



prostep ivip e.V.

ProduktDaten Journal

2026-1



FAST FORWARD

DIGITAL TRANSFORMATION

#FFWDX

Smarte Produkte erfolgreich entwickeln und betreiben

CONTACT ist der führende Anbieter von offener Standardsoftware und Open Source Pionier für den Produktentstehungsprozess und die digitale Transformation. Unsere Produkte helfen, Projekte zu organisieren, Prozesse verlässlich auszuführen und weltweit anhand von virtuellen Produktmodellen und dem Digitalen Zwilling zusammenzuarbeiten. Unsere CONTACT Elements Plattform mit ihrer offenen Technologie ist ideal, um industrielle KI umfassend zu integrieren und IT-Systeme und das Internet der Dinge für durchgängige Geschäftsprozesse zu verbinden.



CONTACT
Software

energizing great minds

contact-software.com

CONTACT Open World 2026

23. & 24. September 2026 | Bonn

Jetzt Ticket sichern!

Inhalt

- 4** Editorial
- 6** prostep ivip Scientific Award
- 8** Kurz notiert

Neue Mitglieder

- 16** ARRK Engineering; CAIQ, Keysight; qwitto; Royal Philips; Uncountable Inc.; Share PLM GmbH; Lehrstuhl für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der Universität Stuttgart

Start-Ups

- 24** Circulonix; Share PLM GmbH; Connectorprise

Symposium

- 28** Symposium 2026 Rückblick

Scientific Award Gewinner

- 38** Scientific Award Gewinner 2026 in der Kategorie Masterarbeit: Integrated Data Management for Multidisciplinary System Development – Framework Conception and Practical Application
- 52** Scientific Award Gewinner Dissertation 2026: Systems Engineering Frameworks for AI-Integrated Autonomy – A Synthesis of Research in Virtual Product Creation

Projekte

- 62** Live Collaboration in Engineering (LCE): Die Evolution der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Engineering
- 68** Den Digital Thread mithilfe von Standards zusammenführen

Fachthemen

- 74** Cloud-native DevOps im Automotive Engineering: Wie Cloud-Infrastrukturen und Security-by-Design die SDV-Entwicklung transformieren
- 80** R&D Reinvention mit KI: Warum Produktdaten, Kontext und die zugrundeliegende Entwicklungslogik entscheidend sind

- 88** Mensch-KI-Dialog im Zentrum von MBSE: Ein KI-Begleiter für Systems Engineering

- 96** Knowledge B-Rep Graph: Enabling Collaborative Digital Engineering with STEP and Knowledge Graphs in the Age of Software-Centric Product Development

- 120** Twin Transformation: Der Digitale Produktpass als Enabler für Digitalisierung und Nachhaltigkeit

- 128** Wie VDA Band 2 und VDA 231-301 den Weg von Dokumenten-basierten Freigaben hin zu digital steuerbaren Nachweisprozessen eröffnen – Agentische KI im risikobasierten Nachweisprozess

- 136** Die Antwort ist nicht „KI“

Wissenschaft & Forschung

- 142** Von der Strategie zur Implementierung – ein rollenspezifisches Weiterbildungsprogramm zu digitalen Zwillingen

- 150** Data-Driven Rotor Design – Entscheidungsunterstützung für die multidisziplinäre Auslegung von Rotoren elektrischer Maschinen

- 154** Termine

- 155** Web-Seminare, Podcasts und Videos

- 156** Die Wissensplattform für digitale industrielle Exzellenz

- 157** Ihre Vorteile als Mitglied bei prostep ivip

- 158** Anzeigen schalten im ProduktDaten Journal

- 160** Hinweise für Autoren

- 161** Kontakt

- 162** Impressum



Künstliche Intelligenz in der Produktentwicklung: Systematisch vom Potenzial zur industriellen Praxis

Zwischen Aufbruch und Realität

Die Diskussion um Künstliche Intelligenz hat in den vergangenen Jahren erheblich an Dynamik gewonnen. Was lange als Zukunftsversprechen galt, ist heute in vielen Bereichen industrieller Wertschöpfung angekommen, wenn auch oft noch in Form vieler nur bedingt verbundener Einzelinitiativen. Auch in der Produktentwicklung existieren überzeugende Anwendungen – etwa bei der Auswertung komplexer Testdaten oder im Anforderungsmanagement. Gleichzeitig zeigt sich ein differenziertes Bild: Während einzelne Initiativen beachtliche Fortschritte erzielen, bleibt die systematische Nutzung von KI in der Breite bislang die Ausnahme. Auch das „Finden“ des richtigen Wegs bleibt dabei schwierig – das umfasst das Verständnis von „was ist zweckmäßig“ ebenso wie der Blick auf die Umsetzung einzelner Tools oder deren operative Nutzung.

Damit rückt eine zentrale Frage in den Fokus: Wie lassen sich die vorhandenen Potenziale in eine skalierbare industrielle Praxis überführen? Anders als beim klassischen Prozessmanagement kommt hier neben dem „Use Case“ oder Prozessschritt die Frage der Daten hinzu und die der besten Modelle.

Die Notwendigkeit ergibt sich aus der Realität der Produktentwicklung. Produkte sind heute hochkomplexe, vernetzte Systeme, deren Entwicklung durch steigende Variantenvielfalt, kürzere Innovationszyklen und wachsende und oft wenig oder immer weniger strukturierte Datenmengen geprägt ist. Klassische ingenieurwissenschaftliche Methoden bleiben unverzichtbar, stoßen jedoch zunehmend an Grenzen. Künstliche Intelligenz kann hier als Unterstützung und Erweiterung wirken – indem sie große Datenräume erschließt und fundiertere Entscheidungen ermöglicht. Zugleich ist die Frage, wie viel strukturierte Datenbasis es doch noch braucht, schwer zu beantworten, auch die Hoffnung auf „keine“ ist wahrscheinlich unbegründet.

Vom Anwendungsfall zur Systematik

Entlang des Produktentstehungsprozesses bieten sich zahlreiche Ansatzpunkte für den Einsatz von KI – von der Konzeptphase, dem generativen Design über Simulation und Absicherung bis hin zur Rückführung von Felddaten. Dennoch bleibt der industrielle Durchbruch bislang aus. Der Grund liegt selten in den Modellen selbst, sondern vielmehr in ihrer Einbettung: KI wird häufig in isolierten Anwendungsfällen erprobt, echte Wirksamkeit skaliert aber über eine bessere Integration in Prozesse, Daten(modelle) und die Organisation selbst. Das ist zwar auch gut, weil Fortschritte entstehen, zugleich aber ist es auch etwas durch Zufall und Einzelinitiativen getrieben.

Die entscheidende Aufgabe besteht daher darin, KI als integralen Bestandteil der Produktentwicklung zu etablieren. Dies erfordert durchgängige Prozesse, konsistente und vernetzte Daten sowie eine enge Verzahnung mit bestehenden Entwicklungsumgebungen. Ebenso notwendig sind Organisationsformen, die die Zusammenarbeit von Ingenieurwissenschaften und Data Science systematisch fördern.

Gemeinsame Verantwortung von Industrie und Forschung

Vor diesem Hintergrund ist mein Engagement innerhalb prostep ivips für mich weit mehr als ein organisatorischer Schritt – es ist eine Überzeugungsentscheidung. Der prostep ivip Verein bietet ein Forum und eine Community, um industrieübergreifend an durchgängigen Lösungen für die digitale Produktentstehung zu arbeiten. Bereits als Doktorand und später in meiner Zeit in der Industrie war ich bei den Symposien, und ich freue mich sehr, das jetzt wieder intensivieren zu können.

Dabei wird es spannend sein, wie „wir in der akademischen Forschung“ dabei helfen können, den Blick nach vorne zu richten. In einzelnen Initiativen kann und muss die industrielle Anwendung oft sehr schnell sein, eine systematische Bebauung in der Breite mit langfristig nachhaltiger Wirkung kann aber oft von der Zusammenarbeit aus Industrie und Forschung profitieren. Darauf möchte ich gern hinwirken. Hier kann Forschung einen entscheidenden Beitrag leisten, indem sie die Grundlage für robuste, industrietaugliche Ansätze schafft.

Am Ende wird sich der Umgang mit KI in der Produktentwicklung weniger als optionaler Wettbewerbsvorteil, sondern vielmehr als grundlegende Fähigkeit erweisen. Entscheidend ist nicht, ob Unternehmen KI einsetzen, sondern wie konsequent und systematisch sie dies tun. Die Voraussetzungen dafür müssen wir heute gemeinsam schaffen.

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer, Ingénieur ECP

Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Mitglied des prostep ivip Vorstands

prostep ivip
Scientific Award -
für Ingenieur:innen
mit Schwerpunkt
virtuelle Produktentstehung

**SCI
EN
TIF
IC**

AWARD
prostep ivip

Scientific Award

7

Sie sind (angehende/r) Ingenieur*in und beschäftigen sich in Ihrer Master- oder Doktorarbeit mit der virtuellen Produktentstehung? Sie möchten Ihre Ideen Vertretern führender Hersteller und IT-Unternehmen vorstellen?

Dann nutzen Sie jetzt Ihre Chance!

Der prostep ivip Verein fördert PLM-Köpfe von morgen mit 1.000 Euro (Masterarbeit) oder 4.000 Euro (Doktorarbeit) mit der Verleihung des prostep ivip Scientific Award!

Wer kann sich für die Auszeichnung bewerben?

Jeder Interessent, der seine Master- oder Doktorarbeit bis zum 31. Januar 2027 an einer Universität zu einem Thema der virtuellen Produktentstehung eingereicht hat.

Zur Einreichung sind Arbeiten in deutscher oder englischer Sprache zugelassen, sofern sie nicht unter die Bedingungen der Geheimhaltung fallen. Bitte stellen Sie die benotete Arbeit und das dazugehörige Gutachten des betreuenden Professors zur Verfügung.

Die Jury des prostep ivip Scientific Award entscheidet, welche Einreichungen mit dem Scientific Award geehrt wird. Zum Kreis der Entscheider gehören Dr. Henrik Weimer (AIRBUS), Prof. Dr. Matthias Kreimeyer (Universität Stuttgart), Thomas Kamla (Volkswagen), Tomohiko Adachi (Mazda Motor Corporation), Jens Poggenburg (AVL | Vorstandssprecher) sowie Philipp Wibbing (UNITY).

Neben dem Preisgeld (1.000 € Masterarbeit bzw. 4.000 € Doktor-Arbeit) bieten wir dem/der Gewinner/in im Bereich Doktorarbeit die Möglichkeit, selbst Teil des prostep ivip Symposiums zu werden und im Bereich des „Scientific Tracks“ über die Ergebnisse der Doktorarbeit zu berichten. Eine einmalige Chance, einen bleibenden Eindruck beim fachkundigen Publikum und somit potenziellen künftigen Arbeitgebern zu hinterlassen!

Einsendeschluss zur Bewerbung um den Scientific Award 2027 ist der 31. Januar 2027!

Senden Sie Ihre benotete Arbeit und das dazugehörige Gutachten an:

Dr. Alain Pfouga, Geschäftsführer prostep ivip Verein
alain.pfouga@prostep.org

sowie

Nora Tazir, Technical Program Manager prostep ivip Verein
nora.tazir@prostep.org.



Kontakt

Nora Tazir
Technical Program Manager
nora.tazir@prostep.org



Kontakt

Dr. Alain Pfouga
General Manager
alain.pfouga@prostep.org

Neues Vorstandsteam der prostep ivip Association gewählt

Im Rahmen der Mitgliedervollversammlung des prostep ivip e.V. im Kap Europa in Frankfurt/Main am 13. April 2026 – dem Vorabend des diesjährigen Symposiums – fand die turnusgemäße Wahl des Vorstands statt. Die Versammlung markierte zugleich einen bedeutenden personellen Wechsel in der Vereinsführung.



Von Links nach rechts:
Philipp Wibbing (Unity AG), Vorstandssprecher Jens Poggenburg (AVL), Tomohiko Adachi (Mazda Motor Corporation), Thomas Kamla (Volkswagen AG), Prof. Dr. Matthias Kreimeyer (Universität Stuttgart). Nicht im Bild: Dr. Henrik Weimer (AIRBUS)

Stabübergabe in der Mitgliedergruppe Forschung und Universitäten

Nach 14 Jahren engagierter Vorstandstätigkeit für die Mitgliedergruppe 3 (Forschung und Universitäten) übergab Prof. Dr. Rainer Stark (TU Berlin) sein Amt an seinen Nachfolger Prof. Dr. Matthias Kreimeyer von der Universität Stuttgart. Die prostep ivip Association dankt Prof. Dr. Stark herzlich für sein langjähriges Wirken, seine wissenschaftliche Expertise und seinen unschätzbaren Beitrag zur Weiterentwicklung der Gemeinschaft. Wir freuen uns sehr, Prof. Dr. Matthias Kreimeyer in unserem Vorstandsteam willkommen zu heißen, und sind überzeugt, dass seine wissenschaftliche Expertise und sein industrieller Erfahrungsschatz eine große Bereicherung für die Association sein werden. Wir wünschen ihm für seine neue Aufgabe alles Gute und freuen uns auf eine ebenso produktive wie wegweisende Zusammenarbeit.

Bewährtes Führungsteam im Amt bestätigt

Das übrige Vorstandsteam wurde in seinen Ämtern bestätigt und wird die Association in der Periode 2026–2028 führen. Dem Vorstand gehören an: Jens Poggenburg (AVL) als Vorstandssprecher, Thomas Kamla (Volkswagen AG), Dr. Henrik Weimer (AIRBUS), Philipp Wibbing (Unity AG), Tomohiko Adachi (Mazda Motor Corporation) sowie neu an Bord Prof. Dr. Matthias Kreimeyer (Universität Stuttgart). Der Vorstand wird die Association mit Tatkraft und ausgewiesener Fachkompetenz in die Zukunft führen.

Strategische Schwerpunkte 2026-2028

Für die kommende Amtsperiode hat der Vorstand klare inhaltliche Prioritäten gesetzt: Im Fokus stehen der Ausbau der Mitgliedschaft in den Bereichen MedTech und Defense sowie die Intensivierung der Verbandsarbeit rund um das Thema Künstliche Intelligenz – Felder, die für die Zukunft des Systems Engineering von zentraler Bedeutung sind.

Projekt HARMONIQ gestartet!

Flexible, automatisierte und vernetzte Produktionssysteme ermöglichen – darum geht es in unserem neuen Forschungsprojekt „HARMONIQ – Harmonising equipment behaviour representation enabling digital twins of production systems“.

Das Forschungsprojekt, das im Rahmen des WIPANO-Programms vom BMW gefördert wird, startete am 01.11.25.

Gemeinsam mit den Projektpartnern CAIQ GmbH, dem Institut für Produktionssysteme der TU Dortmund und der RIF Engineering & Consulting GmbH (Konsortialführung) arbeiten wir daran, zu einer vollständigen und standardisierten Beschreibung von Produktionsanlagen und deren Komponenten beizutragen, indem insbesondere das Verhalten sowie die Zustandsinformationen der Assets einer Anlage betrachtet werden. Dies stellt die Basis für eine ganzheitliche Erfassung der anfallenden Daten in Produktionssystemen, die Echtzeitsteuerung von Produktionsprozessen sowie deren flexibler Anpassungsfähigkeit dar.

Neben der Weiterentwicklung und Harmonisierung entsprechender Standards, wie beispielsweise Equipment Behaviour Catalogue (EBC) oder Asset Administration Shell (AAS), wird vor allem die Überführung dieser Standards in die industrielle Praxis zentraler Bestandteil von HARMONIQ sein. Im Fokus stehen dabei die Erfassung, Priorisierung und Analyse industrieller Use Cases, um die Standardisierung konsequent an den Bedarfen aus der Praxis auszurichten.

Begleitend wird dazu ein Projekt im Rahmen unseres Technischen Programmes angestoßen – alle Mitglieder des prostep ivip Vereins sind schon jetzt ganz herzlich eingeladen, sich zu beteiligen, eigene Anwendungsfälle einzubringen, gemeinsam interoperable Standards für die Produktion voranzutreiben und sich auf neutralem und vorwettbewerblichen Grund über Herausforderungen bei der Planung und dem Betrieb digitalisierter Produktionssysteme auszutauschen.

**Wir freuen uns auf Ihre wertvollen Ideen und Anregungen!
Sie möchten mitmachen oder einfach mehr erfahren?
Wenden Sie sich gern an Rachel Bauer!**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Kontakt**

Rachel Bauer
Research & Innovation Manager
rachel.bauer@prostep.org

Die prostep ivip Mediathek: Ein Wissensschatz rund um die digitale Transformation

Wissen, das bewegt – und das direkt zum Download bereitsteht: Die Mediathek von prostep ivip ist eine der umfangreichsten Sammlungen praxisnaher Arbeitsergebnisse, Studien und Fachpublikationen rund um die Themen der digitalen Transformation, Interoperabilität und des modellbasierten Engineerings. Viele Inhalte stehen auch Nicht-Mitgliedern offen – doch den vollen Umfang der Mediathek mit sämtlichen Dokumenten und exklusiven Studien erschließen sich ausschließlich Mitglieder von prostep ivip. Nach einmaliger Registrierung bzw. Log-in steht Ihnen das gesamte Spektrum unserer Verbandsarbeit zur Verfügung.

Jetzt registrieren: [🔗 prostep ivip: Mitgliederlogin](#)

Was Sie erwartet

Die Mediathek bündelt die Arbeitsergebnisse unserer über 25 aktiven Projektgruppen – von FAICE über LOTAR, CDT und HAIVISH bis hin zu CASCARA. Diese Dokumente sind das Rückgrat unserer Verbandsarbeit: methodisch fundiert, industrienah und unmittelbar nutzbar.

Einen Überblick über alle Projektgruppen und deren Themenfelder finden Sie hier: [🔗 prostep ivip: Projekte](#)

Persönlicher Austausch erwünscht

Sie möchten tiefer in bestimmte Projekthinhalte einsteigen oder suchen den fachlichen Dialog? Unsere Technische Programmmanagerin Nora Tazir steht Ihnen gerne zur Verfügung: nora.tazir@prostep.org

Bei Fragen rund um den Zugang zur Mediathek, die Registrierung oder den Log-in wenden Sie sich bitte an: fabienne.kreusch@prostep.org

Nutzen Sie die Vielfalt unserer Mediathek – sie ist Ihr direkter Zugang zum kollektiven Wissen der prostep ivip Community.



Kontakt

Nora Tazir
Technical Program Manager prostep ivip
nora.tazir@prostep.com

Jetzt schon vormerken

Zwei Highlights im Veranstaltungskalender von prostep ivip – beide kostenfrei, beide mit hochkarätigen Inhalten, und beide mit separaten Anzeigen in dieser Ausgabe des ProductData Journals vertreten. Hier ein erster Überblick:

Engineering Interoperability Day 2026

1. Oktober 2026 | NH Frankfurt Airport West, Raunheim | Eintritt frei

Erstmals kommen mit dem STEP AP242 Day und dem JT Day zwei etablierte Communities unter einem gemeinsamen Dach zusammen – zum Engineering Interoperability Day 2026. Das Ergebnis: ein fokussiertes, eintägiges Format, das Expertinnen und Experten aus Engineering, IT und Produktion eine gemeinsame Plattform für den Austausch rund um Standards, Datenmodelle und durchgängige Engineering-Prozesse bietet.



ENGINEERING
INTEROPERABILITY
DAY2026
JT & STEP FOR DIGITAL CONTINUITY

ENGINEERING INTEROPERABILITY DAY 2026

JT & STEP FOR DIGITAL CONTINUITY



1 October 2026
09:30 - 17:30



NH Frankfurt Airport West
Kelsterbacher Straße 19
65479 Raunheim

Where STEP and JT Communities Unite

For the first time, the STEP AP242 Day and the JT Day merge into one powerful event. The Engineering Interoperability Day brings together engineers, IT professionals, decision-makers and solution providers to drive industrial interoperability forward – in a single, focused and free-of-charge format built for real exchange and lasting impact.

The Engineering Interoperability Day is part of a full week of international expert meetings – making it the ideal opportunity to connect, collaborate and stay ahead in your field:

Sept 28–30

LOTAR & MBx Interoperability Forum

Oct 1

Engineering Interoperability Day

Oct 2

JT Workflow & Implementor Forum

Topics that move the industry:

From long-term data archiving to smart manufacturing – the 2026 programme covers the full spectrum of engineering data challenges. Expect in-depth sessions, real-world use cases and direct exchange with international experts on:

- Data Exchange & Long-Term Archiving (LOTAR)
- Smart Manufacturing Data
- Material Properties incl. Composites
- Product Data Traceability
- End-to-End Product Lifecycle Processes
- Classified Information Handling

Interested? Find out more at prostep.org



Questions? Contact:

Jochen Boy

Tel.: +49 6151 9287 382

E-Mail: jochen.boy@prostep.com



**Secure your spot – admission is free,
registration is required.**

Register here!

Im Mittelpunkt stehen Themen wie Datenaustausch und Langzeitarchivierung (LOTAR), Smart Manufacturing Data, Materialeigenschaften, Rückverfolgbarkeit von Produktdaten sowie End-to-End-Prozesse im Produktlebenszyklus. Ergänzt wird der Veranstaltungstag durch intensive Networking-Möglichkeiten mit internationalen Fachleuten.

Der Engineering Interoperability Day ist zudem Teil einer ganzen Woche von Fachtreffen (28. September – 2. Oktober), die LOTAR & MBx Interoperability Forum, JT Workflow Forum und JT Implementor Forum umfasst – maximaler Wissenstransfer bei minimalem Reiseaufwand.

Alle Informationen und Anmeldung:

[🔗 prostep ivip: Engineering Interoperability Day](#)



SYSTEMS
ENGINEERING
SUMMIT

2026

Tokyo Systems Engineering Summit 2026

27. November 2026 | Marunouchi Hall & Conference, Tokyo | Eintritt frei

Globales Engineering trifft japanische Präzision: Der Tokyo Systems Engineering Summit bringt Praktikerinnen und Praktiker aus Japan und Europa zusammen, die modellbasiertes, softwaredefiniertes Engineering täglich in realen Projekten leben – branchenübergreifend, aus zwei Perspektiven, in einem Format, das echten Tiefgang ermöglicht.

Auf dem Programm stehen Fachvorträge aus Aerospace, Automotive, Shipbuilding und Medical Technology, ergänzt durch wissenschaftliche Beiträge und Praxisberichte zur digitalen Transformation. Alle Vorträge werden simultan Englisch $\leftrightarrow$ Japanisch übersetzt.

Jetzt vormerken – weitere Details folgen in Kürze.

Sichtbarkeit dort, wo sie wirkt

Der Tokyo Systems Engineering Summit gehört zu den internationalen Foren, die ein hochkarätiges, branchenübergreifendes Publikum aus Japan und Europa an einem Ort zusammenbringen. Für Technologieanbieter und Lösungspartner bietet sich damit eine gute Gelegenheit, mit Entscheidungsträgern und Fachexperten in einem Umfeld ins Gespräch zu kommen, das echten Austausch ermöglicht.

prostep ivip Mitgliedern, die diese Plattform nutzen möchten, stellen wir Ausstellungsflächen sowie Premium-Partnerschaftspakete zur Verfügung. Als Aussteller präsentieren Sie Ihre Lösungen in unmittelbarer Nähe zum Konferenzgeschehen – nicht am Rand der Veranstaltung. Als Premium-Partner ist Ihre Marke über alle Kommunikationskanäle des Summits hinweg sichtbar, von der Event-Website über Printmaterialien bis zur Berichterstattung vor und nach der Veranstaltung.

Bei Interesse an Ausstellungs- oder Partnerschaftsmöglichkeiten freuen wir uns auf Ihre Kontaktaufnahme:



Kontakt

Fabienne Kreusch
Public Relations & Event Manager prostep ivip
fabienne.kreusch@prostep.org

[🔗 Fabienne Kreusch | \[fabienne.kreusch@prostep.org\]\(mailto:fabienne.kreusch@prostep.org\) | +49 151 20 52 86 79](#)
[🔗 prostep ivip: Tokyo Systems Engineering Summit 2026](#)



SYSTEMS
ENGINEERING
SUMMIT

2026



27 NOVEMBER 2026
MARUNOUCHI HALL

**SOFTWARE-DEFINED.
MODEL-BASED.
ACROSS INDUSTRIES.**

**INNOVATING GLOBAL SOLUTIONS
FOR A CONNECTED WORLD**

Join the premier networking event that brings together 150+ engineering professionals from Japan, Korea, and Europe. Building on the remarkable success of previous years, the Tokyo Systems Engineering Summit has established itself as the essential platform for intercultural exchange and knowledge transfer.

- › GLOBAL KNOWLEDGE EXCHANGE
- › INTENSIVE NETWORKING OPPORTUNITIES
- › BARRIER-FREE COMMUNICATION
- › FUTURE-READY TECHNOLOGIES
- › ZERO COST, MAXIMUM VALUE



REGISTER NOW
www.prostep.org

WITH SUPPORT OF OUR
PREMIUM PARTNER





Call for Contributions - prostep ivip Symposium 2027

14. & 15. April 2027 | Düsseldorf

Jetzt schon vormerken: Das prostep ivip Symposium 2027 findet am 14. und 15. April in Düsseldorf statt. Wer aktiv dabei sein möchte, sollte die folgenden Termine bereits heute im Kalender markieren.

Die wichtigsten Daten auf einen Blick

Mitte September 2026 – Start des Call for Contributions

Einreichungen sind ab Mitte September möglich. Nutzen Sie die Gelegenheit frühzeitig – erfahrungsgemäß übersteigt die Zahl der Einreichungen die verfügbaren Programmplätze deutlich. Das Programmkomitee bewertet alle Beiträge sorgfältig; nur die qualitativ überzeugendsten Einreichungen finden Eingang ins Programm.

Mitte Oktober 2026 – Ausstellungsflächen verfügbar

Ab Mitte Oktober stehen Einzel- und Doppelstandflächen zum Erwerb bereit. Ausführliche Informationen hierzu finden Sie ab Ende August auf www.symposium.de.

Wichtige Hinweise zur Einreichung

IT-Unternehmen und Beratungen können Beiträge ausschließlich gemeinsam mit einem Anwenderunternehmen einreichen. Bitte beachten Sie: Der Anwender muss bei der Einreichung von Beginn an benannt sein – nachträgliche Ergänzungen werden nicht akzeptiert.

Anwenderunternehmen können Beiträge eigenständig und ohne Partnerunternehmen einreichen.

Qualität entscheidet: Aufgrund der hohen Nachfrage und der begrenzten Programmplätze empfehlen wir, besonderes Augenmerk auf die inhaltliche Qualität des Beitrags sowie auf die Wahl des anwendenden Partners zu legen. Nur so maximieren Sie Ihre Chancen auf eine Programmaufnahme.

Alle weiteren Informationen sowie aktuelle Updates finden Sie rechtzeitig auf:

www.symposium.de

Wir freuen uns auf Ihre Einreichungen und ein Symposium, das erneut Maßstäbe setzt.

Sie haben Fragen rund um das Symposium?

[Fabienne Kreusch](mailto:fabienne.kreusch@prostep.org) | fabienne.kreusch@prostep.org | +49 151 20528679



Kontakt

Fabienne Kreusch
Public Relations & Event Manager prostep ivip
fabienne.kreusch@prostep.org

Willkommen zurück, Sabrina!

Eine geschätzte Kollegin kehrt zurück: Sabrina Reis, unsere erfahrene Ansprechpartnerin rund um Mitgliedschaft und Projektcontrolling, bereichert das Team von prostep ivip nach ihrer Elternzeit wieder mit ihrer Fachkompetenz und ihrem fundierten Wissen. Wir freuen uns sehr, sie wieder an Bord zu haben!



Kontakt

Sabrina Reis
Member Relations & Project Controls
Manager
sabrina.reis@prostep.org
+49 6151 9287-312

Buchempfehlung: Neuerscheinung von prostep ivip Ehrenmitglied Dr. Steven Vettermann

Von Interoperabilität zu Entscheidungsfähigkeit

Der prostep ivip Verein beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Frage, wie Zusammenarbeit über Unternehmens-, System- und Domänengrenzen hinweg verbessert werden kann.

Mit zunehmender Digitalisierung, Software-Defined Products und Künstlicher Intelligenz rückt dabei eine weitere Fragestellung in den Vordergrund: Wie treffen Organisationen gute Entscheidungen, wenn Komplexität zunimmt und Unsicherheit nicht mehr vollständig reduziert werden kann?

Mit dieser Fragestellung beschäftigt sich das Buch Kursänderung - Leadership zwischen Transformationsdruck und Orientierung.

Auf Basis von Erfahrungen aus industrieller Transformation, Systems Engineering und Organisationsentwicklung beleuchtet es die Bedeutung von Orientierung, Lernfähigkeit und verantwortlichem Handeln unter Unsicherheit - insbesondere dort, wo Entscheidungen getroffen werden müssen, bevor alle Informationen vorliegen.

Die Erstveröffentlichung erfolgt am 24. Juni 2026 zunächst in deutscher Sprache.

Bibliografische Informationen:

Steven Vettermann

Kursänderung - Leadership zwischen Transformationsdruck und Orientierung
ISBN: 978-3-384-92093-5



ARRK Engineering

ARRK Engineering ist ein globaler Entwicklungspartner für die Automobil- und Mobilitätsindustrie sowie für sektorübergreifende, innovative Produktentwicklung. Wir unterstützen unsere Kunden von der ersten Idee bis zur Serienreife und realisieren komplexe Technologien in den Bereichen E-Mobilität, autonomes Fahren, Software- und Systementwicklung, AI-gestützte Methoden und digital integrierte End-to-End-Engineeringprozesse.

Mit unserem Bereich Digitalisierung & Software treiben wir die Transformation hin zu software-definierten Produkten, modellbasierten Entwicklungsprozessen und AI-basierten Engineering-Lösungen voran; mit Fokus auf Skalierbarkeit, Datenqualität, Cybersecurity und ganzheitliche Systemarchitekturen.

Die Expertise unserer rund 1.600 Mitarbeitenden an internationalen Standorten sowie die Stärke unseres Shareholders Mitsui Chemicals bilden das Fundament für Qualität, Innovationskraft und nachhaltige Kundenzufriedenheit.

Mit unserer Mitgliedschaft bei prostep ivip gestalten wir Standards der digitalen Produktentwicklung aktiv mit und vernetzen unseren Entwicklungs- und Digitalisierungsansatz mit dem internationalen Engineering-Ökosystem des Vereins.



Petrus Petrus
Director Digitalization & Software
petrus.petrus@arrk-engineering.com

Kontakt



CAIQ

Die CAIQ ist ein renommierter Anbieter von Software und Dienstleistungen für Engineering-Prozesse. Als Mittelstandsunternehmen (KMU) mit Hauptsitz in München entwickeln wir Standardsoftwarelösungen basierend auf einer offenen und innovativen Komponentenarchitektur.

Unsere Kunden schätzen uns als vertrauenswürdigen Berater und zuverlässigen Integrator von IT-Systemen im Produktentwicklungsprozess, da wir standardisierte Softwarelösungen auf Basis der CONTACT Elements Platform entwickeln. So unterstützen wir Unternehmen weltweit bei der Optimierung von Prozessketten im Produktlebenszyklus in vielen industriellen Applikationen.

Unser Angebot umfasst Softwarelösungen für Simulationsprozess- und Datenmanagement für CAE, Datenaustausch sowie Unternehmens- und Lieferantenintegration. CAIQ Produkte erleichtern die technische Zusammenarbeit für Produktdatenmanagement und ermöglichen ein Technologiedatenmanagement für Funktions- und Parameterdaten.

Das Leistungsportfolio im Virtual Engineering bedienen wir mit umfassender Expertise in führenden Solver-Technologien und intelligenten Automatisierungskonzepten. Dadurch beschleunigen wir die Entwicklungsprozesse, reduzieren Kosten und sichern höchste Qualitätsstandards – noch bevor der erste Prototyp entsteht. Unsere Kernkompetenz basiert auf innovativen Engineering und methodischen Weiterentwicklungen im Bereich der funktionalen Absicherung mit einem hohen Qualitätsanspruch.

Mit über 160 Mitarbeitern an 5 Standorten in Deutschland, Polen und Rumänien ist CAIQ ein gut aufgestelltes Unternehmen (KMU), um innovative Lösungen für den Mittelstand sowie Konzernunternehmen anzubieten. CAIQ ist stolz auf viele zufriedene Kunden in über 10 unterschiedlichen Branchen.

Waldemar Stein
Senior Marketing Manager
online@caiq.eu



Kontakt



Keysight

Bei Keysight (NYSE: KEYS) inspirieren und befähigen wir Innovatoren, Technologien zu entwickeln, die die Welt verändern.

Als Unternehmen des S&P 500 bieten wir marktführende Design-, Emulations- und Testlösungen. Damit können Ingenieure während des gesamten Produktlebenszyklus schneller und mit weniger Risiko entwickeln und implementieren.

Als globaler Innovationspartner unterstützen wir Kunden aus den Bereichen Kommunikation, industrielle Automatisierung, Luft- und Raumfahrt, Verteidigung, Automobilindustrie, Halbleiter und allgemeine Elektronik dabei, Innovationen voranzutreiben, um die Welt zu verbinden und zu sichern.

Weitere Informationen finden Sie unter www.keysight.com.



Manuela Joseph
Sr. Marketing Specialist
Design Engineering Software
manuela.joseph@keysight.com

Kontakt



qwitto

qwitto unterstützt bei der Einführung von MBSE, von der initialen Einrichtung bis hin zum qualifizierten Betrieb. Wir bieten ein breites Spektrum an Dienstleistungen an, einschließlich unseres DevOps-Tools für MBSE: qAnalytics.

Für unsere langjährigen Partner realisieren wir individuelle Tool-Anpassungen, Tool-Integrationen sowie Digital Threads, einschließlich nahtloser Datenworkflows. Diese Verbesserungen sorgen für optimierte Prozesse, signifikante Reduzierung von Fehlern und beschleunigen das Digital Engineering erheblich.

Mit unserem Tool qAnalytics bieten wir eine DevOps-Umgebung für MBSE. qAnalytics bietet ereignisgesteuerte, konfigurierbare und nachvollziehbare Pipelines für MBSE. Dies ermöglicht ein kontinuierliches Qualitätsfeedback und beschleunigt den Systems-Engineering-Workflow. In qAnalytics werden so (automatisierte) Validierungen, die Überwachung von Lifecycle-Zuständen, Trendanalysen, Dashboarding, Änderungsverfolgung sowie schlanke Review-Prozesse einfach möglich.

Dr. Sebastian Voss
Managing Director
sebastian.voss@qwitto.com
www.qwitto.com



Kontakt



Royal Philips

Royal Philips ist ein weltweit führendes Unternehmen im Bereich der Gesundheitstechnologie. Das Unternehmen konzentriert sich darauf, die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen zu verbessern und über das gesamte Gesundheitsspektrum hinweg bessere Ergebnisse zu ermöglichen - von einer gesunden Lebensweise und Prävention bis hin zu Diagnose, Behandlung und häuslicher Pflege.

Philips nutzt fortschrittliche Technologien sowie fundierte klinische und verbraucherbezogene Erkenntnisse, um integrierte Lösungen anzubieten. Das Unternehmen mit Hauptsitz in den Niederlanden ist führend in den Bereichen diagnostische Bildgebung, bildgestützte Therapie, Patientenüberwachung und Gesundheitsinformatik sowie im Bereich Verbrauchergesundheit und häusliche Pflege.

Philips erzielte im Jahr 2025 einen Umsatz von 17,8 Milliarden Euro und beschäftigt rund 65.000 Mitarbeiter, die in mehr als 70 Ländern für Vertrieb und Service zuständig sind.



Arinc Bayazit
Senior Systems Engineer
arinc.bayazit@philips.com



Luc Castermans
MBSE Product Owner
luc.castermans@philips.com

Kontakt



Uncountable Inc.

Uncountable Inc. stellt eine KI-gestützte Plattform für das Produktlebenszyklusmanagement (PLM) bereit, die Rezepturen, Stücklisten, Testdaten, Prozessparameter und Dokumentationen in einem einzigen durchsuchbaren Aufzeichnungssystem zentralisiert. Diese bietet vollständige Transparenz über den gesamten Lebenszyklus hinweg – vom Konzept über die Skalierung bis hin zur Fertigung. Dadurch werden Forschung und Entwicklung, Qualität und Betrieb aufeinander abgestimmt, um Rückverfolgbarkeit und schnellere Innovationen zu ermöglichen.

Zu den geschätzten Kunden zählen unter anderem Dow, DuPont, Sika, TotalEnergies, Repsol, Clariant, Mondelez und Beiersdorf sowie mehr als 150 weitere Unternehmen.

Tea Pavlek
Director
Global Technical Marketing and Events
tea@uncountable.com



Kontakt



Share PLM GmbH

Erfolgreicher Wandel beginnt beim Menschen, nicht bei der Technologie. Gegründet 2026, begleiten wir Organisationen durch komplexe digitale Transformationsprojekte – und decken dabei das gesamte OCM ab, von der Strategie bis zur Umsetzung.

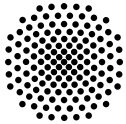
Unser Transformation Management Framework bringt Menschen, Prozesse und Technologie in Einklang, um nachhaltige Akzeptanz und echten Mehrwert zu schaffen. Mit unserer Expertise in Engineering, Psychologie und Design Thinking bieten wir maßgeschneiderte Transformationsbegleitung, die Mitarbeitende stärkt, Prozesse optimiert und Technologie mit Unternehmenszielen verbindet.

Ob bei der Einführung neuer Software oder bei umfassenderen Transformationsvorhaben – wir sorgen dafür, dass Wandel nicht nur möglich, sondern nachhaltig wird.



Thomas Winden
Managing Director
Share PLM GmbH
+49 151 14015769
thomas.winden@shareplm.com
www.shareplm.de
www.linkedin.com/in/thomas-winden

Kontakt

**Universität Stuttgart**

Lehrstuhl für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der Universität Stuttgart

Unser Forschungsschwerpunkt ist die systematische Erforschung und Entwicklung der Gestaltung komplexer technischer Systeme. Im Fokus stehen Modelle, Methoden und Werkzeuge für effiziente, IT-gestützte Entwicklungsprozesse. Unsere Forschungs- und Projektergebnisse sind integraler Bestandteil von Lehre, Doktorandenausbildung und Wissenstransfer in interdisziplinären Industriekooperationen.

Ein besonderer Schwerpunkt unserer Arbeit liegt aktuell auf der Gestaltung (modularer) Systemarchitekturen und deren Wechselbeziehung zur Gestaltung von IT Systemen. Künstliche Intelligenz ist darin ein wichtiger Aspekt, aber auch die Nachhaltigkeit von Systemen und Komponenten.

In der Lehre ist der Lehrstuhl als Teil des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) im Bachelor im Bereich Konstruktionslehre / Maschinenelemente aktiv, im Master im Bereich Methodik / Systems Engineering / FEM / Getriebebau / Antriebssysteme.

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer
Leiter des Lehrstuhls
für Produktentwicklung und
Konstruktionstechnik
matthias.kreimeyer@iktd.uni-stuttgart.de
www.iktd.uni-stuttgart.de

**Kontakt**

Drei Minuten. Große Bühne. Echte Chance.

Start-up Pitch beim prostep ivip Symposium 2026

Bereits zum vierten Mal in Folge bot das prostep ivip Symposium jungen Unternehmen eine der wertvollsten Plattformen, die der PLM- und Digital-Engineering-Sektor zu bieten hat: den Start-up Pitch – live, vor über 600 Fachbesuchern, potenziellen Investoren, Partnern und Kunden aus genau dem Umfeld, in dem diese Unternehmen wachsen wollen.

Das Prinzip ist so einfach wie wirkungsvoll: Drei Minuten Redezeit, ein laufender Countdown, die große Bühne des Plenarsaals – und ein Publikum, das versteht, worum es geht. Direkt im Anschluss entschieden die anwesenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer per Live-Abstimmung über die Symposiums-App, wer den Pitch für sich gewinnt.

2026 traten drei Jungunternehmen an:

- Circulonix
- Share PLM
- Connecterprise

Alle drei überzeugten mit innovativen Ansätzen aus dem Herzen der digitalen Transformation. Den Sieg holte sich **Lucas Weyrich mit Circulonix** – und nahm neben dem Applaus des Plenarsaals auch eine prostep ivip Vereinsmitgliedschaft sowie ein **Preisgeld von 2.500 Euro** mit nach Hause.

Wir gratulieren herzlich und danken allen drei Teilnehmern für ihren Mut, ihr Engagement und die Bereitschaft, ihr Unternehmen vor diesem außergewöhnlichen Publikum zu präsentieren. Auf den folgenden Seiten stellen wir Circulonix, Share PLM und Connecterprise ausführlich vor – denn jedes dieser Unternehmen verdient Aufmerksamkeit, weit über den Pitch-Moment hinaus.

Ihnen allen wünschen wir weiterhin starke Ideen, kluge Entscheidungen und den langen Atem, den Unternehmertum verlangt.

Sie sind Gründerin oder Gründer im PLM- oder Digital-Transformation-Umfeld?

Dann ist der Start-up Pitch beim prostep ivip Symposium Ihre Chance. Bewerben Sie sich für 2027 – das nächste Symposium findet am **14. und 15. April in Düsseldorf** statt. Bewerbungen sind ab September 2026 möglich, parallel zum Call for Contributions, unter **www.symposium.de**.

Nutzen Sie die Gelegenheit – die Bühne wartet.

Circulonix



1. Der Elevator Pitch

Projektierung und technischer Vertrieb mit KI im Maschinen- und Anlagenbau. Unser KI-System wandelt Kundenanfragen automatisch in individuelle Lösungsangebote um. **Wir helfen Engineer-to-Order-Unternehmen, unstrukturierte historische Projektdaten zu nutzen, um Angebote schneller zu erstellen und langfristig flexiblere, modularere Produktstrukturen aufzubauen.**

2. Der „Why Now?“ Moment

Engineer-to-Order-Unternehmen stehen unter Druck, auf komplexe Kundenanfragen zu reagieren. Erfahrene Experten kennen vergangene Projekte und realisierbare Lösungen. Wenn sie das Unternehmen verlassen, geht Wissen verloren. Klassische Automatisierung basiert auf starren Konfiguratoren, Regeln und strukturierten Produktdaten, was bei kundenindividuellen Systemen oft nicht möglich ist. Das KI-System von Circulonix kann bestehende unstrukturierte Dokumente, CAD-Modelle und Stücklisten nutzen, um Entwicklungswissen zu erfassen und flexible Automatisierung im technischen Vertrieb zu ermöglichen.

3. Mehrwert für die Industrie

Industrieunternehmen erhalten hunderte Kundenanfragen, von kleinen Anpassungen an komplexen Maschinen bis hin zu maßgeschneiderten Linien oder individuellen Lösungen. Heute arbeiten die Projektierung und der technische Vertrieb häufig manuell mit Word, Excel und Projektordnern. Für jede Kundenanfrage erstellen sie Angebote vollständig aufs Neue, obwohl ähnliche Lösungen bereits zuvor entwickelt wurden. Circulonix reduziert die benötigte Zeit zur Erstellung von Lösungsangeboten, macht Expertenwissen für das Team zugänglich und hilft Unternehmen, bestehende Module zu neuen Lösungen zu kombinieren. Dadurch entsteht langfristig eine modulare und flexible Produktstruktur.

4. Die Technologie dahinter

Klassische Produktkonfiguratoren benötigen strukturierte Produktdaten und starre Konfigurationslogik, um Mehrwert zu schaffen. Einfache LLM-Chatbots können Dokumente durchsuchen, sind jedoch nicht in der Lage, mit der Komplexität kundenspezifischer Maschinen und Anlagen umzugehen. Circulonix nutzt KI-Agenten und einen domänenspezifischen Knowledge Graph, um Entwicklungswissen aus unstrukturierten Dokumenten, CAD-Modellen, Stücklisten und Projektordnern flexibel zu erfassen. Im Gegensatz zu generischen LLM-Systemen verbindet und interpretiert Circulonix Anforderungen, Lösungskonzepte, Systemkomponenten und Schnittstellen und ermöglicht so automatische Angebote und Variantenanalysen.



Kontakt

Lucas Weyrich
Gründer / Founder
lucas.weyrich@circulonix.com
www.circulonix.com



Share PLM GmbH

1. Der Elevator Pitch

Share PLM ist eine spezialisierte Boutique-Beratung, die die entscheidende Lücke zwischen komplexer Technologie und den Menschen schließt, die sie nutzen. Wir begleiten Unternehmen durch ihre digitale Transformation und decken dabei den gesamten Weg des Organizational Change Management (OCM) ab – von der Strategie bis zur Umsetzung. Unser maßgeschneiderter Ansatz sorgt dafür, dass neue PLM-Systeme vollständig angenommen werden, und verwandelt Widerstand in Akzeptanz.

2. Der „Why Now?“-Moment

Die industrielle Landschaft entwickelt sich rasant – und dennoch scheitern alarmierende 70 % aller digitalen Transformationen. Warum? Weil PLM traditionell als reine IT-Einführung behandelt wird statt als kultureller Wandel im Unternehmen. Heute erfordern die Komplexität vernetzter Ökosysteme, die Leistungsfähigkeit moderner KI sowie der dringende Bedarf an Effizienz und Nachhaltigkeit einen neuen Ansatz. Unternehmen erkennen zunehmend, dass selbst die besten Systeme scheitern, wenn die Nutzer sie nicht annehmen. Genau dieser Paradigmenwechsel hat das Zeitfenster für unsere am Menschen orientierte Vision geöffnet – und beweist, dass erfolgreiche digitale Transformation beim Menschen beginnt.

3. Ihr Mehrwert für die Industrie

Unsere Lösung macht Lifecycle-Prozesse intelligenter, indem sie sicherstellt, dass komplexe PLM-Systeme aktiv genutzt und nicht nur installiert werden. Mit unserem Fokus auf Organizational Change Management helfen wir Unternehmen, die Erfolgsquote ihrer digitalen Initiativen deutlich zu steigern. Wir bringen Technologie und Geschäftsziele in Einklang und verbinden dabei Engineering, Psychologie und Design Thinking. Durch maßgeschneiderte Strategien dürfen unsere Kunden reibungslosere Übergänge, höhere Nutzerakzeptanz und effizientere Arbeitsabläufe erwarten. Letztlich befähigen wir Mitarbeitende, neue, nachhaltige Prozesse mit Zuversicht anzunehmen – und ermöglichen es Unternehmen so, den Return on Investment ihrer PLM-Investitionen zu maximieren und schneller auf Marktveränderungen zu reagieren.

4. Die Technologie dahinter

Auch wenn wir uns in den führenden PLM-Plattformen souverän bewegen, ist unsere eigentliche „Kerntechnologie“ unsere bewährte Methodik des Organizational Change Management und unser einzigartiges „House of Change“-Framework. Aufgebaut auf drei Säulen – Erfahrung, Lernen und Zusammenarbeit – und getragen von einer gemeinsamen Transformationsvision, stellt dieser ganzheitliche Ansatz sicher, dass jeder Aspekt der Transformation von der Strategie bis zur Umsetzung gesteuert wird. Was uns wirklich unterscheidet, ist unsere systemunabhängige, am Menschen orientierte Perspektive sowie unsere praxisnahe Arbeitsweise. So werden komplexe PLM-Landschaften zugänglich und intuitiv, Risiken werden proaktiv gesteuert und ein nachhaltiger Verhaltenswandel im gesamten Unternehmen vorangetrieben.



Kontakt

Thomas Winden
Managing Director
Share PLM GmbH
+49 151 14015769
thomas.winden@shareplm.com
www.shareplm.de
www.linkedin.com/in/thomas-winden

Connecterprise



1. Der Elevator Pitch

ConnectERPrise wurde 2022 gegründet und bietet Softwarelösungen und Services für den industriellen Datenaustausch und die Interoperabilität technischer Datenpakete. Wir helfen Unternehmen, Silos aufzubrechen, indem wir CAD/PLM-Standards wie STEP und JT beherrschen. Unsere Mission ist es, dass komplexe Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg fließend, zugänglich und zuverlässig bleiben – von der Entwicklung über die Fertigung und Wartung bis hin zur zirkulären Wiederverwendung.

2. Der „Why Now?“-Moment

Die europäische Industrie steht an einem strategischen Wendepunkt. Angesichts des intensiven internationalen Wettbewerbs und geopolitischer Verschiebungen müssen wir unsere digitale Transformation beschleunigen. Das Aufkommen der KI hat – verbunden mit dem dringenden Bedürfnis nach industrieller Souveränität – ein einzigartiges Zeitfenster eröffnet. Jetzt ist der Moment, uns von proprietären Abhängigkeiten zu lösen und auf offene Standards zu setzen, um ein widerstandsfähiges, schnelles und unabhängiges industrielles Rückgrat für Europa zu schaffen.

3. Ihr Mehrwert für die Industrie

Unser Ansatz folgt der Logik des europäischen DataSpace und fördert die Transparenz, die für den künftigen Digital Product Passport (DPP) erforderlich ist. Indem wir tiefgreifende Interoperabilität sicherstellen, gestalten wir Prozesse intelligenter und nachhaltiger und ermöglichen eine durchgängige digitale Rückverfolgbarkeit von Materialien und Produkten. Kunden erwartet ein durchgängiger „Digital Thread“, der die Ziele der Kreislaufwirtschaft und ein langfristiges Asset-Management unterstützt.

4. Die Technologie dahinter

Nach einer erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsphase im Jahr 2024 mit Fokus auf den STEP-AP242-Echtzeitaustausch treten wir nun in eine neue Phase ein. Unsere Vision ist es, diese „Digital Twin“-Interoperabilität direkt ins Herz der industriellen Abläufe zu bringen. Indem wir unsere Service-Ebene an den Standards der Asset Administration Shell (AAS) ausrichten, erleichtern wir den Übergang von der Prototypen-Denkweise zu einer großflächigen, internen industriellen Realität.



Kontakt

Nicolas Blanchon
Founder & Expert in Extended
Enterprise and Data Interoperability
nicolas.blanchon@connecterprise.com
www.connecterprise.com

Veranstaltungsrückblick Symposium **Beim Jahrestreffen der prostep ivip Community stand KI an erster Stelle**

Autorin: Daniela Hoffmann



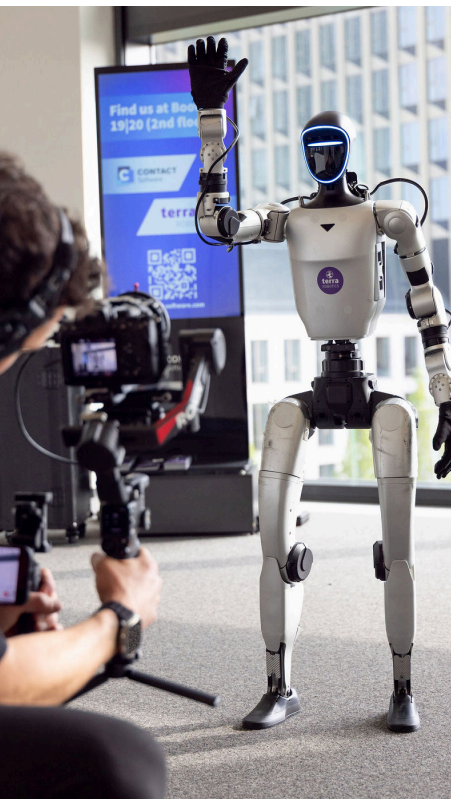
Auf dem prostep ivip Symposium wurden die Grenzen des heute mit KI Machbaren ausgelotet und Praxiserfahrungen ausgetauscht. Mit Neugier und Leidenschaft diskutierte die internationale Community, welche Rezepte für die schnellere Entwicklung Software-definierter Produkte taugen - und lud dazu auch andere Branchen ein.



Vorstandsmitglied Philipp Wibbing (Unity) stellte die prostep ivip Community gleich zum Veranstaltungsauftritt vor eine Entscheidung à la „Matrix“: Wer die blaue Pille wählt, verbringt zwei inspirierende Symposium-Tage, macht danach aber so weiter wie bisher. Wer sich jedoch für die rote Pille entscheidet, trifft die mutige Entscheidung, nicht nur Inspiration mitzunehmen, sondern konkrete Veränderung in seine Organisation zu bringen. „Wir leben in herausfordernden Zeiten, und ihr müsst euch entscheiden, welche Pille ihr nehmen möchtet“, so Wibbing. Thomas Kamla (Volkswagen) erklärte, dass sich auch der Vereinsvorstand selbst für die rote Pille entschieden habe. Man wolle noch weiter in Richtung Deep Tech sowie Robotik und Physical AI vordringen – die Gamechanger-Themen der Zukunft. Dafür gebe es im Verein ein starkes Erbe und starkes Wissen.

„Driven by tech, united for impact“, nannte Vorstandssprecher Jens Poggenburg (AVL) das Motto. „Wir haben ein sehr klares Bild davon, wie wir für die Community Mehrwert schaffen können, und wir haben die Leitplanken geschärft“, stellte er klar. Ziel sei, die Mitglieder im Umgang mit Disruption zu unterstützen. „Dafür brennen wir, und genau darüber diskutieren auch unsere Mitglieder und wir als Vorstand sehr intensiv, um gute Wege zu finden“, so Poggenburg. Nach 14 Jahren leidenschaftlichen Engagements für den Verein überließ Prof. Rainer Stark (TU Berlin) seinen Vorstandssitz Prof. Matthias Kreimeyer von der Uni Stuttgart. Der Fünfte im Vorstandsbund, Dr. Henrik Weimer (Airbus), konnte leider nicht dabei sein.



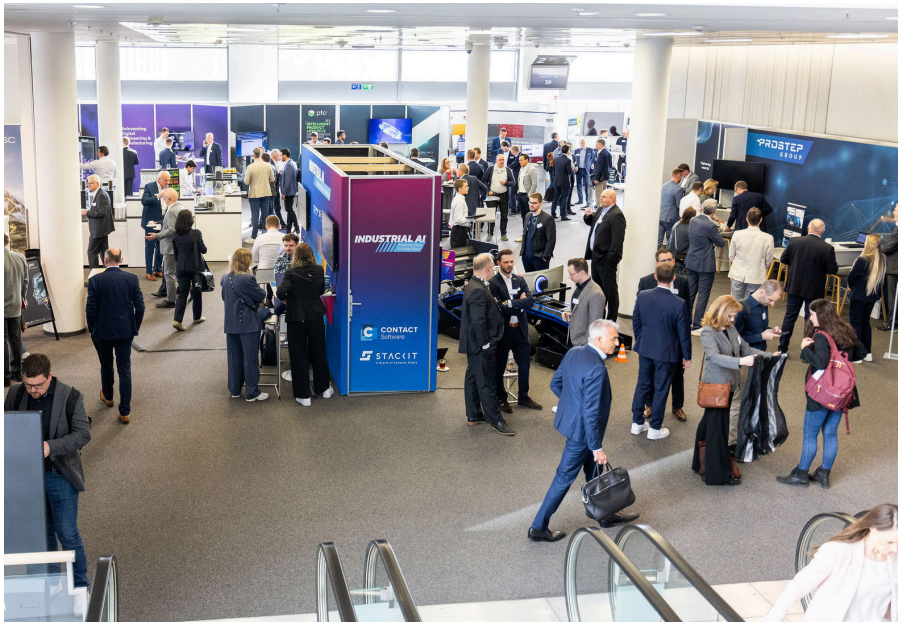


The next Frontier: AI

Die Pillendiskussion sollte an beiden Kongresstagen die Gemüter weiter beschäftigen und tauchte immer wieder in Gesprächen auf. Für viele ist die Transformation angesichts der wirtschaftlichen und geopolitischen Dynamik kein „nice to have“: Im Fokus stand vor allem die übergreifende Frage, wie sich Entwicklungszeiten weiter verkürzen und Kosten reduzieren lassen. Die Zusammenkunft war entsprechend geprägt von den zwei Themen KI und Daten, die derzeit die Entwicklungslandschaft umpflügen wie kaum ein Trend zuvor. KI, insbesondere Agentic AI ist gekommen, um zu bleiben, und wird insbesondere in F&E eine massive Rolle spielen. Sie berührt das Selbstverständnis und die Arbeitsweise von Ingenieuren und Ingenieurinnen zutiefst.



Wolfgang Puntigam, Vice President Software bei AVL, zeichnete ein Zukunftsbild, bei dem KI vom Assistenten zum Teammitglied werden und schließlich den Menschen enablen könnte, binnen kürzester Zeit unterschiedlichste Entwürfe „auszuprobieren“ – wie bei Tony Stark aus dem Film „Iron Man“. „Bei KI-Transformation geht es immer um Menschen. Denn es gibt viele Ängste und auch Narrative im Raum, die stimmen mögen oder auch nicht. Habe ich in Zukunft noch einen Job? Macht KI meinen Job?“, fasste Puntigam eine zentrale Herausforderung zusammen: Die Menschen auf diesem Weg mitzunehmen. Als wichtige Vereinsaufgabe sieht er, die offenen Datenstandards für agentische KI voranzutreiben. Dazu gehörten etwa offene MCP-Services (Model Context Protocol), Agent-to-Agent-Protokolle und offene APIs. Auf der anderen Seite müssen die insbesondere für Agentische KI benötigten Daten dringend verfügbar und semantisch



verstehbar gemacht werden: Darüber war man sich schon auf dem letzten Symposium klar, bei dem es viel um Ontologien und Semantic Layer ging.

Datensouveränität mitdenken

Doch der Aspekt der Datensouveränität hat seitdem stark an Gravitas gewonnen. Das zeigte exemplarisch eine Teilnehmerfrage: „Wenn wir versuchen, mit Hilfe von KI Design zu machen, wie schützt man sein geistiges Eigentum?“. Derzeit sei die Haltung dazu etwas „schizophren“: „Einerseits möchten wir KI für Designvorschläge nutzen. Andererseits sind wir nicht bereit, unsere Ideen in die KI-Umgebung einzubringen“. Je mehr mit KI entwickelt wird, desto mehr sensibles Ingenieurwissen fließt naturgemäß in die Algorithmen ein.

„Digitale Souveränität beginnt in eurer IT-Architektur und in der Art, wie ihr KI einsetzt. Bevor wir KI umfassend nutzen können, müssen wir unsere digitale Transformation beschleunigen – denn KI ist vollständig von Daten abhängig“, brachte es Patrick Müller von Contact Software auf den Punkt. Gerade Vertrauen sei dabei ein zentrales Element – und ein Kernthema von prostep ivip. „Wir beobachten, dass PLM-Daten zunehmend entlang der Lieferkette verfügbar gemacht werden, um wieder mehr Transparenz und Kontrolle zu gewinnen“, sagte Müller mit Blick auf die Schwierigkeiten, die sich insbesondere bei Just-in-Time-Lieferketten heutzutage durch geopolitische Veränderungen ergäben.



Dass es europäische Souveränität nur geben kann, wenn die Unternehmen selbst etwas dafür tun, hat sich als Erkenntnis immer mehr durchgesetzt. Dabei spielen europäische Hyperscaler-Herausforderer wie Stackit eine zentrale Rolle. Ghoutam Banerjee, VP bei Hauptsponsor Stackit, erklärte, dass immer mehr industrielle Hersteller ihre Lösungen auf der gleichnamigen Plattform anbieten würden. Dazu gehören etwa die Lösungen der anderen zwei Premiumpartner AVL und Contact Software. Auch SAP soll es ab September auf Stackit geben. Das Unternehmen gehört zur Schwarz Gruppe und versorgt bereits die 600.000 Angestellten unter anderem von Lidl mit souveränen Lösungen. In Neckarsulm will man zwei Milliarden Euro in einen Innovation Park AI auch für OEMs und Automotive Supplier der Region investieren, berichtet Banerjee.

Early Birds teilen ihre Vorgehensweisen

Auch in diesem Jahr war auf dem Symposium der – in anderen Bereichen keinesfalls gewöhnliche – Spirit des Wissensaustauschs auf Peer-Ebene zu erleben. Viel Neugier und Aufgeschlossenheit, die Bereitschaft zu teilen, um voneinander zu lernen, waren praktisch in allen Sessions spürbar. Dabei lag gleich für mehrere Vortragende ein Schwerpunkt darauf, wie sich das aufwendige Änderungsmanagement und das Requirements Management durch KI beschleunigen lässt. BMW beispielsweise stellte gemeinsam mit Partner Raiqon vor, wie man im Anforderungsmanagement mit CodeBeamer und der Raiqon-KI-Plattform bereits enorme Zeiteinsparungen erzielen konnte. Etwa 120.000 Einträge kommen monatlich neu ins System, berichtete Patrick Grüßenbeck von BMW. Mit integrierter semantischer Suche und automatischer Datenübertragung ohne Copy und Paste gelinge es, einen Eintrag, für dessen Suche bisher sechzig Ingenieure einen Tag beschäftigt waren, praktisch auf Knopfdruck zu finden.

Auch im Bereich Nachhaltigkeit kann KI eine zentrale Rolle spielen, gerade wenn bessere Informationen in frühen Phasen des Designprozesses vorliegen und die richtigen Entscheidungen für den CO₂-Fußabdruck rechtzeitig getroffen werden können. So zeigte Stefan Gatersleben von Schaeffler, wie sich mit einer Lösung von Transition Technologies PSC der Zeitaufwand, um Materialalternativen unter dem CO₂-Gesichtspunkt zu vergleichen, deutlich reduzieren ließ.

Das Software-defined Product treibt viele Branchen um

Matthias Kreimeyer bekräftigte in seiner Begrüßung: „Diese Idee von ‚United for Impact‘, ist etwas, das als Community wirklich funktioniert – und auch die prostep ivip-Organisation funktioniert so. Wir wollen dabei über die Kernindustrie, also die Automobilindustrie, hinausgehen“. Der Vorstand hat dabei über Aerospace hinaus auch Branchen wie Defense, Medizintechnik oder Maschinen- und Anlagenbau im Blick. Beim Software-definierten Produkt können andere Branchen von den Vorarbeiten im Verein lernen, aber auch ihre Stärken einbringen. Bernd Feldvoss von Airbus teilte in einem Workshop Erkenntnisse, die branchenübergreifend aus dem prostep ivip-Projekt LOTAR (LONG Term Archiving and Retrieval über lange Lebenszyklen hinweg) spannend sind.



„Die Komplexität wächst enorm: Viele Produktvarianten, lange Lebenszyklen, strengere Vorschriften. Alte Produkte müssen neue Anforderungen erfüllen – das ist mit Papier kaum noch handhabbar“, erklärte Thilo Jania vom japanischen Medizintechnikhersteller Olympus in der Expert Corner „Engineering at Digital Speed“. Zugleich gehe die Strategie dahin, Produkte innerhalb der streng regulierten Branche immer weiter zu individualisieren.

Unterschiedliche Aufgabenstellungen, ähnliche Herausforderungen

Derzeit sei oft noch die unterschriebene Zeichnung die einzige „Single Source of Truth“. „Auch die Behörden entwickeln sich und akzeptieren zunehmend digitale Nachweise. Wir stehen hier an einem Wendepunkt“, so Jania. Zugleich gelte es, die Fachexpertise aus den Köpfen in die Digitalisierung zu bringen, auch um das Wissen derjenigen, die in den nächsten Jahren in Rente gehen, nicht zu verlieren: Dabei seien KI-Tools wesentlich.

„Wir haben unsere Ingenieure darauf trainiert, Modelle zu erstellen und Engineering zu betreiben, um ihr jeweiliges Engineering-Problem zu lösen. Und all die Daten wurden jahrelang – und werden auch heute noch – genau in diesem Kontext strukturiert. Jetzt aber wollen wir die Gleichung umdrehen“, fasste es Kenneth Swope von The Boeing Company zusammen. Man wolle die Daten offenlegen, domänenübergreifend relevant und außerdem für Agenten verfügbar machen – obwohl die Modelle bisher nicht dafür aufgebaut waren. „Das heißt, wir müssen anfangen, mit genau dieser Anforderung im Blick zu modellieren, damit die Daten so strukturiert und bereitgestellt werden, dass sie nützlich sind. Das ist eine Transformation der Belegschaft und es ist eine Transformation der Unternehmen“, folgerte Swope.



Alle Fotos auf einen Klick



MBSE, Simulation und virtuelle Validierung sind die Zukunft

Im Defense-Bereich zeigte Jörg Wirtz von Airbus Defence and Space auf, welche Herausforderungen neue Verteidigungssysteme wie die Multi Domain Combat Cloud mit sich bringen. „Es handelt sich um ein äußerst komplexes System-of-Systems. Die Entwicklung wird zusätzlich dadurch erschwert, dass es sich um ein multinationales und unternehmensübergreifendes Projekt handelt. Der Schlüssel zur Beherrschung dieser Komplexität liegt in modellbasiertem Arbeiten und in der frühen Verifikation von Hypothesen durch Simulation des Gefechtsfelds und des Gesamtsystems“, berichtete Wirtz.

Als größter Hemmschuh erweist sich bei der Simulation die Frage nach der Glaubwürdigkeit. Nur wenn Model-based Systems Engineering und Simulation zusammenkommen, können mit virtuellem Testing auch Hardware-Entscheidungen getroffen werden. Hans-Martin Heinkel von Robert Bosch ging darauf ein, was hier bereits mit dem prostep ivip-Projekt Smart Systems Engineering (SmartSE) erreicht werden konnte. Dazu zählt ein mittlerweile weltweit genutzter Standard für die ECU-Modellierung und die Erfahrung, dass die technologische Basis aus Standards wie Modelica Association, FMI (Functional Mock-up Interface) und SSP (System Structure and Parameterization) sich durchaus für den Praxiseinsatz eignet. Auch im MBSE-Umfeld können Large Language Models bei der Übersetzung von SysML in SSP helfen.

Internationale Zusammenarbeit

In den letzten Jahren haben sich immer mehr asiatische Hersteller im Verein eingebracht. Für viele in der Community ist es ein Zeichen der Hoffnung, dass eine vertrauensvolle internationale Zusammenarbeit weiter einen Wert darstellt. In Frankfurt setzten die Vorträge japanischer Hersteller ein starkes Zeichen dafür. Für das nächste Symposium haben sich bereits Mazda und Toshiba als Premiumpartner positioniert.

Nachdem die Neunziger Jahre vom Lernen an japanischer Effizienz geprägt waren und Kaizen, Kanban und Lean zum Karate der Ingenieurskunst wurden, bringt der Austausch auch jetzt spannende kulturelle und technologische Einblicke. So berichtete Takao Senko von Honda Motor ausführlich über die Bedeutung des Traums im Engineering von Honda und über den Weg zum Model-based Enterprise: Ein Unternehmensansatz, bei dem das digitale Produktmodell zur zentralen und verbindlichen Informationsquelle über den gesamten Produktlebenszyklus wird. Dabei wird das MBSE-Konzept auf eine höhere Ebene gehoben. Im MBE-Maturity-Modell sei man derzeit dabei, Stufe 4 zu erreichen, bei der digitale Produktdaten direkt und maschinenlesbar in Downstream-Prozessen genutzt werden. Level 4 sei der „Startpunkt für den KI-Traum“.

„Die Zukunft ist nicht, dass KI Ingenieure ersetzt, sondern ein Menschen- und Modell-übergreifendes Arbeiten mit KI, mit Modellen und strukturiertem Wissen als gemeinsamer Sprache“, ergänzte Takao Nii von Dentsu Soken. „Aktuell habe ich zwei Träume. Zum einen möchte ich MBE Level 5





und Level 6 realisieren, um KI-getriebenes Arbeiten mit meinen Kolleginnen und Kollegen im Unternehmen zu ermöglichen. Ich möchte diese Aktivitäten unter dem Konzept von Träumen vorantreiben“, so Takao Senko. Sein zweiter Traum: „Nächstes Jahr den Fortschritt von Level 5 und 6 sowie der KI-Aktivitäten zu erklären“.

Neue Ideen im Startup-Pitch Award

Aus dem diesjährigen Startup-Pitch ging Cyrcolonix mit Gründer Lucas Weyrich als Sieger hervor. Die Lösung: Ein KI-Agent, der für Kundenanfragen automatisch maßgeschneiderte Systemvorschläge erstellt und für Project Engineering sowie den technischen Vertrieb mit Fokus auf mechatronische Systeme in komplexen Projekten wie Industriemaschinen gedacht ist. „Die Engineering-Logik, welche Komponenten zusammenpassen, steckt heute in den Köpfen von Experten“, erklärte Weyrich. Das sei zeitaufwendig und die Abhängigkeit von einzelnen Mitarbeitenden hoch. In der zweiten Jahreshälfte wolle man die Lösung produktiv ausrollen und eine Pre-Seed-Finanzierungsrunde starten.

Dass der enge Austausch zwischen Startups mit disruptiven Ideen und etablierten Unternehmen allen Seiten dient, zeigte auch die Keynote des Startup-Gewinners Spread von 2023 für eine Softwareplattform, die Engineering-Daten aus unterschiedlichen Systemen holt und sowohl für Entwickler als auch KI-Agenten verfügbar macht. „Millionen von Iterationen von Engineering-Entscheidungen haben bereits stattgefunden, und zu all

diesen Entscheidungen gibt es Datenspuren“, konstatierte Robert Göbel von Spread. Er ging darauf ein, wie entscheidend Kontext ist, damit AI-Agenten etwa Produktentwickelnden helfen können, Informationen zu finden oder die zunehmende Vielfalt an Tools zu beherrschen. Fehlt dieses Fundament, dann nützen auch die leistungsfähigsten KI-Modelle nichts. „Diese Community hier, diese 650 Teilnehmerinnen und Teilnehmer, die heute hier sind, sind tatsächlich in der Lage, wirklich etwas zu bewegen“, machte Göbel der Community Mut.



Scientific Award Gewinner 2026 in der Kategorie Masterarbeit



Mein Name ist Gerolf Schalk und ich bin über Siemens Digital Industries Software als Dissertant an der Technischen Universität Graz tätig. Meine Forschungsarbeit mit dem Titel „Integrated Data Management for Multidisciplinary System Development - Framework Conception and Practical Application“ wurde von der prostep ivip Association mit dem Scientific Award 2026 in der Kategorie Masterarbeit ausgezeichnet - eine Ehre, die mich mit großem Stolz erfüllt.

Die Motivation für meine Arbeit resultiert aus meiner langjährigen Beschäftigung mit den Themen Systems Engineering, digitaler Transformation und interdisziplinärer Produktentwicklung, die mich als Mitgestalter moderner Systeme schon immer fasziniert haben. Während meiner Laufbahn stieß ich regelmäßig auf die Projekte, Publikationen und Standards der ProSTEP iViP Association, die sich als wichtige Ressourcen für meine Arbeit herausstellten. Durch diese Nähe stieß ich zufällig auf die Ausschreibung des Scientific Award. Die thematische Verbindung zu meiner Masterarbeit machte die Einreichung für mich naheliegend. Obwohl ich mir anfangs keine großen Chancen ausmalte, war die Freude umso größer, als ich die Mitteilung über meinen Gewinn erhielt.

Im Mittelpunkt meiner Masterarbeit steht die Entwicklung eines praxisorientierten Frameworks, das die Zusammenarbeit sowie Rückverfolgbarkeit in komplexen Entwicklungsprozessen optimiert. Ziel meiner Forschungsarbeit ist es, den wachsenden Anforderungen moderner mechatronischer Systeme gerecht zu werden – von zunehmender technischer Komplexität über fragmentierte Softwarelandschaften bis hin zur Herausforderung, interdisziplinäre Teams effizient miteinander zu vernetzen. Die Kernidee liegt in der Konzeption spezifischer Datenmodelle für Product Lifecycle Management-Systeme, die umfassende Transparenz sowie eine strukturierte Organisation von Entwicklungsdaten gewährleisten. Dadurch können Ingenieur*innen sich stärker auf ihre Kerntätigkeiten konzentrieren und zugleich Innovationen über disziplinäre Grenzen hinweg vorantreiben.

Besonders stolz bin ich darauf, dass meine Arbeit die Brücke zwischen Theorie und Praxis schlägt: Die entwickelten Konzepte sind anhand eines Anwendungsfalls – eines Entwicklungsprozesses für eine Quadcopter-Drohne – erfolgreich validiert worden. Hierbei wurden sämtliche digitale Modelle erstellt, basierend auf den erarbeiteten Datenmodellen strukturiert und schließlich in einem funktionstüchtigen Prototyp umgesetzt. Diese Praxisnähe unterstreicht, wie digitale Produktentwicklung die Gestaltung physischer Systeme nicht nur effizienter, sondern auch zukunftsorientierter machen kann.

Meine Vision ist es, durch meine Forschung aktiv zu einem nachhaltigen und zukunftsorientierten Ingenieurwesen beizutragen. Ich bin überzeugt, dass Technologie nicht nur Entwicklungsabläufe optimieren sollte, sondern auch gezielt Vertrauen schaffen, Menschenleben bereichern und Lösungen für eine bessere Welt liefern kann. Diese Überzeugung dient mir als täglicher Antrieb und prägt meine wissenschaftliche sowie persönliche Reise. Um diese Überzeugung und die Kernkonzepte meiner ausgezeichneten Masterarbeit einer breiteren Fachgemeinschaft näherzubringen, habe ich eine Kurzfassung meiner Arbeit verfasst.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei der ProSTEP iViP Association für die professionelle Organisation und den überaus herzlichen Empfang bedanken – ein Erlebnis, das mir noch lange in Erinnerung bleiben wird. Ich würde mich freuen, das Team bei künftigen Symposien wiederzutreffen und weiterhin Teil dieser inspirierenden Gemeinschaft zu sein.

Beste Grüße, Gerolf Schalk

Winner Scientific Award Master Thesis

Integrated Data Management for Multidisciplinary System Development - Framework Conception and Practical Application

Gerolf Schalk^{1,2}, Philipp Kranabittl^{1,3}, Matthias Bajzek^{1,3},
Stefan Kollegger^{1,3}, and Hannes Hick¹

¹Institute of Machine Components and Methods of Development,
Graz University of Technology, Austria

²Siemens Industry Software, Germany

³Antemia GmbH, Austria

Interdisciplinary system development faces growing pressure from rising system complexity, fragmented software tool landscapes, and an increasing demand for seamless collaboration across engineering domains. Under these conditions, traditional development approaches often fall short in maintaining traceability and coherence of engineering data. These challenges call for a fundamental rethinking of existing methodologies and the introduction of new approaches that enable engineers to navigate complexity more effectively.

Building on established concepts for handling complexity, namely Systems Engineering, Model-Based Systems Engineering, and Product Lifecycle Management (PLM), this paper introduces a practical framework for managing interdisciplinary development data within PLM systems. The proposed approach offers an implementation-oriented and adaptable structure that supports the organization of engineering data, enables end-to-end traceability, and facilitates cross-disciplinary collaboration. To assess the framework's applicability, it is applied and evaluated in a development project involving digital engineering models and a physical prototype within a practice-oriented engineering environment. The results illustrate a best-practice approach for structuring development processes and engineering data and supporting digital transformation.

Introduction

Developing modern mechatronic systems poses significant challenges – including increasing system complexity, advancing digitalization, greater interdisciplinarity, growing demands for sustainability and traceability, as well as rising cost and time pressure. However, for companies to remain competitive and ensure engineering efficiency, the development phase plays a critical role, as key system characteristics – such as functionality, repairability, recyclability, and engineering data quality – are largely defined at this initial stage. Addressing these challenges requires a shift in engineering education, working habits, and the ability to collaborate across technical disciplines. Common issues in this context include a lack of shared understanding, the absence of a common engineering language, and limited interdisciplinary methodologies [1]. Effective cross-disciplinary communication, however, depends on a holistic system understanding, enabled by T-shaped knowledge, which combines deep expertise in an engineering discipline with broad interdisciplinary comprehension. This T-shaped profile enables engineers to understand each other's needs, identify shared information interfaces, and consider discipline-specific information throughout the development process [2].

This paper addresses the challenges described above by introducing a practical and adaptable framework for structuring interdisciplinary system development that enables engineers to focus on their core tasks by reducing coordination efforts, information search, and troubleshooting. From a technical perspective, the paper presents a concept for comprehensive interdisciplinary data structuring and process-wide traceability within a centralized data platform. The paper begins with a discussion of the state of the art, followed by a review of relevant engineering concepts, the presentation of a customized data structuring model, the scientific procedure, the development results, and the digital environment that enabled the implementation. Core elements of this work are derived from the first author's master's thesis, which provides additional implementation details and theoretical background [3].

State of the Art in Technology

As outlined in Section 1, the development of modern mechatronic systems is inherently interdisciplinary and highly complex. To address these challenges, Systems Engineering (SE) provides a foundational philosophy aimed at enabling the realization of successful systems through structured, cross-disciplinary development [4]. Model-Based Systems Engineering (MBSE) extends this scope by introducing system modeling as a semantic formalization that fosters discipline-neutral understanding of the system under development. Moreover, it relies on digital engineering models from different engineering disciplines as central artifacts to represent and support engineering activities. This approach facilitates the reuse of specifications and design artifacts, thereby improving common understanding and engineering traceability [5]. Product Lifecycle Management (PLM) complements SE and MBSE as it is the discipline of managing products throughout their lifecycles – from development to decommissioning [6]. While closely related to the fields of SE and MBSE, PLM places a stronger emphasis on implementing their methodologies through dedicated software solutions [7]. PLM systems offer shared data repositories for various engineering artifacts, thereby supporting traceability and improving interdisciplinary communication. In this context, data structuring is seen as a key strategy for addressing complexity and collaboration issues [8].

The structuring of development data is managed through so-called data models, which define how system artifacts – such as requirements, electronic components, system modeling functions, and simulation results – are organized and related across different levels of abstraction. However, PLM systems often do not come with predefined, comprehensive data models, and traditional ones lack the capability to integrate data from different authoring tools into the PLM system [9], required for efficient development processes. In practice, such data models must be tailored to organizational processes and system characteristics, which vary widely [10]. Still, there is broad agreement that standardized, lifecycle-integrated data structuring models would be beneficial as best-practice blueprints [11]. Although structured data is considered the backbone of system development, unified data structuring models are lacking, resulting in fragmented engineering data across various software tools, thereby hindering the realization of comprehensive, integrated data management platforms [12,13].

Several models for system data structuring have been established in the literature, including the Asset Administration Shell [7], the Core Product Model [14], and the Product Process Organization Model [15], which are discussed in detail in the underlying master's thesis. These data structuring models aim to standardize development data and consider process and organizational dimensions. However, they primarily address conceptual data organization and typically do not showcase practical engineering artifacts in interdisciplinary system development (see Figure 1) including their relationships. Therefore, few of the established models provide comprehensive support for the design of mechatronic systems [16]. In addition, many of the reviewed models are based on theoretical considerations, lack

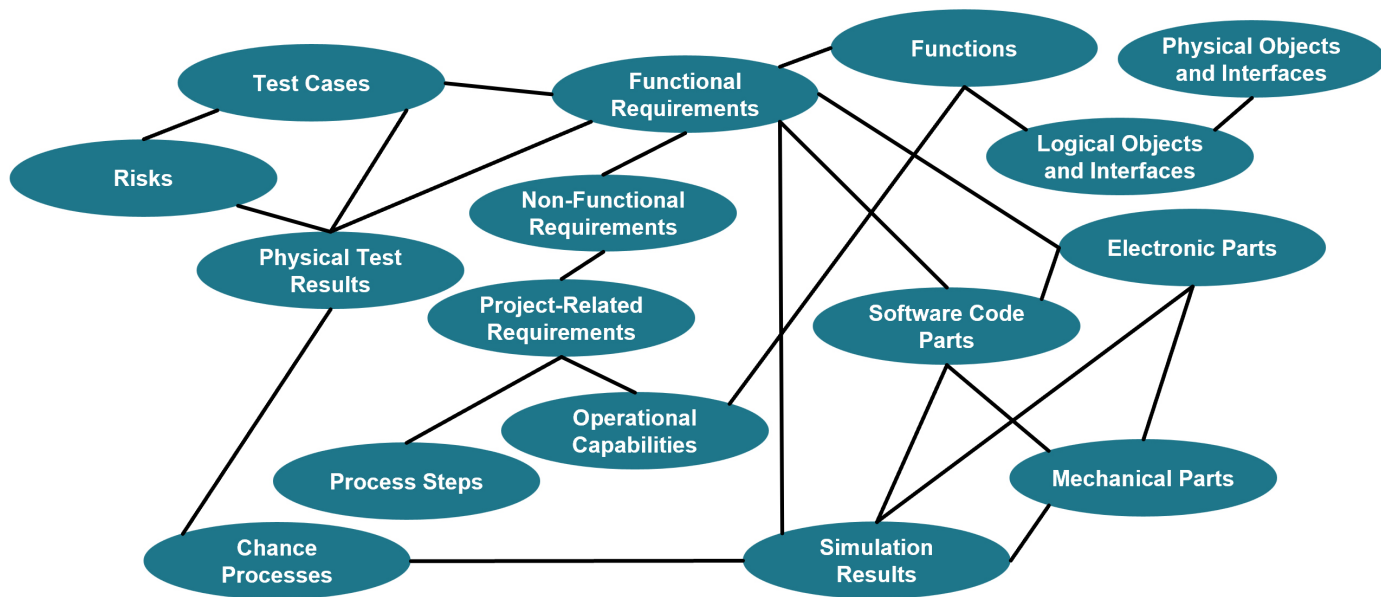


Figure 1: Overview of Engineering Artifacts in Interdisciplinary System Development

implementation guidance, and are only partially integrable into industrial PLM systems. This gap motivated the development of customized PLM data structuring models, with a strong emphasis on practical application, developed in the context of the author's master's thesis. One such model, referred to as the PLM Convergence Framework (PLM-CF), is proposed in this paper. Its aim is to achieve a high level of visual clarity and to bridge the gap between high-level and detailed data modeling, thereby offering a generic yet adaptable structure grounded in practical application.

In summary, there remains a significant lack of comprehensive data models for structuring development data within PLM systems. This is partly explained by the fragmentation of data across numerous software tools, the heterogeneity of data artifacts, and the lack of seamless interfaces to PLM systems, making unified repositories difficult to realize.

Scientific Procedure

The methodology for systematically structuring and tracing data within a unified data platform is based on the PLM-CF, which is developed from foundational principles in SE, MBSE, and PLM, as described in Section 4.1. To derive this framework, established methods for interdisciplinary system development were first analyzed, followed by a targeted literature review of existing data structuring models. These were examined for their suitability in supporting integrated and traceable system development. Building on these insights, a set of customized data models (PLM-CF) was developed,

emphasizing conceptual clarity, practical applicability, and adaptability to different systems and organizational contexts. To evaluate the applicability of the PLM-CF, it was implemented in a prototyping project involving the creation of digital engineering models – such as mechanical, electronic, software, simulation, and requirements models – alongside a corresponding mechatronic prototype. Within this setup, the PLM-CF functioned as a structural guideline for linking and organizing artifacts from the digital engineering models across disciplines and hierarchy levels. In addition, a representative engineering change scenario involving cross-disciplinary modifications was introduced to examine the capability of the PLM-CF to maintain traceability and structural integrity under dynamic conditions, as detailed in the author's master's thesis. Overall, this work follows a practice-oriented engineering perspective and presents a reference implementation within a lifecycle-oriented engineering environment.

Results

This section presents the theoretical background of the PLM-CF and discusses the results of the prototyping project, as well as the enabling environment. It begins with a theoretical outline of the PLM-CF's design and methodology, followed by an overview of the engineering environment that supported its practical implementation. Finally, the implementation results of the prototyping project are examined.

4.1 Development of a Customized Data Structuring Model

The PLM-CF builds on established principles, including the V-Model [17], the RFLP approach [18], Zigzagging [19], and the Four Interlocking Pillars [20]. It illustrates the logical flow and traceability relationships of development data along the engineering process, as shown in Figure 2. However, the figure does not directly represent the data organization within the PLM system, as the data within the PLM-CF is not separated by discipline. In addition, it must be noted that, unlike the traditional V-model, the verification and validation (V&V) activities are already shown on the left side of the V-shape to form a logical traceability via RFLP-V&V. This is because V&V must be interwoven early with development activities on all levels of the system architecture for quality control and test planning [21].

The PLM-CF offers a structured yet scalable framework for managing development artifacts and their traceability links – without introducing unnecessary complexity. It provides horizontal traceability via RFLP-V&V, vertical traceability through Zigzagging, and systematic decomposition across hierarchical levels. The depth of the hierarchical structure is expandable depending on system complexity and the scope of the engineering project. To support practical application and common understanding, the PLM-CF includes additional illustrations, as discussed in the author's master's thesis.

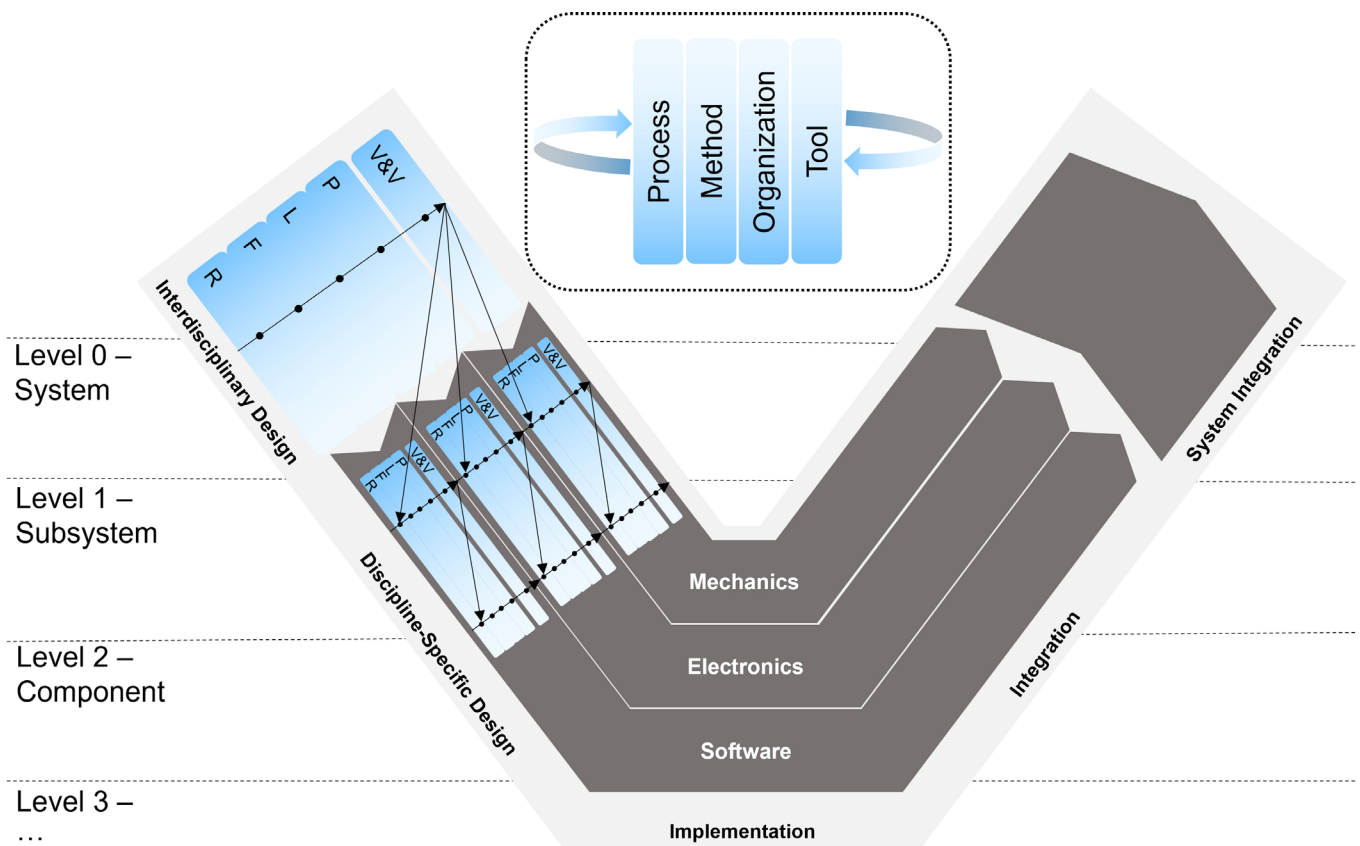


Figure 2: Overview of PLM-CF

A key advantage of the PLM-CF is its clear traceability structure, which allows for efficient modifications by engineers. By organizing data across disciplines rather than within isolated domains, the PLM-CF fosters interdisciplinary collaboration and prevents silo-thinking by design. However, it must be noted that the PLM-CF also does not necessarily mirror the chronological creation of artifacts from RFLP-V&V across disciplines in real-world engineering projects. In this context, trace links from RFLP-V&V would serve primarily for documentation purposes rather than actively supporting the development process. Moreover, it may not always be practical to model all RFLP-V&V artifacts at every hierarchy level, particularly when higher-level components are already well-understood by the organization or are off-the-shelf components that must not be developed themselves. In the context of the prototyping project presented in Section 4.3, the development followed a textbook approach, with all artifacts modeled comprehensively across several hierarchy levels to mitigate system failures and ensure robust system design.

4.2 Engineering Environment

The proposed PLM-CF was not evaluated in an isolated engineering context but was instead applied under realistic development conditions. Therefore, the corresponding prototyping project was executed in the Digital Lifecycle Lab (DLL), hosted by Antemia GmbH [22] at the Institute of Machine Components and Methods of Development. A top view of the lab setup is shown in Figure 3. The DLL serves as a practice-oriented, end-to-end engineering and management platform aligned with industrial needs for interdisciplinary system development. While it focuses on digital engineering through a seamlessly integrated industrial software toolchain, the DLL remains a physical environment, providing hands-on access to different workspaces representing typical roles of an interdisciplinary engineering team, including a project leader, systems engineer, process engineer, mechanical engineer, electrical engineer, software engineer, and testing engineer.

The comprehensive implementation of the PLM-CF in the prototyping project was enabled by the DLL's integrated digital infrastructure, which supported the modeling, management, and traceability of engineering artifacts across disciplines. In particular, the seamlessly connected toolchain from authoring tools to the PLM system, together with direct interfaces for artifact capturing and interactive visualization capabilities, served as key enablers for establishing the framework, generating comprehensive traceability, testing its implementation, and analyzing interdisciplinary dependencies.

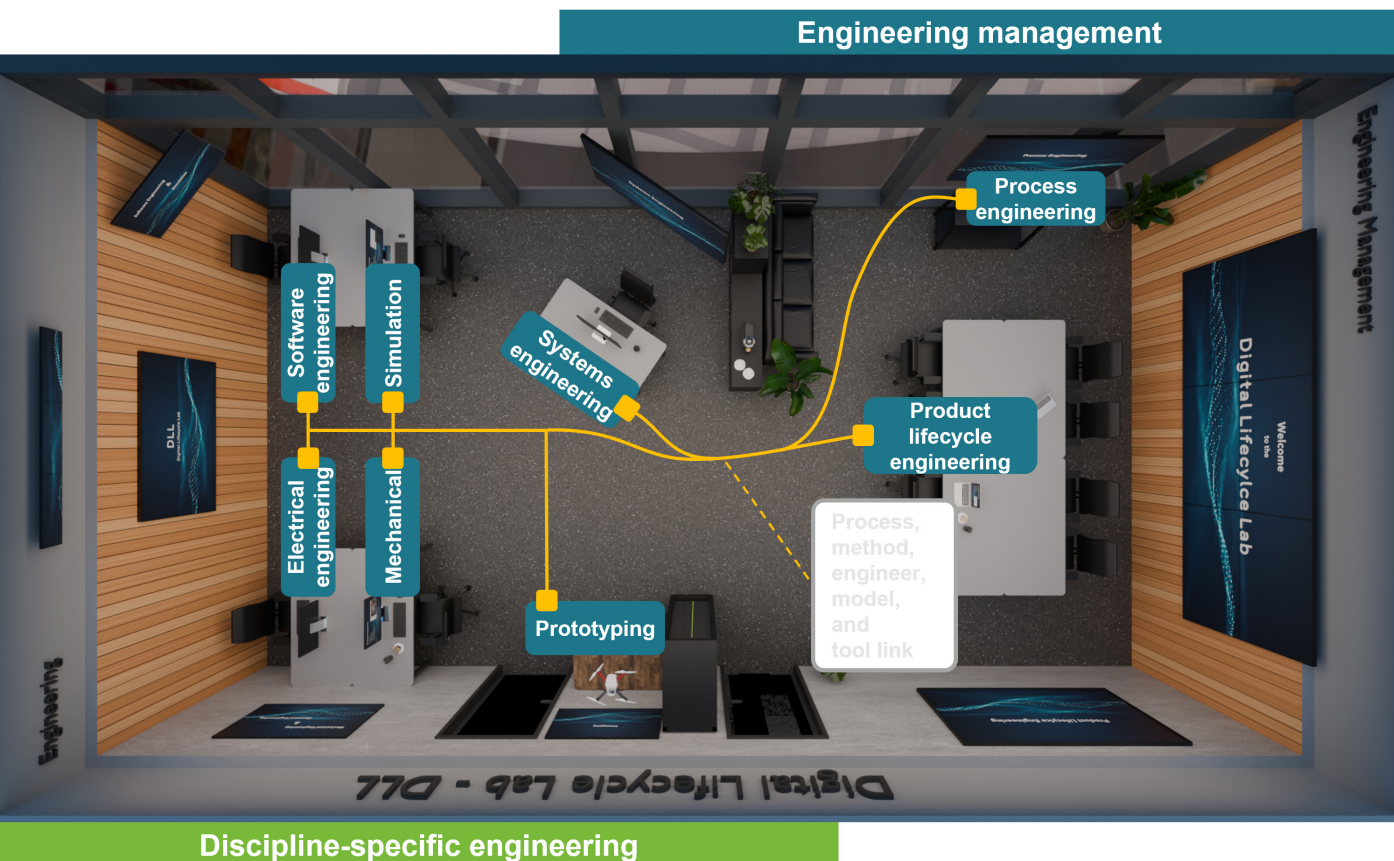


Figure 3: Top View of the Digital Lifecycle Lab © Antemia [22]

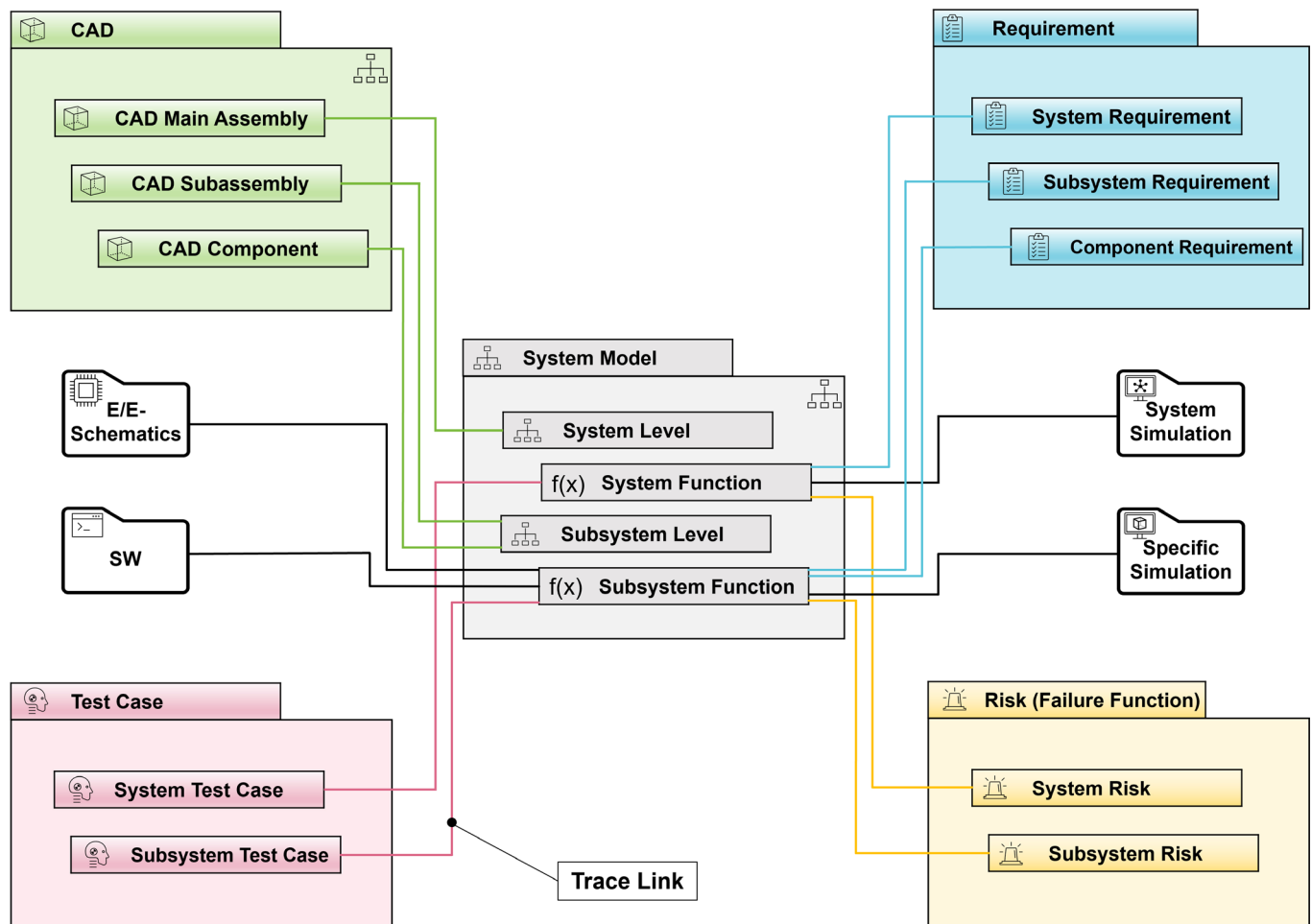


Figure 4: Tailored PLM-CF for Drone Development

4.3 Implementation Results

This section describes the tailored PLM-CF and the digital development of engineering models for the mechatronic system considered, namely a quadcopter drone. The drone was chosen as a representative system due to its multidisciplinary nature, widespread recognition, and high implementation flexibility, enabled by readily available base platforms, sensors, and programmable controllers. Building on the generic PLM-CF presented in Section 4.1, a tailored framework version was derived for the drone system, as illustrated in Figure 4. This included the concrete definition of required artifacts, the appropriate levels of detail for sufficiently specifying the system, and the adaptation of the logic for linking individual artifacts across disciplines.

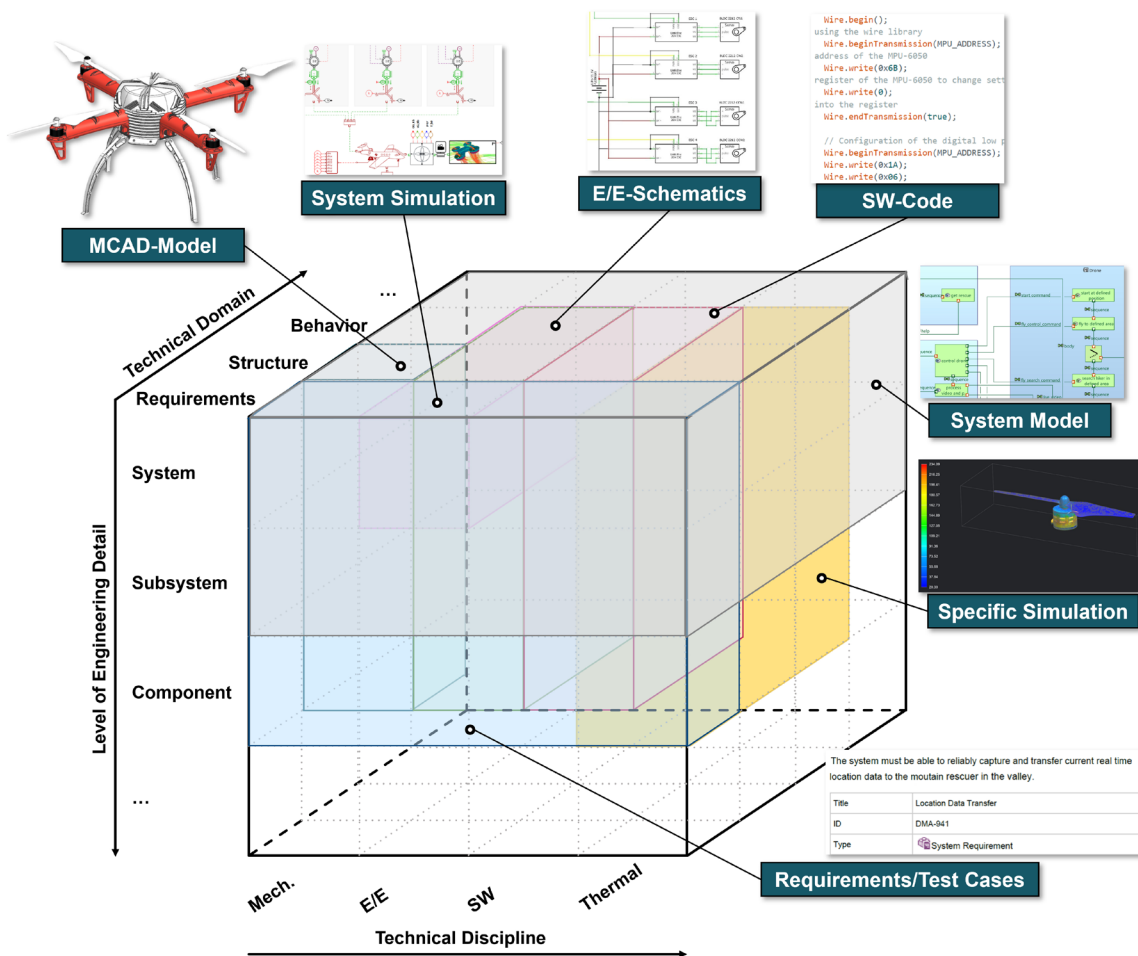


Figure 5: Digital Models for Drone Development within the Model Cube Visualization Method

Throughout development, multiple digital engineering models were created, ranging from the initial system requirements to detailed physical component designs, fully covering the RFLP-V&V approach. For clarity, these models are systematically structured across engineering disciplines, levels of detail, and technical domains, using the Model Cube Visualization Method [23], as depicted in Figure 5, which supports navigation across interfaces and provides an overview of missing or redundant information in the engineering project within the DLL.

To integrate the generated models and artifacts, all artifacts were transferred from their respective authoring tools into the PLM system, enabled by the seamless interfaces of DLL's PLM system. To recreate a realistic engineering setup, roles and accounts reflecting typical interdisciplinary team structures were defined within the PLM system. These roles were assigned responsibility for uploading and managing their respective artifacts and models, thereby representing the cross-disciplinary flow of information and enabling the analysis of interdependencies between roles and required information.

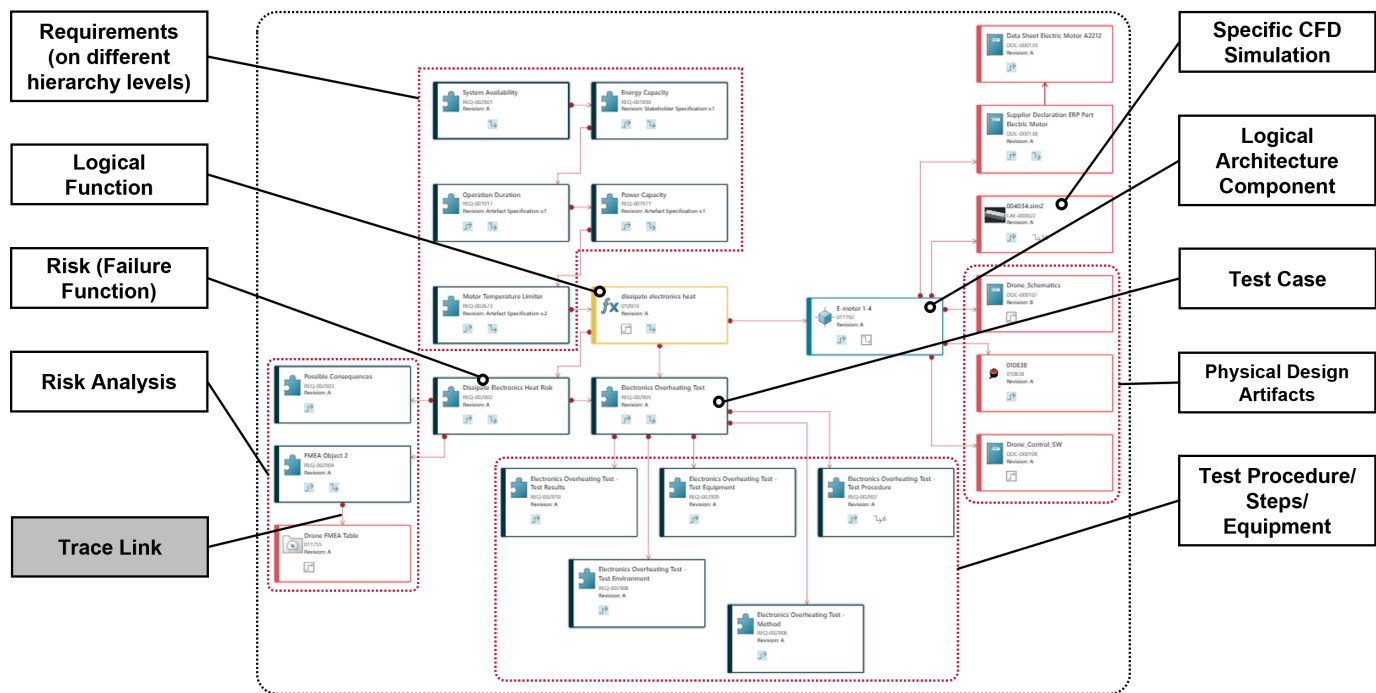


Figure 6: Excerpt of the PLM-CF within the PLM System

Figure 6 shows the implemented PLM-CF within the PLM system Siemens Teamcenter. It illustrates individual artifacts and the traceability structure, spanning multiple hierarchy levels of requirements through to the physical design artifacts for simulation, mechanical, electronic, and software disciplines of the drone. As the full traceability network is significantly larger and more interconnected, only a selected detail, starting from a single requirement, is shown. To support navigation and reduce complexity within large traceability structures, the PLM system provides targeted search functionalities for artifact relationships and interfaces.

Discussion

The results of the prototyping project demonstrate the applicability and adaptability of the PLM-CF in enabling structured and traceable management of development data within a multidisciplinary engineering process. By tailoring the PLM-CF to the quadcopter drone system, a centralized, process-wide data structure was established that supports artifact traceability and interdisciplinary collaboration and serves as a best-practice example for other use cases. Compared to existing data structuring models, the PLM-CF offers a more visually guided, coherent, and implementation-oriented approach. While many models emphasize data standardization or high-level data integration, the PLM-CF bridges the gap between high-level and detailed data modeling, offering a generic yet adaptable structure. Beyond

theoretical design, it demonstrates practical applicability through its implementation in a PLM system within the context of a mechatronic development project. This positions the PLM-CF as a relevant contribution to ongoing discussions in SE, MBSE, and PLM, particularly regarding collaboration and data traceability in complex development settings.

However, several limitations must also be acknowledged. Integrating and configuring all the software tools involved for multidisciplinary system development requires significant effort and may pose a barrier to adoption in industrial environments. Additionally, the evaluation was limited to a single use case – the quadcopter drone system – which restricts the generalizability of the findings. Therefore, the applicability of the PLM-CF to more complex or different kinds of systems remains to be verified. Furthermore, the PLM-CF focuses primarily on the development phase, and its applicability to downstream lifecycle phases requires further investigation.

Summary and Outlook

This work introduced a novel approach for organizing and managing interdisciplinary system development by combining established engineering methodologies with the capabilities of seamlessly connected software tools. Central to this approach is a customized data structuring model – the PLM-CF – which was applied to the digital development of a mechatronic system and verified through the implementation of a corresponding physical prototype.

Several promising directions exist for further advancing the PLM-CF. One key area is the integration of Artificial Intelligence (AI) into SE, MBSE, and PLM, as traditional PLM systems often lack the capabilities required for engineering automation. Leveraging structured development data – as enabled by the PLM-CF – AI applications could be trained to support workflow automation, enhance search and reuse, assist design processes, and improve quality assurance [24]. In this context, the drone project serves as a practical blueprint for AI-enabled engineering. In addition, advancements of the PLM-CF could focus on engineering change processes and variant management through deeper integration of workflows and processes, offering enhanced traceability throughout development. The framework may also be extended to cover downstream lifecycle phases such as operation and decommissioning. Continued research should explore these directions and further evaluate the scalability, adaptability, and applicability of the PLM-CF. Despite these limitations, the PLM-CF presents a robust yet adaptable framework with the potential to enhance both theoretical understanding and the practical execution of traceable, model-based development.

Bibliography

- [1] J. Torry-Smith, A. Qamar, S. Achiche, J. Wikander, and N. H. Mortensen, "Challenges in Designing Mechatronic Systems," *Journal of Mechanical Design*, vol. 135, 2013, doi: 10.1115/1.4007929.
- [2] A. Kossiakoff, W. N. Sweet, S. J. Seymour, and S. M. Biemer, *Systems Engineering – Principles and Practice*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [3] G. Schalk, "Integrated Data Management for Multidisciplinary System Development – Framework Conception and Practical Application," Master's Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2024.
- [4] INCOSE, *INCOSE Systems Engineering Handbook*, Version 2a, Seattle, WA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2004.
- [5] S. Friedenthal, A. Moore and R. Steiner, *A Practical Guide to SysML*, 2nd ed., Eds. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2012.
- [6] J. Stark, "Product Lifecycle Management (PLM)," in *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation*, J. Stark, Ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022, pp. 1–32, doi: 10.1007/978-3-030-98578-3_1.
- [7] A. Deuter and S. Imort, "Product Lifecycle Management with the Asset Administration Shell," *Computers*, vol. 10, no. 7, Art. no. 84, 2021, doi: 10.3390/computers10070084.
- [8] J. Gausemeier, D. Steffen, J. Donoth, and S. Kahl, "Conceptual Design of Modularized Advanced Mechatronic Systems," in *Proc. of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, Vol. 4: Product and Systems Design, Palo Alto, CA, USA, Aug. 24–27, 2009, pp. 263–274.
- [9] O. Shilovitsky, "The Fundamental Challenges of Traditional PLM Software Architectures: A Critical Review," *OpenBOM Blog*, Jan. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.openbom.com/blog/the-fundamental-challenges-of-traditional-plm-systems-a-critical-review>. [Accessed: Mar. 17, 2026].
- [10] G. Schuh, D. Assmus, and E. Zancul, "Product Structuring – The Core Discipline of Product Lifecycle Management," in *Proc. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, Belgium, 2006.
- [11] M. Gomez, D. Baxter, R. Roy, and M. Kalta, "Through-Life Integration Using PLM," in *Proc. 19th CIRP Design Conference – Competitive Design*, Cranfield University, Cranfield, UK, Mar. 30–31, 2009, pp. 155–162.
- [12] O. Shilovitsky, "Structure and Models of Product Data for Connected Processes in PLM," *Beyond PLM*, Dec. 8, 2023. [Online]. Available: <https://beyondplm.com/2023/12/08/structure-and-models-of-product-data-for-connected-processes-in-plm>. [Accessed: Mar. 17, 2025].
- [13] INCOSE, *Systems Engineering Vision 2035*, San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering, 2021.
- [14] R. Sudarsan, S. J. Fenves, R. D. Sriram, and F. Wang, "A Product Information Modeling Framework for Product Lifecycle Management," *Computer-Aided Design*, vol. 37, no. 13, pp. 1399–1411, 2005, doi: 10.1016/j.cad.2005.02.010.
- [15] J. Le Duigou and A. Bernard, "Product Lifecycle Management Model for Design Information Management in Mechanical Field," in *Proc. 21st CIRP Design Conference*, Daejeon, South Korea, Mar. 2011, pp. 207–213.
- [16] C. Zheng, M. Bricogne, J. Le Duigou, and B. Eynard, "Mechatronic Design Process: A Survey of Product Data Model," *Proc. CIRP*, vol. 21, pp. 282–287, 2014.
- [17] VDI/VDE 2206, *Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)*, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany, 2020.
- [18] M. Eigner, T. Gilz, and R. Zafirov, "Proposal for Functional Product Description as Part of a PLM Solution in Interdisciplinary Product Development," in *Proc. International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, May 21–24, 2012.
- [19] T. Weillkiens, *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*, 2nd ed. Heidelberg, Germany: dpunkt.verlag, 2008.
- [20] M. Bajzek, J. Fritz, and H. Hick, "Systems Engineering Principles," in *Systems Engineering for Automotive Powertrain Development*, H. Hick, K. Küpper, and H. Sorger, Eds. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2021, pp. 149–195.
- [21] D. Scheithauer and K. Forsberg, "V-Model Views," in *Proc. 23rd INCOSE International Symposium*, Philadelphia, PA, USA, Jun. 2013, pp. 502–516.
- [22] Antemia GmbH, "Training and Consulting Provider for Methodologies of Interdisciplinary Systems Development," [Online]. Available: <https://www.antemia.com/main/>. [Accessed: Mar. 17, 2026].
- [23] H. Hick, M. Bajzek, and C. Faustmann, "Definition of a System Model for Model-Based Development," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 9, Art. no. 1074, Aug. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1069-0.
- [24] F. Tsirigotis, "Artificial Intelligence and Product Lifecycle Management Systems," in *Product Lifecycle Management (Volume 6): Increasing the Value of PLM with Innovative New Technologies*, J. Stark, Ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2024, pp. 13–26, doi: 10.1007/978-3-031-53521-5_2.

Gerolf Schalk
 PhD Student – Systems Engineering/AI
 Siemens Industry Software GmbH
 DI SW GS&CS EU DACH DE&PFD SAT
gerolf-alfred.schalk@siemens.com
 +43 664-5438638



Kontakt

Scientific Award Gewinner Dissertation 2026

Systems Engineering Frameworks for AI-Integrated Autonomy: A Synthesis of Research in Virtual Product Creation

Dr.-Ing. Lars Ullrich,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Erlangen Nürnberg

Note: This article is based on the author's doctoral thesis, „Towards Intelligent, Safe, and Scalable Autonomy: A Study Driven by Trajectory Planning for Automated Vehicles“ [P1], completed at the Chair of Automatic Control at Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). The research was awarded the 2026 prostep ivip Scientific Award [1] and is consolidated here to provide an industrial and systems engineering perspective for the prostep ivip community.



Figure 1: Award ceremony of the prostep ivip Scientific Award at the prostep ivip Symposium 2026 in Kap Europa, Frankfurt am Main. The award honored Lars Ullrich for his doctoral thesis on intelligent, safe, and scalable autonomy for automated vehicles.

The integration of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) into cognitive cyber-physical systems is driving a fundamental paradigm shift in virtual product creation. Within the automotive sector, this transition challenges classical Systems Engineering (SE) methodologies, which are designed for deterministic, mathematically explicit “white-box” models. When confronted with data-driven, implicit “black-box” AI systems, traditional linear development processes struggle to provide safety assurance and scalable validation. This article synthesizes a comprehensive frameworks spanning process modeling, control-theoretic safety assurance, and decentralized product data management (PDM) to bridge the gap between academic autonomy and industrial systems engineering. By introducing the “Iterative Data-Based V-Model,” we outline how data must transition from a passive operational input into a version-controlled, cryptographically verified, and first-class engineering artifact within the product lifecycle.

Introduction: The Technological Ceiling of Software-Defined Vehicles

Modern product development is undergoing a transformation driven by digital continuity, Industry 4.0, and the embedding of machine learning into safety-critical, closed-loop applications. In highly automated and fully autonomous driving (AD), systems must navigate in open, dynamic, and ever-changing real-world environments [P11]. To date, the automotive industry's response to this complexity has centered on the "Software-Defined Vehicle" (SDV), wherein hardware configurations are decoupled from software-driven features. However, as autonomy levels increase, SDV architectures face a technological ceiling.

Traditional modular, service-oriented software architectures segment the autonomous stack into discrete, sequential modules: perception, prediction, planning, and control [P4]. While this structural modularity facilitates isolated verification, it introduces compounding measurement errors and significant semantic information loss across intermediate boundaries. Specifically, representing complex real-world dynamics via simplified geometric abstractions, such as 3D bounding boxes, strips away crucial contextual information. To achieve robust autonomy, the system must maintain multi-level Situation Awareness (SA) [2]. This includes not only raw perception (Level 1 SA) but also situational comprehension (Level 2 SA) and future state projection (Level 3 SA). For example, a system must distinguish between an open drivable shoulder and a physically unobstructed but hazardous non-drivable zone, a task that purely geometric models struggle to resolve without dense semantic context.

To overcome these limitations, recent research has explored differentiable, modular end-to-end learning paradigms.¹⁶ In frameworks like Unified Autonomous Driving (UniAD), a single neural network natively integrates tracking, mapping, occupancy prediction, and motion planning [3]. By enabling the downstream motion planner to backpropagate errors directly to upstream perception layers, these architectures maximize joint performance. Yet, this shift from mathematically explicit code to data-driven, implicit software introduces a core systems engineering conflict [P2]. When the system's behavior is learned implicitly from data rather than designed explicitly via code, traditional, linear verification and validation (V&V) methodologies fail. Proving the safety of a non-deterministic AI system operating in an open world requires a fundamental restructuring of the systems engineering lifecycle.

The Iterative Data-Based V-Model: Structuring the Data Lifecycle

The classical V-model [4], long established as the standard reference for complex mechatronic lifecycles, assumes that a system can be decomposed top-down into deterministic specifications, verified in isolation, and integrated bottom-up. This linear structure assumes a closed-world operational envelope. To accommodate the implicit, data-dependent nature of AI, we proposed the "Iterative Data-Based V-Model" [P3]. This process reference model formalizes the iterative transitions between the real-world operational space, virtual simulation environments, and continuous deployment loops.

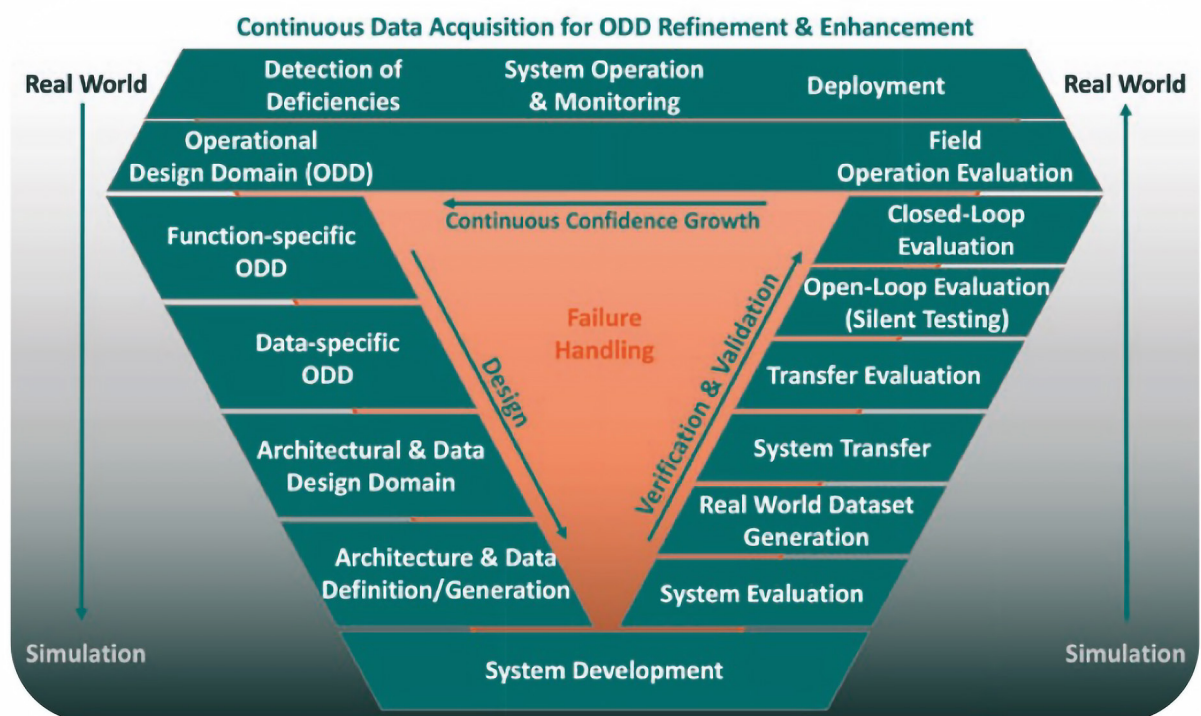


Figure 2: Iterative data-based V-model for the development and safety assurance of AI-enabled systems. Starting from the definition of the Operational Design Domain (ODD), the framework formalizes the closed-loop process between real-world operation and simulation, integrating data-driven development, verification, and validation. The iterative structure supports continuous system improvement and confidence building while addressing the challenges posed by complex AI-based systems operating in open-world environments.

A cornerstone of this model is the hierarchical decomposition of the Operational Design Domain (ODD) into three distinct, version-controlled specification layers:

- **System ODD:** The macro-level tier that defines the physical, environmental, and socio-political boundaries within which the automated vehicle is legally and functionally designed to operate. This serves as the top-level requirements specification. [P3]
- **Function-Specific ODD:** A top-down decomposition of the System ODD into localized requirements for specific subsystems. For example, the camera-based object detection subsystem is assigned a dedicated functional boundary that directly aligns with and inherits constraints from the overall System ODD, thereby minimizing functional specification uncertainties. [P3]
- **Data-Specific ODD:** This layer translates the function-specific requirements into concrete, quantifiable data specifications. It formally defines the volume, diversity, quality, and statistical distribution of the real-world and synthetic datasets required to train, verify, and validate the underlying machine learning models. [P3]

By making this translation explicit, the model establishes a continuous validation loop. When out-of-distribution (OOD) scenarios or edge cases are encountered during real-world operation, they are monitored, captured, and systematically fed back into the data-specific ODD. This triggers targeted synthetic data generation, virtual regression testing, and localized model fine-tuning. [P3]

Unlike conventional iterative methods that lack systems-engineering rigor, or highly empirical fleet-driven data loops that lack formal requirements tracking, the Iterative Data-Based V-Model bridges the gap. It harmonizes the structured, scenario-based virtual testing of initiatives like the German Verification Validation Methods (VVM) project [5] with the scalability of active continuous integration (CI) frameworks, along credibility building and safety determination of Waymo's Safety Framework [6], creating a traceable, engineering-grade data loop.

The AI Safety Assurance Triad and the "Data Control" Paradigm

Ensuring the safety of AI-integrated mechatronic systems requires proving that machine learning outputs remain valid, trustworthy, and explainable throughout the entire product lifecycle [P8]. In our work, we mapped this domain along a triad composed of technical research, industrial standardization, and legal regulation, emphasizing that these three pillars must evolve in parallel to prevent technological and regulatory fragmentation. [P2]

Our analysis [P2] further highlights the growing need for data-driven approaches to AI safety assurance that account for the inherent challenges of empirical AI systems, support lifecycle-wide safety assessment, and remain sufficiently technology-agnostic to accommodate future innovations. At the same time, it underscores the importance of open innovation, collaborative standardization efforts, and adaptive regulatory frameworks that facilitate continuous improvement while enabling safe technological progress. The study also identifies a fundamental paradigm shift from mathematically explicit systems toward data-driven, implicitly specified systems, requiring a corresponding evolution of system analysis and safety assurance methodologies.

To ground the safety analysis of these empirical systems in classical systems theory, we introduced the interdisciplinary “Data Control” paradigm [P5]. Rather than treating deep neural networks as isolated, static “black boxes,” Data Control interprets the underlying data-generating process (DGP) and its abstraction by AI systems through a system-theoretic and system-analysis-driven lens. This paradigm seeks to bridge the gap between performance-oriented, data-driven AI development and system-theoretic analysis focused on behavior, stability, and robustness.

A central focus of the Data Control paradigm [P5] is analyzing an AI system’s vulnerability to violations of the independent and identically distributed (i.i.d.) assumption under dataset shifts. By linking statistical dependencies to underlying causal relationships via Reichenbach’s Common Cause Principle, we demonstrate that causal structures, such as cause-effect relationships, yield conditional probabilities that remain invariant to input distribution shifts, such as covariate shift. This causal-graphical perspective provides a solid mathematical foundation for evaluating how well a learned model generalizes beyond its training distribution. [P5]

To formalize the analysis and evaluation of data-based AI signals and systems, we defined three central system properties:

- **AI Circumstance Robustness (AIC Robustness):** This property evaluates whether the statistical input-output relationship of the model remains invariant across different environmental or internal circumstances, such as sensor tolerances, noise, or weather conditions. It directly links the model’s robustness to a pre-specified set and range of operational conditions. [P5]
- **AI Circumstance Sensitivity (AIC Sensitivity):** This property captures the required responsiveness of non-stationary and dynamic AI systems. It defines how the statistical relationship changes in a pre-specified, controlled manner, measured by Kullback-Leibler divergence, when designated sensitivity factors vary beyond a specified threshold. [P5]
- **AI Dynamics Stability (AID Stability):** For dynamic AI systems, this property analyzes how the statistical relationship changes over time. Inspired by discrete-time Lyapunov stability, it uses the Kullback-Leibler divergence between consecutive time steps as a Lyapunov function candidate. This allows systems engineers to prove that the time-varying statistical divergence does not increase after a specific circumstance occurs, ensuring the system remains stable over its operational lifecycle. [P5]

By forcing the explicit documentation of assumptions, the Data Control paradigm provides a generic, application-agnostic framework for the formalized analysis, monitoring, and regulation of AI systems, enabling targeted diagnostics and continuous maintenance.

Control-Theoretic Trajectory Planning and Regional Scalability

At the physical execution layer, the core of our research focuses on trajectory planning and control optimization under strict physical and environmental constraints. Safe motion planning requires solving non-linear, non-convex optimization problems in fractions of a second. To resolve this, my thesis introduced three major control-theoretic advancements:

Robust Meta-Learning of Vehicle Dynamics

Vehicle parameters, such as tire-road friction, change dynamically due to weather, payload, or surface degradation. Traditional Model Predictive Control (MPC) relies on static physical parameters, which can lead to instability during sudden transitions. We developed an online adaptation method using Conditional Neural Processes (CNPs) [P9] that marries a nominal physical vehicle model with a data-driven error model. This hybrid formulation models the vehicle's dynamic state as a combination of a nominal physical model and a data-driven yaw rate dynamics component. The yaw rate dynamics is determined online by the Conditional Neural Process using a rolling window of recent state-action context history. This formulation allows the vehicle to safely adapt to highly hazardous surface conditions, such as black ice, within milliseconds, preventing loss of control while maintaining nominal actuator limits.

Stochastic Normalizing Flows for MPC Sampling

In highly complex, multi-modal environments, such as busy urban intersections, numerical optimization algorithms frequently become trapped in local minima. To guarantee path feasibility, we integrated Stochastic Normalizing Flows [7] into sampling-based model predictive trajectory planning. Normalizing Flows map a tractable, simple probability distributions, such as an isotropic Gaussian, to a complex, multi-modal trajectory distribution through a sequence of invertible, differentiable transformations. This process mathematically maps the simple probability density of the base distribution to a complex, multi-modal target trajectory space by scaling it with the absolute determinants of the Jacobians of the inverse transformations. By sampling directly from this learned, highly realistic flow, the trajectory planner can generate multiple distinct, collision-free path alternatives [P10], e.g., passing a stalled vehicle on the left versus waiting on the right, in under 20 milliseconds, which are subsequently refined by a low-level MPC optimization step.

Motion Transformer Transfer Learning

Predicting the future trajectories of surrounding traffic participants is crucial for proactive path planning. While deep-learning-based Motion Transformers [8] achieve high predictive accuracy, they are notoriously data-hungry and costly to train. We conducted a comprehensive transfer learning study demonstrating that a transformer model pre-trained on massive, generalized public datasets can be successfully adapted to highly specific local operational domains using minimal localized data [P7]. This transferability drastically reduces the data collection and computational overhead required to scale predictive models to new urban deployment areas across the globe.

Managing Regional Scalability

Even with robust physical control and predictive capabilities, deploying autonomous vehicles globally introduces socio-political, legal, and ethical challenges. Driving cultures, legal right-of-way interpretations, and ethical norms differ vastly across international boundaries.

To manage these regional variances, we proposed a two-stage scalability framework [P6]. In the first stage (Global Technical Stabilization), a high-performance, standardized baseline model is trained on global datasets to manage physical vehicle control, standard perception, and hard safety envelopes. In the second stage (Local Socio-Political Fine-Tuning), the baseline model's decision boundaries are adjusted using country-specific reward models [P6]. These reward models act as a digital configuration interface. Moreover, by altering the cost functions within the trajectory optimizer, the vehicle's driving style can be adapted, e.g., from an assertive, tight-merging style suited for dense Mediterranean traffic to a highly defensive, large-distance style required in northern Europe. Thus, to comply with local legal frameworks and cultural expectations without altering the underlying safety-critical software stack.

Industrial Systems Engineering: Interoperability and the Digital Thread

For the virtual product creation and PDM communities, transitioning these academic frameworks into industrial practice requires aligning them with open standards and configuration management (CM) guidelines [9]. Under the prostep ivip Smart Systems Engineering (SmartSE) guidelines, collaborative co-simulations between OEMs and suppliers should evaluate simulation credibility. This requires a clear separation of IP within shared models.

References

- [1] prostep ivip Association: Scientific Award. 2025. Available online: Scientific Award.
- [2] Endsley, M. R.: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: Human Factors 37.1 (1995), 32–64.
- [3] Hu, Y.; Yang, J.; Chen, L.; Li, K.; Sima, C.; Zhu, X.; Chai, S.; Du, S.; Lin, T.; Wang, W., et al.: Planning-Oriented Autonomous Driving. In: Proc. IEEE/CVF Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR). 2023, 17853–17862.
- [4] Bröhl, A.-P.: Das V-Modell: Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg, 1993.
- [5] Galbas, R.; Nolte, M.; Eberle, U.; Hungar, H.; Mosebach, H. H.; Salem, N. F.; Schittenhelm, H.; Reich, J.; Kirschbaum, T.; Westhofen, L.: VV Methods Safety Assurance Position Paper. PositionPaper.VVM Project Consortium. 2024.
- [6] Favaro, F.; Fraade-Blanc, L.; Schnelle, S.; Victor, T.; Peña, M.; Engstrom, J.; Scanlon, J.; Kusano, K.; Smith, D.: Building a Credible Case for Safety: Waymo's Approach for the Determination of Absence of Unreasonable Risk. In: arXiv preprint arXiv:2306.01917 (2023).
- [7] Papamakarios, G.; Nalisnick, E.; Rezende, D. J.; Mohamed, S.; Lakshminarayanan, B.: Normalizing Flows for Probabilistic Modeling and Inference. In: J. Mach. Learn. Res. 22.57 (2021), 1–64.
- [8] Shi, S.; Jiang, L.; Dai, D.; Schiele, B.: Motion Transformer with Global Intention Localization and Local Movement Refinement. In: Proc. 36th Int. Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS). 2022, 6531–6543.
- [9] prostep ivip Association: Product Data Journal. 2025. Available online: Product Data Journal.
- [10] Hedberg, T. D. Jr.; Krma, S.; Camelio, J. A.: Method for Enabling a Root of Trust in Support of Product-Data Certification and Traceability. In: J. Comput. Inf. Sci. Eng. 19.4 (2019), 1–33.

Using the Functional Mock-up Interface (FMI 3.0) and System Structure and Parameterization (SSP) standards, the physical, deterministic aspects of the vehicle can be packaged as model parameters, while the data-driven, neural components are isolated as model functions. This structural separation allows partners to exchange behavior models as Functional Mock-up Units (FMUs), protecting internal algorithmic IP while ensuring functional interoperability within the virtual testbench.

Furthermore, as the industry transitions from document-centric exchange to linked data spaces (e.g., Gaia-X), semantic interoperability becomes paramount. Standards like the Vehicle Electric Container (VEC) are being evolved into RDF-based ontologies. Unlike raw XML schemas that define only syntax, ontologies define both syntax and semantics, ensuring that downstream AI perception models can natively parse a vehicle's electrical and physical architecture without manual, error-prone translation.

To secure the digital thread of these complex configurations, product data management should implement robust, cryptographic traceability [10]. In highly regulated industries, virtual verification and validation cannot rely on siloed databases. By leveraging Public Key Infrastructure (X.509-PKI), digital signatures can be embedded directly into product data packages.

Within our proposed release workflow, each major milestone, such as the definition of a new Data-Specific ODD, the release of a synthetic validation dataset, or the approval of a neural trajectory planner, is cryptographically signed by the responsible engineering role. The Configuration Management (CM) system then cross-signs these packages, vouching for the entire multi-stage engineering review chain. This cryptographic chain of trust ensures that when an autonomous vehicle is deployed, downstream consumers and regulatory authorities can verify that the onboard software matches the certified simulation loop and is fully authorized for its operational domain [10].

Outlook: From Software-Defined Vehicles to Data-Defined Autonomy

As we look to the future of autonomous systems, the traditional software-centric paradigm must evolve. We must transition from Software-Defined Vehicles to Data-Defined Autonomy. In this new paradigm, the driving capabilities, safety profiles, and regional adaptability of an autonomous system are not determined by the complexity of its hand-written code, but by the completeness, quality, and structure of the data that shapes its implicit models.

Achieving this transition requires establishing data as a first-class engineering artifact through the Interactive Data-Based V-Model [P3]. This means that data can no longer be treated as a transient, operational input. Instead, datasets, training distributions, and ODD boundary definitions should be managed with the same structural rigor, version control, change-management loops, and cryptographic traceability as physical hardware components.

By embedding these data specifications natively into PLM and configuration management systems, linked via open standards like STEP AP242, ReqIF, and FMI 3.0, the systems engineering community can build a secure, continuous, and scalable digital thread. The 2026 prostep ivip Scientific Award underscores the vital importance of this intersection between control theory, machine learning, and systems engineering. Through these unified frameworks, we pave the way for a future of intelligent, safe, and truly scalable autonomy.

Own Publications

- [P1] Ullrich, L.: Towards Intelligent, Safe, and Scalable Autonomy: A Study Driven by Trajectory Planning for Automated Vehicles. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany. DOI : 10.25593/open-fau-2326 (2025).
- [P2] Ullrich, L.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.; Graichen, K.: AI Safety Assurance for Intelligent Vehicles: A Survey on Research, Standardization, Regulation. In: IEEE Trans. Intell. Veh. (2024).
- [P3] Ullrich, L.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.; Graichen, K.: Expanding the Classical V-Model for the Development of Complex Systems Incorporating AI. In: IEEE Trans. Intell. Veh. (2024).
- [P4] Ullrich, L.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.; Graichen, K.: Toward Fully Autonomous Driving: AI, Challenges, Opportunities, and Needs. In: IEEE Access 14 (2026).
- [P5] Ullrich, L.; Zimmer, W.; Greer, R.; Graichen, K.; Knoll, A.; Trivedi, M.: A New Perspective On AI Safety Through Control Theory Methodologies. In: IEEE Open J. Intell. Transp. Syst. (2025).
- [P6] Ullrich, L.; Buchholz, M.; Petit, J.; Dietmayer, K.; Graichen, K.: A Concept for Efficient Scalability of Automated Driving Allowing for Technical, Legal, Cultural and Ethical Differences. In: IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC). 2025, 2663-2670.
- [P7] Ullrich, L.; McMaster, A.; Graichen, K.: Transfer Learning Study of Motion Transformer-based Trajectory Predictions. In: IEEE Intell. Veh. Symp. Proc. (IV). 2024, 110-117.
- [P8] Ullrich, L.; Mujirishvili, Z.; Graichen, K.: Enhancing System Self-Awareness and Trust of AI: A Case Study in Trajectory Prediction and Planning. In: IEEE Intell. Veh. Symp. Proc. (IV). 2025, 110-117.
- [P9] Ullrich, L.; Völz, A.; Graichen, K.: Robust Meta-Learning of Vehicle Yaw Rate Dynamics via Conditional Neural Processes. In: Proc. 62nd IEEE Conf. Decis. Control (CDC). 2023, 2611-2619.
- [P10] Rabenstein, G.; Ullrich, L.; Graichen, K.: Sampling for Model Predictive Trajectory Planning in Autonomous Driving using Normalizing Flows. In: Proc. 35th IEEE Intell. Veh. Symp. Proc. (IV). 2024, 2091-2096.
- [P11] Kempen, R. van; Lampe, B.; Leuffen, M.; ...; Ullrich, L.; Graichen, K., et al.: AUTotech.agil: Architecture and Technologies for Orchestrating Automotive Agility. In: Proc. 32nd Aachen Colloquium Sustainable Mobility. 2023.

Dr. Lars Ullrich
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Erlangen Nürnberg
Senior Scientist
(Research Lead: Safe Physical AI)
lars.ullrich@fau.de



Kontakt

Live Collaboration in Engineering (LCE): **Die Evolution der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im Engineering**

Dr. Jakob Trauer, Jessica Kos, Dr. Sebastian Schweigert-Recksiek (sem engineering methods AG)
Dr. Sebastian Handschuh (Mercedes-Benz AG)
Peter Gerber (Schaeffler Technologies AG & Co. KG)

Heute erfolgt der unternehmensübergreifende Informationsaustausch im Engineering vielfach noch asynchron, dateibasiert und ohne ausreichende Transparenz über Reifegrad, Verantwortlichkeiten oder Kontext. Die Projektgruppe Collaborative Digital Twins (CDT) hat in den vergangenen drei Jahren wichtige methodische und technische Grundlagen für eine unternehmensübergreifende, synchrone Zusammenarbeit im Engineering geschaffen - wie beispielsweise User Journeys, Glossary, Ontologien bis hin zu einer Sandbox-Implementierung eines Datenraums, in dem ein POC zum Austausch von Anforderungsinformationen erfolgreich umgesetzt wurde.

Mit dem Abschluss des CDT-Projekts Ende 2025 wurde der Startpunkt für die neue Projektgruppe Live Collaboration in Engineering (LCE) gelegt, die Anfang 2026 ihre Arbeit aufgenommen hat. LCE führt die Ergebnisse von CDT nicht nur fort, sondern entwickelt sie weiter, um unternehmensübergreifende synchrone Kollaboration entlang des gesamten Produktentwicklungszyklus zu ermöglichen. Anstatt Dokumente asynchron auszutauschen, sollen zukünftig relevante Daten synchron vernetzt werden. Ziel von LCE ist somit ein durchgängig vernetztes Engineering Realität werden zu lassen, von der frühen Anforderungsdefinition über die Systemarchitektur und Simulation bis hin zu Integration und Testing und darüber hinaus.

Von kollaborativen Digitalen Zwillingen zu echtzeitfähiger Zusammenarbeit im Engineering

Mit der neuen Initiative Live Collaboration in Engineering (LCE) wird die in CDT entwickelte Vision weitergeführt. LCE hat das Ziel die Grundlagen, für eine synchronisierte und föderierte Echtzeit-Zusammenarbeit entlang des gesamten V-Modells zu schaffen. Im Mittelpunkt steht dabei die Weiterentwicklung der CDT-Ergebnisse hin zu einem Konzept für vernetzte Engineering-Prozesse.

Im Rahmen des CDT-Projekts wurden zwischen 2023 und 2025 zentrale methodische und technische Grundlagen für eine unternehmensübergreifende, synchrone Zusammenarbeit erarbeitet. Zu den wichtigsten Ergebnissen zählen ein umfassendes, harmonisiertes Glossar mit über 130 Begriffen, abgestimmte Ontologien für verschiedene Engineering Domänen sowie detaillierte User Journeys zur Beschreibung praxisnaher Kollaborationsszenarien. Ergänzt wurden diese Konzepte durch eine generische, DT-ready IT-Architektur, die mit Dataspace Technologien kompatibel ist.



Bild 1: prostep ivip Symposiumsvortrag „Collaborative Digital Twins – Enabling Live Collaboration in Engineering: Project Results, Collaboration with Catena-X & Way Forward“.

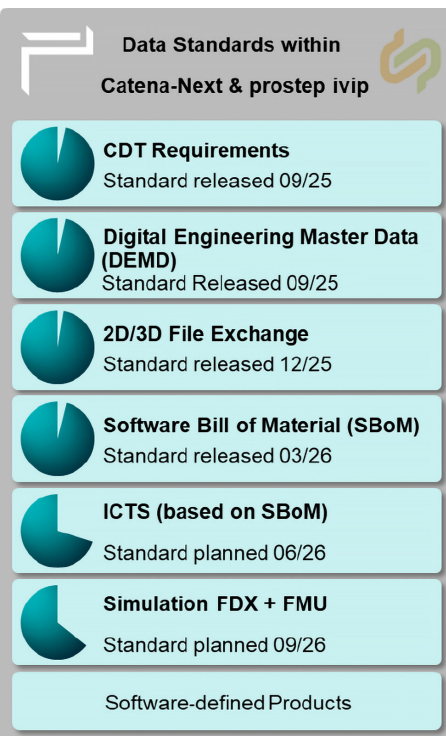


Bild 2: Veröffentlichte Standards

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurde ein Demonstrator umgesetzt, der zeigt, wie Anforderungsdaten synchron, souverän und ohne dateibasierten Austausch zwischen mehreren Partnern ausgetauscht werden können. So können einzelne Anforderungen punktbasiert zwischen unterschiedlichen, heterogenen IT-Landschaften ausgetauscht werden.

Diese Ergebnisse wurden auf dem prostep ivip Symposium 2026 von der Projektleitung Dr. Sebastian Handschuh (Mercedes-Benz AG) und Peter Gerber (Schaeffler AG) vorgestellt. Dort wurde anhand des CDT-Demonstrators gezeigt, wie durch das entwickelte Framework der Anforderungsaustausch von einigen Tagen auf wenige Sekunden verkürzt werden kann. Dies verdeutlichte den Mehrwert semantisch harmonisierter Datenmodelle und föderierter IT-Architekturen. Nicht nur kann die Entwicklungszeit deutlich reduziert werden, sondern auch Datenqualität, -verfügbarkeit, und -sicherheit werden verbessert.

Einen vertiefenden Einblick in die Ergebnisse des CDT-Projekts bietet zudem das begleitende CDT-Projektvideo (https://www.youtube.com/watch?v=LvFL_-XKhqM), das die Zielsetzung, Architektur und Umsetzung des Demonstrators anschaulich darstellt.

Die Projektgruppe LCE baut auf diesen Ergebnissen auf. Ein zentraler Enabler dafür ist die Verfügbarkeit einheitlicher und interoperabler Datenstandards. Aufbauend auf den Ergebnissen der Projektgruppe CDT und in Abstimmung mit Catena X wurden in den vergangenen Monaten mehrere relevante Standards veröffentlicht bzw. vorbereitet (Bild 2: Veröffentlichte Standards).

Mit CDT Requirements, Digital Engineering Master Data (DEMD), 2D/3D File Exchange sowie der Software Bill of Material (SBOM) stehen bereits zentrale Standards für den unternehmensübergreifenden Austausch von Engineering Informationen zur Verfügung. Sie adressieren wesentliche Datenarten entlang des Produktlebenszyklus – von Anforderungen über Geometrie und Stammdaten bis hin zu softwarebezogenen Informationen.

Darüber hinaus sind weitere Standards in Arbeit deren Veröffentlichung im Laufe des Jahres 2026 vorgesehen ist. Damit wird die Grundlage geschaffen, Live Collaboration schrittweise auf zusätzliche Engineering Disziplinen auszuweiten und software definierte Produkte ganzheitlich zu unterstützen.

Projektstart der Projektgruppe „Live Collaboration in Engineering“ (LCE)

Anfang März 2026 fand der erste Onsite-Workshop der neuen Projektgruppe in Darmstadt statt (Bild 3: Erster onsite Workshop der Projektgruppe Live Collaboration in Engineering (LCE) Ende März 2026 in Darmstadt). 22 Vertreter*innen aus 14 Unternehmen und Organisationen arbeiteten in interaktiven Sessions an drei zentralen Schwerpunkten:



Bild 3: Erster Onsite-Workshop der Projektgruppe Live Collaboration in Engineering (LCE) Ende März 2026 in Darmstadt

1. Schärfung der Vision und Mission

Im ersten Schritt wurde die gemeinsame Zielsetzung von LCE weiter präzisiert. Die Gruppe diskutierte, was „Live Collaboration“ im industriellen Engineering konkret bedeutet und welche Formen synchroner Zusammenarbeit dafür notwendig sind. Dabei spielte die Diskussion über geeignete Echtzeitgrade, Anforderungen an Datenqualität sowie klare Verantwortlichkeiten für geteilte Informationen eine zentrale Rolle.

2. Sammlung und Priorisierung von Use Cases

Anschließend wurden vielfältige Use Cases aus unterschiedlichen anderen Projektgruppen und Initiativen entlang des V-Modells vorgestellt. Auf dieser Basis einigte sich die Projektgruppe darauf, zunächst jene Prozesse zu priorisieren, die den größten fachlichen Nutzen und die stärkste Hebelwirkung versprechen – insbesondere Collaborative Simulation, Integration & Test sowie System Engineering.

3. Arbeitsmodus und Schnittstellen

Abschließend wurden die geplante Arbeitsweise der Projektgruppe sowie die Struktur der Arbeitspakete konkretisiert. Die Teams stellten ihre Roadmaps und erwarteten Deliverables vor. Darüber hinaus wurden relevanten Schnittstellen identifiziert, um den Austausch von Ergebnissen und Anforderungen zwischen den Arbeitspaketen zu gewährleisten.

Die Projektgruppe LCE ist in vier Arbeitspakete gegliedert, die gemeinsam den methodischen, organisatorischen und technischen Rahmen schaffen:

Arbeitspaket 0: Organisation & Strategic Networking

Dieses Arbeitspaket verantwortet die übergeordnete Koordination, die Harmonisierung der Vision und die Formulierung des Business Value von LCE. Zudem organisiert es den Austausch mit anderen prostep ivip-Projekten

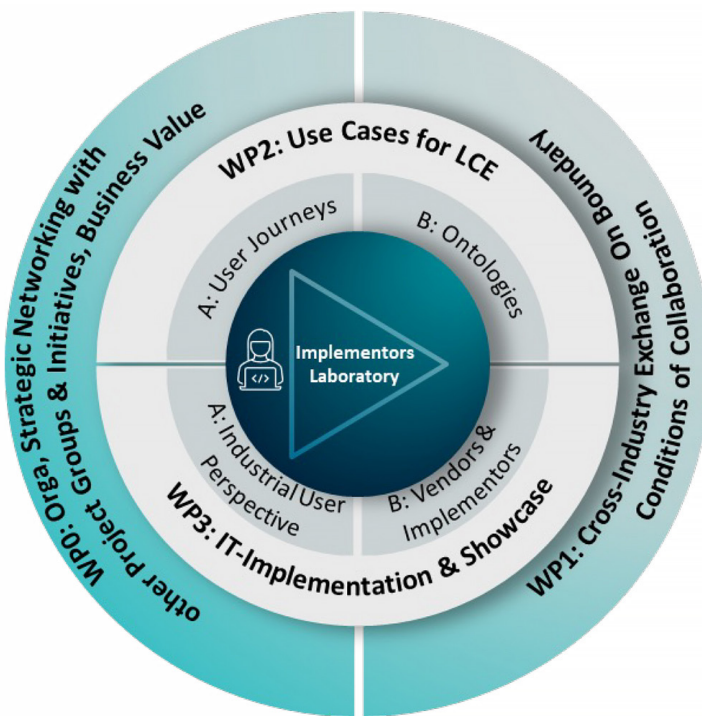


Bild 4: LCE Arbeitspaketstruktur

und externen Initiativen wie Catena-X, DDP, SmartSE, FAICE oder HAIViSH. Die Erstellung von Publikationen und die Vorbereitung von Beiträgen für Formate wie das prostep ivip Symposium gehören ebenfalls zu seiner Aufgabe.

Arbeitspaket 1: Cross-Industry Exchange on Boundary Conditions

Dieses Arbeitspaket adressiert industrieübergreifend rechtliche, organisatorische und prozessuale Rahmenbedingungen. Dazu gehören Fragen zu Datenhoheit, Governance-Modellen und Lieferkettenintegration. Durch regelmäßige „Walk-In Sessions“ werden Fragen aus den technischen Arbeitspaketen gesammelt, diskutiert und in Empfehlungen überführt.

Arbeitspaket 2: Use Cases for LCE

Dieses Arbeitspaket bildet den fachlichen Kern von LCE. In einer Kombination aus User-Journey-Perspektive (Projektteil A) und Ontologie-Perspektive (Projektteil B) werden Use Cases harmonisiert, priorisiert und hinsichtlich Live Collaboration neu ausgestaltet. Bestehende Ontologien aus DDP, Catena-X und weiteren Quellen werden auf LCE-Bedarf hin analysiert, Lücken identifiziert und Vorschläge für Weiterentwicklungen erstellt. Als erster Anwendungsfall wurde die unternehmensübergreifende Co-Simulation ausgewählt.

Arbeitspaket 3: IT-Implementation & Showcase

Dieses Arbeitspaket verantwortet die technischen Anforderungen und die Implementierung. Ziel ist es, einen LCE-Demonstrator zu entwickeln, der den Mehrwert synchroner Kollaboration anhand eines priorisierten Use

Cases sichtbar macht. Die technische Architektur beschreibt sowohl Implementierungsoptionen als auch Empfehlungen für eine interoperable Umsetzung in realen Unternehmensumgebungen.

Ausblick

Die nächsten Meilensteine sind die Finalisierung der Roadmaps und die Ausarbeitung konkreter Implementierungsanforderungen für den LCE-Demonstrator. Zusammenfassend zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass virtuelle Datenräume echte synchrone unternehmensübergreifende Zusammenarbeit im Engineering ermöglichen. Der Übergang vom dateibasierten Austausch hin zur Kollaboration auf semantisch eindeutig beschriebenen Daten stellt die Grundlage für Effizienz, Qualität und Sicherheit dar.

Mit LCE entsteht eine zukunftsweisende Projektgruppe, die den Weg hin zu einer dynamischen, interoperablen und gleichzeitig souveränen Engineering-Zusammenarbeit bereitet und damit einen zentralen Baustein für die nächste Generation digitaler Produktentstehung legt.

Interessierte Unternehmen und Organisationen sind herzlich eingeladen, sich aktiv an der Projektgruppe Live Collaboration in Engineering (LCE) zu beteiligen. Wenn Sie Teil der Initiative werden und die nächsten Schritte hin zu synchroner, unternehmensübergreifender Engineering Zusammenarbeit mitgestalten möchten, füllen Sie gerne die LCE Member Survey aus (<https://forms.office.com/e/0swuGG8qJA>), oder kontaktieren Sie uns direkt.

Weitere Informationen zur Projektgruppe Live Collaboration in Engineering (LCE) sind auf der offiziellen Projektseite des prostep ivip Vereins verfügbar: <https://www.prostep.org/projekte/live-collaboration-in-engineering-lce>



Kontakt

Projektpate
Peter Gerber
SCHAEFFLER
peter.gerber@schaeffler.com



Kontakt

Projektpate
Dr. Sebastian Handschuh
Mercedes-Benz AG
sebastian.handschuh@mercedes-benz.com



Kontakt

Projektkoordinator
Dr. Jakob Trauer
:em engineering methods AG
jakob-trauer@em.ag

Den Digital Thread mithilfe von Standards zusammenführen

Asa G. Trainer, Trainer Engineering Associates
Thomas R. Thurman, TRThurman Consulting
Jochen Boy, PROSTEP AG

Das CAx Interoperability Forum (CAx-IF)

Im Rahmen des übergeordneten Model-Based „x“ Interoperability Forums (MBx-IF), das gemeinsam von PDES, Inc. (USA), AFNeT (Frankreich) und dem prostep ivip Verein getragen wird, unterstützt das CAx-IF die Einführung von STEP AP242 [1] und konzentriert sich auf 3D Geometrie, die mit semantischen Eigenschaften wie Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI – Product & Manufacturing Information) angereichert ist.

Sowohl die Anwender als auch die Implementierergruppe des Forums zählen jeweils rund ein Dutzend Mitgliedsunternehmen. Dazu gehören auf der einen Seite Hersteller und Zulieferer aus der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie und auf der anderen Seite CAD-Systemanbieter sowie Entwickler von CAD-Konvertern und Validierungssoftware. Das Forum kann bereits auf eine lange Erfolgsgeschichte zurückblicken, die bis ins Jahr 1999 reicht, als PDES, Inc. und prostep ivip ihre jeweiligen Aktivitäten bündelten und die erste gemeinsame Testrunde (Round 1J, mit „J“ für „joint“) durchführten. Die 57. gemeinsame Testrunde (R57J) wurde im März 2026 mit einem Treffen in Charleston, South Carolina, USA, abgeschlossen.

Hauptziel des Forums ist es, Industrieanforderungen zu sammeln, Vorgehensweisen zur Abbildung der benötigten Informationen auf den STEP Standard in sogenannten „Recommended Practices“ zu entwickeln und zu dokumentieren, bei Bedarf Abstimmungen mit den Standardisierungsgremien bei ISO vorzunehmen und schließlich das Datenmodell, die vereinbarten Vorgehensweisen und die Software-Implementierungen der Anbieter in den Testrunden zu validieren. Anwender profitieren dadurch von einem bei Veröffentlichung validierten Standard sowie von robusten, interoperablen Softwareprodukten. Für Softwareanbieter dient das Forum als Inkubator, der Implementierungszyklen deutlich verkürzt und gleichzeitig die Produktqualität durch umfassende Tests vor der Markteinführung erhöht.

Warum Persistente IDs in STEP?

Ein robuster Digital Thread erfordert, dass jedes Feature, jede Toleranz, jedes Bezugselement und jedes operative Element aus der Konstruktion seine Identität über Fertigung, Inspektion und Nutzung hinweg beibehält. Bleibt diese Identität über alle Übersetzungen und Rücktransformationen hinweg erhalten, profitieren Unternehmen von kürzeren Markteinführungszeiten, weniger Nacharbeit in der Produktion und der Möglichkeit, bei Ausfällen im Betrieb fundierte Ursachenanalysen durchzuführen.

Vor allem die Luft- und Raumfahrt, Verteidigungs- und Automobilindustrie treiben diese Entwicklung voran, doch die Anforderung ist universell: Jedes Element benötigt eine eindeutige, autoritative Kennung, die über Werkzeuge, Versionen und über Jahrzehnte des Produktlebenszyklus hinweg bestehen bleibt.

Mehrere Communities befassen sich aus unterschiedlichen Perspektiven mit dieser Herausforderung – unter anderem MBSE, MTConnect, das PDM-IF und das CAX-IF. Dieser Artikel konzentriert sich auf die Arbeiten im Persistent ID (PID) Projekt von PDES, Inc., das eng mit dem CAX-IF verzahnt ist und STEP AP242 als maßgeblichen Träger dieser Identifikatoren adressiert. Dargestellt werden die bereits erzielten Ergebnisse, bestehende Lücken sowie die Planungen für die nächsten 12 bis 18 Monate. Die grundlegenden Forschungsergebnisse sind in NIST AMS 300 12 dokumentiert [2].

Domänenübergreifender Austausch mit nachgelagerten Systemen

Im Januar 2026 veröffentlichten das CAX-IF und das Digital Metrology Standards Consortium (DMSC) die „Recommended Practices for Cross Domain Exchange for Downstream Uses“, Release 1.0 [3]. Diese Empfehlung beschreibt, wie UUIDs aus STEP AP242 in das Quality Information Framework (QIF) übernommen werden, sodass Geometrie, PMI und Messergebnisse entlang der Kette Konstruktion → Planung → Messung → Ergebnis miteinander verknüpft bleiben.

STEP Exporte verwenden hierzu das V5_UUID_ATTRIBUTE, während QIF denselben Identifikator über EntityExternalIds beibehält. Das Ergebnis ist eine bidirektionale Rückverfolgbarkeit, die sowohl eine Vorwärtsprüfung der Designabdeckung als auch eine rückwärtige Ursachenanalyse ermöglicht, wenn ein Messergebnis außerhalb der Toleranz liegt.

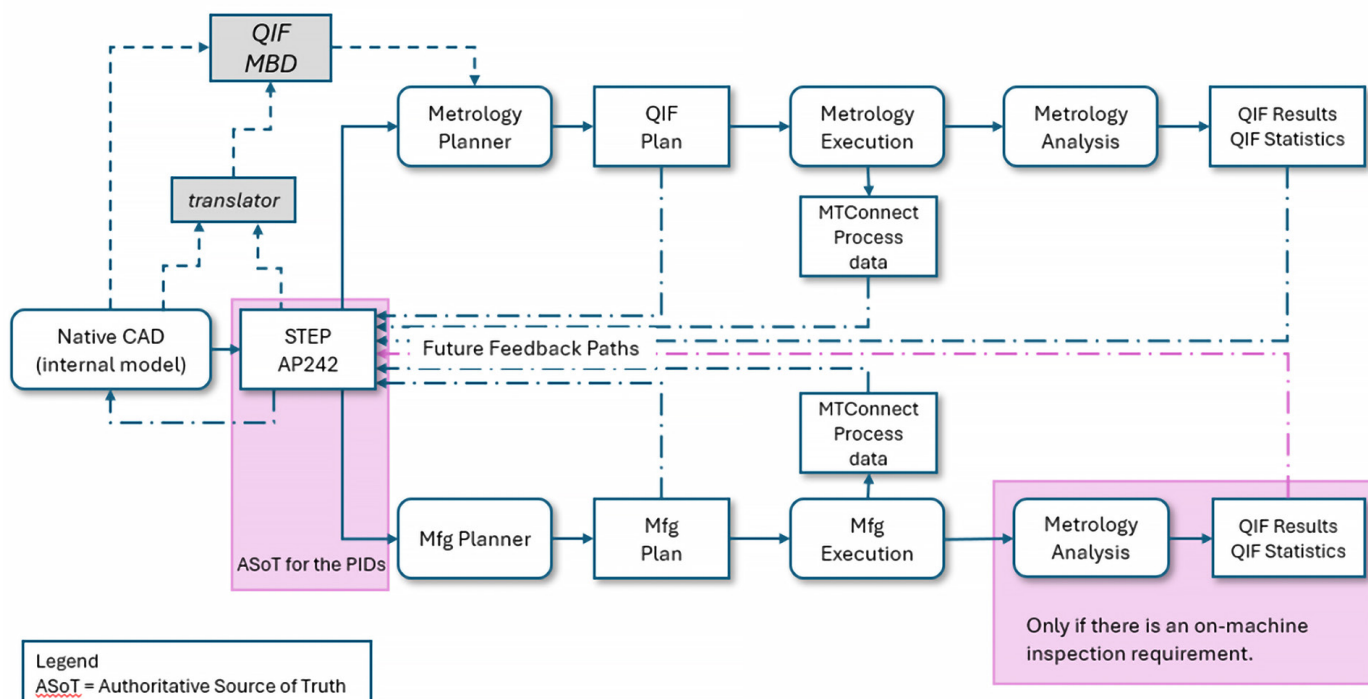


Bild 1: Informationsfluss von der Entwicklung in die nachgelagerten Prozesse (aus [3]).

Zwischen den Tests im CAX-IF und im PID-Projekt konnte die vollständige Rückverfolgbarkeit von gemessenen Merkmalen in QIF-Ergebnissen bis hin zu den entsprechenden STEP Features mit ihren Konstruktionsmerkmalen (PMI) nachgewiesen werden. Dadurch wird ein automatisierter, domänenübergreifender Datenaustausch möglich, der eine eindeutige Identifikation von Fertigungsfehlern – etwa durch Werkzeugverschleiß – oder die Ableitung notwendiger Konstruktionsanpassungen zur Verbesserung des Produktionsprozesses erlaubt. Ziel ist es, diese Fähigkeiten künftig auch auf die Verknüpfung von Anforderungen aus dem modellbasierten Systems Engineering sowie auf gezielte Beobachtungen aus Felddausfallanalysen auszuweiten. Derzeit beschränkt sich dieser Ansatz allerdings auf den Maschinenbaubereich.

Der hier beschriebene domänenübergreifende Austausch bewegt sich somit innerhalb der Teildomänen des Maschinenbaus, in denen ein gemeinsames ingenieurstechnisches Grundverständnis vorhanden ist. Somit können unterschiedliche Repräsentationen derselben Daten behandelt werden. Informationsaustausch zwischen dem mechanischen und dem Elektrik-/Elektronikbereich ist derzeit nicht das Ziel. Dies erscheint zwar grundsätzlich möglich, erfordert jedoch weiterführende Forschung zur Bewertung von Machbarkeit und Nutzen.

Fortschritte im CAX-IF

In den letzten Testrunden des CAX-IF wurden kontinuierliche Fortschritte erzielt. Die PID Recommended Practice v1.8 [4] beschreibt die Erzeugung und Nutzung von Persistenten IDs für Design Iteration (PDI) und nachgelagerte Nutzung (PDC). Die Cross Domain Exchange Empfehlung [3] adressiert den Austausch zwischen STEP und QIF. In der Testrunde 55J wurde die Funktionalität grundsätzlich etabliert und in R56J der Abdeckungsgrad erweitert. Die jüngste Runde 57J (September 2025 – März 2026) bestätigte die bidirektionale Rückverfolgbarkeit sowohl für PMI und die assoziierten Features und Geometrien in STEP als auch über Merkmalsresultate und zugehörige Features in QIF.

In Runde 57J konnte beim Datenaustausch via STEP für das PDI-Szenario eine Gesamterfolgsquote von 97 % (75 Dateien, 160 Ergebnisse, sechs Anbieter) erzielt werden. Für PDC waren es 76 % (14 Dateien, 18 Ergebnisse, fünf Anbieter). Der Testfall CDE – der erste systematische STEP-zu-QIF Round Trip – erreichte 77 % (sieben Dateien, sieben Ergebnisse, vier Anbieter). Über alle Testzyklen hinweg ist ein klarer Aufwärtstrend erkennbar, der die zunehmende Reife der Implementierungen gemäß den Recommended Practices widerspiegelt. Die steigende Beteiligung unterstreicht das große Interesse an der Unterstützung für Persistente IDs und bestätigt die Rolle des CAX-IF als wirkungsvoller Inkubator für neue STEP Funktionen.

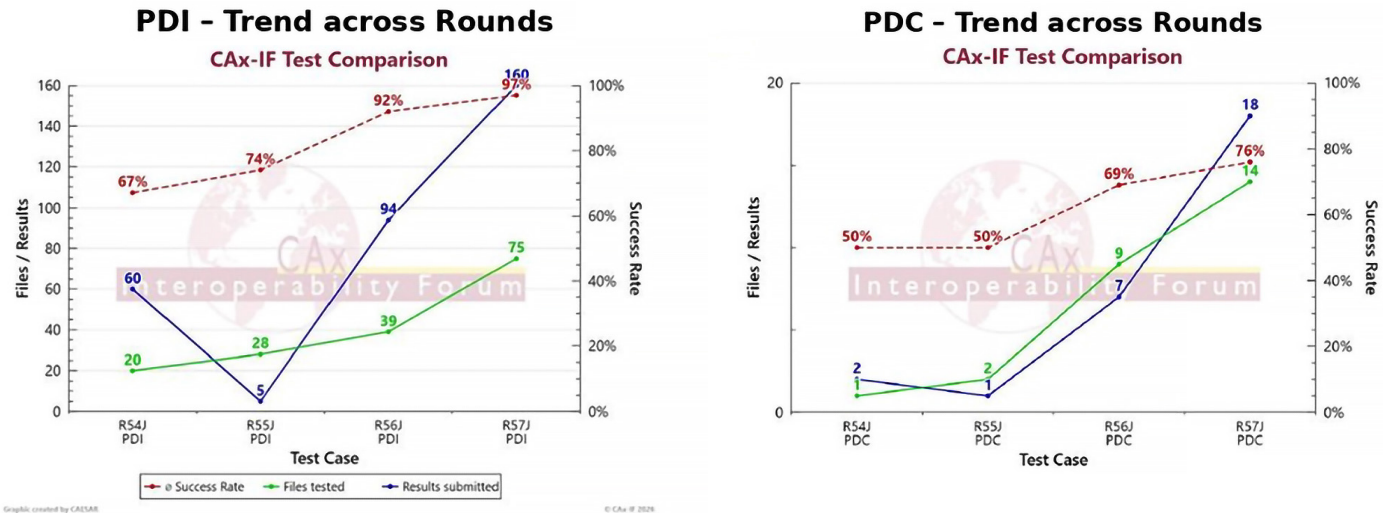


Bild 2: CAX-IF Testergebnisse: Trendkurven für die Runden 54J–57J, für die Testfälle PDI und PDC.

Wie geht es weiter?

Trotz der erreichten Dynamik bestehen weiterhin Lücken. Die meisten sollen im Rahmen der Entwicklung von AP242 Edition 5 sowie des begleitenden CAX-IF Testprogramms geschlossen werden

- Bill of Operational Features (BOF) [5] – eine Planungssicht auf das Produkt mit detaillierten Eigenschaften zu jedem operativen Feature und UUID Verknüpfungen zurück zur Konstruktionssicht.
- Modellbasierte Notizen – strukturierte Modelle mit eingebetteten Dokument, Attribut und PMI Referenzen sowie integrierten Konformitätsspezifikationen.
- Parametrische PMI-Vorlagen – eine eigenständige Repräsentation von Gewinden, Schweißnähten und Positionsnummern.
- Rückführung von Messergebnissen in die Konstruktion – Nutzung des Datentyps „Observation“, um konstruktionsrelevante Erkenntnisse aus der Inspektion (z. B. unerwartete Grate) weiter zu reichen.

Die Planungen des CAX-IF für die kommenden Testrunden umfassen unter anderem:

- Einführung von BOF „Collection“-Konzepten in Part 21 Dateien im Rahmen der Weiterentwicklung Recommended Practices,
- Einführung modellbasierter Notizen und parametrischer PMI Templates über Entwurfs-Datenschema für AP242 Edition 5 und neue Recommended Practices,

- Integration von Feedback aus der Messtechnik in die Konstruktion,
- Fortgesetzte Tests von BOF, modellbasierter Notizen, parametrischer PMI Templates und Feedback,
- Integrierte PID Tests zwischen Domain Model XML und Part 21 Dateien,
- Integrierte PID Tests zwischen MBSE Modellen und Part 21 Dateien.

Gemeinsam führen diese Schritte den Digital Thread von einem reinen Demonstrator zwischen Konstruktion und Inspektion hin zu einer vollständig integrierten, multidomänenfähigen Lösung – zusammengehalten durch persistente Identifikatoren und die sie tragenden Standards. Diese automatisierten Verknüpfungen zwischen Produktdaten unterschiedlicher Domänen ermöglichen eine klare, eindeutige Kommunikation zwischen allen Beteiligten im Digital Thread. Erwartet werden dadurch kürzere Entwicklungszeiten, weniger Nacharbeit und gezielte Rückmeldungen aus der Analyse von Wartungsfällen.

Quellen

- [1] ISO 10303-242:2025, Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering, Edition 4, August 2025.
- [2] T.R. Thurman, A.G. Trainer, A. Barnard Feeney, R. Astheimer, M. Hardwick, M. Hedlind, Research Results and Recommendations for Universally Unique Identifiers in Product Data Standards, NIST AMS 300-12, July 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.300-12>
- [3] Recommended Practice for Cross-Domain Exchange for Downstream Uses, Release 1.0, CAx Interoperability Forum and DMSC, 29 January 2026.
- [4] Recommended Practice for Persistent IDs for Design Iteration and Downstream Exchange, Release 1.8, CAx Interoperability Forum, 13 March 2026.
- [5] Recommended Practice for Bill of Operational Features, DRAFT Release 0.7, CAx Interoperability Forum, 15 April 2026.
- [6] PDES, Inc., 2026 Technology Roadmap – AP242 Edition 5 Plan (Roundtable Presentation, March 2026, Charleston, SC).



Kontakt

Asa G. Trainer
Trainer Engineering Associates
agtrainer@comcast.net



Kontakt

Thomas R. Thurman
TRThurman Consulting
thomas@trthurman.consulting



Kontakt

Jochen Boy
PROSTEP AG
jochen.boy@prostep.com

Cloud-native DevOps im Automotive Engineering: **Wie Cloud-Infrastrukturen und Security-by-Design die SDV-Entwicklung transformieren**

Michele Del Mondo, PTC

Cloud-native DevOps-Plattformen werden zum zentralen Enabler für die Entwicklung von Software-Defined Vehicles. Mit der zunehmenden Software-zentrierung von Fahrzeugen benötigen OEMs und Zulieferer skalierbare, sichere und durchgängige Entwicklungsumgebungen, die Continuous Integration, Compliance und Security-by-Design unterstützen. Der Beitrag zeigt, wie Cloud-Infrastrukturen, Application Lifecycle Management und automatisierte Validierung helfen, Entwicklungszyklen zu beschleunigen, regulatorische Anforderungen zu erfüllen und Vertrauen in sicherheitskritische Automotive-Software zu schaffen.



Bild 1: Cloud-native Infrastrukturen schaffen die Grundlage für skalierbare und vernetzte Entwicklungsumgebungen in der Software-Defined Vehicle-Entwicklung. © PTC

Software-Defined Vehicles (SDV) verlangen nach neuen Entwicklungsprinzipien. Cloud-native DevOps-Plattformen und integrierte Security-Strategien sorgen nicht nur für Geschwindigkeit, sondern auch für Vertrauen in sicherheitskritischen Umgebungen.

Moderne Fahrzeuge sind keine Maschinen mehr, sondern digitale Plattformen auf Rädern. Mit vielen Millionen Zeilen Code ist die Software das neue Differenzierungsmerkmal. Das stellt OEMs und Tier-1-Zulieferer vor grundlegende Herausforderungen in der Entwicklungslogik: Statt starrer Entwicklungszyklen und lokaler Toolchains braucht es flexible, skalierbare und sichere Cloud-native Umgebungen. Die Fähigkeit, komplexe Systeme mit hoher Änderungsdynamik sicher zu betreiben und zu pflegen, entscheidet zunehmend über den Markterfolg.

Neue Architektur, neue Anforderungen

Software-Defined Vehicles folgen zentralisierten E/E-Architekturen mit leistungsstarken Zentralrechnern. Damit steigen die Anforderungen an dynamische Updates, Funktionsentkopplung und systematische Wiederverwendung. Gleichzeitig fordern Regularien wie ISO/SAE 21434, ASPICE oder UNECE R155 eine lückenlose Dokumentation, sichere Entwicklungsprozesse und umfassendes Risikomanagement.



Bild 2: Software-Defined Vehicles erhöhen Sicherheit und Nutzerkontrolle durch intelligente, datengetriebene Assistenzsysteme. © PTC

Diese regulatorischen Anforderungen machen es erforderlich, dass Sicherheitsaspekte bereits in den frühesten Phasen des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden. Eine mangelnde Integration von Sicherheitsvorgaben in der Architekturphase kann später zu kostspieligen Nacharbeiten, Verzögerungen bei der Zulassung oder sogar zu Produktrückrufen führen. Auch die Absicherung der Lieferkette rückt verstärkt in den Fokus: Jede Komponente muss nachvollziehbar, überprüfbar und sicher integrierbar sein.

Cloud-native DevOps als Antwort auf Komplexität und Geschwindigkeit

Cloud-basierte DevOps-Plattformen bilden das methodische Rückgrat für SDV-Entwicklung: Continuous Integration und Continuous Delivery (CI/CD) mit integrierten Security-Scans, automatisierte Compliance-Prüfungen, skalierbare Testumgebungen – das alles sorgt für Effizienz, Sicherheit und Transparenz. Anbieter wie PTC unterstützen diese Prozesse mit Lösungen, die speziell auf die Anforderungen der Automobilbranche zugeschnitten sind. Die Cloud erlaubt dabei nicht nur schnellere Entwicklungszyklen, sondern auch einen reibungslosen Wechsel zwischen Entwicklung, Testing und Deployment.

Ein Beispiel: Statt längere Release-Zyklen lokal zu bauen und zu validieren, können globale Teams in einer einheitlichen Umgebung entwickeln, testen und ausrollen. Das reduziert Time-to-Market drastisch, senkt Fehlerquoten und verbessert die Softwarequalität nachhaltig. CI/CD-Pipelines sorgen dafür, dass jede Codeänderung sofort getestet, validiert und bei Bedarf in Echtzeit ausgeliefert werden kann. Die Integration von Feature-Toggles ermöglicht zudem rollierende Updates, bei denen neue Funktionen schrittweise ausgerollt und bei Bedarf zurückgenommen werden können.

Security-by-Design: Sicherheit beginnt bei der Architektur

Spätestens mit der UNECE-Regelung R155 ist die ISO/SAE 21434 zur regulatorischen Realität geworden. In der Praxis bedeutet das: Security muss frühzeitig mitgedacht und methodisch im Entwicklungsprozess verankert werden. Cloud-native ALM-Plattformen wie Codebeamer unterstützen mit eingebautem Requirements-Management, automatisierten Risikobewertungen und Audit-Trails. So lassen sich Sicherheitsanforderungen modellbasiert steuern, überwachen und dokumentieren.

Security-by-Design bedeutet konkret: die Integration von Sicherheitsmechanismen wie Secure Boot, Verschlüsselung, Netzwerksegmentierung und Anomalieerkennung bereits auf der Architekturebene. In Kombination mit automatisierter Testabdeckung und modellbasierten Bedrohungsanalysen schaffen Cloud-native Plattformen die notwendige Transparenz und Sicherheit. Die Einbindung von Bedrohungsmodellen und Angriffsszenarien in den frühen Phasen des Systemdesigns hilft, Schwachstellen proaktiv zu adressieren.



Bild 3: Digitale Durchgängigkeit verbindet Entwicklung und Produktion und schafft die Basis für transparente, skalierbare Engineering-Prozesse. © PTC



Bild 4: Moderne Automotive-Entwicklung vereint Simulation, Automatisierung und Software-Engineering in integrierten Plattformen. © PTC

Skalierbarkeit trifft auf Compliance

Die Cloud bietet nicht nur Geschwindigkeit, sondern auch Nachvollziehbarkeit: Jede Änderung, jedes Feature, jedes Release ist dokumentiert. Das ist entscheidend für Zertifizierungsprozesse, Zulassungsverfahren und gesetzliche Anforderungen. Gleichzeitig können durch Cloud-Ressourcen Test- und Simulationsumgebungen beliebig skaliert werden – ob Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop oder modellbasierte Tests. Auch die Integration von KI-gestütztem Testmanagement und Predictive Quality Monitoring wird durch Cloud-Plattformen erheblich vereinfacht.

Durch standardisierte APIs und Microservice-Architekturen lassen sich neue Features in bestehende Systeme integrieren, ohne den Gesamtkontext zu beeinträchtigen. Ein gutes ALM-System verwaltet diese Änderungen zentral, dokumentiert Versionsstände und erlaubt ein gezieltes Rollback bei Problemen. Diese Flexibilität ist besonders wichtig für OEMs, die mehrere Modellvarianten über unterschiedliche Märkte hinweg bedienen. Gleichzeitig unterstützt das System eine enge Verzahnung mit Produktion und Aftermarket-Services und schafft damit die Grundlage für konsistente, wartbare und skalierbare Systemlandschaften.

Best Practices: Was die Industrie schon heute umsetzt

Volvo CE nutzt Cloud-ALM, um mechanische, elektronische und softwareseitige Anforderungen zusammenzuführen – mit direktem Effekt auf die Time-to-Market. Durch die zentrale Verwaltung von Sicherheitsanforderungen lassen sich regulatorische Unterschiede zwischen Absatzmärkten effizient handhaben. Veoneer realisiert mit Codebeamer eine durchgängige Sicherheitszertifizierung für Steer-by-Wire-Systeme, inklusive Versionierung und Audit-Trails.

BMW wiederum verbindet MBSE und DevOps, um Compliance, Variantenvielfalt und Sicherheitsarchitekturen in einem einheitlichen Prozess abzubilden. Durch die Verbindung von modellbasiertem Engineering mit automatisierten Pipelines entstehen digitale Entwicklungspfade, die nicht nur effizient, sondern auch nachvollziehbar und auditierbar sind.

ZF implementiert digitale Zwillingsstrategien, um frühzeitige Simulationen sicherheitskritischer Funktionen zu ermöglichen. Diese Echtzeit-Validierung, gekoppelt mit Cloud-nativen Infrastrukturen, beschleunigt die Innovationszyklen und reduziert die Anzahl physischer Prototypen signifikant. Auch Bosch testet derzeit cloudbasierte Software-in-the-Loop-Umgebungen, um komplexe Regelalgorithmen automatisiert zu validieren und zyklisch zu optimieren.

Fazit: SDV verlangt nach Cloud und Vertrauen

Die Transformation zum SDV ist nicht nur ein technologischer Wandel, sondern ein Kulturwandel im Engineering. Cloud-native DevOps-Plattformen schaffen die Grundlage, um komplexe Softwareprodukte sicher, effizient und nachvollziehbar zu entwickeln. Sie bieten Skalierbarkeit, Sicherheit und Compliance in einer bisher nicht gekannten Integrationstiefe.

Nur wer Architektur, Sicherheit und Variantenmanagement integriert denkt, wird langfristig im Markt bestehen können. Die Übertragung klassischer IT-Prinzipien in die SDV-Entwicklung ist dabei entscheidend für Zukunftsfähigkeit und Skalierung. Wer Sicherheit nicht als Bremse, sondern als Differenzierungsmerkmal begreift, schafft Vertrauen in digitale Mobilität – und bleibt auch in der Cloud wettbewerbsfähig.



Kontakt

Michele Del Mondo
Senior Director Global Advisor
Automotive
PTC
ptc@piabo.net

R&D Reinvention mit KI:

Warum Produktdaten, Kontext und die zugrunde liegende Entwicklungslogik entscheidend sind

Dr. Alexander Albers, Mario Mikuschek, Daniel Spiess, Accenture

KI rückt schnell auf die R&D-Agenda, weil Unternehmen strukturellen Cost Take Out und höhere Entwicklungsgeschwindigkeit erreichen wollen. Tatsächliche Wirkung entsteht jedoch nicht durch immer mehr Use Cases allein. Entscheidend ist, ob Organisationen belastbare Produktdaten, nutzbaren Kontext und eine neue zugrunde liegende Entwicklungslogik zusammenbringen.



Bild 1: KI im Engineering hängt vom Zusammenspiel von Produktdaten, Kontext und Entwicklungslogik ab.

Industrielle R&D-Organisationen stehen unter Druck, Entwicklungsaufwand zu senken, die Produktivität im Engineering zu steigern und Entwicklungszyklen trotz wachsender Produktkomplexität zu verkürzen. KI bietet dafür Hebel in Softwareentwicklung, Systems Engineering, MBSE, Simulation, Testing, Dokumentation und Mechanik. Dennoch bleiben viele Initiativen auf POC-Ebene stecken oder auf isolierte Use Cases begrenzt. Ursache ist häufig nicht der Mangel an Ideen, sondern fehlende Skalierungsfähigkeit. Breitere Performance-Effekte entstehen erst durch eine belastbare Produktdatenbasis, nutzbaren Kontext und eine zugrunde liegende Entwicklungslogik, die KI in strukturellen Cost Take Out und Speed übersetzt.

Cost Take Out und Speed sind zur eigentlichen R&D-Agenda geworden

R&D steht unter Druck, schneller und effizienter zu werden. In vielen Industrieunternehmen ist dieser Druck zu einer dauerhaften Rahmenbedingung der Produktentwicklung geworden.

Die Herausforderung besteht nicht mehr allein in Innovation oder Produktdifferenzierung. Zunehmend geht es auch um strukturellen Cost Take Out und höhere Entwicklungsgeschwindigkeit. Engineering-Organisationen sollen mehr Output liefern, Entwicklungszyklen verkürzen und steigende domänenübergreifende Komplexität unter höherem wirtschaftlichem Druck beherrschen.

In vielen Branchen wird dieser Druck durch globalen Wettbewerb, wachsende regulatorische Anforderungen und zunehmenden Druck auf R&D-Budgets verstärkt. Gleichzeitig nimmt die Komplexität der Produktentwicklung weiter zu. Hardware, Software, Elektronik, Systemlogik und datengetriebene Funktionen sind enger miteinander verzahnt. Varianten nehmen zu, Update-Zyklen beschleunigen sich und Abhängigkeiten zwischen Domänen wachsen.

Damit stoßen viele Organisationen an die Grenzen klassischer Verbesserungsansätze in R&D. Inkrementelle Prozessoptimierung reicht häufig nicht mehr aus. Die bisherige Annahme, Komplexität vor allem durch stärkere Spezialisierung, mehr Dokumentation und sequenzielle Koordination beherrschen zu können, wird zunehmend weniger tragfähig.

Deshalb rückt KI schnell auf die R&D-Agenda. Für viele R&D-Verantwortliche ist KI mit einer klaren wirtschaftlichen Erwartung verbunden: Engineering-Aufwand reduzieren, Durchsatz erhöhen und Reaktionsfähigkeit verbessern, ohne technische Qualität und Nachvollziehbarkeit zu gefährden.

Das macht die aktuelle Diskussion hoch relevant. Zugleich entsteht ein Risiko: Wenn Unternehmen KI vor allem über einzelne Use Cases organisieren, entstehen zwar lokale Verbesserungen, aber nicht zwingend eine Veränderung des gesamten R&D-Performance-Profils.

KI schafft Wert im Engineering - aber das ist nicht mehr die zentrale Frage

Es besteht wenig Zweifel daran, dass KI entlang großer Teile der Engineering-Wertschöpfung Nutzen stiften kann. In software-naher Entwicklung unterstützt sie Coding, Testing, Debugging und Dokumentation. Im Systems Engineering und Requirements Engineering kann sie Informationen strukturieren, Inkonsistenzen erkennen und den Zugriff auf verteiltes Wissen verbessern. In MBSE-Kontexten hilft sie bei Modellnavigation, Konsistenzprüfungen und dem Umgang mit komplexen Systemartefakten.

Ähnliches gilt für Simulation, Test und mechanische Entwicklung. KI kann Synthese und Analyse beschleunigen, Design-Iterationen unterstützen und manuellen Aufwand in Dokumentation, Suche und Wiederverwendung von Wissen reduzieren.

Das geht über punktuelle Entlastung hinaus. In ausgewählten Aktivitäten kann KI wie virtuelle Kapazität wirken, indem sie wiederkehrende Vorbereitungsaufgaben übernimmt und wissensintensive Arbeit unterstützt. Das Prinzip 'Human in the Lead' bleibt dabei entscheidend.

Die wichtigere Frage ist jedoch, warum dieser Nutzen so häufig lokal begrenzt bleibt. Warum entstehen vielversprechende Anwendungen, während breitere Performance-Effekte in Kosten und Geschwindigkeit begrenzt bleiben?

Genau an diesem Punkt muss die Debatte weitergehen. Die Frage ist nicht mehr, ob KI Engineering unterstützen kann. Die Frage ist, was verhindert, dass diese Unterstützung in systemische R&D-Performance übersetzt wird.

Der eigentliche Engpass ist nicht die Use-Case-Identifikation, sondern Skalierungsfähigkeit

Viele Organisationen haben bereits Fortschritte dabei gemacht, KI-Potenziale in R&D zu identifizieren. Sie entwickeln POCs, validieren technische Machbarkeit und zeigen lokalen Nutzen. Breite Performance-Effekte über das gesamte Entwicklungssystem hinweg bleiben jedoch häufig begrenzt.

Der Grund liegt darin, dass viele Unternehmen bei der Identifikation vertikaler Use Cases weiter sind als beim Aufbau horizontaler Skalierungsfähigkeit. Sie wissen, wo KI eingesetzt werden könnte, aber noch nicht, welche Umgebung erforderlich ist, um KI über Funktionen, Domänen und Workflows hinweg zu skalieren. Dadurch entsteht eine Lücke zwischen lokaler Machbarkeit und Wertrealisierung auf Unternehmensebene.

Viele Initiativen werden weiterhin als isolierte KI-Use-Cases gedacht, statt in den breiteren Produktentwicklungsprozess eingebettet zu sein. Lokale Machbarkeit wird demonstriert, systemischer Wert bleibt jedoch schwer realisierbar.

Diese Lücke ist im Engineering besonders sichtbar. R&D-Performance hängt nicht nur von der Produktivität einzelner Rollen ab. Entscheidend sind Qualität, Geschwindigkeit und Kohärenz des gesamten Entwicklungssystems.

In vielen Engineering-Umgebungen interagieren Requirements, Systemarchitekturen, Produktstrukturen, CAD-Modelle, Simulationsergebnisse, Software-Artefakte und Testnachweise noch nicht ausreichend vernetzt. Informationen werden manuell übertragen, Kontext geht über Systemgrenzen hinweg verloren und Traceability wird genau dort schwach, wo KI sie am dringendsten bräuchte.

Deshalb bleiben viele Initiativen auf POC-Ebene stecken. Eine Lösung funktioniert in einer Abteilung, in einer spezifischen Tool-Umgebung oder in einem sorgfältig vorbereiteten Prozessschritt. Die Skalierung darüber hinaus wird schwierig: Schnittstellen brechen, Kontext fehlt, Daten sind inkonsistent und Ergebnisse lassen sich in angrenzenden Funktionen nur schwer weiterverwenden.

Der zentrale Engpass ist häufig nicht mehr der Mangel an vielversprechenden KI-Anwendungen. Häufig fehlen Entwicklungsumgebungen, die eine Skalierung über einzelne Use Cases hinaus ermöglichen.

Drei technische Voraussetzungen entscheiden, ob KI skaliert

Wenn Unternehmen KI in strukturellen Cost Take Out und Speed übersetzen wollen, werden drei technische Voraussetzungen entscheidend: Produktdatenbasis, Interoperabilität und Kontext.

Eine belastbare Produktdatenbasis entscheidet, ob Engineering-Informationen verlässlich interpretierbar sind. KI kann nur dann belastbaren Wert schaffen, wenn die zugrunde liegenden Daten robust, strukturiert und nutzbar sind. Dazu gehören klare Objekte, saubere Metadaten, konsistente Semantik, Versionsbezug und nachvollziehbare Beziehungen zwischen Engineering-Artefakten.

Interoperabilität entscheidet, ob Engineering-Informationen über Tool-, System- und Domänengrenzen hinweg durchgängig nutzbar sind. Requirements, Architekturen, Stücklisten, Software-Artefakte, Simulationsergebnisse, Testnachweise und Änderungsinformationen müssen über Tools und Domänen hinweg zusammenspielen. Bleiben Tools schwach verbunden oder Informationsflüsse an Systemgrenzen unterbrochen, kann KI nur in Teilkontexten optimieren.

Kontext entscheidet, ob Engineering-Informationen im konkreten Anwendungsfall relevant werden. Zugriff auf Daten allein genügt nicht. KI benötigt den richtigen situativen und funktionalen Zusammenhang. Eine Anforderung wird erst dann handlungsrelevant, wenn sie im Zusammenhang mit Architektur, Variante, Release-Status, Validierungslogik und nachgelagerten Auswirkungen verstanden wird.

Für die Product-Data- und Engineering-IT-Community sind diese Themen nicht neu. Im Kontext von KI werden sie jedoch zu direkten Voraussetzungen dafür, KI in der Produktentwicklung zu skalieren. Was KI zunehmend benötigt, ist nicht nur eine zugängliche Datenbasis, sondern eine harmonisierte und maschinenlesbare Engineering-Umgebung.

Dennoch ist das nur die halbe Geschichte. Bessere Datenfundamente, bessere Konnektivität und besserer Kontext sind wesentliche Enabler. Für sich genommen erzeugen sie jedoch noch keinen strukturellen Wert.

Der übersehene Hebel ist die zugrunde liegende Entwicklungslogik

Das in der aktuellen KI-Debatte am stärksten unterschätzte Thema ist nicht die technische Befähigung. Es ist die zugrunde liegende Entwicklungslogik selbst.

Mit zugrunde liegender Entwicklungslogik meinen wir nicht die Governance von KI-Initiativen oder das Management von KI-Use-Cases. Gemeint sind die strukturellen Entscheidungen, die prägen, wie Produktentwicklung betrieben wird: wie Arbeit geteilt wird, wie Informationen zwischen Domänen fließen, wann Lernen stattfindet und wie Entscheidungen getroffen werden – unabhängig von einem bestimmten Tool oder einer konkreten KI-Anwendung.

In vielen Industrieunternehmen wird KI in ein Entwicklungssystem eingeführt, das weiterhin von Annahmen einer früheren Engineering-Ära geprägt ist. Arbeit ist durch sequenzielle Übergaben, domänenbasierte Silos, langsame Abstimmungsschleifen und vergleichsweise späte Lernzyklen organisiert. Integration und Validierung erfolgen oft spät. Dieses Modell kann Kontrolle schaffen, begrenzt aber die Fähigkeit, den vollen Wert von KI aufzunehmen.

Das ist entscheidend, weil KI nicht nur isolierte Aufgaben beschleunigt. Ihr tieferes Potenzial liegt darin, Iterationsschleifen zu verkürzen, Wissen über Grenzen hinweg zu verbinden und Synthese, Analyse und Entscheidungsvorbereitung zu beschleunigen. KI verändert, was in der Produktentwicklung technisch möglich ist; die organisatorische Realität bleibt jedoch häufig dahinter zurück.



Bild 2: Produktdatenbasis, Interoperabilität, Kontext und Entwicklungslogik müssen gemeinsam weiterentwickelt werden, damit KI strukturellen Wert in R&D schafft.

Bleibt die umgebende Entwicklungslogik unverändert, wird KI auf lokale Produktivitätsgewinne zurückgedrängt, statt systemische Performance-Verbesserungen zu erzeugen. Das Ergebnis ist ein vertrautes Missverhältnis: Das technische Potenzial steigt, aber die strukturelle Performance bewegt sich kaum.

Darin liegt die zentrale Spannung vieler R&D-Organisationen. Technisch können sie Engineering-Arbeit mit KI augmentieren. Strukturell arbeiten sie weiterhin mit langsamen Übergängen, starker Trennung zwischen Domänen und spätem Feedback. R&D Reinvention mit KI lässt sich daher nicht auf eine Tooling-Agenda reduzieren. Produktentwicklung muss iterativer, stärker architekturbasiert, besser auf unterschiedliche Domänengeschwindigkeiten ausgerichtet und funktionsübergreifend integrierter werden.

Das hat direkte Auswirkungen auf Cost Take Out. Im Engineering sind späte Korrekturen fast immer teurer als frühes Lernen. Wenn KI frühere Synthese, schnellere Bewertung und rascheres Feedback über Domänen hinweg unterstützt, liegt ihr Wert nicht nur in lokaler Effizienz. Er liegt darin, Aufwand aus später Integration und Rework nach vorne zu verlagern oder zu vermeiden.

Das bedeutet nicht, auf technische Stringenz, Sicherheit oder Engineering-Disziplin zu verzichten. Industrielle Produktentwicklung wird weiterhin Traceability, Kontrolle und menschliches Urteilsvermögen benötigen. ‚Human in the Lead‘ bleibt in den meisten industriellen Kontexten deshalb das richtige Prinzip.

Genau darin liegt die eigentliche Bedeutung von R&D Reinvention mit KI. Es geht nicht um die digitale Erweiterung etablierter Prozesse. Es geht um die Neugestaltung der Produktentwicklung, damit KI nicht nur isolierte Produktivitätsgewinne ermöglicht, sondern breitere Effekte auf Kosten, Geschwindigkeit und Durchsatz.

Was R&D Reinvention mit KI jetzt erfordert

Wenn diese Sicht stimmt, ist die Implikation klar: Der nächste Schritt für Industrieunternehmen besteht nicht darin, KI-Experimente zu stoppen. Es geht darum, sie in eine breitere R&D-Transformationslogik einzuordnen.

Erstens: Das Ambitionsniveau verschieben. Use Cases sind wichtig, aber sie sind nicht der richtige Maßstab für den Anspruch. Entscheidend ist, ob KI zu breiterer Performance-Verbesserung in R&D beiträgt.

Zweitens: Die technischen Skalierungsbedingungen stärken. KI kann nur auf Basis robusterer Produktdaten, besserer Interoperabilität und nutzbarem Kontext skalieren.

Drittens: Die zugrunde liegende Entwicklungslogik als Gestaltungsaufgabe behandeln. Die Frage ist nicht mehr nur, wo KI eingefügt werden kann. Die Frage ist, wo sich die Logik der Produktentwicklung verändern muss, damit KI strukturell wertvoll wird.

Viertens: KI als Katalysator für R&D-Redesign verstehen, nicht als Add-on. Die Gewinner werden nicht die Unternehmen mit den meisten POCs oder den sichtbarsten Demos sein. Es werden diejenigen sein, die KI nutzen, um neu zu denken, wie Produktentwicklung tatsächlich funktioniert.

R&D Reinvention mit KI bedeutet nicht, immer weitere Use Cases hinzuzufügen. Es geht darum, strukturellen Cost Take Out und Speed durch KI zu erschließen – ermöglicht durch starke Produktdaten, nutzbaren Kontext und eine neue zugrunde liegende Entwicklungslogik.

Das ist der Unterschied zwischen lokaler KI-Unterstützung und struktureller R&D-Performance. Für R&D-Verantwortliche und Engineering-IT-Architekten lautet die praktische Frage nicht, ob sie in KI investieren sollen, sondern ob ihr Entwicklungssystem so aufgestellt ist, dass KI wirksam skaliert werden kann.



Kontakt

Dr. Alexander Albers
Accenture
Engineering Consulting Senior Manager
alexander.albers@accenture.com



Kontakt

Mario Mikuschek
Accenture
Engineering Consulting Senior Manager
mario.mikuschek@accenture.com



Kontakt

Daniel Spiess
Accenture
Management Consulting Executive
daniel.spiess@accenture.com

Mensch-KI-Dialog im Zentrum von MBSE: **Ein KI-Begleiter für Systems Engineering**

Vincent Hummel, Jean-Sébastien Gros, Felix von Pechmann, Mews Partners
Projektkontext: Projekt im Auftrag der französischen Beschaffungsbehörde DGA

Model-Based Systems Engineering (MBSE) verspricht eine bessere Beherrschung komplexer Systeme durch Rückverfolgbarkeit, Konsistenz und multidisziplinäre Zusammenarbeit. In der Praxis wird die Einführung jedoch durch Tool-Komplexität, lange Lernkurven und den Aufwand für den Aufbau und die Pflege von Modellen begrenzt. Dieser Projektbeitrag stellt SyneSys vor, einen KI-basierten Begleiter, der von Mews Partners zusammen mit CIL4SYS und Deepika für die französische Rüstungsbeschaffungsbehörde entwickelt wurde. Die Lösung ermöglicht es Systems Engineers und Projektbeteiligten, über natürliche Sprache mit Engineering-Modellen zu interagieren, während methodische Strenge und die Rückverfolgbarkeit zu Quelldokumenten gewahrt bleiben.

Eine Fallstudie mit einer Überwachungsdrohne zeigt, wie eine technische Spezifikation analysiert, in Modellartefakte umgewandelt und auf Konsistenz überprüft werden kann. Erste Messungen zeigen eine Reduzierung der Modellierungszeit von ca. 15 Stunden auf 1 Stunde in diesem Fall und von 40 Stunden auf 12 Stunden in einem komplexeren Gabelstapler-Fall. Der Artikel erläutert Nutzen, Einschränkungen und Einführungsbedingungen für KI-erweitertes MBSE.

Warum komplexe Projekte Systems Engineering benötigen

Betrachten wir ein Mini-Drohnen-Überwachungssystem für innere Sicherheitskräfte. Auf den ersten Blick scheinen die Anforderungen kompakt genug, um auf wenigen Seiten Platz zu finden. Doch das System offenbart schnell die typischen Merkmale komplexen Engineerings.

Das System beschränkt sich nicht auf die Drohne selbst. Es umfasst ein Luftfahrzeug mit sechs Motoren, eine elektrische Stromversorgung, drei Batteriesätze, eine abnehmbare Nutzlast, hochauflösende und thermische Kameras, einen kreiselstabilisierten Gimbal, Daten- und Videoverbindungen, primäre und sekundäre Bodenstationen, Ersatzteile, Werkzeug, technische Dokumentation sowie Lager- und Transportausrüstung. Funktional muss es manuellen und automatischen Flug unterstützen, Flugpläne mit mehreren Wegpunkten, den Einsatz in weniger als fünf Minuten, dreißig Minuten Ausdauer mit einer Kilogramm-Nutzlast, automatische Rückkehr bei Verbindungsverlust oder niedrigem Akkustand, degradierte Betriebsmodi, georeferenzierte Metadaten sowie Beobachtung bei Tag und Nacht.

Hinter einem „kleinen“ System verbergen sich also mehrere interagierende Subsysteme, Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen, disziplinübergreifende Leistungsanforderungen und die Notwendigkeit, operative Bedarfe mit Designentscheidungen zu verknüpfen. Genau hier bringt Systems Engineering seinen Wert: Es strukturiert das Problem, organisiert Anforderungen, definiert die Architektur, unterstützt Integration, Verifikation und Validierung und ermöglicht die disziplinübergreifende Zusammenarbeit über den gesamten Lebenszyklus.

Model-Based Systems Engineering, MBSE, geht noch weiter, indem es isolierte Dokumente durch ein formales, gemeinsames Modell ersetzt. Jede Anforderung kann mit den Funktionen verknüpft werden, die sie erfüllen, jede Funktion mit den Komponenten, die sie realisieren, und jede Schnittstelle mit den Flüssen, die sie durchlaufen. Rückverfolgbarkeit wird damit inhärent. Konsistenz kann geprüft werden. Auswirkungsanalysen bei Änderungen werden schneller und verlässlicher.

Im Drohnenbeispiel wirkt sich eine Erhöhung der Kommunikationsreichweitenanforderung von einem auf zwei Kilometer auf Sender, Empfänger, Stromverbrauch, Batteriebemessung und Flugausdauer aus. Ohne Modell werden solche Kaskaden oft erst spät entdeckt, typischerweise während der Integration. Das Versprechen von MBSE besteht darin, diese Abhängigkei-

ten früher sichtbar zu machen und ingenieurwissenschaftliches Wissen in ein gemeinsames Asset zu verwandeln.

Das MBSE-Einführungsparadox

Trotz mehr als zwanzig Jahren Befürwortung bleibt die MBSE-Einführung langsamer als erwartet, selbst in Verteidigungs-, Raumfahrt-, Transport- und Energieprogrammen, wo das Management von Komplexität zunehmend kritisch wird. Drei Barrieren treten immer wieder auf.

Die erste ist die Lernkurve. Die Beherrschung einer Modellierungsumgebung, ihrer Metamodelle, UML- oder SysML-Profile und Architekturrahmen kann viele Monate dauern, bevor ein Ingenieur wirklich produktiv wird. Selbst nach dem Erlernen des Tools stehen Teams oft vor dem „leeren Modell-Syndrom“: Wo fängt man an, wenn die Modellierungsumgebung keine anfängliche Struktur enthält?

Die zweite Barriere ist der Aufwand für den Aufbau des Modells. Ein nutzbares Modell zu erstellen erfordert nach wie vor einen erheblichen manuellen Aufwand: Blöcke, Ports, Beziehungen, Diagramme und Rückverfolgbarkeitsverknüpfungen müssen eingegeben und gepflegt werden. Der Ingenieur verbringt zu viel Zeit mit der Bedienung des Tools und zu wenig Zeit mit dem Nachdenken über die Architektur. Im Überwachungsdrohnen-Fall benötigt ein erfahrener Ingenieur für den manuellen Aufbau eines Modells, das die logische Architektur, Anforderungen und operative Szenarien abdeckt, ca. 15 Stunden, allein um eine textuelle Spezifikation in ein Modell umzuwandeln.

Die dritte Barriere ist die Zugänglichkeit. Modelle bleiben für Nicht-Spezialisten oft eine Blackbox. Projektmanager, Kunden und Fachexperten, die vom Modell profitieren würden, verlassen sich weiterhin häufig auf Dokumente, Tabellenkalkulationen und Präsentationen. Infolgedessen koexistiert das Modell mit der traditionellen Dokumentation, anstatt sie als maßgebliche Engineering-Referenz zu ersetzen.

Die derzeitigen Antworten sind hauptsächlich methodischer Natur: vereinfachte Metamodelle, Best-Practice-Leitfäden, Schulungsprogramme und Einführungsbegleitung. Sie sind nützlich, lösen das Problem aber nicht vollständig. Die Vereinfachung der Methode kann den Wert des Modells verringern, während Schulungen langwierig und kostspielig bleiben. Vor allem bleibt das Modell ein technisches Artefakt, das von einem begrenzten Kreis von Spezialisten genutzt wird.

KI als Begleiter des Systems Engineers

Unser Ansatz besteht darin, MBSE nicht so weit zu vereinfachen, dass sein Reichtum verloren geht, sondern die Ingenieure so zu stärken, dass sie die volle Leistungsfähigkeit der Modellierung nutzen können, ohne unter ihrer Komplexität zu leiden. Zu diesem Zweck haben Mews Partners, CIL4SYS und Deepika SyneSys entwickelt, einen KI-basierten Begleiter für das Systems

Engineering. Die Lösung integriert sich in bestehende Modellierungsumgebungen und ermöglicht den Dialog in natürlicher Sprache mit dem Systemmodell.

Die Vision gliedert sich in drei Rollen.

Erstens agiert die KI als Wegweiser. Sie hilft dem Ingenieur bei der Planung und Organisation der Arbeit sowie beim Aufbau und der Strukturierung des Modells. Sie extrahiert Anforderungen aus Quelldokumenten, schlägt Modellskelette vor, generiert Diagramme und automatisiert repetitive Aufgaben. Sie kann auch Architekturmuster vorschlagen und methodische Abweichungen während der Modellierung erkennen.

Zweitens agiert die KI als Hüter. Sie stärkt die Rückverfolgbarkeit und Modellqualität, indem sie Modellobjekte mit ihren dokumentarischen Quellen verknüpft, die Konformität mit dem Ziel-Metamodell prüft und Lücken oder Inkonsistenzen identifiziert. Sie kann bei der Durchführung von Auswirkungsanalysen helfen, wenn neue Anforderungen oder Änderungsanfragen entstehen. Vor allem stellt sie sicher, dass das Modell eine zuverlässige Grundlage für alle Ingenieure bietet.

Drittens agiert die KI als Übersetzer. Sie macht das Modell über den Kreis der Modellierungsexperten hinaus zugänglich, sowohl zur Verbesserung als auch zur Nutzung. Ein Projektmanager kann nach Termin- oder Risikoauswirkungen fragen, ein Kunde kann Bedarfe in operativer Sprache ausdrücken, und ein Ingenieur kann technische Änderungen beschreiben. Der Begleiter übersetzt diese Interaktionen in formale Modelloperationen oder Modellanfragen.

Für Systems Engineers liegt der Wert darin, sich auf Architekturentscheidungen statt auf Tool-Mechanik zu konzentrieren. Für andere Beteiligte liegt der Wert darin, über natürliche Sprache auf das Modell zugreifen zu können, ohne das Modellierungstool beherrschen zu müssen. Das Modell wird einfacher zu befragen, zu erklären und anzureichern.

Anwendung auf einen Überwachungsdrohnen-Fall

Das Projekt wurde auf eine 12-seitige technische Spezifikation für professionelle Mini-Drohnen angewendet. Ziel war es, das Dokument zu analysieren, relevante Engineering-Artefakte zu identifizieren und ein strukturiertes Modell gemäß dem Ziel-Metamodell zu generieren, hier auf der logischen Ebene des NATO Architecture Framework.

Der Prozess beginnt mit der Dokumentenexploration. Der KI-Begleiter nimmt die Spezifikation auf, segmentiert sie in semantische Abschnitte und indiziert den für die Modellierung relevanten Inhalt. Dies ermöglicht es dem Benutzer, durch die Quelle zu navigieren, zu überprüfen, ob der gesamte Umfang abgedeckt ist, und zu verstehen, woher jedes extrahierte Element stammt.

Der zweite Schritt ist die Modellkonstruktion. Aus dem analysierten Dokument generiert der Begleiter ein logisches Modell, einschließlich Systemknoten wie Luftfahrzeug, Nutzlast, HD-Kamera, Wärmekamera, kreiselstabilisierter Gimbal, Bodenstationen, Datenverbindung und Batterie. Es werden auch Fähigkeiten, Leistungsmaße, operative Szenarien wie Einsatz und Tages- oder Nachtüberwachung sowie logische Aktivitäten wie Bilderfassung oder Ausdauerüberwachung identifiziert.

Jedes Modellelement wird auf seine dokumentarische Quelle zurückverfolgt. Diese Rückverfolgbarkeit ist nicht nur für die Verifikation, sondern auch für das Vertrauen der Benutzer wesentlich. Der Ingenieur kann prüfen, warum ein Element existiert, welche Anforderung es rechtfertigt und ob die Interpretation korrekt ist.

Der Begleiter kann auch eine textuelle SysML-v2-Datei zur Verwendung in kompatiblen Modellierungsumgebungen generieren.

Der dritte Schritt ist die Konsistenzanalyse. Sobald das Modell aufgebaut ist, kann der Benutzer Fragen stellen wie: „Gibt es Inkonsistenzen zwischen dem Modell und dem Quelldokument?“ Im Drohnenfall identifizierte der Begleiter mehrere Punkte, die ingenieurwissenschaftliches Urteilsvermögen erfordern. Beispielsweise war der kreiselstabilisierte Gimbal als Unterklasse der Nutzlast modelliert worden, während die Quelle darauf hindeutete, dass er eher eine Komponente der Nutzlast sein sollte. Die Batterie war als unabhängiger Knoten aufgeführt, obwohl sie physisch in das Luftfahrzeug integriert ist. Einige degradierte Modi waren ebenfalls unvollständig. Gleichzeitig bestätigte der Begleiter, dass die Hauptknotenhierarchie, Fähigkeiten, Szenarien und Aktivitätsdiagramme weitgehend konsistent waren.

Das resultierende Modell wurde ohne menschliche Überprüfung nicht als final betrachtet. Es lieferte jedoch eine solide und rückverfolgbare Grundlage. Die Arbeit des Ingenieurs verlagerte sich von der Dateneingabe hin zur Validierung, Korrektur und Anreicherung der Architektur.

AI as a Companion — Neither Master, Nor Slave, Nor Substitute

The three roles of SyneSys in Model-Based Systems Engineering

01



GUIDE (Assistance)

Accelerate design and onboarding

- Plans and structures the model from source documents
- Extracts requirements, generates skeletons and diagrams
- Suggests architectural patterns
- Detects methodological deviations during modelling

02



GUARDIAN (Rigour)

Ensure consistency and traceability

- Links every model object to its documentary source
- Checks compliance with the target meta-model
- Identifies gaps and inconsistencies
- Supports impact analysis on change requests

03



TRANSLATOR (Interface)

Make the model accessible to all

- Natural-language dialogue with the system model
- Project managers ask about schedule and risk impacts
- Customers express needs in operational language
- Engineers describe technical changes; the companion converts them to formal model operations

Bild 1: Die drei Rollen des KI-Begleiters: Wegweiser, Hüter, Übersetzer

Erste Ergebnisse

Wir haben den Modellierungsprozess ausgehend von einem Eingabedokument über drei Schritte gemessen: Dokumentenanalyse, Identifikation von Engineering-Artefakten und Modellkonstruktion. Zwei Fälle wurden bewertet.

Im Überwachungsdrohnen-Fall, der eine moderate Komplexität aufweist, erforderte der vollständige Prozess ohne den KI-Begleiter ca. 15 Stunden und mit ihm ca. 1 Stunde. Dies entspricht einer Zeitersparnis von ca. 93 %.

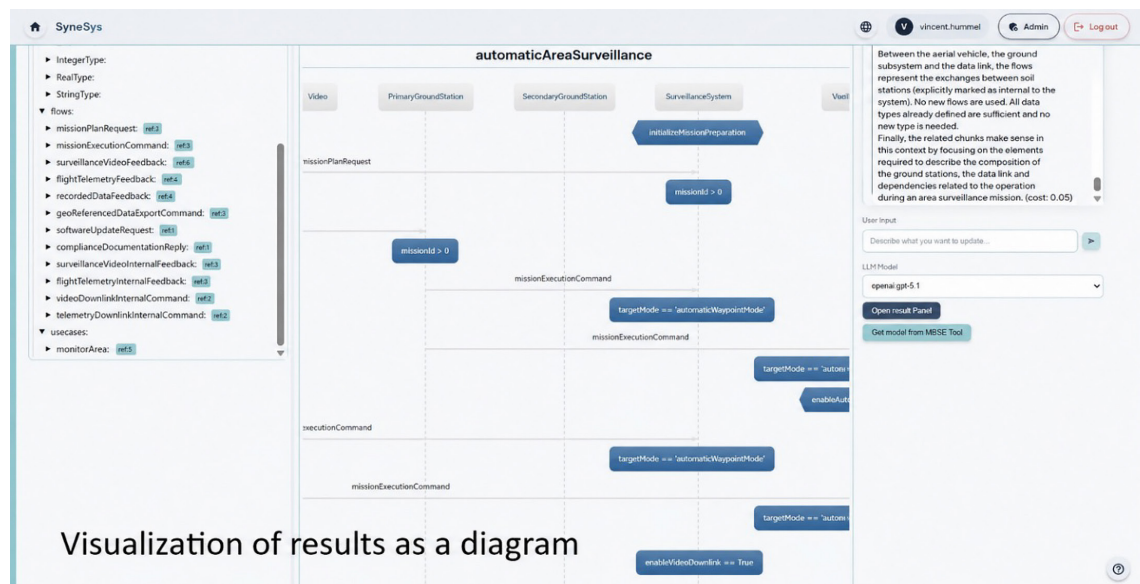
In einem zweiten Fall bezüglich eines Gabelstaplersystems mit höherer Komplexität erforderte der Prozess ohne den KI-Begleiter ca. 40 Stunden und mit ihm ca. 12 Stunden. Dies entspricht einer Zeitersparnis von ca. 70 %. Der Gewinn ist am größten, wenn der Umfang klar definiert ist. Im Drohnenfall übernahm der Begleiter den Großteil des Prozesses. Im komplexeren Fall blieb die menschliche Steuerung bedeutsamer, aber die Beschleunigung war dennoch erheblich.

Diese Zahlen beziehen sich auf den Kernmodellierungsprozess. Sie schließen nicht alle ergänzenden Aktivitäten ein, wie die detaillierte Qualitätsregel-Verifikation, vollständige Metamodell-Konformitätsprüfungen oder feinkörnige Rückverfolgbarkeitsvalidierung. Diese Aktivitäten erfordern weiterhin ingenieurwissenschaftliche Kontrolle und stellen weiteres Automatisierungspotenzial dar.

Lessons Learned

Die Verwendung natürlicher Sprache schafft sofortiges Engagement, auch bei Zielgruppen, die normalerweise zögerlich bei der MBSE-Einführung sind. Anstatt die Modellierung durch Tool-Befehle und Diagramme anzugehen, können Benutzer mit Fragen, Bedarfen und ingenieurwissenschaftlichen Absichten beginnen.

Bild 2: Modellkonstruktion: Fähigkeiten- und operatives Prozessdiagramm



Visualization of results as a diagram

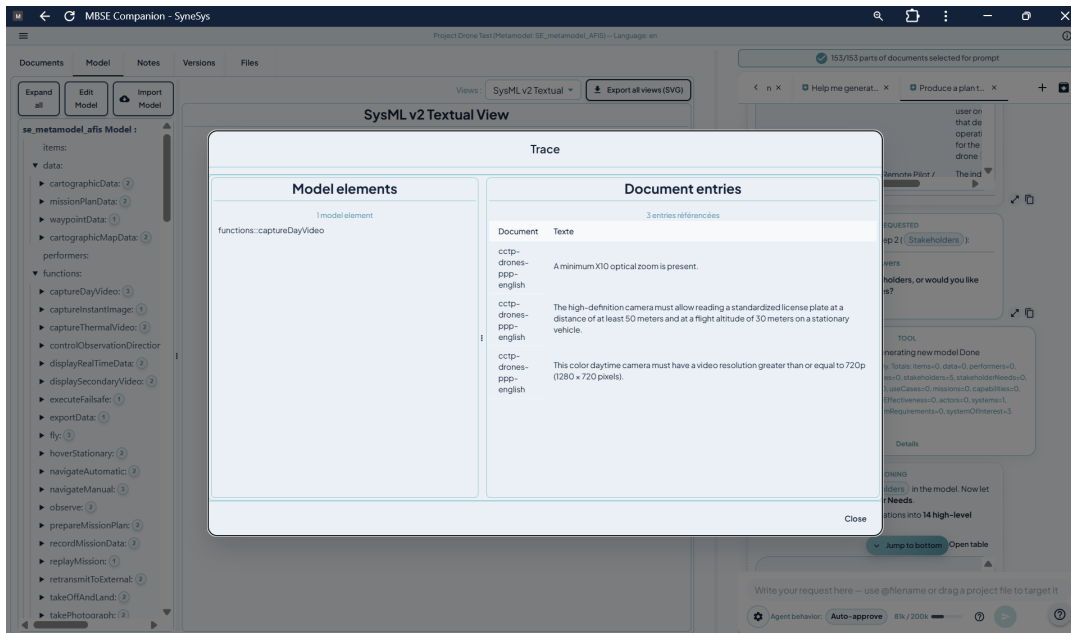


Bild 3: Rückverfolgbarkeit von Modell-elementen zum Quelldokument

Das Projekt zeigt auch, dass KI die methodische Strenge nicht ersetzt. Im Gegenteil: Die Qualität der Ergebnisse hängt stark von der Qualität des Metamodells und des Engineering-Rahmens ab. KI funktioniert besser, wenn die Modellierungsregeln klar sind. Sie kompensiert keinen Mangel an Systems-Engineering-Disziplin.

Die menschliche Überwachung bleibt essenziell. Aufeinanderfolgende Iterationen mit dem Begleiter müssen kontrolliert werden, damit der Ingenieur die Eigenverantwortung für den Inhalt behält. Das Ziel ist nicht die autonome Modellgenerierung ohne Überprüfung, sondern ein effizienter Dialog zwischen Ingenieur und KI.

Das Änderungsmanagement ist ebenfalls entscheidend. Eine natürlichsprachliche Schnittstelle kann die Lösung attraktiv machen, aber die Einführung muss unterstützt werden, um zu vermeiden, dass die heutige „Klick-Fabrik“ durch eine zukünftige „Prompt-Fabrik“ ersetzt wird. Der Wert entsteht durch die Kombination von KI-Unterstützung, Engineering-Methode und menschlichem Urteilsvermögen.

Ausblick

KI wird den Systems Engineer oder den Architekten nicht ersetzen. Sie wird sie von Aufgaben mit geringem Mehrwert befreien, um sich auf Verstehen, Abwägen und Entscheiden konzentrieren zu können. Repetitive Modellierungsoperationen, Konsistenzprüfungen auf niedriger Ebene und Dokument-zu-Modell-Transformationen können zunehmend an KI delegiert werden, während die ingenieurwissenschaftliche Verantwortung beim Menschen verbleibt.

Diese Entwicklung könnte auch die Rollen in Engineering-Organisationen verändern. Fachexperten könnten Eigentümer der Systemsicht für ihren Bereich werden, unterstützt von KI als Tutor und Assistent. Systems Engineers könnten sich noch stärker hin zu bereichsübergreifender Architektur, Kompromissanalyse und Koordination bewegen.

Ein KI-Begleiter für Systems Engineering

95

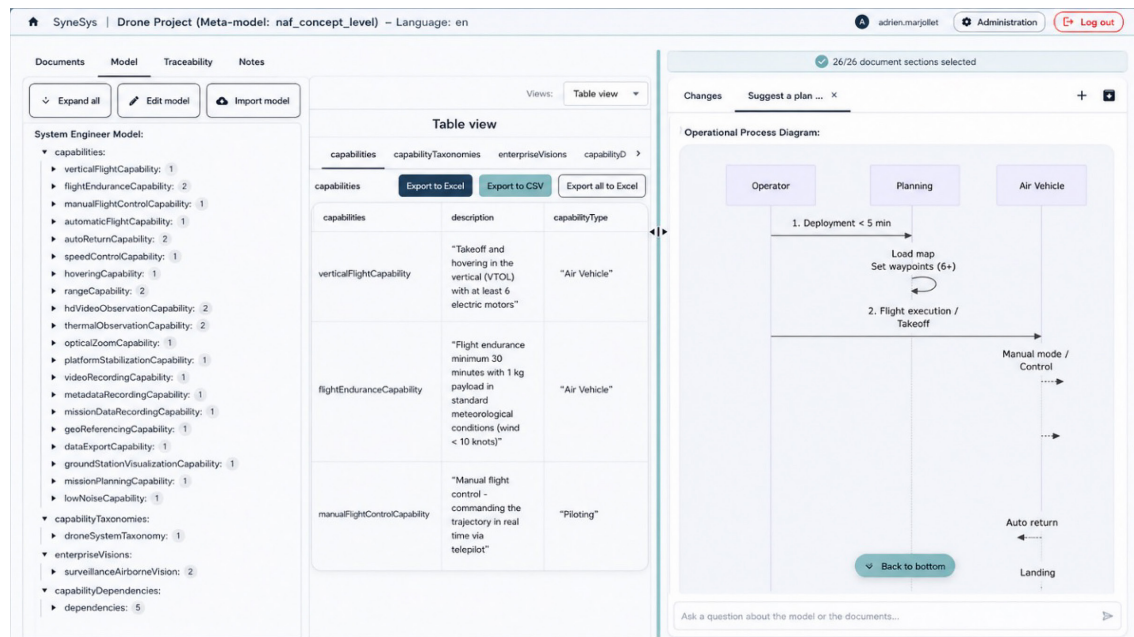


Bild 4: Modell-exploration in verschiedenen Formaten

Mehrere Herausforderungen bleiben offen. Die Interoperabilität mit Anforderungsmanagement-, ALM- und PLM-Umgebungen ist ein zentrales Thema. Organisationen müssen auch lernen, ihre Metamodelle richtig zu bemessen, um das Gleichgewicht zwischen methodischem Aufwand und KI-generiertem Mehrwert zu optimieren. Sie müssen außerdem das Management von Fähigkeiten, Kompetenzen und Wissen anpassen, um eine angemessene Mensch-Maschine-Zusammenarbeit sicherzustellen.

Das Fazit ist einfach: KI kann als Kompetenzenverstärker und Konsistenz-aufdecker wirken. Sie hilft Ingenieuren, die Auswirkungen ihrer Entscheidungen zu verstehen, während sie für die Entscheidungen selbst verantwortlich bleiben. Richtig eingesetzt kann sie MBSE zugänglicher, nützlicher und weiter verbreitet machen.



Kontakt

Felix von Pechmann
Partner AI, data, optimisation @ Mews Labs
felix.von-pechmann@mews-partners.com



Kontakt

Vincent Hummel
Senior Manager, MBSE
vincent.hummel@mews-partners.com



Kontakt

Jean-Sebastian Gros
Partner, MBSE
jean-sebastien.gros@mews-partners.com

Knowledge B-Rep Graph: Enabling Collaborative Digital Engineering with STEP and Knowledge Graphs in the Age of Software-Centric Product Development

Julian Gebhard, David Pfister, Yuebo Wang, Katrin Brudny, Steffen Staab

Knowledge Graphs zeigen seit mehreren Jahren Potenzial für Engineering-Anwendungen und finden zunehmend produktiven Einsatz in großen Fertigungsunternehmen. Dennoch fehlt es an einer Transformation von traditionellen Lösungen hin zu einer Knowledge-Graph-Infrastruktur.

Mercedes-Benz und die Forschungsgruppe Analytic Computing der Universität Stuttgart betreiben aktive Forschung, um mit den im Semantic-Web-Ökosystem bereits verfügbaren Werkzeugen einen greifbaren Mehrwert zu liefern, indem sie diese für industrielle Planungs-, Montage- und Engineering-Workflows anpassen. Diese Arbeit präsentiert einen Proof of Concept zur Anwendung von Knowledge Graphs für die Analyse der Topologie und Geometrie von CAD-Modellen sowie für die Automatisierung der Modellvalidierung. Der zusätzliche semantische Kontext, den Knowledge Graphs im Gegensatz zu traditionellen CAD-Austauschformaten bereitstellen, ermöglicht eine zielgerichtete Informationsextraktion, ohne dass eigens entwickelter Code geschrieben werden muss. Wir stellen darüber hinaus eine Workbench zur Konstruktion von Queries und Constraints gegen CAD-Modelle und zur Visualisierung der Ergebnisse vor, die Semantic-Web-Operationen näher an die Experten der Engineering-Domäne bringt.

Introduction

Die Zukunft der Produktentwicklung hängt von den richtigen Datenstrukturen und dem richtigen Einsatz von KI-Agenten ab [6, 14]. Software wird im Zentrum unserer Prozesse stehen. Werden Produkte im digitalen Raum so gründlich validiert, dass keine physischen Prototypen mehr gebaut werden müssen, kann ein Fahrzeug vollständig in einer digitalen Umgebung entwickelt, in all seinen Facetten als Twin abgebildet und nach rein digital durchgeführten Sicherheits-, Qualitäts- und Belastungstests direkt für die Produktion freigegeben werden [22]. Es wäre zu einhundert Prozent digital entwickelt, von Agenten konstruiert und reif für die Freigabe. Heute sieht die digitale Produktentwicklung jedoch noch ganz anders aus. Sie basiert weiterhin auf proprietären Lösungen, Dateiaustausch sowie manueller Modellkontrolle und Validierung. Es gibt Handbücher mit allgemeinen CAD-Regeln, Industriestandards und OEM-spezifischen Richtlinien zur Konstruktion von CAD-Bauteilen, doch die Validierung dieser Regeln erfolgt nach wie vor weitgehend manuell [17]. Die Ableitung von 2D-Zeichnungen aus 3D-Modellen zur Prüfung von Annotations gehört in europäischen Unternehmen zum Tagesgeschäft. Manuelle Änderungsdokumentation mit Tippfehlern und falsch referenzierten Seriennummern ist nach wie vor an der Tagesordnung. Es ist schwer vorstellbar, wie die Automobilindustrie eine echte Automatisierung erreichen soll, wenn sie auf solche fehleranfälligen, manuellen Tätigkeiten angewiesen ist. Gleichzeitig verschieben sich die Prozesse hin zu Simultaneous Engineering, wodurch sich die Entwicklungszeiträume verkürzen, bevor die zugrunde liegenden Prozesse stabilisiert wurden [24]. Was benötigt wird, ist eine schnelle Änderungsweitergabe durch Synchronisation [6], eine semantische Anreicherung zur Datenverständlichkeit [7] sowie eine Automatisierung der CAD-Modellanalyse und Validierung. Wir argumentieren, dass Knowledge Graphs für B-Rep-Daten, parallel zu bestehenden Systemen eingesetzt, diese Herausforderungen adressieren können. Die deklarative Natur von Knowledge Graphs macht sie zu einer erweiterbaren Datenstruktur, die in der Lage ist, zusätzliche Informationen zu speichern und den Beteiligten den semantischen Kontext bereitzustellen, der für deren Verständnis erforderlich ist. Ontologien, welche die Konzepte und Beziehungen einer Domäne beschreiben, bilden das Skelett für eine

stabile semantische Infrastruktur. Sie brechen Datensilos auf, machen jeden Teil eines CAD-Modells über eine standardisierte API zugänglich und liefern native Werkzeuge für die automatisierte Informationsvalidierung innerhalb des Graphen. Knowledge-Graph-Technologien verfügen derzeit nicht über eine native Handhabung von CAD-Modellen. Während es bereits einige Forschungsarbeiten gibt, ist das Feld nach wie vor offen, mit nur begrenzten Beiträgen zu 3D-Reasoning, semantischen Regeln und produktionsreifen Anwendungsfällen. Diese Arbeit zielt darauf ab zu zeigen, dass das Feld trotz seiner noch jungen Reife bereits Potenzial für den produktiven Einsatz besitzt und in der Lage ist, geometrisches Reasoning sowie Validierung an CAD-Modellen durchzuführen. Zu diesem Zweck haben wir eine SPARQL-Erweiterung für dreidimensionale B-Rep-Daten sowie eine Benutzeroberfläche zur Visualisierung der Ergebnisse implementiert, um die Vermittlung des Potenzials von Knowledge Graphs im Engineering-Sektor zu verbessern. Im Folgenden präsentieren wir zunächst einen exemplarischen Anwendungsfall der Geometrieverifizierung. Anschließend liefern wir Hintergrundinformationen zu Datenstrukturen und Knowledge Graphs, gefolgt von einem Überblick über verwandte Arbeiten. Danach erläutern wir den Proof of Concept und seine Validierung, bevor wir mit einer Machbarkeitsstudie abschließen.

Use Case

In der Industrie unterliegen CAD-Modelle einer Vielzahl von Qualitäts- und Kompositionsanforderungen. Wir identifizieren vier verschiedene Kategorien: (1) allgemeine Modellintegritätsbedingungen, etwa die Anforderung, dass jeder Solid eine geschlossene Shell besitzt; (2) Normen, die von Standardisierungsgremien oder Industrieinitiativen definiert werden, beispielsweise ISO 1101, welche Regeln und Symbole für geometrische Toleranzen festlegt [13]; (3) Experten- oder Unternehmensrichtlinien mit Fokus auf Design for Manufacture, etwa Mindestanforderungen an die Wandstärke für 3D-gedruckte Teile; und (4) unternehmensspezifische Regeln zu Aspekten wie Sicherheitsklassifizierungen, Farbcodierung oder Schriftartverwendung. Diese Anforderungen können zudem von Material, Funktion des Bauteils und Industriesektor abhängen. Wir wählten den minimal zulässigen Abstand einer Bohrung zu einer Bauteilkante (siehe Bild 1) als unseren exemplarischen Anwendungsfall, da er repräsentativ für eine Klasse geometrischer Designregeln ist, die derzeit manuell oder über speziell hardcodierte Skripte validiert werden [17].

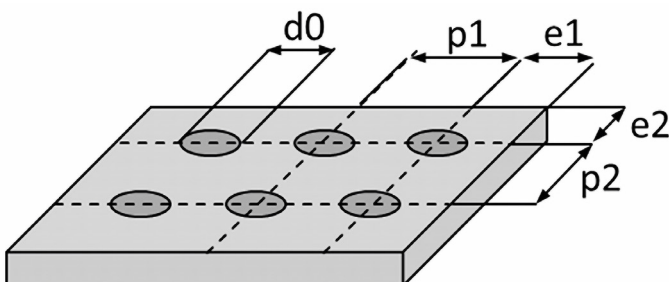


Bild 1: Regel zum Abstand zwischen Bohrung und Kante: d_0 bezeichnet den Bohrungsdurchmesser, p_1 und p_2 sind die Bohrungsmittelpunkte, und e_1 , e_2 sind die Bauteilkanten. Der minimal zulässige Abstand von der Bohrungswand zur nächsten Kante ist eine Funktion von d_0 und dem Bauteilmaterial.

Die Prüfung dieser Regel erfordert die Ableitung mehrerer impliziter Informationen aus dem Graphen:

1. **Bohrungserkennung.** Eine Bohrung wird aus dem B-Rep-Graphen abgeleitet, indem ein Advanced Face identifiziert wird, das eine zylindrische Surface mit negativer Orientierung besitzt und dessen äußeres Face Bound ausschließlich geschlossene Kreise enthält (also Kreise, deren Startpunkt mit ihrem Endpunkt übereinstimmt).
2. **Distanzberechnung.** Der Abstand der Bohrungs-Face zu jeder anderen Face desselben Solids muss geometrisch mit unserer eigenen SPARQL-Funktion `brepf:distance` berechnet werden.
3. **Prüfung der Solid-Konnektivität.** Eine naive Distanzprüfung kann zu False Positives führen: Zwei Faces einer U-förmigen Klammer können geometrisch nahe beieinander liegen, jedoch durch Luft anstatt durch festes Material getrennt sein. Um solche Fälle auszuschließen, haben wir eine Boolesche Funktion `brepf:connected(face1, face2)` definiert, die mittels Ray Casting verifiziert, dass entlang des verbindenden Pfads festes Material zwischen den beiden Faces vorhanden ist.

Die Lösung dieses Anwendungsfalls erfordert drei verschiedene Formen des Reasonings: topologisches Reasoning zur Identifikation von Bohrungen anhand ihres strukturellen Graph-Patterns, dimensionales Reasoning zur Messung von Abständen zwischen Faces und geometrisches Reasoning, um zu bestimmen, ob zwei Faces durch festes Material verbunden sind. Zusammen machen diese Anforderungen den Anwendungsfall zu einem repräsentativen und anspruchsvollen Proof of Concept für die automatisierte Validierung von CAD-Modellen gegen Designregeln.

Background

1. RDF Graph

Das Resource Description Framework (RDF) wird vom World Wide Web Consortium (W3C) als Standard zur Darstellung von Informationen im Semantic Web in Form eines gerichteten, beschrifteten Graphen definiert [25]. Daten werden als Triples der Form (Subject, Predicate, Object) ausgedrückt, wobei jedes Element durch eine IRI oder, im Fall von Objects, optional durch einen Literalwert identifiziert wird. Bild 2 zeigt einen Triple, der aus einer Circle-Instanz besteht, die durch das Predicate `hasRadius` mit dem Literal `3^^xsd:float` verbunden ist und so einen Gleitkommawert repräsentiert. Eine Sammlung von Triples bildet einen RDF-Graphen, der in einem Triple Store gespeichert und mittels SPARQL abgefragt werden kann. OWL (Web Ontology Language) erweitert RDF um eine formale Semantik, die die Definition von Klassen, Properties und Axiomen erlaubt und automatisches Reasoning über Description Logic unterstützt.



Bild 2: Ein RDF-Triple, bestehend aus dem Subject `www.example.org/circle#170`, dem Predicate `www.example.org/hasRadius` und dem Literal-Object `3^^xsd:float`. Dieser Triple drückt aus, dass die Circle-Instanz einen Radius von 3 besitzt.

2. SPARQL

SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) ist die Standard-Anfragesprache für RDF-Daten. Eine SPARQL-SELECT-Query spezifiziert Graph Patterns über Triple Patterns sowie optionale Expressions zum Binden zusätzlicher Variablen oder innerhalb von Filter-Operationen [9]. Named Graphs ermöglichen es, mehrere RDF-Datensätze in demselben Store vorzuhalten und in einer einzigen Query individuell zu adressieren. SPARQL kann durch eigene Funktionen erweitert werden, die in der Query Engine registriert werden; solche Funktionen erhalten RDF-Literale als Argumente und liefern berechnete Werte zurück, wodurch nicht-native Operationen wie geometrische Distanzberechnungen ermöglicht werden [4]. Listing 1 zeigt ein minimales Beispiel: Es ruft jeden Circle im Graphen zusammen mit seinem Radius ab und filtert das Ergebnis so, dass nur Kreise mit einem Radius größer als 2 zurückgegeben werden.

```
PREFIX brep: <http://www.example.org/brep#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>

SELECT ?circle ?radius
WHERE {
  ?circle a brep:Circle ;
          brep:hasRadius ?radius .
  FILTER(xsd:double(?radius) > 2)
}
```

Listing 1: Eine einfache SPARQL-Query, die alle Circles mit einem Radius größer als 2 abrufen.

3. SHACL

Die Shapes Constraint Language (SHACL) ist ein W3C-Standard zur Validierung von RDF-Graphen gegen eine Menge von Constraints [8]. Während SPARQL für das Abfragen und Extrahieren von Informationen aus einem Graphen entwickelt wurde, ist SHACL für dessen Validierung konzipiert: Ein SHACL-Prozessor evaluiert eine Menge von Shapes gegen einen Datengraphen und produziert einen Validierungsbericht, der angibt, welche Knoten konform sind und welche nicht. SHACL operiert unter der Closed-World-Assumption, das heißt, das Fehlen einer geforderten Aussage wird als Verletzung und nicht als unbekannte Information behandelt. SHACL unterscheidet zwischen zwei Arten von Shapes. Eine Node Shape adressiert eine Menge von Knoten im Graphen und wendet Constraints direkt auf diese an. Eine Property Shape adressiert die Werte einer bestimmten Property auf diesen Knoten und drückt Constraints wie Datentypanforderungen, Kardinalitätsschranken oder Wertebereiche aus. Shapes werden selbst als RDF dargestellt, wodurch sie zusammen mit den Daten gespeichert werden können, die sie einschränken, und wie jeder andere Graphinhalt abfragbar sind. Für Fälle, in denen das eingebaute Constraint-Vokabular nicht ausreicht, ermöglicht SHACL-SPARQL die Einbettung einer vollständigen SPARQL-Query in eine Shape als Constraint. Die Shape gilt als verletzt, sobald die eingebettete Query ein nicht-leeres Ergebnis zurückliefert. Diese Erweiterung macht es möglich, komplexe, auf Graph-Traversierung basierende Validierungsregeln, etwa geometrische Designprüfungen, im selben deklarativen Framework auszudrücken, das auch für einfachere strukturelle Constraints verwendet wird.

4. Boundary Representation (B-Rep)

Boundary Representation ist eine Technik zur Speicherung geometrischer Modelle, indem deren Begrenzungen als parametrische mathematische Gleichungen für zweidimensionale geometrische Entitäten dargestellt werden [26]. Diese 2D-Geometrien werden anschließend auf 3D-Körper projiziert und begrenzen damit eine Face. Die Menge der Faces begrenzt einen Bereich im euklidischen Raum und bildet eine Mannigfaltigkeit, die einen Solid repräsentiert. Ein B-Rep-Modell besteht aus einer Hierarchie topologischer Entitäten, welche die Struktur des Modells beschreiben, beispielsweise Vertices, Edges und Faces. Diese sind wie folgt verbunden: Ein Edge kann zwei Vertices referenzieren, eine Face kann mehrere Edges referenzieren. Allein dies vermittelt jedoch noch nicht die tatsächliche Geometrie des Objekts; vielmehr wird die Geometrie zusätzlich an die Topologie angeheftet. Jeder Vertex ist mit einem kartesischen Punkt verknüpft, ein Edge kann mit einer Linie, einem Kreis oder einem Spline verknüpft sein, und eine Face referenziert eine Surface wie einen Zylinder oder eine Ebene, wie in Bild 3 gezeigt. B-Rep ist in CAD-Systemen weit verbreitet, da es geometrische Informationen exakt erhält. Es ist daher tessellierten Repräsentationen überlegen, die zwar ähnliche topologische Elemente besitzen, jedoch die geometrische Vielfalt vermissen lassen, da Splines, Kreise und analytische Surfaces ausgeschlossen sind, während tessellierte Repräsentationen sich in der Rendering-Performance auszeichnen. B-Rep ist insofern eingeschränkt, als es die Modellierungsoperationen aus der Engineering-Historie innerhalb des Werkzeugs nicht speichern oder exportieren kann; Boolesche Operationen wie Subtraktion und Addition zwischen Solids sind daher aus den exportierten Daten nicht rekonstruierbar.

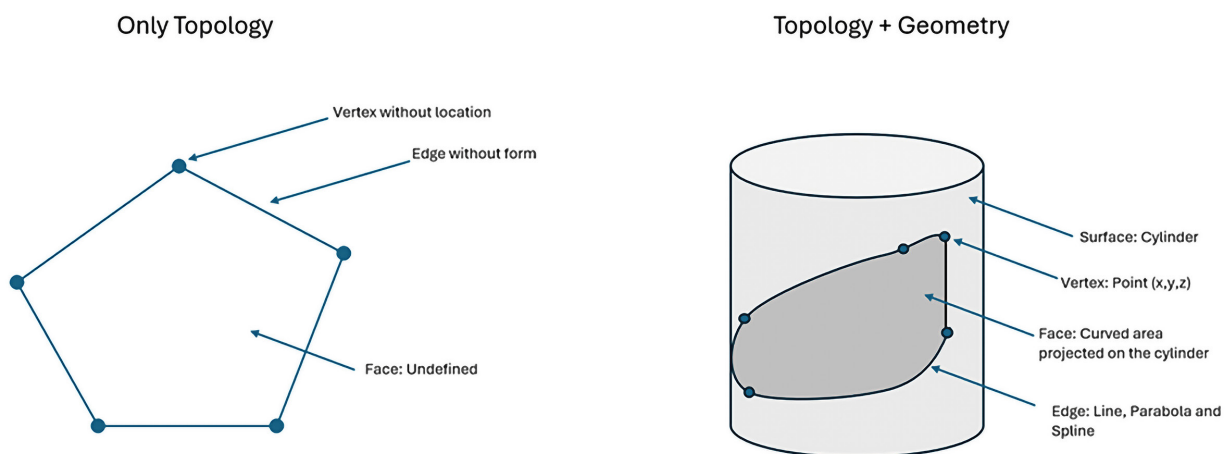


Bild 3: Vergleich zwischen reiner Topologie (links) und Topologie kombiniert mit Geometrie (rechts). Ohne Geometrie enthält ein B-Rep-Graph nur unbeschriftete Vertices, Edges und Faces ohne räumliche Bedeutung. Durch das Hinzufügen der Geometrie wird jedem Vertex ein kartesischer Punkt, jedem Edge ein Kurventyp (Linie, Parabel oder Spline) und jeder Face ein Surface-Typ (z.B. Zylinder) zugeordnet, wodurch der Solid im euklidischen Raum vollständig definiert ist.

Related Work

1. Ontologien und Graph Daten für Produktgeometrie

Geometrie. Die Forschung zu Ontologien für Produktgeometrie und deren Repräsentation in RDF ist seit über einem Jahrzehnt aktiv. Eine prominente Richtung besteht darin, Ontologien in bestehenden Industriestandards zu verankern und so direkt das Interoperabilitätsproblem zu adressieren. Im Jahr 2009 veröffentlichten Krüma et al. OntoStep, das die Logik des EXPRESS-Schemas von STEP AP 203 (ISO 10303-203) in OWL DL übersetzt und damit die Repräsentation von B-Rep in Knowledge Graphs ermöglicht [15]. Später entwickelten sie den weiterentwickelten Parser STP2OWL, der STEP-EXPRESS-Schemata und Part-21-Instanzdateien in OWL überführt [16]. Beide Werkzeuge dienten als Referenz für das Ontologiedesign in dieser Arbeit. Im Jahr 2015 definierten Perzylo et al. die Ontologie OntoBREP, die ebenfalls auf B-Rep abzielt, jedoch ohne Abhängigkeit vom STEP-Standard, und ergänzten sie um explizite Constraints für Baugruppen [21]. Sie nutzten die Kombination aus Topologie, Geometrie und Constraints zur Definition semantischer Robotertasks.

OntoBREP ist allerdings nicht in einem bestehenden Standard verankert, was die Integration in etablierte Engineering-Workflows erschwert. Im AEC-Sektor strukturiert ifcOWL, basierend auf ISO 16739 (IFC), Gebäudeelemente und Räume, um die architektonische Modellierung und die BIM-Koordination zu unterstützen, wobei die Geometrieunterstützung CSG, tessellierte und BRep-Repräsentationen umfasst [1]. Aktuelle Sprachen bieten nur eingeschränkte Unterstützung für PMI, Materialdaten und Regeln zur Ableitung semantischer Features wie Bohrungen oder Wänden.

Produktstruktur. Komplexe technische Produkte, etwa ein Automobil, können aus etwa 30000 Einzelteilen bestehen, von denen jedes mehrere Revisionen aufweisen kann, die sich in Geometrie, Gewicht oder Bezeichnung unterscheiden. Obwohl es Datenschemata gibt, die eine vollständige Baugruppe repräsentieren können, verwendet die Engineering-Praxis typischerweise separate Dateien je Bauteil. Bei der Anwendung von Semantic-Web-Technologien auf solche Baugruppen müssen die einzelnen Teilgraphen verknüpft und mit semantischen Informationen annotiert werden, um konjunktive Queries über die gesamte Baugruppe zu ermöglichen, etwa um alle Teile oberhalb eines bestimmten Gewichts abzurufen, die ein bestimmtes Material teilen, oder um Komponenten zu identifizieren, deren Geometrie eine Designnorm verletzt. Die Aufgabe von Produktstruktur-Ontologien besteht daher darin, Geometrie, funktionale Beschreibung und Metadaten zu verbinden. OpenSource-Ontologien, die sich mit Produktstrukturen befassen, sind unter anderem die Basic Product Ontology (BPO) [27] sowie der von Bharadwaj et al. [2] vorgeschlagene Assembly Hierarchy Subgraph. Allgemeiner haben jüngere Arbeiten Ontologien zur Modellierung von Produktstrukturen in einem abfragbaren Format eingesetzt [12].

Rongen et al. [23] schlagen eine Semantic AAS vor, die Asset-Administration-Shell-Daten (AAS) auf RDF abbildet und damit einen branchenweiten Wandel hin zu intelligenten, interoperablen Knowledge Graphs widerspiegelt. Aufbauend auf diesen Grundlagen führten Gebhard et al. [6] eine mehrschichtige Produktontologie ein, die Struktur, Geometrie und Verhalten abdeckt, und demonstrierten ihre Anwendung in einem Framework zur wertbasierten Synchronisation für Simultaneous Engineering bei Mercedes-Benz. Auf einer übergeordneten Systemebene schlagen Hofmann et al. [10] ein ontologiebasiertes Knowledge Backbone für Circular Factories vor und adressieren damit die Herausforderungen der semantischen Repräsentation von Produkten und Unsicherheiten, der Nutzung von Erfahrungswissen, der Systeminteroperabilität sowie des Datenmanagements. Ihre Ontologie umfasst das Produkt, die Ressourcen und die Umgebung sowie Überwachungs-, Planungs- und Ausführungsprozesse. Die resultierende Plattform unterstützt Entscheidungsprozesse in Bereichen wie Inspektion, Demontage, Fertigung, Prüfung und Montage, indem sie über den Zustand des Produkts vom historischen Kontext bis hin zu seinem zukünftigen Zustand reasoniert.

2. SPARQL Erweiterung für geometrische Daten

Geometrische Beziehungen wie Parallelität, Koinzidenz, Distanz und Winkel werden typischerweise nicht explizit in geometrischen Modellen gespeichert, sondern ergeben sich implizit aus den zugrunde liegenden mathematischen Repräsentationen. Die nativen Funktionalitäten von SPARQL bieten keine eingebaute Unterstützung für solche geometriespezifischen Operationen, was mehrere Erweiterungs-Frameworks motiviert hat. In der Architekturdomäne ist GeoSPARQL der etablierte Standard, der 2012 vom Open Geospatial Consortium veröffentlicht wurde [20]. Er definiert räumliche Datentypen, Operatoren und Filterfunktionen, die die Syntax und Semantik von SPARQL für 2D-Geodaten erweitern. Homburg et al. [11] erweiterten GeoSPARQL im Jahr 2020 um die Unterstützung des Reasonings über Rasterdaten, indem sie neue Literal-Datentypen definierten und die zusätzlichen Expressions zu deren Verarbeitung sowie deren Auswertung rekursiv festlegten. BimSPARQL [28] ermöglicht Queries über dreidimensionale BIM-Daten anhand einer klassifizierten Menge räumlicher Funktionen, bleibt jedoch auf den IFC-Standard beschränkt. Es wurde für die Validierung von BIM-Modellen anhand verschiedener Kriterien eingesetzt, beispielsweise dass jedes Gebäudeelement mit einem Geschoss assoziiert sein muss. Zuletzt definierten Elshani et al. [4] eine umfassende Menge von 3D-geometrischen Funktionen mit expliziten Signaturen und stellten ein Framework zu deren Implementierung mittels CAD-Bibliotheken bereit, das in einen RDF4J-TripleStore integriert ist. Diese Arbeit fließt unmittelbar in den hier verfolgten Ansatz ein.

Proof of Concept

Wir haben sowohl theoretische als auch praktische Forschung zur Anwendung von Knowledge Graph-Technologien auf CAD-Modelle durchgeführt. Im Gegensatz zur Architekturdomäne ist die Anwendung von Semantic-Web-Technologien auf mechanische CAD-Modelle vergleichsweise jung, und es fehlt an praktischen Implementierungen, die es der Industrie erlauben würden, deren Nutzen zu beurteilen. Unser Proof of Concept umfasst drei Hauptkomponenten: (1) einen Mechanismus zur Generierung von RDF-Graphen aus STEP-Daten, (2) SPARQL-Funktionserweiterungen für geometrisches Reasoning über B-Rep-Daten, die entweder als eigenständige Anfragesprache oder eingebettet in SHACL-SPARQL-Constraints verwendet werden können, sowie (3) eine webbasierte Benutzeroberfläche, die den vollständigen Workflow aus Laden, Abfragen und Validieren von CAD-Modellen integriert.

1. System Architektur

Die RDF-Graphdaten werden in einem RDF4J-Triple-Store gespeichert, der aufgrund seiner OpenSource-Natur und seiner Unterstützung für die Registrierung benutzerdefinierter Funktionen ausgewählt wurde [3]. RDF4J läuft mit Apache Tomcat auf einem Debian/Ubuntu-Server. Die Gesamtarchitektur ist in Bild 4 dargestellt. Die Graphgenerierung ist in Java als RDF4J-Erweiterung implementiert, die hochgeladene STEP-Modelle automatisch in Named Graphs konvertiert. Für die geometrische Analyse verwenden wir die OpenCascade Technology (OCC) C++-Bibliothek [19], die von Elshani et al. [5] als die leistungsfähigste Bibliothek für geometrische Operationen auf Engineering-Modellen identifiziert wurde. Da OCC eine C++-Bibliothek ist, haben wir einen eigenen Wrapper über das Java Native Interface (JNI) entwickelt, um sie in die Java-basierte RDF4J-Umgebung zu integrieren. Die Benutzeroberfläche ist in Node.js und React implementiert; sie kommuniziert mit RDF4J über dessen REST-API und mit OCC indirekt über die benutzerdefinierte Funktionsschicht, um CAD-Modelle und B-Rep-Graphen zu visualisieren sowie SPARQL-Queries und SHACL-Validierungen interaktiv auszuführen.

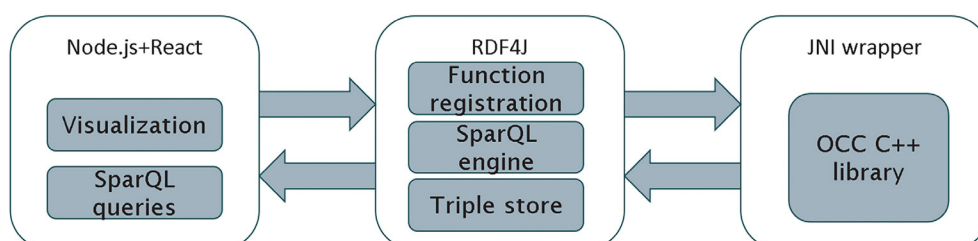


Bild 4: Systemarchitektur: Das Node.js/React-Frontend kommuniziert mit RDF4J, das benutzerdefinierte SPARQL-Funktionen registriert, die geometrische Berechnungen über einen JNI-Wrapper an die OCC-C++-Bibliothek delegieren.

2. Graph Generation

Wir haben eine eigene B-Rep-Ontologie definiert, die am Standard STEP 242 ausgerichtet ist. Geometrische und topologische Feature-Typen, ihre Properties sowie ihre Beziehungen wurden aus dem EXPRESS-Schema von STEP 242 abgeleitet und in RDF/OWL ausgedrückt. Für diesen Proof of Concept umfasst die Ontologie ausschließlich geometrische und topologische Features; Kinematik und PMI (Product and Manufacturing Information) sind ausgeschlossen. Die Klassenhierarchie der Ontologie ist in Bild 5 dargestellt.

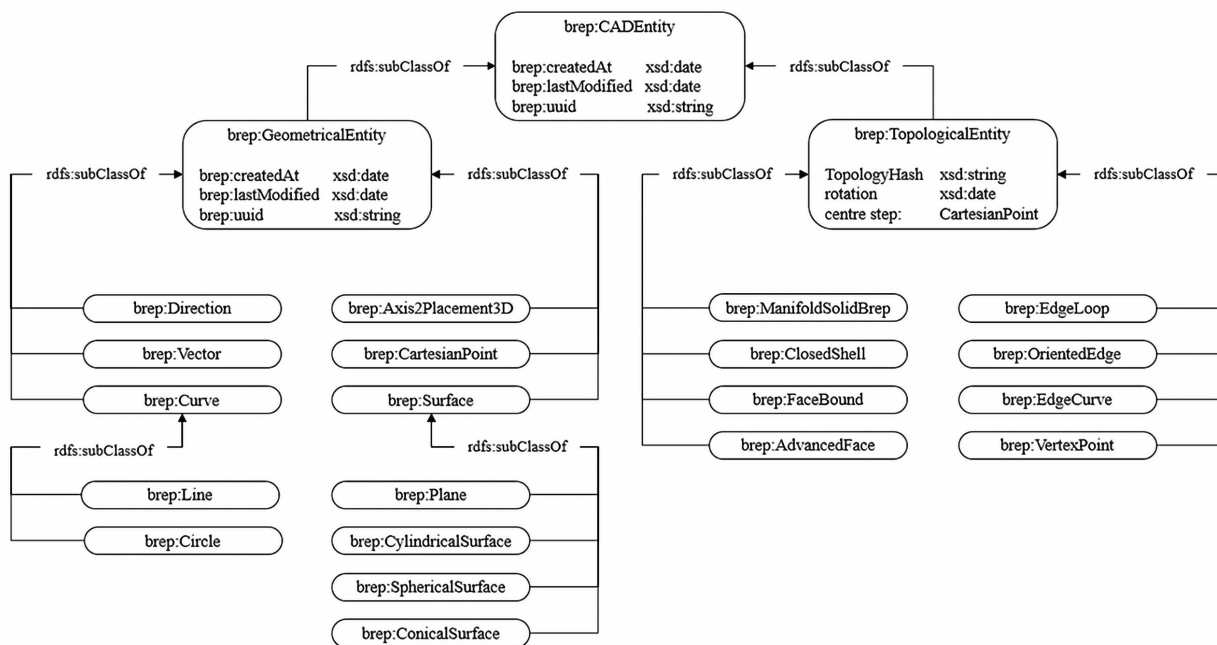


Bild 5: Klassenhierarchie der B-Rep-Ontologie, strukturiert in zwei Top-Level-Zweige: *brep:GeometricalEntity* (Surfaces, Curves, Points, Axes) und *brep:TopologicalEntity* (Manifold Solid, Closed Shell, Advanced Face, Edge Loop, Oriented Edge, Edge Curve, Vertex Point).

Anschließend haben wir einen Algorithmus entwickelt, der STEP-Part-21-Instanzdateien gemäß dieser Ontologie in RDF-Grapheninstanzen konvertiert. Der Algorithmus verwendet String-Parsing, um eine Hashmap zu erstellen, die nach STEP-Entity-Typ indiziert ist, und erzeugt aus jedem Eintrag RDF-Knoten und Edges. Während der Konvertierung wurden zwei semantische Erweiterungen vorgenommen. Erstens wurden Beziehungen explizit gemacht: Anstelle der syntaktischen STEP-Referenz #x verweist auf #y hält der Graph ein benanntes Predicate fest, beispielsweise *brep:hasOuterFaceBound*, wodurch der Beziehungstyp ohne Kenntnis des STEP-Schemas abfragbar wird. Zweitens wurden geometrische Duplikate eliminiert: Wenn zwei Faces einen Edge teilen, wird dieser Edge im Graphen durch einen einzigen Knoten repräsentiert, sodass geteilte Topologie durch eine einfache Knotenidentitätsprüfung anstatt eines geometrischen Vergleichs erkannt werden kann.

3. SPARQL Erweiterung für B-Rep Daten

Wir haben SPARQL um einen neuen Literal-Datentyp für B-Rep-Geometrie sowie eine Menge eigener Funktionen erweitert, die in RDF4J registriert sind. Die Funktionen operieren auf den in unserer Ontologie definierten topologischen Entitäten: `brep:Vertex`, `brep:EdgeCurve`, `brep:AdvancedFace` und `brep:ClosedShell`. Dem Klassifikationsansatz vorangegangener Arbeiten folgend [4, 28], haben wir die Funktionen in vier Kategorien gruppiert:

- **Algebraische Beziehungsfunktionen:** berechnen skalare Größen zwischen Entitäten, etwa den minimalen Abstand zwischen zwei Faces, Edges oder Vertices.
- **Geometrische Beziehungsfunktionen:** evaluieren geometrische Prädikate, beispielsweise ob zwei Faces parallel sind oder ob sich zwei Solids schneiden.
- **Boolesche Operationsfunktionen:** berechnen mengentheoretische Kombinationen von Solids, beispielsweise Vereinigung oder Schnittmenge.
- **Analytische Funktionen:** berechnen intrinsische Eigenschaften von Entitäten, etwa den Flächeninhalt einer Face oder das Volumen einer Shell.

Eine wesentliche Implementierungsherausforderung ergibt sich aus den Kosten für die Initialisierung von OCC-Solid-Objekten, da hierfür die vollständige B-Rep-Datenstruktur aus dem Geometrie Literal des Graphen geparkt und konstruiert werden muss. Die Herausforderung wird zusätzlich dadurch verschärft, dass einzelne Primitive wie Faces oder Surfaces oft Informationen über den übergeordneten Solid benötigen, zu dem sie gehören, beispielsweise wenn geprüft werden soll, ob zwei Faces durch den Solid hindurch verbunden sind, oder wenn bestimmt werden soll, ob eine Face eine Wand ist, was nur in einem umfassenderen Kontext sinnvoll ist. Bei jedem Funktionsaufruf ein vollständiges CAD-Modellobjekt zu konstruieren, ist daher rechenintensiv.

Um dies zu adressieren, sind alle benutzerdefinierten Funktionen in einer gemeinsamen Java-Klasse implementiert, die als Cache fungiert und als CAD Model Object realisiert ist. Beim ersten Aufruf, der eine bestimmte Closed Shell betrifft, wird das entsprechende OCC-Objekt aus dem Geometrie-Literal konstruiert und in einer Hashmap gespeichert, die anhand der Graph Identifikation der Shell indiziert ist; ihre Sub-Entitäten (Faces, Edges, Vertices) werden gleichzeitig indiziert. Nachfolgende Funktionsaufrufe rufen die zwischengespeicherten Objekte ab, anstatt sie erneut zu initialisieren, was bedeutet, dass die Auswertung einer Funktion über Hunderte von Faces eines einzelnen Solids nur eine einzige OCC-Initialisierung erfordert. Um den Solid-Kontext jeder Funktion zur Verfügung zu stellen, erweitern wir jede Funktionssignatur um den übergreifenden Solid-Identifikator.

Beispielsweise wird die abstrakte Funktion

$$\text{minDistance} : \textit{face} \times \textit{face} \rightarrow \mathbb{R}$$

zur eigenen SPARQL-Funktion

$$\text{brepf:minDistance} : \textit{faceID} \times \textit{faceID} \times \textit{solidID} \rightarrow \mathbb{R}.$$

Die Architektur des CAD Model Object wird im Folgenden beschrieben.

CAD MODEL OBJECT
— Geometrie-Instanzen — + cad_objects = { solidID : { object : solid_object, AdvancedFace : { advID : adv_object, advID : ... }, Surface : { surfID : surf_object, surfID : ... }, ... }
— Funktionen — 1: + brepf:minDistance(faceID₁, faceID₂, solidID) → ℝ 2: + brepf:connected(faceID₁, faceID₂, solidID) → {true,false} 3: + brepf:volume(solidID) → ℝ 4: ...

Wenn eine brepf:-Funktion aufgerufen wird, prüft sie zunächst, ob alle benötigten Objekte bereits zwischengespeichert sind. Falls nicht, werden sie initialisiert. Falls sie vorhanden sind, wird die Operation unter Verwendung der OpenCascade-CAD-Bibliotheken ausgeführt.

4. User Interface

Wir haben eine Webanwendung implementiert, um den Mehrwert von Knowledge Graphs und SPARQL-Erweiterungen für die CAD-Modellanalyse zu demonstrieren. Als Benchmark-Datensatz haben wir die CAD-Modelle eines SCARA-Roboters verwendet, die von HowToMechatronics veröffentlicht wurden [18]. Die Benutzeroberfläche ist in drei Bereiche unterteilt, wie in Bild 6 dargestellt.

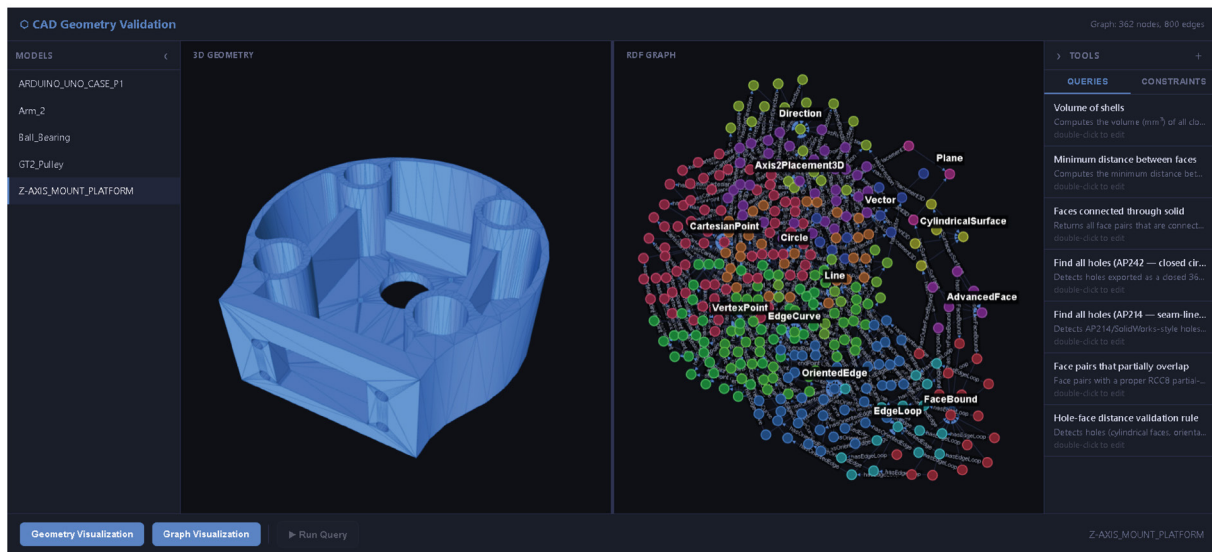


Bild 6: Benutzeroberfläche: (links) Modellbrowser, (Mitte) Visualisierungsfenster für Geometrie und RDF-Graph, (rechts) Toolbox mit SPARQL-Queries und SHACL-Constraints.

Das linke Panel stellt einen Modellbrowser bereit; durch Auswahl eines Modells werden die Visualisierungssteuerungen aktiviert. Der zentrale Bereich enthält zwei nebeneinander angeordnete Visualisierungsfenster. Das Geometriefenster rendert das ausgewählte CAD-Modell: Aus dem SPARQL-Query-Ergebnis wird ein OCC-Objekt konstruiert, tesselliert und im Browser mittels WebGL dargestellt. Das Graphfenster zeigt den entsprechenden RDF-Graphen: Knoten werden gemäß der Ontologiekategorie eingefärbt (z.B. EdgeLoop, Circle) und Edges mit ihren Predicate-Namen beschriftet; Knotenlabels werden zur besseren Übersichtlichkeit unterdrückt. Das rechte Panel ist die Toolbox, die vordefinierte SPARQL-Queries und SHACL-Shape-Constraints enthält. SPARQL-Queries können bei Bedarf gegen das aktive Modell ausgeführt werden; SHACL-Constraints werden automatisch ausgewertet, sobald ein Modell in den Graph Store eingelesen wird.

Validation

Um den in Abschnitt 2 definierten Anwendungsfall zu adressieren, kombinierten wir die implementierten SPARQL-Funktionen mit Validierungslogik, um alle drei Aspekte abzudecken: Bohrungserkennung, Distanzberechnung und Prüfung der Solid-Konnektivität. Hierfür kombinierten wir SPARQL-Reasoning mit SHACL-Shapes.

1. Reasoning

Die vollständige Validierungs-Query ist in Listing 2 dargestellt. Der innere SELECT-Block identifiziert kandidatenhafte Bohrungs-Face-Paare, indem er das B-Rep-Pattern für Bohrungen innerhalb des Bauteilgraphen abgleicht und die anwendbare Mindestabstandsnorm aus einem separaten Named Graph hole_norms abrufen, der materialabhängige Distanzfaktoren speichert. Die äußeren BIND und FILTER-Ausdrücke berechnen anschließend den geometrischen Abstand, vergleichen ihn mit der Norm und behalten nur die Paare, welche die Regel verletzen.


```

PREFIX brep: <http://www.example.org/brep#>
PREFIX brepf: <http://www.example.org/brepf#>
PREFIX norm: <http://example.com/norm#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>

SELECT DISTINCT ?hole ?distance ?min_distance
FROM NAMED <http://www.example.org/testdata/part21#Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM>
FROM NAMED <http://www.example.org/hole_norms>
WHERE {
  {
    SELECT DISTINCT ?shell ?geo ?hole ?face ?diameter ?factor
    WHERE {
      GRAPH <http://www.example.org/testdata/part21#Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM> {
        ?shell brep:hasAdvFace ?hole ;
          brep:hasGeometry ?geo ;
          brep:hasMaterial ?material1 .
        ?hole brep:hasSurface ?surface ;
          brep:orientation "False" ;
          brep:hasOuterFaceBound ?fb .
        ?surface a brep:CylindricalSurface ;
          brep:RADIUS ?radius .
        ?fb brep:hasEdgeLoop ?loop .
        ?loop brep:hasOrientedEdge ?oe .
        ?oe brep:hasEdgeCurve ?edge .
        ?edge brep:endPoint ?ep ;
          brep:startPoint ?sp ;
          brep:hasCurve ?curve .
        ?curve a brep:Circle .
        FILTER(?ep = ?sp)
        ?shell brep:hasAdvFace ?face .
        FILTER(?hole != ?face)
        FILTER NOT EXISTS {
          ?hole (brep:hasOuterFaceBound|brep:hasFaceBound)
            /brep:hasEdgeLoop/brep:hasOrientedEdge/brep:hasEdgeCurve ?shared .
          ?face (brep:hasOuterFaceBound|brep:hasFaceBound)
            /brep:hasEdgeLoop/brep:hasOrientedEdge/brep:hasEdgeCurve ?shared .
        }
      }
    }
    GRAPH <http://www.example.org/hole_norms> {
      ?norm a norm:hole_norm ;
        norm:material ?material2 ;
        norm:edgeFactor ?factor ;
        norm:max_size ?max_size ;
        norm:min_size ?min_size .
    }
    FILTER(?material1 = ?material2)
    FILTER(datatype(?min_size) IN (xsd:decimal, xsd:double, xsd:integer))
    FILTER(datatype(?max_size) IN (xsd:decimal, xsd:double, xsd:integer))
    BIND(xsd:double(?radius) * 2 AS ?diameter)
    FILTER(?diameter > xsd:double(?min_size) &&
      ?diameter < xsd:double(?max_size))
  }
  BIND(?diameter * xsd:double(?factor) AS ?min_distance)
  BIND(brepf:distance(?geo, ?hole, ?face) AS ?distance)
  FILTER(?distance > 0 && ?distance < ?min_distance)
  BIND(brepf:connected(?geo, ?shell, ?hole, ?face) AS ?connected)
  FILTER(?connected)
}

```

Listing 2: SPARQL-Query zur Validierung des Abstands zwischen Bohrung und Kante.

Nach der Ausführung erzeugt die Oberfläche einen tabellarischen Bericht, der jedes verletzende Bohrungs-Face-Paar mit dem gemessenen Abstand und dem geforderten Mindestabstand auflistet (Bild 7). Angewendet auf die Z-Achsen-Montageplattform des SCARA-Roboters identifizierte die Query 8 Bohrungen mit Abständen zu benachbarten Faces, die unterhalb der materialspezifischen Norm liegen.

Hole-face distance validation rule — Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM 18.88s

24 row(s)

HOLE	DISTANCE	MIN_DISTANCE
1842	2.2817279836452946	3.2
1842	1.431727983645295	3.2
1867	2.2817279836452955	3.2
1867	1.4317279836452954	3.2
1909	2.281727983645293	3.2
1909	1.431727983645294	3.2
2273	2.2817279836452955	3.2
2273	1.4317279836452943	3.2
2439	1.9499999999999993	5.1
2439	2.9499999999999993	5.1
2439	3.864847884329831	5.1
2457	1.9499999999999993	5.1

Bild 7: Ergebnistabelle der Query für das Bauteil Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM: Jede Zeile listet einen verletzenden Bohrungs-Identifikator, den gemessenen Abstand zur nächsten nicht angrenzenden Face sowie den aus der anwendbaren Norm abgeleiteten geforderten Mindestabstand auf.

Die verletzenden Faces werden zudem direkt in der 3D-Geometrieansicht hervorgehoben und liefern dem Konstrukteur damit unmittelbares visuelles Feedback (Bild 8).

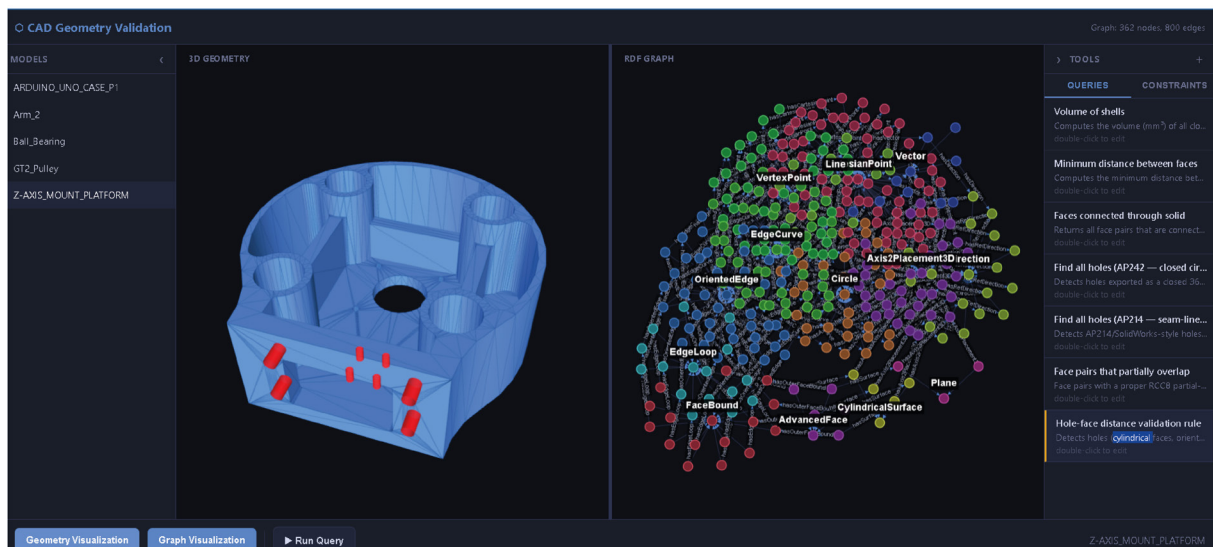


Bild 8: Visualisierung der Query-Ergebnisse: Faces, welche die Regel zum Abstand zwischen Bohrung und Kante verletzen, werden in der 3D-Geometrieansicht hervorgehoben.

2. Constraints

Während sich SPARQL gut für das Reasoning über RDF-Daten und für die Extraktion oder Generierung von Informationen eignet, ist es für die Validierung nicht optimal. SHACL-Shapes sind in diesem Kontext zu bevorzugen, da Constraints direkt in den Graphen eingebettet werden können. Die SHACL-Erweiterung SHACL-SPARQL ermöglicht die Integration von SPARQL-Queries in Shapes. Da Shapes unter der Closed-World-Assumption operieren, schlägt die Validierung fehl, sobald die SPARQL-Query ein Ergebnis zurückgibt. In unserem Anwendungsfall bedeutet dies, dass eine Verletzung gemeldet wird, wenn eine Bohrung näher an einer Kante liegt als zulässig. In unserer Anwendung werden die Constraints im zweiten Tab auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche angezeigt. Sie werden automatisch beim Serverstart ausgewertet, sobald die gesamte Geometrie in Knowledge Graphs überführt wurde. Dies stellt die endgültige Kombination von Reasoning-Logik und automatisierter CAD-Modellvalidierung dar und kann als Gatekeeping-Schicht zwischen den von Lieferanten erhaltenen Modellen und den produktiven Systemen großer Fertigungsunternehmen dienen. Darüber hinaus kann es semantisch angereicherte Diagnosen liefern, die angeben, was fehlerhaft ist, und potenziell die Behebung anleiten.

Listing 3 zeigt einen Auszug aus dem Validierungsbericht, den die SHACL-Engine für ein Bauteil produziert, in dem eine Bohrung die Mindestabstandsregel verletzt. Der Bericht ist um das standardisierte SHACL-Validierungsvokabular herum strukturiert. Der Top-Level-Knoten enthält `sh:conforms false` und zeigt damit an, dass mindestens ein Constraint verletzt wurde. Jeder untergeordnete `sh:ValidationResult`-Knoten identifiziert die Shape, welche die Verletzung ausgelöst hat, über `sh:sourceShape`, den validierten Solid über `sh:focusNode` und die konkrete verletzende Face über `sh:value`. Die `sh:sourceConstraintComponent` ist auf `sh:SPARQLConstraintComponent` gesetzt, was widerspiegelt, dass das Constraint als eingebettete SPARQL-Query ausgedrückt wurde. Die `sh:resultMessage` liefert eine menschenlesbare Diagnose, welche die Identifikation der Bohrungs-Face, die benachbarte Face, der sie zu nahe ist, den gemessenen Abstand und den aus dem Norm-Graphen abgeleiteten materialspezifischen Mindestabstand enthält. Drei repräsentative Ergebnisse werden gezeigt, von denen jedes einer anderen Bohrungsdurchmesserklasse und damit einer anderen Mindestabstandsschwelle entspricht; der vollständige Bericht für dieses Bauteil enthält insgesamt 86 Verletzungen.

```
[ a sh:ValidationReport ;
  sh:conforms false ;
  sh:result
    [ a sh:ValidationResult ;
      sh:resultSeverity sh:Violation ;
      sh:sourceConstraintComponent sh:SPARQLConstraintComponent ;
      sh:sourceShape <http://example.com/cad#HoleDistanceConstraintShape> ;
      sh:focusNode <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#2996> ;
      sh:value <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#1842> ;
      sh:resultMessage 'Hole face ...#1842 is too close to face ...#754:
distance 2.28 mm < minimum 3.2 mm.' ] ,
    [ a sh:ValidationResult ;
      sh:resultSeverity sh:Violation ;
      sh:sourceConstraintComponent sh:SPARQLConstraintComponent ;
      sh:sourceShape <http://example.com/cad#HoleDistanceConstraintShape> ;
      sh:focusNode <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#2996> ;
      sh:value <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#2439> ;
      sh:resultMessage 'Hole face ...#2439 is too close to face ...#817:
distance 1.95 mm < minimum 5.1 mm.' ] ,
    [ a sh:ValidationResult ;
      sh:resultSeverity sh:Violation ;
      sh:sourceConstraintComponent sh:SPARQLConstraintComponent ;
      sh:sourceShape <http://example.com/cad#HoleDistanceConstraintShape> ;
      sh:focusNode <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#2996> ;
      sh:value <http://www.example.org/ex/Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM#2895> ;
      sh:resultMessage 'Hole face ...#2895 is too close to face ...#529:
distance 2.0 mm < minimum 2.4 mm.' ]
    # ... 86 weitere Verletzungen ausgelassen
  ] .
```

Listing 3: Auszug des SHACL-Validierungsberichts für das Bauteil Z-AXIS_MOUNT_PLATFORM (Identifikatoren von Blank Nodes zur besseren Lesbarkeit gekürzt).

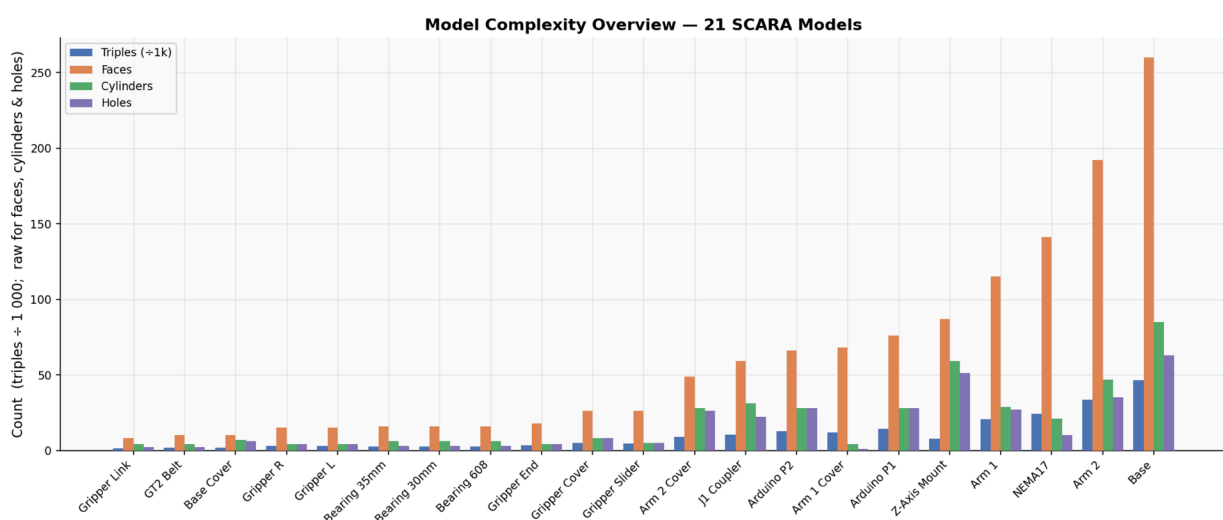


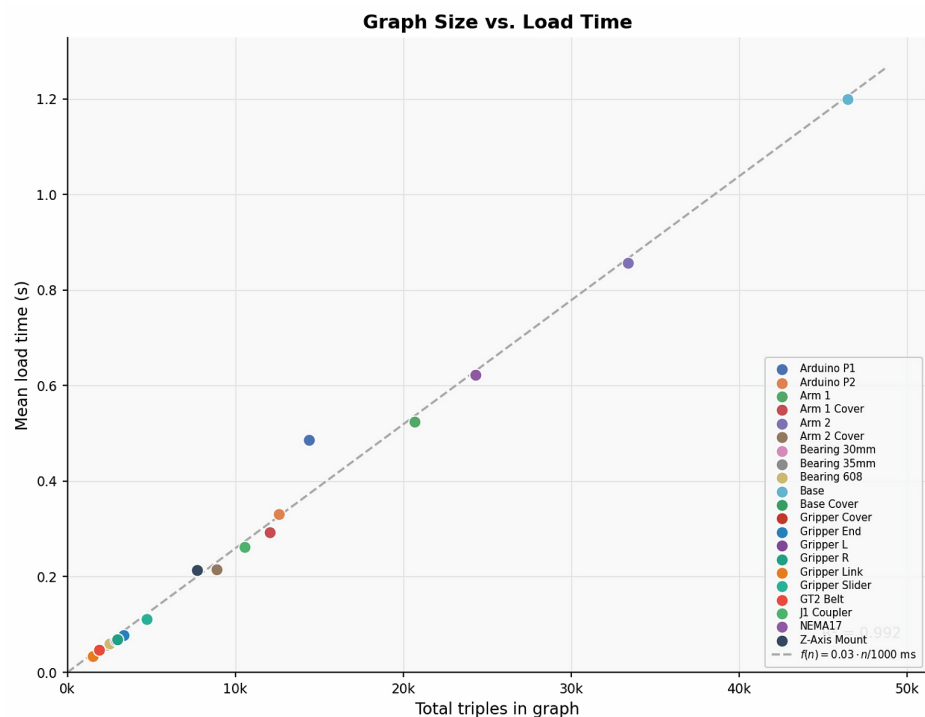
Bild 9: Übersicht der Modellkomplexität für die 21 SCARA-Roboter-Bauteile, die im Benchmark verwendet werden, mit der Anzahl der Triples (skaliert um $\div 1\,000$), Faces, zylindrischen Surfaces und Bohrungen pro Bauteil. Die Bauteile sind von links nach rechts nach steigender Gesamtkomplexität geordnet; das größte Bauteil (Base) besitzt 46 448 Triples, 260 Faces, 85 zylindrische Surfaces und 63 Bohrungen.

Feasibility Study

Um die Praxistauglichkeit dieser Technologien zu beurteilen, führten wir eine Machbarkeitsstudie durch, die sowohl funktionale Korrektheit als auch Performance evaluierte. Wir führten die Query aus unserem Anwendungsfall aus, die Graphtraversierung mit geometrischer Berechnung kombiniert. Zusätzlich verwendeten wir eine rein topologische Bohrungs-Identifikations-Query ohne externe Bibliotheksaufrufe oder benutzerdefinierte SPARQL-Funktionen als Vergleichsbaseline. Die Modellkomplexität wird durch die Gesamtzahl der Triples, Faces, zylindrischen Surfaces und Bohrungen charakterisiert. Der Benchmark-Datensatz besteht aus Modellen eines SCARA-Roboters, der für den Eigenbau konzipiert und von Dejan Nedelkovski auf seiner Plattform HowToMechatronics erstellt wurde [18]. Wir wählten 21 Bauteile unterschiedlicher Größe und Komplexität, um die Skalierbarkeit unseres Ansatzes zu beurteilen; die Verteilung der Modellgrößen ist in Bild 9 dargestellt. Das größte Modell ist die Base des SCARA-Roboters, mit 46448 Triples, 260 Faces, 85 zylindrischen Surfaces und 63 Bohrungen.

Wir analysierten die Performance in vier Bereichen: Graphmaterialisierung aus STEP-Dateien, Query-Ausführungszeit, Query-Ausführungszeit mit und ohne unseren Caching-Mechanismus sowie SHACL-basierte Validierung. Zur Analyse und Diskussion der Skalierbarkeit verwendeten wir die Methode der kleinsten Quadrate (Least-Squares-Regression), um eine Funktion an die Verteilung anzupassen, unter Verwendung von scikit-learn.

Bild 10: Graphgröße im Vergleich zur mittleren Ladezeit für die 21 SCARA-Roboter-Bauteile. Die Ladezeit wächst linear mit der Anzahl der Triples ($R^2 = 0,992$), angepasst durch $f(n) = 25,95 \cdot n/1000$ ms.



Wir beginnen mit der Graphmaterialisierung, die ein lineares Wachstum der Ladezeit relativ zur Anzahl der Triples zeigt; bei einem Regressionskoeffizienten von $R^2 = 0,992$ erhalten wir die Anpassung

$$f(n) = 25,95 \cdot \frac{n}{1000} \quad [\text{ms}],$$

wobei n die Anzahl der Triples bezeichnet und das Wachstum der Ladezeit in unserem System beschreibt.

Zur Analyse der Query-Zeit zeichnen wir die Ausführungszeit für die rein topologische Bohrungsidentifikations-Query und für die Query mit Distanzberechnung auf. Alle Queries wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Distanz-Query für das größte Modell, die die Berechnung des Abstands von 63 Bohrungen zu 260 Faces (einschließlich der Bohrungen selbst) erforderte, also insgesamt 14364 Distanzberechnungen, wurde in etwa 13,5 Sekunden abgeschlossen. Die Query-Zeit zeigte eine starke Abhängigkeit von der Anzahl der Bohrungen anstatt von der Gesamtzahl der Triples, was zu erwarten war, da die Anzahl der Berechnungen direkt von der Anzahl der Bohrungen abhängt. Die Beziehung zwischen Query-Zeit und Bohrungsanzahl für die rein topologische Query ist in Bild 11 dargestellt, und für die Distanz-Query in Bild 12. Die rein topologische Query weist einen linearen Trend auf:

$$f_{\text{holes}}(h) = 0,225 \cdot h + 17,1 \quad [\text{ms}], \quad R^2 = 0,775,$$

wobei die Konstante 17 ms den festen SPARQL-Ausführungs-Overhead unabhängig von der Modellgröße darstellt und der Term 0,225 ms/Bohrung die marginalen Kosten pro gefundener Bohrung beschreibt. Die Distanz-Query weist ein quadratisches Wachstum auf:

$$f_{\text{dist}}(n, h) = 7,87 \times 10^{-5} \cdot n + 3,73 \times 10^{-3} \cdot \frac{h(h-1)}{2} \quad [\text{s}], \quad R^2 = 0,796,$$

wobei n die Anzahl der Triples und h die Anzahl der Bohrungen ist. Dies führt zu einem schnellen Anwachsen der Query-Zeit bei Bauteilen mit vielen Bohrungen.

Die SHACL-Validierung zeigt, wie aufgrund der identischen zugrunde liegenden Query zu erwarten war, eine ähnliche Verteilung wie die Distanz-Query, benötigt jedoch deutlich mehr Zeit. Die Validierung des Basismodells dauert nahezu 20 Minuten. In Bild 13 vergleichen wir die Performance von SHACL-SPARQL und reinem SPARQL auf einer logarithmischen Skala. Die SHACL-Validierung benötigt etwa das 120-Fache der Ausführungszeit der äquivalenten reinen SPARQL-Query.

Unser Caching-Ansatz verbesserte die SPARQL-Query-Performance erheblich, insbesondere bei Modellen, in denen der Solid groß, die Anzahl der Bohrungen jedoch gering ist, da die Konstruktion des CAD-Modellobjekts kostspielig ist, während einzelne Distanzberechnungen vergleichsweise günstig sind. Diese Modelle erreichten einen Speedup von bis zu 92,5×.

Bild 11: Ausführungszeit der rein topologischen Bohrungs-Identifikations-Query im Vergleich zur Bohrungsanzahl über die 21 Benchmark-Bauteile. Die Beziehung ist näherungsweise linear ($R^2 = 0,775$), mit einem festen Overhead von 17 ms und marginalen Kosten von 0,225 ms pro Bohrung.

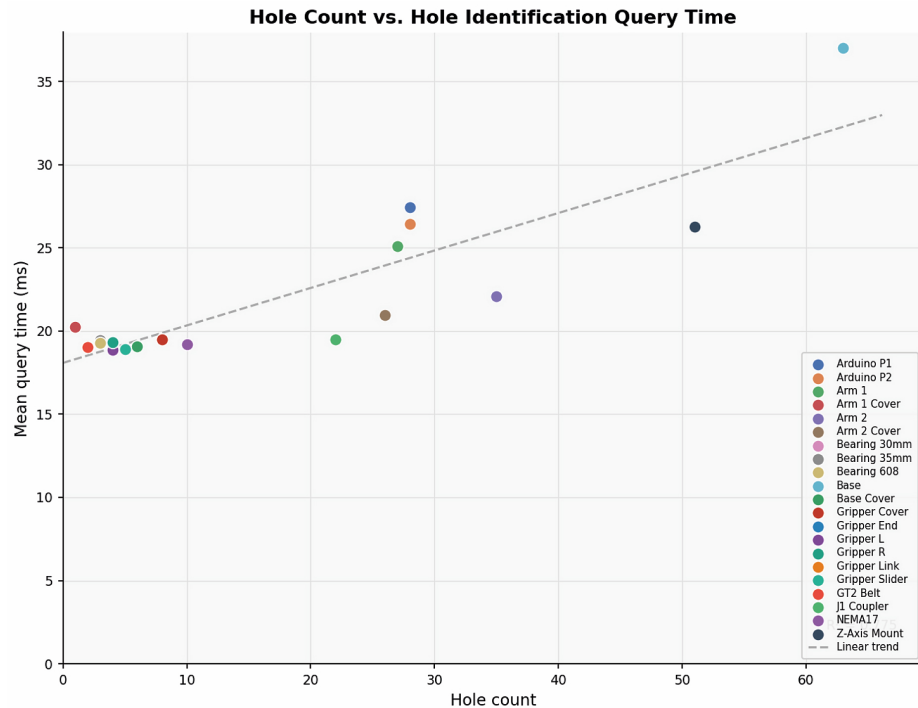
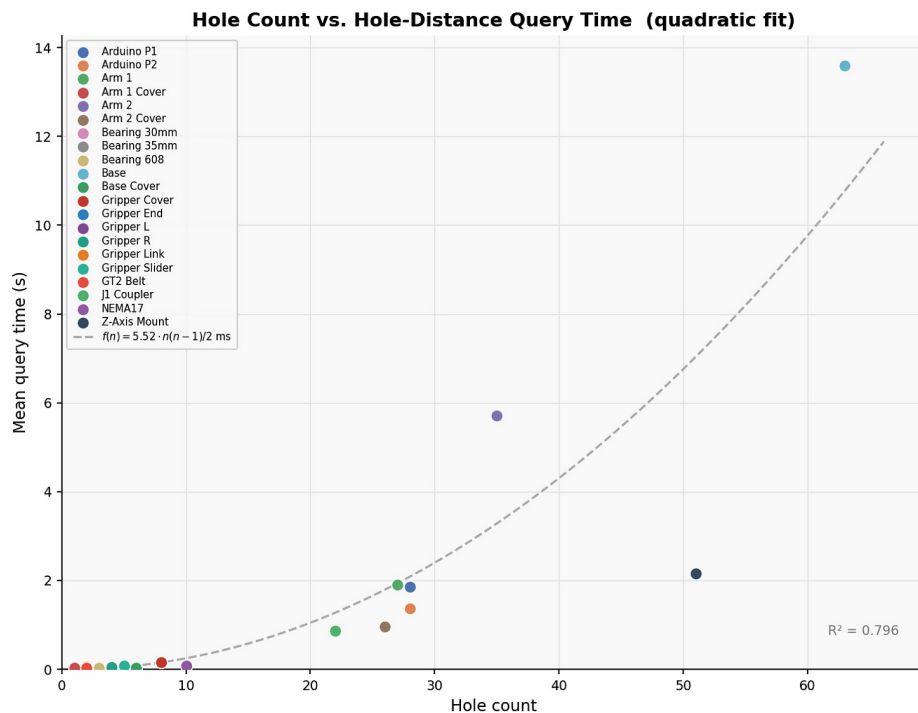


Bild 12: Ausführungszeit der Distanz-Query zwischen Bohrung und Face im Vergleich zur Bohrungsanzahl. Das Wachstum ist quadratisch in der Anzahl der Bohrungen ($R^2 = 0.796$), da jede Bohrung mit jeder anderen Face verglichen werden muss, was zu einer steil ansteigenden Ausführungszeit für Bauteile mit vielen Bohrungen führt.



Die Verbesserung ist in Bild 14 dargestellt. Während der relative Speedup für kleinere Modelle stärker ausgeprägt ist, konvergiert er mit zunehmender Modellgröße, bleibt jedoch bei großen Modellen mit vielen Distanzberechnungen weiterhin äußerst vorteilhaft.

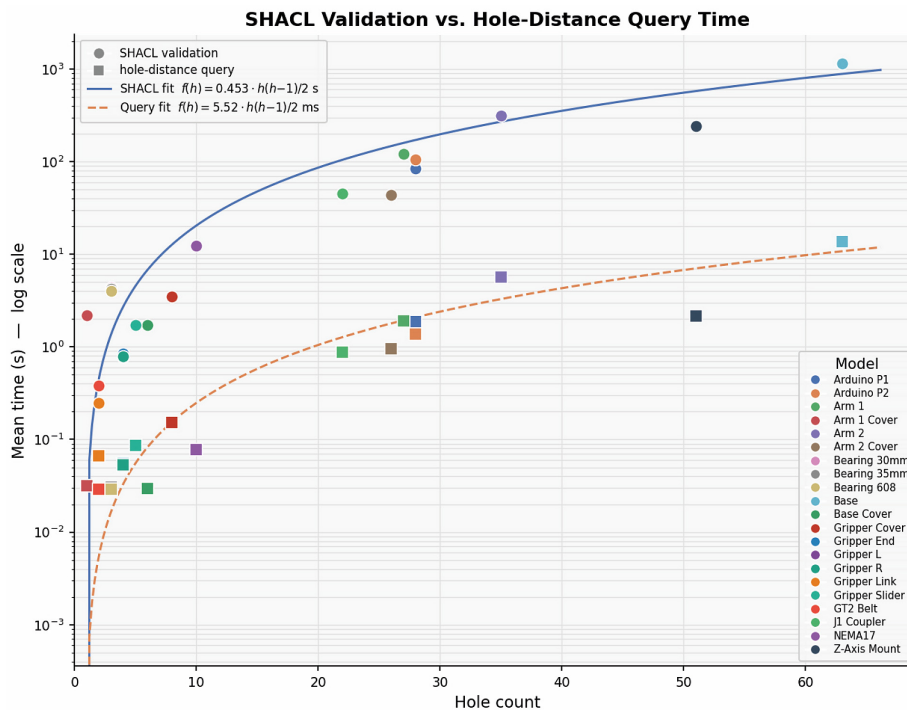


Bild 13: SHACL-Validierungszeit im Vergleich zur reinen SPARQL-Distanz-Query-Zeit auf logarithmischer Skala, aufgetragen gegen die Bohrungsanzahl. SHACL-SPARQL benötigt durchgängig etwa zwei Größenordnungen mehr Zeit als die äquivalente reine SPARQL-Query; die Validierung des größten Bauteils (Base, 63 Bohrungen) dauert annähernd 20 Minuten.

Discussion

Die Kombination von B-Rep und Knowledge-Graph-Technologien zu Knowledge-B-Rep-Graphs hat ihr Potenzial zur Analyse und Validierung geometrischer Modelle unter Beweis gestellt. Wir haben einen Proof of Concept mit mehreren Analysefunktionen implementiert und gegen einen BenchmarkDatensatz evaluiert. Unsere Studie hat gezeigt, dass die Integration von CAD-Bibliotheken zur Analyse von B-Rep-Primitiven, ein bislang nur wenig erforschter Bereich, in der Tat machbar ist und für einfache CAD-Modelle in Sekundenschnelle berechnet werden kann.

Wir betrachten zunächst die Skalierbarkeit. Die Graphmaterialisierung skaliert linear; eine Extrapolation aus unserem Regressionsmodell ergibt, dass unser System eine Milliarde Triples in etwa 16,5 Minuten laden würde. Dies kann für mittelgroße Deployments akzeptabel sein, könnte jedoch in großen Automotive-Kontexten zum Engpass werden. Ein Fahrzeug kann etwa 30000 Teile mit zahlreichen Revisionen aufweisen, und viele dieser Teile sind komplexer als die in dieser Studie verwendeten Komponenten des SCARA-Roboters. Dies ist besonders problematisch für geometrische Queries, deren Rechenaufwand quadratisch mit der Modellkomplexität wächst. Den Einsatz von SHACL-Shapes über die zahlreichen in der Automobilindustrie vorkommenden Bauteile hinweg dürfte daher in naher Zukunft schwer zu realisieren sein. Der beste Weg ist, mit einer bereits performanten Graph-Infrastruktur zu beginnen und einfache Operationen ohne externe Bibliotheksaufrufe durchzuführen, bevor die automatisierte Validierung integriert wird. Die Performance von SPARQL mit CAD-Operationen wird weitere Verbesserungen erfordern, bevor sie in Shapes für den täglichen produktiven Einsatz integriert werden kann. Funktionen, die nicht von der Anzahl der Primitive abhängen, etwa Schnittprüfungen zwischen Bauteilen

oder Metadaten-Queries für Volumen und Schwerpunkt, stellen in dieser Hinsicht einen Quick Win dar. Unser Caching-Modell lieferte exzellente Ergebnisse und adressiert damit die Herausforderung der hohen Anzahl von Primitiven in B-Rep sowie den Bedarf an Kontextwissen. Eine verbleibende Einschränkung besteht darin, dass die brepf-Funktionen zusätzliche Komplexität in Queries einbringen, was die intuitive Nutzung sowie die Integration mit LLM-basierten Agenten erschweren kann.

Abschließend betrachten wir die Usability. Es wurde noch keine Nutzerstudie durchgeführt, doch unsere Benutzeroberfläche soll Studierenden und Ingenieuren das Verständnis der Mechanismen von Knowledge Graphs erleichtern. Sie bietet zudem eine Workbench, um CAD-Modelle einfach zu

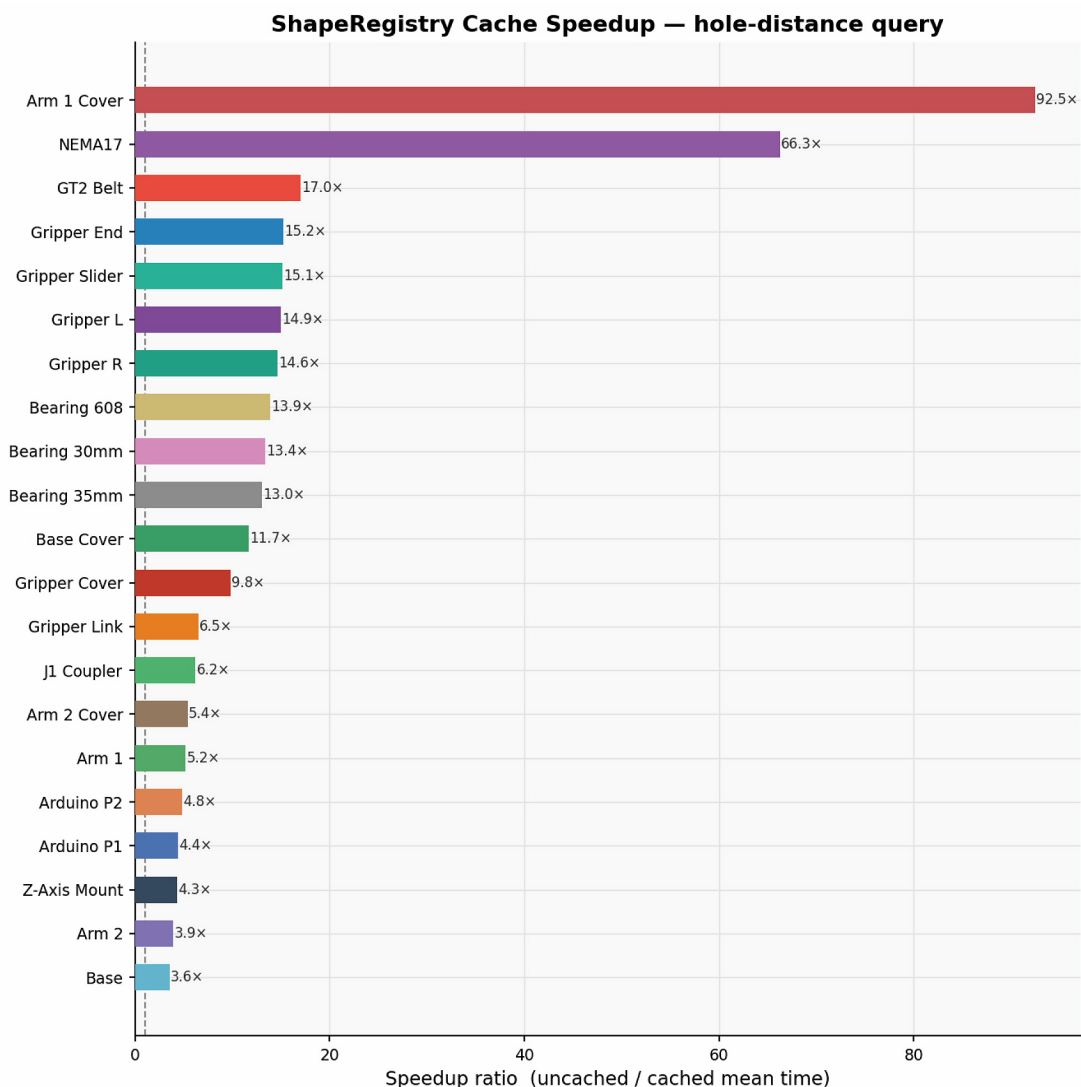


Bild 14: Cache-Speedup-Verhältnis (mittlere Zeit ohne Cache / mittlere Zeit mit Cache) für die Bohrungs-Distanz-Query über alle 21 Benchmark-Bauteile. Bauteile mit hohem Verhältnis von Solid-Komplexität zu Bohrungsanzahl profitieren am stärksten, mit Speedups von bis zu 92,5x (Arm 1 Cover). Der Speedup konvergiert für größere, bohrungsdichte Modelle wie die Base zu niedrigeren Werten, bei denen wiederholte Distanzberechnungen die Initialisierungskosten dominieren.

integrieren und eigene Queries und SHACL-Shapes mit visueller Ausgabe zu entwickeln, was die Lernkurve abflachen sollte. Mit der zunehmenden Verbreitung dieses neuen Ansatzes zur Speicherung von Engineering-Daten in Unternehmen wird es möglich werden, das volle Potenzial von Graphen zu nutzen, indem konjunktive Queries durchgeführt und Daten aus verschiedenen Quellen verknüpft werden. Zusammenfassend zeigen wir, dass die Kombination von Knowledge Graphs und B-Rep Modellen eine wertvolle Technologie ist, die sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie mehr Aufmerksamkeit verdient; dem aktuellen Stand der Technik fehlen sowohl die theoretischen Grundlagen als auch praktische Implementierungen.

Future Work

Wir planen, die theoretischen Grundlagen der Anwendung von Knowledge Graphs auf CAD-Modelle weiter auszubauen, einschließlich der Ausdruckstärke aktueller Sprachen, der formalen Erweiterung der SPARQL-Algebra um 3D-Operationen und der Integration von CAD-Wissen in SHACL-Shapes. In aktuellen Sprachen fehlt ein Großteil der relevanten Informationen in bestehenden Ontologien oder ist über separate Sprachen verteilt. Infolgedessen verbindet keine bestehende Sprache Geometrie und PMI. Darüber hinaus existieren keine Regeln, die zur Sicherstellung der Datenintegrität für SHACL-Shapes verwendet werden können, welche unter der Closed-World-Assumption operieren, während Graphen unvollständig sein können. Beispielsweise könnte eine SHACL-Shape ein CAD Modell eines Billardtisches mit dem Ziel validieren, sicherzustellen, dass insgesamt sechs Bohrungen vorhanden sind. Werden keine gefunden, nicht weil die Bohrungen fehlen, sondern weil dem Modell ein explizites hole-Attribut fehlt und es stattdessen eine Menge von Informationen enthält, aus denen Bohrungen abgeleitet werden könnten, würde die Shape fälschlicherweise eine Verletzung melden. Aus diesem Grund müssen solche Informationen als Regeln



Kontakt

Julian Gebhard
Doktorand, PT/TVE
Mercedes-Benz Group AG
julian.gebhard@mercedes-benz.com



Kontakt

Prof. Dr. Steffen Staab
Direktor, Institut für Künstliche Intelligenz
Universität Stuttgart
steffen.staab@ki.uni-stuttgart.de



Kontakt

Yuebo Wang
Product Owner VaaS, PT/TDRD
Mercedes-Benz Group AG
yuebo.wang@mercedes-benz.com

innerhalb der Ontologien kodiert werden, bevor eine automatisierte SHACL-Validierung zuverlässig angewendet werden kann. Anschließend sollte das Reasoning-Framework durch eine formale Erweiterung der SPARQL-Algebra weiterentwickelt werden, um einen Standard zu etablieren und die Grundlage für künftige Forschung zu legen. Schließlich planen wir die Durchführung einer umfassenden industriellen Studie mit Mercedes-Benz und der Universität Stuttgart, um das Potenzial von Knowledge Graphs im Engineering anhand einer realweltlichen Fallstudie zu demonstrieren.

Literatur

- [1] Jakob Beetz, Jos Van Leeuwen und Bauke De Vries. "IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies". In: *Ai Edam* 23.1 (2009), S. 89-101.
- [2] Akshay G Bharadwaj und Binil Starly. "Knowledge graph construction for product designs from large CAD model repositories". In: *Advanced Engineering Informatics* 53 (2022), S. 101680.
- [3] Eclipse Foundation. *Eclipse RDF4J: A powerful Java framework for processing and handling RDF data*. Accessed: 2026-04-21. 2025. url: <https://rdf4j.org>.
- [4] Diellza Elshani u.a. "geof3D: SPARQL geometric functions for co-designing buildings". In: *Advanced Engineering Informatics* 71 (2026). issn: 1474-0346. doi: 10.1016/j.aei.2025.104261.
- [5] Diellza Elshani u.a. "Comparative analysis of approaches for geometric data representation in RDF". In: *Proceedings of the 13th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, LDAC*. 2025. S. 92-107.
- [6] Julian Gebhard u.a. "AI-powered knowledge graphs: Accelerating simultaneous engineering in the automotive digital era". In: *Digital Engineering* (2025), S. 100070.
- [7] Julian Vincent Paul Gebhard und Yübo Wang. "Semantic interoperability for digital twindriven product development: a maturity model approach". In: *Digital Twin* (2026), S. 2618294.
- [8] Veronika Heimsbakk. *SHACL for the Practitioner*. 1. Aufl. Edited by Larry Swanson. Oslo, Norway: Interface Media AS, 2025. isbn: 978-82-694212-0-0.
- [9] [9] Daniel Hernández. "A core sparql fragment". (2020).
- [10] Constantin Hofmann u.a. "The role of an ontology-based knowledge backbone in a circular factory". In: *at-Automatisierungstechnik* 72.9 (2024), S. 875-883.
- [11] Homburg, Timo, Steffen Staab, and Daniel Janke. "Geosparql+: Syntax, semantics and system for integrated querying of graph, raster and vector data." *International Semantic Web Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [12] Yuxin Huang u.a. "Design knowledge graph-aided conceptual product design approach based on joint entity and relation extraction". In: *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 44.3 (2023), S. 5333-5355.
- [13] ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Standard. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
- [14] Tamás Kolossvári, Dániel Feszty und Tibor Dóry. "Systems engineering in automotive product development: A guide to initiate organisational transformation". In: *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 9.4 (2023), S. 100160. issn: 2199-8531. doi: 10.1016/j.joitmc.2023.100160.
- [15] Sylvere Kréma u.a. "Ontostep: OWL-DL ontology for step". In: *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7561* (2009).
- [16] Soonjo Kwon u.a. "A new implementation of ontostep: Flexible generation of ontology and knowledge graphs of express-driven data". In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 22.2 (2022), S. 024502.
- [17] Hyeonji Lee u.a. "Rule-based design verification for mechanical parts with dynamic rule subset selection". In: *Scientific Reports* 15.17153 (2025). doi: 10.1038/s41598-025-01815-4.
- [18] Dejan Nedelkovski. *SCARA Robot | How To Build Your Own Arduino Based Robot*. Accessed: 2026-04-19. 2026. url: <https://howtomechatronics.com/projects/scara-robot-how-to-build-your-own-arduino-based-robot/>.
- [19] Open Cascade SAS. *Open CASCADE Technology (OCCT)*. Accessed: 2026-04-21. 2025. url: <https://dev.opencascade.org>.
- [20] Open Geospatial Consortium. *OGC GeoSPARQL – A Geographic Query Language for RDF Data*. OGC Implementation Standard OGC 22-047r1. Version 1.1. Accessed: 2025-11-10. Open Geospatial Consortium, 2024. url: <http://www.opengis.net/doc/IS/geosparql/1.1>.
- [21] Alexander Perzylo u.a. "An ontology for CAD data and geometric constraints as a link between product models and semantic robot task descriptions". In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2015, S. 4197-4203. doi: 10.1109/IROS.2015.7353971.
- [22] Dimitrios Piromalis und Anastasios Kantaros. "Digital Twins in the Automotive Industry: The Road toward Physical-Digital Convergence". In: *Applied System Innovation* 5.4 (2022), S. 65. doi: 10.3390/asi5040065.
- [23] Sjoerd Rongen, Nikoleta Nikolova und Mark van der Pas. "Modelling with AAS and RDF in industry 4.0". In: *Computers in Industry* 148 (2023), S. 103910.
- [24] SM Sapuan, MR Osman und Y Nukman. "State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry". In: *Journal of Engineering Design* 17.2 (2006), S. 143- 157.
- [25] Steffen Staab und Rudi Studer. *Handbook on ontologies*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [26] Ian Stroud. *Boundary representation modelling techniques*. Springer, 2006.
- [27] Anna Wagner und Uwe Rüppel. "BPO: The Building Product Ontology for assembled products." In: *LDAC*. 2019, S. 106-119.
- [28] Chi Zhang, Jakob Beetz und Bauke de Vries. "BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data". In: *Semantic Web* (Aug. 2018), S. 1-27. doi: 10.3233/SW-180297.

Twin Transformation:

Der Digitale Produktpass als Enabler für Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Dr. Jakob Trauer, Celina Adelhardt, Dr. Alexander Christ, Markus Tettschlag
:em engineering methods AG

Der Digitale Produktpass (DPP) entwickelt sich zu einem zentralen Instrument, um Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Nachhaltigkeit entlang des gesamten Produktlebenszyklus sicherzustellen. Im Rahmen des europäischen Grünen Deals wird er für die meisten Unternehmen zur Pflicht. Diese stehen jedoch vor Herausforderungen wie heterogenen Datenlandschaften, fehlenden Standards und dem hohen Aufwand zur Integration in bestehende IT-Ökosysteme.

Um diesen Hürden zu begegnen, werden in diesem Artikel praxisorientierte Lösungsansätze vorgestellt, darunter der Einsatz der Asset Administration Shell (AAS), modularer Datenarchitekturen sowie von Free and Open Source Software (FOSS) wie Eclipse BaSyx. Darüber hinaus werden Wege aufgezeigt wie der DPP als strategischer Enabler für die digitale und ökologische Transformation (Twin Transformation), die Grundlage für neue, datengetriebene Geschäftsmodelle schafft und den Ausgangspunkt für weiterführende Anwendungsfälle für Digitale Zwillinge bildet.

Der Einfluss des Digitalen Produktpasses auf die Industrie

Der Digitale Produktpass (DPP) wird kommen. Die Frage ist nicht mehr ob, sondern wann. Der Geltungsbereich umfasst dabei alle physischen Güter, die innerhalb der EU in den Verkehr gebracht oder in Betrieb genommen werden. Dies beinhaltet ausdrücklich auch einzelne Bauteile und Zwischenprodukte.

Den Rahmen für den DPP bildet der „Green Deal“ der EU mit dem Ziel der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Um dieses Ziel bis 2050 zu erreichen, wird zum einen Rechtsverbindlichkeit geschaffen und zum anderen Investition in Innovationen sowie grüne Technologien und Infrastrukturen gezielt gefördert.

Fungierte bisher die Ökodesign Richtlinie [1] als Grundlage für nachhaltige Produkte, erfolgt durch die Ökodesign Verordnung (Ecodesign for Sustainable Product Regulation, ESPR) [2] eine deutliche Ausweitung des Anwendungsbereichs. Die ESPR bildet dabei eine Art leere Hülle. Spezifische Anforderungen an die Produkte werden über definierte Produktgruppen vorgegeben und innerhalb delegierter Rechtsakte präzisiert, z.B. für Eisen und Stahl, oder Batterien [3] (vgl. Bild 1).

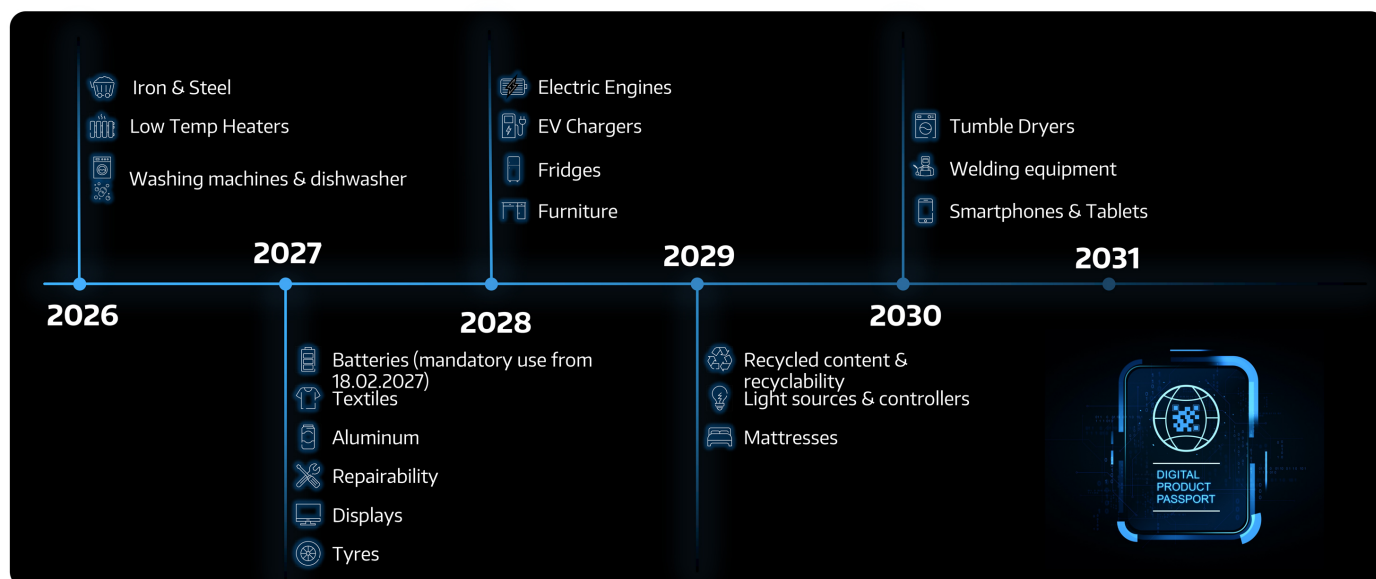


Bild 1: Voraussichtliche Zeitschiene der delegierten Rechtsakte im Rahmen der Ökodesign Verordnung

Doch welche konkreten Auswirkungen ergeben sich hieraus für die Unternehmen? Grundsätzlich gilt: Jeder Unternehmensbereich kann vom DPP betroffen sein. Durch die formulierten Leistungs- und Informationsanforderungen (siehe ESPR, Artikel 6 und 7) gewinnen darüber hinaus Lieferketteninformationen an Relevanz, z. B. zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks.

Die tatsächliche Betroffenheit wird in direkte und indirekte Betroffenheit unterteilt [4]:

- **Direkte Betroffenheit:** Das Unternehmen bringt ein reguliertes Produkt in Verkehr. Dieses Produkt muss über einen DPP des Unternehmens verfügen.
- **Indirekte Betroffenheit:** Das Unternehmen verbaut ein reguliertes Bauteil eines Lieferanten in sein nicht reguliertes Produkt. Das Unternehmen muss den DPP des Lieferanten-Bauteils seinen Kunden zugänglich machen.

Durch die Vielzahl an weiteren Verordnungen steigt die direkte Betroffenheit der Unternehmend zusehends. Unternehmen sollten sich daher vorbereiten.

Vielfältige Hürden bei der Einführung des DPP

Viele Unternehmen tun sich schwer mit der Umsetzung des DPP. Die Regulierung wird in wirtschaftlich herausfordernden Zeiten vor allem als zusätzliche Kosten- und Zeitbelastung wahrgenommen. Als Kernherausforderungen gelten:

- **Unklare DPP-Anforderungen:** Unklare Anforderungen, unterschiedliche Zeitpläne, weitere EU Vorgaben sowie offene Fragen zu Prozessen, Systemen und Sanktionen führen zu Unsicherheit und verzögern Entscheidungen in den Unternehmen. So sind bspw. die Regeln zur Interaktion zwischen den Wirtschaftsakteuren sowie die Ausprägung einzelner Abläufe und notwendiger Systembausteine noch nicht geklärt, z. B. hinsichtlich DPP-System, EU DPP-Registry oder Backup Provider. Gleiches gilt für die Konsequenzen bei Nichterfüllung. Dies führt zum Zögern auf Unternehmensseite und zur Verschleppung von Entscheidung und Maßnahmen.
- **Mangelnde Datenverfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit, Qualität und Zuverlässigkeit der DPP-relevanten Daten sind entscheidend. Neben fehlenden Daten aus der Lieferkette basieren viele vorhandene Daten auf Annahmen oder groben Erfahrungswerten. Zur Absicherung und Steigerung der Verlässlichkeit von Daten mangelt es oftmals an entsprechenden Rollen und Verantwortlichkeiten innerhalb der Unternehmen. Bei der Einbindung von externen Daten aus der Lieferkette fehlen klare Prozesse, Standards und Technologien. All dies führt zu nicht wertschöpfenden Aktivitäten mit hohen manuellen Aufwänden und zusätzlicher Kommunikation.
- **Dokumentenbasierte Arbeitsweise:** Viele der DPP-relevanten Daten befinden sich außerhalb von PLM- und ERP-Systemen in Dokumenten.

Daten werden zwischen den Unternehmen textbasiert ausgetauscht und auch innerhalb der Unternehmen treten Medienbrüche aufgrund fehlender IT-Schnittstellen auf. Häufig fungiert eine ausufernde Tabellenkalkulation als Senke für die DPP-Daten, die nur noch von einzelnen Personen im Unternehmen bearbeitet werden können. Schlussendlich stellt dieses Vorgehen eine Art Sackgasse dar, die in hohen manuellen Aufwänden mündet.

- **Unzureichende IT-Interoperabilität:** Die Daten für den DPP liegen in der Regel fragmentiert in unterschiedlichen IT-Systemen. Einerseits bedarf es für den Zugriff auf die relevanten Datenpunkte entsprechende IT-Schnittstellen und andererseits automatisierte Mechanismen zur Transformation und Harmonisierung der Daten zur Bereitstellung für den DPP. In heterogenen IT-Landschaften stellen vorhandene IT-Systeme lediglich einzelne Funktionalitäten zur Verfügung, es fehlt die Durchgängigkeit für DPP-Daten. Das Aufräumen und Weiterentwickeln der IT-Landschaft erfordert Investitionen der Unternehmen in die Fähigkeiten der IT und des Personals.
- **Fehlende Wiederverwendung:** Die breite Masse der Unternehmen beschäftigt sich bereits mit den Themen Nachhaltigkeit und produktbezogene Umweltauswirkungen, z.B. im Rahmen von Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, LCA) oder Umweltproduktdeklaration (engl. Environmental Product Declaration, EPD). Relevante DPP Daten sowie bestehende Berechnungen und Nachhaltigkeitsdaten werden kaum weiterverwendet. Dadurch bleiben erhebliche Effizienz- und Kostensparpotenziale ungenutzt.

Die IT-Landschaft muss DPP-ready aufgestellt werden

Die Einführung des DPP ist als integraler Bestandteil einer ganzheitlichen, übergreifenden Daten- und IT-Strategie zu verstehen. Ausgangspunkt für die Einführung des DPP sollte daher eine Strategie darstellen, in der

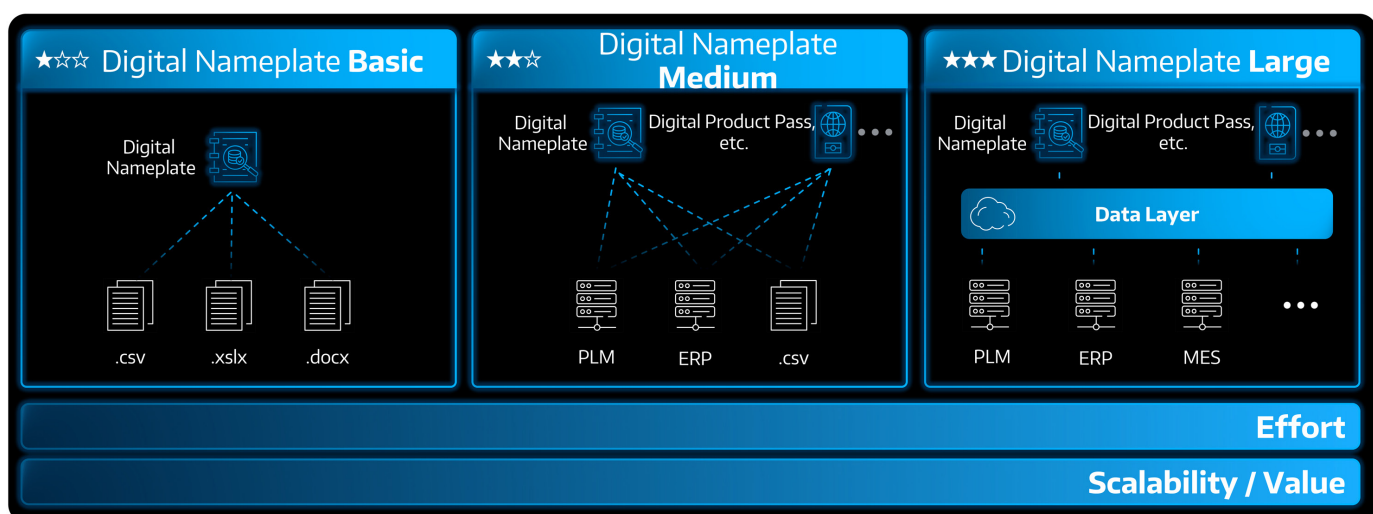


Bild 2: Unterschiedliche Ausbaustufen der IT-Architekturen für das Digitale Typenschild.

definiert wird welche Mehrwerte der DPP erzielen soll, welcher Zusammenhang zu Digitalen Zwillingen herrscht und wie sich über diese Initiativen zusätzlicher Umsatz generieren lässt.

Darauf aufbauend sind relevante Datenpunkte, Quellen und ein passender Datenstandard, etwa von der Industrial Digital Twin Association IDTA [5], und Anforderungen aus Datenräumen wie Catena X oder Manufacturing X, festzulegen, um mit unsicheren regulatorischen Vorgaben umzugehen. EAM basierte Ansätze wie MBITA® (Model-Based IT Architectures) [6] können bei der Datenmodellierung unterstützen.

Die gewählte Ontologie dient zur Erstellung semantischer Datenmodelle, idealerweise in modularer Form. Ausgangspunkt für den DPP im Rahmen der AAS ist das digitale Typenschild [7]. In diesem werden grundlegende produktspezifische Daten wie Herstellerinformationen und Kennzeichnungen aufgelistet. Durch die Ergänzung weiterer Submodell, wie der „Hand-over Documentation“, kann der DPP so schrittweise wachsen [5].

Dieser Ansatz ermöglicht ein pragmatisches Vorgehen. Der größte Aufwand liegt in der Datenbereitstellung. Je nach Größe des Unternehmens und Fortschritt der Digitalisierung, bieten sich unterschiedliche Ausbauformen an (vgl. Bild 2). Kleine Unternehmen, die hauptsächlich dokumentenbasiert arbeiten, können über individuelle Parser ihre Daten automatisiert in eine Verwaltungsschale überführen. Da dieses Konzept jedoch nicht skaliert, ist ein Zugriff auf Quellsysteme über APIs zu bevorzugen. Der DPP sollte nicht als Monolith gesehen werden, sondern als Sammlung einzelner Puzzleteile. Insbesondere, wenn weitere Anwendungsfälle, die über den

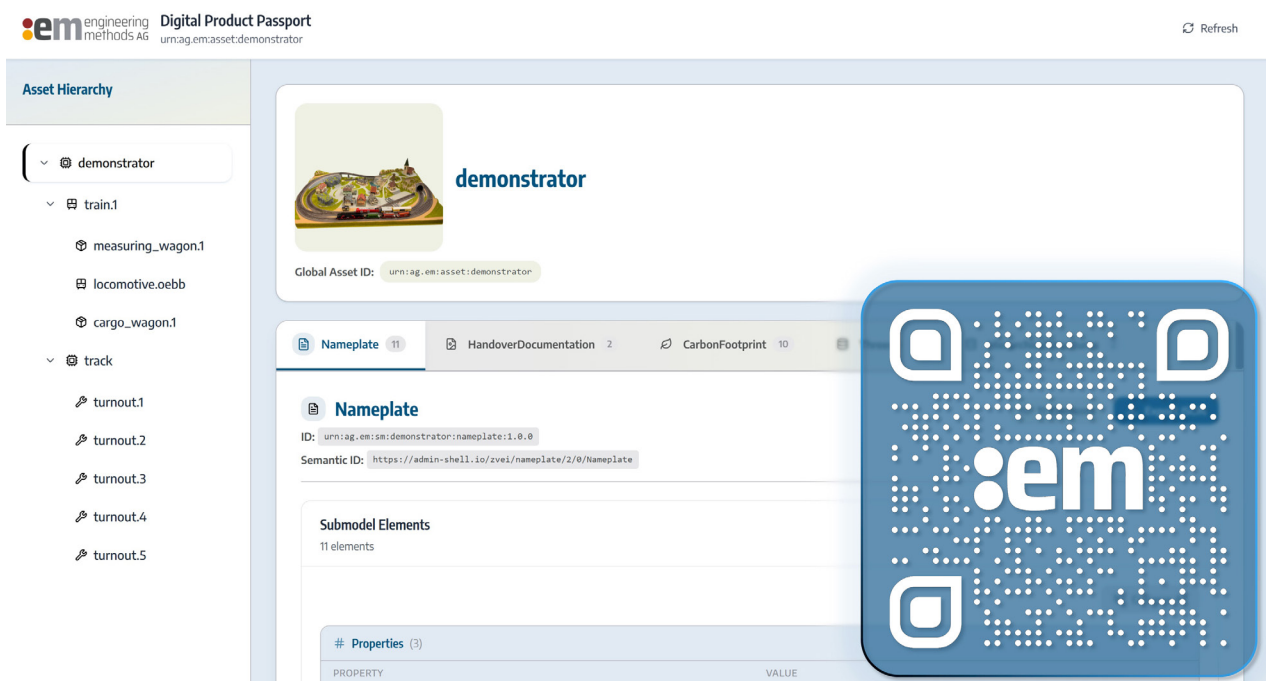


Bild 3: Der Digitale Produktpass am Beispiel des :em Digital Twin Showcase.

reinen DPP hinausgehen – wie zum Beispiel für den Digitalen Zwilling – lohnt sich ein Data-Layer, in dem Daten harmonisiert und semantisch beschrieben werden sowie über standardisierte Schnittstellen für jedmögliche Anwendung effizient zur Verfügung gestellt werden können.

Free and Open Source Software unterstützt bei der Implementierung

Free and Open Source Software (FOSS) ermöglicht beim DPP eine effiziente Systemintegration und IT Interoperabilität auf Basis der herstellerunabhängigen AAS. Mit Eclipse BaSyx als modularer Referenzimplementierung lassen sich bestehende IT Landschaften schnell erweitern, Einstiegshürden senken und Eigenentwicklungen sowie Vendor Lock ins vermeiden.

Das offene Entwicklungsmodell und die zugehörigen Communities sichern die Weiterentwicklung der Standards und erleichtern die Integration regulatorischer Anforderungen. Damit ermöglicht FOSS insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen eine standardkonforme Teilnahme an einem dezentral organisierten DPP Ökosystem [8], [9], [10].

Basierend auf einer H0 Modelleisenbahn wurde der :em DT Showcase entwickelt, der die Potenziale digitaler Zwillinge und der AAS demonstrieren soll [11]. Für diesen Anwendungsfall wurde ein DPP nach den Vorgaben der IDTA umgesetzt (vgl. Bild 3). Für die Umsetzung wurde eine Kombination aus kommerziellen Tools (Bosch Semantic Stack) und FOSS Bausteinen (Eclipse BaSyx) genutzt. So wird die Integration von DPPs mehrerer Subsysteme zu einem Gesamtsystem gezeigt. Der DPP ist öffentlich einsehbar unter: :em DT Showcase.

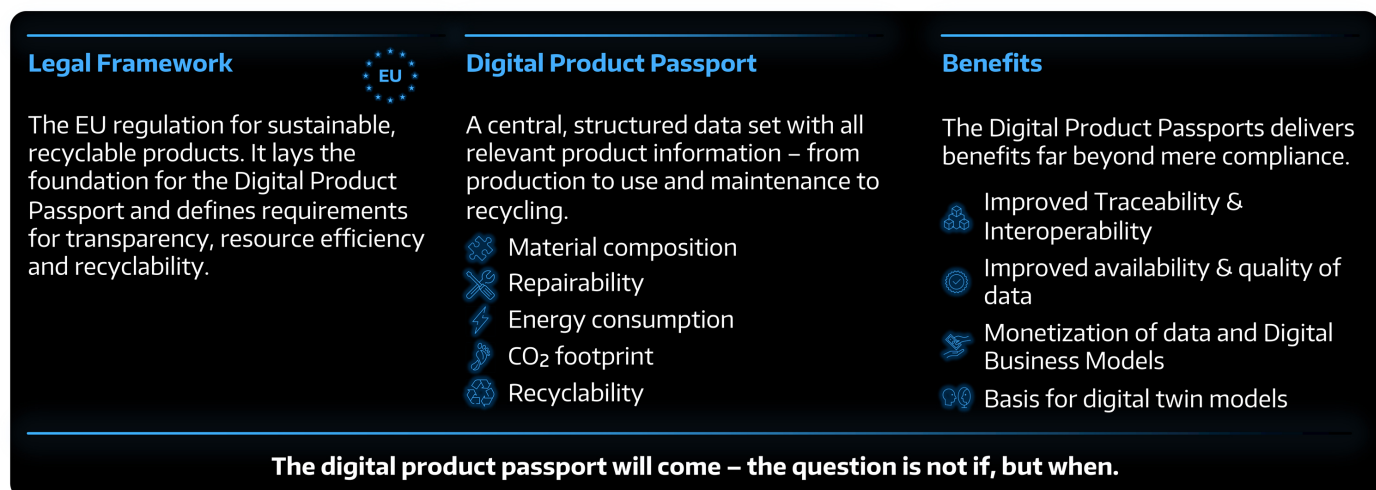


Bild 4: Überblick Digitaler Produktpass

Der DPP als Enabler für digitale Transformation

Der eigentliche Mehrwert des DPP liegt weit über der reinen Compliance. Richtig umgesetzt fungiert der DPP als ein zentraler Enabler für die Twin Transformation [12] (vgl. Bild 4).

Kern des DPP ist die Bereitstellung maschinenlesbarer Lebenszyklusdaten auf Instanzebene. Jedes produzierte Produkt erhält ein digitales Abbild, das über den Lebenszyklus aktuell gehalten wird. Somit entsteht ein digitaler Schatten des physischen Produkts [13], der relevante Informationen konsistent über Entwicklung, Fertigung, Nutzung und Verwertung hinweg verfügbar macht und so digitale Durchgängigkeit schafft. Sobald der DPP umgesetzt wurde, lassen sich viele mittelbare Mehrwerte, wie eine verbesserte Datenverfügbarkeit sowie eine schnellere Entscheidungsfindung, realisieren. Gleichzeitig unterstützt der DPP die Steigerung der Kreislauffähigkeit und verbessert Kundenkommunikation. Auch die strukturierte und medienbruchfreie Integration von Zuliefererdaten wird wesentlich erleichtert und ermöglicht eine synchrone, unternehmensübergreifende Zusammenarbeit in Datenräumen, wie Catena-X oder Manufacturing-X¹.

¹) Wie über Datenräume eine synchrone unternehmensübergreifende Kollaboration basierend auf semantischen Daten realisiert werden kann, wird unter anderem in der prostep ivip Projektgruppe „Live Collaboration in Engineering“ untersucht.

Literatur

- [1] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast) (Text with EEA relevance). 2009. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj>
- [2] Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance). 2024. Zugriffen: 21. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>
- [3] Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance), Bd. 191. 2023. Zugriffen: 21. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
- [4] „Digitaler Produktpass – Die Betroffenheit des Maschinenbaus“. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdma.eu/de-DE/viewer/-/v2article/render/147722203>
- [5] „DPP4.0“, IDTA. Zugriffen: 22. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://industrialdigitaltwin.org/dpp4-0>
- [6] „MBITA® – Model-Based IT Architecture“, em engineering methods AG. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.em.ag/wp-content/uploads/2025/03/em_MBITA_flyer_EN_web.pdf
- [7] Digital Nameplate for Industrial Equipment, Submodel Template IDTA 02006, Frankfurt., Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2025/10/IDTA-02006-3-0-1_Submodel_Digital-Nameplate.pdf
- [8] „BaSyx Wiki – Eclipse BaSyx™“. Zugriffen: 23. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.basysx.org/en/latest/>
- [9] „Eclipse BaSyx“. Zugriffen: 23. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://eclipse.dev/basysx/>
- [10] Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 / acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, „Open Source als Innovationstreiber für Industrie 4.0“, Plattform Industrie 4.0, München, 2022. doi: 10.48669/fb40_2022-2.
- [11] M. Fett, J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, R. Breimann, M. Krastel, und E. Kirchner, „Wertgetriebene, modellbasierte Entwicklung Digitaler Zwillinge unter Berücksichtigung ökonomischer und technischer Aspekte“, Konstruktion, Bd. 78, Nr. 01-02, S. 59-66, 2026, doi: 10.37544/0720-5953-2026-01-02-59.
- [12] A. Christ, K. Avdejuk, J. Hu, und M. Krastel, „Engineering for Sustainability – Datenprodukte für ökologische Nachhaltigkeit“, ProductData Journal, Nr. 2024-2, S. 30-37, 2024.
- [13] J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel, K. Spreitzer, und M. Zimmermann, „What is a digital twin? – definitions and insights from an industrial case study in technical product development“, in Proceedings of the design society: DESIGN conference, Cambridge University Press, 2020, S. 757-766. Zugriffen: 20. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-design-society-design-conference/article/what-is-a-digital-twin-definitions-and-insights-from-an-industrial-case-study-in-technical-product-development/00A2057A827BF31018DAF-625674D40D3>

Darüber hinaus schafft der DPP die technologische Basis für weiterführende, wertschöpfende Anwendungsfälle, die unmittelbare wirtschaftliche Mehrwerte bringen. Beispielsweise lassen sich über die Plattform des DPP Produkt- & Nutzungsdaten monetarisieren und „as-a-service“ dem Kunden anbieten. Die Verfügbarkeit von aktuellen, strukturierten und belastbaren Instanzdaten ermöglicht Data-Analytics Anwendungsfälle. Sie steigern zudem die Qualität von KI Anwendungen, etwa durch KI Agenten für Circular Economy Szenarien wie Rückkaufpreise oder gezielte Rückrufe. Gleichzeitig bildet der DPP als digitaler Schatten eine Grundlage für Digitale Zwillinge.

Die einmal aufgebaute, semantisch beschriebene Datenbasis lässt sich entlang des gesamten Wertstroms wiederverwenden – vom Engineering über die Produktion bis zur Instandhaltung. So ermöglichen Submodelle wie Asset Interfaces Description (AID) und Asset Control die herstellerübergreifende Konnektivität von Assets und schaffen die Grundlage für Asset Orchestration Plattformen oder KI-agentenbasierte Matrixproduktionen und wird somit auch zum Fundament einer durchgängig digitalisierten und skalierbaren Wertschöpfung im Sinne von Smart Manufacturing.

Key Takeaways

Der DPP ist weder Selbstzweck noch isolierte Pflichtübung. Er stellt den strategischen Ausgangspunkt für eine nachhaltige, datengetriebene Produktentwicklung und -nutzung dar, sofern er als integraler Bestandteil einer ganzheitlichen Strategie für PLM und den Digitalen Zwilling verstanden wird:



Der DPP wird kommen. Erste Erfahrungen können mit Batterien gemacht werden.



Der DPP ist ein wichtiger Treiber der Twin Transformation hin zu mehr Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Lieferkette.



Entscheidend ist eine effiziente Datenintegration und die konsequente Umsetzung skalierbare IT-Lösungen.



Die technologische Grundlage für den DPP bildet der Digitale Zwilling mit der AAS als Standard.



Der DPP ist der Startpunkt für viele weitere Anwendungsfälle und zur Etablierung neuer digitaler Geschäftsmodelle und Services.

Für Unternehmen ist es jetzt an der Zeit zu handeln und sich auf den DPP vorzubereiten.



Kontakt

Dr. Jakob Trauer
:em engineering methods AG
jakob.trauer@em.ag

Wie VDA Band 2 und VDA 231-301
den Weg von Dokumenten-basierten
Freigaben hin zu digital steuerbaren
Nachweisprozessen eröffnen

Agentische KI im risikobasierten Nachweisprozess

Bernd Löhle, material.one AG

In vielen Freigabeprozessen wird Digitalisierung noch immer mit dem Austausch von PDFs verwechselt. Der eigentliche Fortschritt beginnt aber erst dann, wenn Nachweise risikobasiert gesteuert, semantisch eindeutig beschrieben und systemisch verarbeitbar werden. Genau hier treffen drei Entwicklungen aufeinander: der risikobasierte Ansatz des neuen VDA Band 2 (Produktionsprozess und Produktfreigabe/PPF-Verfahren), die datenorientierte Semantik von VDA 231-301 und agentische KI als operative Schicht im Nachweisprozess.

Vom Dokument zur Entscheidung

In industriellen Freigabe- und Nachweisprozessen liegt die größte Reibung meist nicht in fehlenden Daten, sondern in ihrer Form. Prüfberichte, Zertifikate, Kontrollpläne, Fähigkeitsnachweise und Freigabedokumente sind vorhanden, aber sie werden als Dateien transportiert statt als strukturierte Nachweise verarbeitet. Das erzeugt Medienbrüche, redundante Erfassung, Interpretationsspielräume und hohen manuellen Abstimmungsaufwand. Die Folge ist ein Prozess, der digital aussieht, aber operativ weiterhin dokumentenzentriert bleibt. Diese Ausgangslage beschreibt inzwischen nicht nur die Praxis vieler Unternehmen, sondern auch Catena-X für den Bereich Product Approval sehr deutlich: Heute werden freigaberelevante Unterlagen häufig manuell als PDFs in kundenspezifische Portale geladen – mit erheblichem Aufwand, inkonsistenten Datenstrukturen und begrenzter Transparenz.

Der neue VDA Band 2 verschiebt die Logik des PPF

Genau deshalb ist der neue VDA Band 2 so relevant. Die 7. Auflage stellt den risikobasierten Ansatz in den Mittelpunkt: Der Umfang des PPF-Verfahrens soll nicht mehr über starre Nachweiskataloge bestimmt werden, sondern über den Risikograd des freizugebenden Produkts oder der Änderung. Damit werden Nachweise gezielter eingesetzt, Abweichungen differenzierter bewertet, der Dokumentationsaufwand reduziert und die Referenzierung auf bestehende Nachweise ausdrücklich ermöglicht. Gleichzeitig werden VDA 231-300/301 als Teil des digitalen Datenaustauschs in der Werkstoffbemusterung als integraler Bestandteil genannt; außerdem verweist das Vorwort auf ein Online-Tool, das die bisherigen Excel-Vorlagen ablösen soll.

Dieser Perspektivwechsel ist mehr als eine methodische Feinjustierung. Er verändert die Architektur des Nachweisprozesses selbst. Wenn nicht mehr jedes Artefakt pauschal gleichbehandelt wird, sondern risikoorientiert entschieden wird, welcher Nachweis benötigt wird, in welcher Form er geführt wird und wie mit Abweichungen umzugehen ist, dann braucht der Prozess nicht nur Dokumente, sondern Entscheidungslogik. Genau an dieser Stelle wird agentische KI industriell interessant. Sie ergänzt den Prozess nicht als allgemeiner Textassistent, sondern als operative Instanz, die Nachweisprozesse steuert, priorisiert, vervollständigt und zur Entscheidung vorbereitet. Diese Lesart lässt sich unmittelbar aus dem risikobasierten Aufbau des neuen VDA Band 2 ableiten.

Agentische KI im risikobasierten Nachweisprozess

130

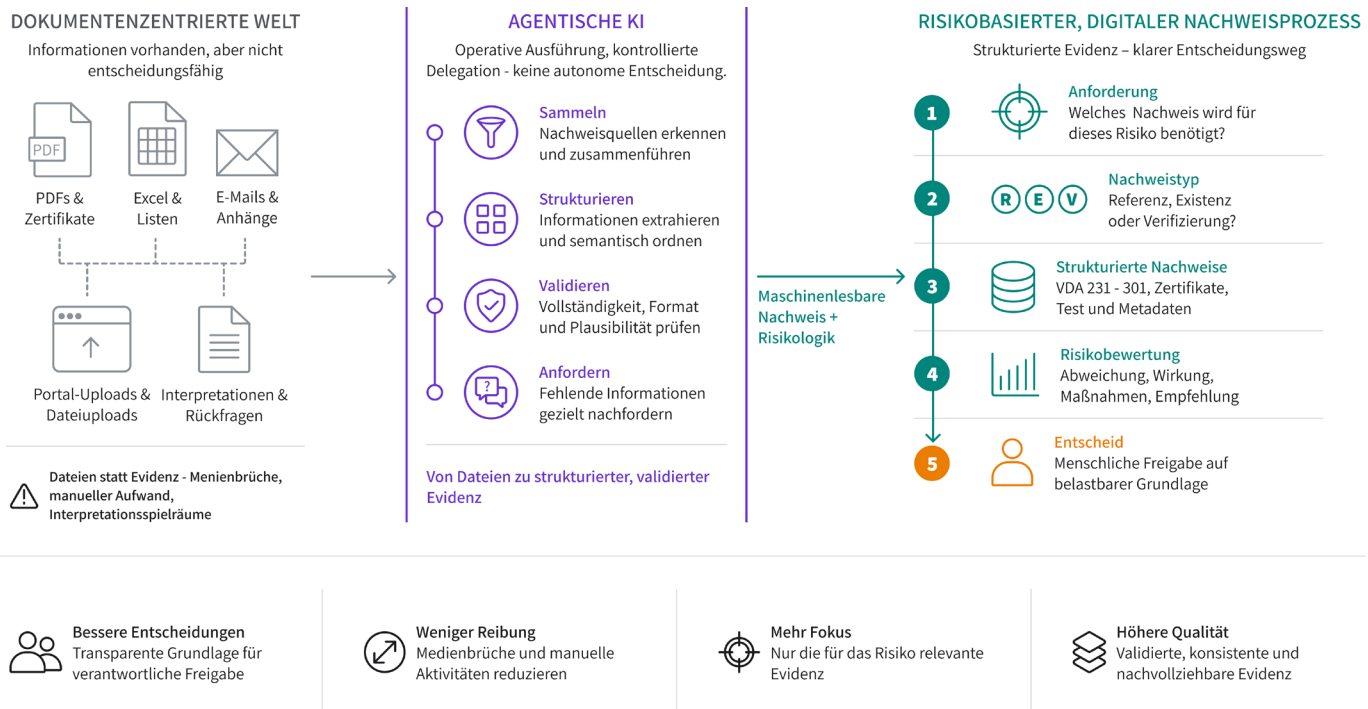


Bild 1: Product Approval Process – „Dokumentenzentrierte Welt“ versus „risikobasierte, digitaler Nachweisprozess“

Was agentische KI im Nachweisprozess tatsächlich tut

Zunächst einmal – was ist agentische KI? Mit agentischer KI sind hier keine frei entscheidenden autonomen Systeme gemeint, sondern spezialisierte digitale Agenten, die innerhalb definierter Rollen, Regeln und Freigabegrenzen Aufgaben im Nachweisprozess übernehmen: Informationen sammeln, Prüfstände erkennen, fehlende Nachweise anfordern, Abweichungen strukturieren und Entscheidungsvorlagen vorbereiten.

Der neue VDA Band 2 unterscheidet drei Arten der Nachweisprüfung: Referenz, Existenz und Verifizierung. Referenznachweise verweisen auf dokumentierte Informationen, ohne dass sie übermittelt werden müssen; Existenznachweise belegen das Vorhandensein dokumentierter Information; Verifizierungsnachweise ermöglichen einen Soll-Ist-Abgleich auf Vollständigkeit, Richtigkeit, Reihenfolge und Konsistenz. Genau diese Dreiteilung ist für agentische KI hoch relevant, weil sie damit nicht „beliebige Dokumente“ verarbeitet, sondern in einem klaren Prüfmodus arbeitet. Ein Agent kann erkennen, welcher Nachweistyp gefordert ist, passende Nachweise einsammeln, fehlende Informationen anfordern, Referenzen auflösen und Verifizierungsobjekte für den Kundenentscheid vorbereiten.

Besonders deutlich wird das bei Abweichungen. Der neue VDA Band 2 verankert die Risikobewertung explizit im PPF-Prozess. Werden Anforderungen nicht vollständig erfüllt, muss die Organisation eine dokumentierte Risikobewertung durchführen; diese ist Teil der PPF-Dokumentation und soll dem Kunden übermittelt werden. Die Risikobewertung muss durch ein interdisziplinäres Team erfolgen, nachvollziehbar dokumentiert sein und unter anderem Abweichung, Ursache, potenzielle Fehlerfolgen, Bewertung des Risikos, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sowie einen internen Entscheidungsvorschlag enthalten. Der Kunde entscheidet anschließend auf Basis dieser Risikobewertung, ob Abweichungen dauerhaft akzeptiert, temporär akzeptiert oder nicht akzeptiert werden.

Genau hier liegt die natürliche Rolle agentischer KI: nicht in der autonomen Freigabe, sondern in der verlässlichen Delegation von Routinearbeit innerhalb eines kontrollierten Prozesses. Agenten können Abweichungen strukturieren, fehlende Nachweise identifizieren, Ursachen und Maßnahmen aus vorliegenden Nachweisen zusammenführen, Referenzen auf ältere Freigaben prüfen, Varianten- und Stufenlogiken berücksichtigen und die Unterlagen für ein menschliches, verantwortliches Review vorbereiten. Die Entscheidung verbleibt beim Menschen; die Prozesslast der Nachweisführung und -aufbereitung kann jedoch deutlich sinken. Aus Sicht der industriellen Governance ist das der entscheidende Unterschied zwischen „KI über Dokumenten“ und „KI im Nachweisprozess“.

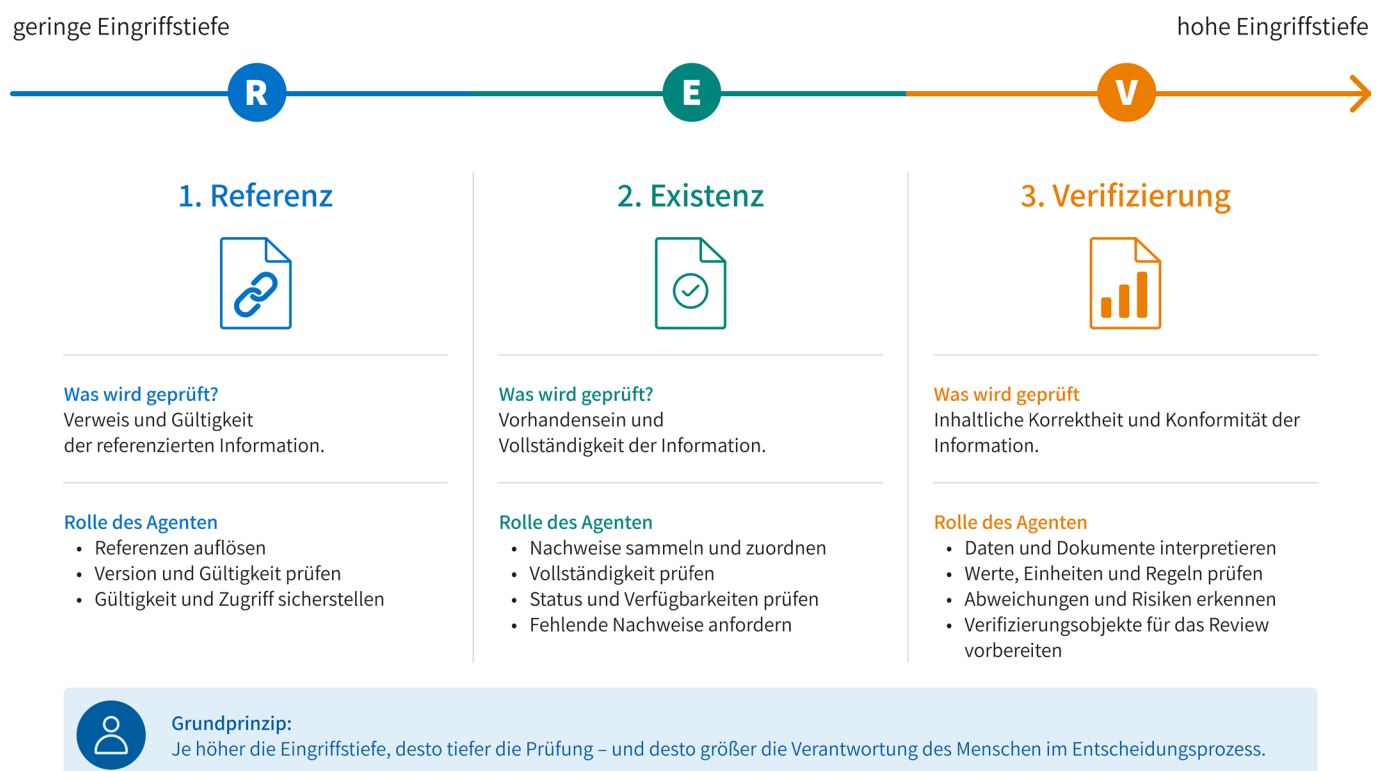


Bild 2: Drei Arten der Nachweisprüfung und die Rolle agentischer KI im PPF-Verfahren

VDA 231-301 macht dokumentenbasiert Nachweise maschinenlesbar

Damit agentische KI in diesem Rahmen belastbar arbeiten kann, braucht sie semantisch eindeutige Datenstrukturen. Genau hier liegt die Rolle von VDA 231-301. Das offizielle Schema-Ökosystem beschreibt released JSON-Schemas für den digitalen Austausch materialbezogener Prüf- und Freigabedaten. Das Repository ist ausdrücklich für produktive IT-Systeme, Validierung, Schnittstellen, Konverter und automatisierte Werkzeuge vorgesehen und adressiert Interoperabilität, Automatisierung sowie konsistente Interpretation über System- und Organisationsgrenzen hinweg.

Für den Nachweisprozess ist besonders relevant, dass im VDA-231-301-Ökosystem bereits ein EN-10204-Subschema existiert – einschließlich Inspection Certificate 3.1. Dieses Subschema beschreibt maschinenlesbar, wie Inhalte solcher Prüfzeugnisse digital repräsentiert werden können: von Material- und Chargenidentifikation über chemische und mechanische Werte bis hin zu Metadaten, Signaturen und Referenzen auf Normen und Prüfmethoden. Es unterstützt automatisierte Verarbeitung, bessere Rückverfolgbarkeit und die Integration in Materialdaten- und Qualitätssysteme.

Gerade an diesem Beispiel wird sichtbar, was agentische KI praktisch leisten kann. Bei 3.1-Zeugnissen reicht es nicht, Text zu erkennen. Ein belastbares System muss auch Tabellenlogik verstehen, sprachübergreifende Feldbezeichnungen erkennen, Einheiten korrekt zuordnen, Exponenten in Kopfzeilen berücksichtigen und Werte in den richtigen fachlichen Kontext einordnen. Erst dann entsteht aus einem Dokument ein verifizierbares Nachweisobjekt. VDA 231-301 liefert dafür nicht die KI, aber die notwendige semantische Zielstruktur. Die Kombination aus standardisiertem Schema und agentischer Prozesslogik ist deshalb stärker als jede rein dokumentenzentrierte Automatisierung. Diese Schlussfolgerung ergibt sich unmittelbar aus der Funktion der Schemas als produktive, validierbare Austauschstruktur.

Über Automotive hinaus

Obwohl PPF und Catena-X aus dem Automobilkontext stammen, ist die zugrunde liegende Logik längst breiter anschlussfähig. Das EN-10204-Subschema wird ausdrücklich auch für Branchen jenseits der Automobilindustrie als relevant beschrieben, etwa für Stahl- und Metallproduktion, Maschinen- und Anlagenbau, Bauprodukte oder industrielle Ausrüstung. Überall dort, wo Prüfzeugnisse, Spezifikationen, Testresultate und Freigaben entlang einer Lieferkette ausgetauscht werden, entstehen dieselben Fragen: Welche Nachweise sind relevant? Welche Abweichung ist tragbar? Welche Information muss referenziert, nachgewiesen oder verifiziert werden? Genau deshalb ist der risikobasierte, datenorientierte Nachweisprozess kein Automotive-Sonderthema, sondern ein belastbares Muster für verteilte Qualitäts- und Freigabeprozesse allgemein.

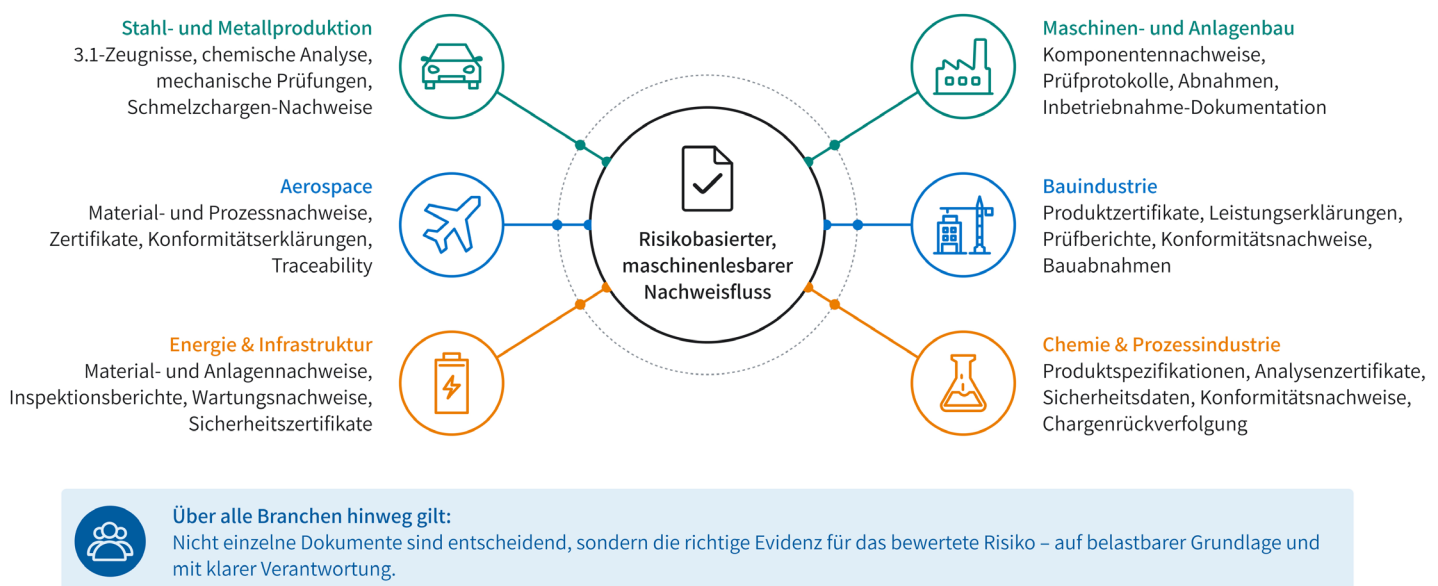


Bild 3: Anwendung in den spezifischen Industriesektoren

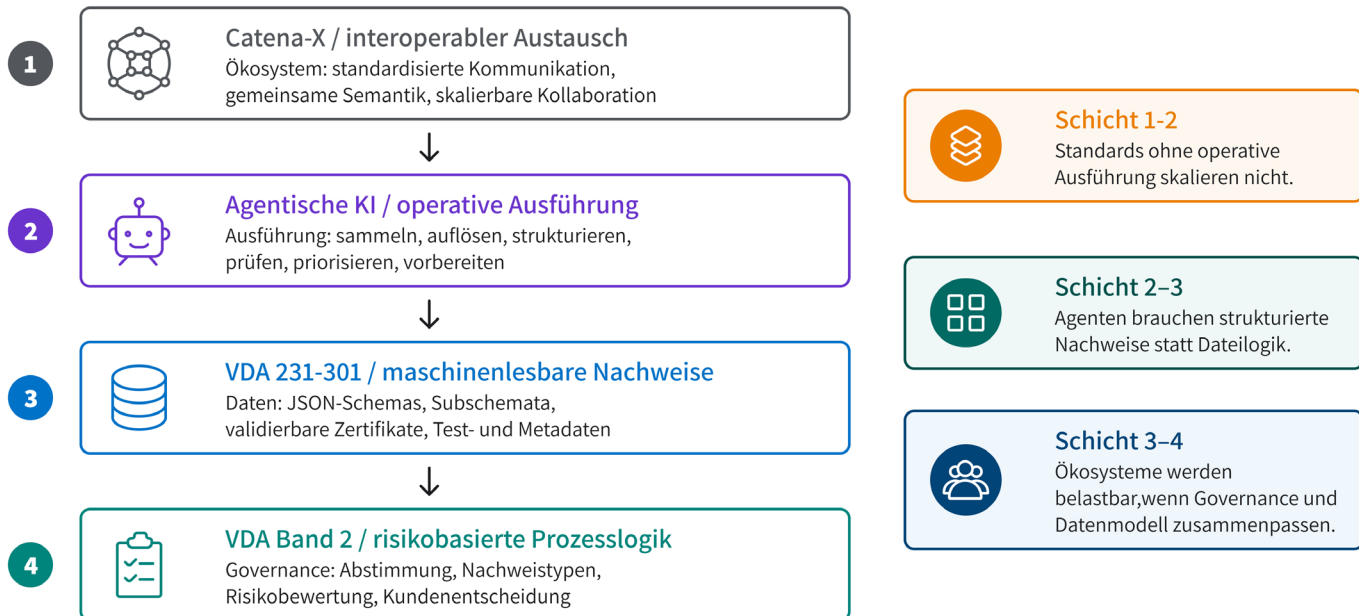


Bild 4: Product Approval Evolution: Die 4 Stufen der Nachweisführung mit agentischer KI

Catena-X: Product Approval als nächste Ökosystem-Stufe

Dass dieses Thema nun auch organisatorisch auf Ökosystemebene angegangen wird, zeigt Catena-X. Mit der neuen Expert Group „Product Approval“ adressiert Catena-X genau jene komplexen Datenaustauschprozesse, die für Produkt- und Produktionsprozessfreigaben heute noch weitgehend dokumentbasiert und manuell ablaufen. Ziel sind mehr Transparenz und Traceability für freigegebene Produkte und die zugehörigen Nachweise, weniger manuelle Uploads in kundenspezifische Portale und eine schnellere, verlässlichere Freigabe. Laut Profil der Expert Group soll dafür ein Catena-X-Standard auf Basis von VDA 231-300/-301 entstehen; zusätzlich sind Aspect Models sowie ein Tractus-X KIT mit Referenzimplementierungen, Beispiel-Payloads, APIs und Testartefakten vorgesehen. Nach aktuellem Planungsstand ist „26.09“ als Catena-X-Release-Bezeichnung vorgesehen.

Für den vorliegenden Kontext ist das ein wichtiges Signal. Es zeigt, dass sich der Nachweisprozess von einer dateibasierten Übergabe zu einem standardisierten, maschinenlesbaren und zunehmend ausführbaren Datenprozess entwickelt. VDA Band 2 definiert die risikobasierte Logik des PPF, VDA 231-301 stellt die semantische Datenstruktur bereit, und Catena-X beginnt, diese Logik in ein interoperables Ökosystem zu überführen. Agentische KI ist in diesem Bild nicht der Hype-Faktor, sondern die operative Schicht, die aus strukturierten Nachweisen einen handlungsfähigen Prozess macht.

Fazit

Die nächste Stufe der Digitalisierung der Freigabe- und Nachweisprozesse besteht nicht darin, noch mehr Dokumente elektronisch zu verwalten. Sie besteht darin, Nachweise risikobasiert zu steuern, semantisch eindeutig zu modellieren und prozessual ausführbar zu machen. Der neue VDA Band 2 liefert dafür die prozessuale Logik. VDA 231-301 liefert die Datenbasis. Catena-X signalisiert mit der Product Approval Expert Group, dass diese Richtung nun auch auf Netzwerkebene konkretisiert wird. Agentische KI wird damit vom allgemeinen Assistenten zum spezialisierten Umsetzungsinstrument im Freigabe- und Nachweisprozess – kontrolliert, sicher, nachvollziehbar und skalierbar.

Aus einem Automotive-Standard wird so ein übertragbares Modell für industrielle Nachweisführung über Branchengrenzen hinweg.



Kontakt

Bernd Löhle
material.one AG
bernd.loehle@material.one
+49 173 5731089

Die Antwort ist nicht „KI“

Dr. Steven Vettermann

Künstliche Intelligenz (KI) verändert derzeit die Agenda nahezu aller Unternehmen. Doch die eigentliche Herausforderung liegt nicht allein in der Technologie. KI wirkt zunehmend wie ein Stresstest für die Fähigkeit von Organisationen, mit Unsicherheit, Geschwindigkeit und ständig neuen Anforderungen umzugehen. Der Beitrag beschreibt, warum bisherige Erfolgsrezepte allein nicht mehr ausreichen, welche organisatorischen Fähigkeiten künftig über Wettbewerbsfähigkeit entscheiden und welche Chancen sich daraus sowohl für die Mitgliedsunternehmen als auch für prostep ivip als gemeinsame Lern- und Entwicklungsplattform ergeben.

Die Verlockung der nächsten Lösung

Kaum ein Thema beschäftigt Unternehmen derzeit so sehr wie die KI. Vorstände diskutieren KI-Strategien. Fachbereiche identifizieren Anwendungsfälle. Softwareanbieter integrieren KI-Funktionen in nahezu jedes Produkt. Wer derzeit Fachkonferenzen besucht, gewinnt leicht den Eindruck, dass die Zukunft bereits entschieden ist. Die Erwartungen sind entsprechend hoch.

Laut McKinsey setzen inzwischen 88 Prozent der befragten Unternehmen generative KI regelmäßig in mindestens einem Geschäftsbereich ein [1]. Gleichzeitig investieren nahezu alle Unternehmen in KI, während sich nur etwa ein Prozent als tatsächlich „AI mature“ bezeichnet.

Dieses Spannungsfeld ist bemerkenswert. Einerseits möchte niemand den Anschluss verlieren. Andererseits wächst die Unsicherheit. Welche Anwendungsfälle schaffen tatsächlich Mehrwert? Welche Kompetenzen werden benötigt? Welche Plattformen werden sich langfristig etablieren?

Das World Economic Forum beschreibt diese Situation als Teil einer größeren Entwicklung. Technologischer Wandel, geopolitische Spannungen, wirtschaftliche Unsicherheit und neue regulatorische Anforderungen verändern gleichzeitig die Rahmenbedingungen vieler Unternehmen [2].

Die eigentliche Herausforderung scheint daher nicht der Zugang zur Technologie zu sein. Vielmehr zeigt die aktuelle KI-Diskussion, wie schwer es Organisationen fällt, handlungsfähig zu bleiben, wenn sich die Rahmenbedingungen schneller verändern als ihre Planungs- und Anpassungszyklen.

Deshalb lautet die entscheidende Frage möglicherweise nicht, wie man KI einführt, sondern wie die eigene Organisation so zu entwickeln ist, dass sie mit einer Welt umgehen kann, in der technologische Veränderung und Disruption zum Normalzustand geworden ist.

Warum die bisherigen Erfolgsrezepte an Grenzen stoßen

Die industrielle Erfolgsgeschichte der vergangenen Jahrzehnte basiert auf Fähigkeiten, die Unternehmen bis heute stark machen: Standardisierung, Planung, Prozessbeherrschung, Spezialisierung und Skalierung. Globale Wertschöpfungsnetzwerke, hochkomplexe Produkte und internationale Kooperationen wären ohne diese Fähigkeiten kaum denkbar.

Die Herausforderung liegt daher nicht in mangelnder Kompetenz. Die Herausforderung liegt in einem Umfeld, das sich – anders als im 20sten Jahrhundert und davor – ständig und zum Teil radikal verändert.

Viele Probleme der Vergangenheit waren kompliziert. Aber mit ausreichend Wissen konnten sie analysiert, geplant und gelöst werden. Aktuelle Herausforderungen wie KI, Cybersecurity, Nachhaltigkeit oder Software-defined

Products verhalten sich häufig anders. Technologien entwickeln sich weiter, regulatorische Anforderungen verändern sich und neue Anwendungsfelder entstehen oft schneller als klassische Planungszyklen.

Planung bleibt wichtig. Sie reicht jedoch allein nicht mehr aus. Der Nobelpreisträger Herbert Simon beschrieb bereits vor Jahrzehnten, dass Organisationen Entscheidungen unter Bedingungen begrenzter Rationalität treffen müssen. Informationen bleiben unvollständig, die Zukunft nur teilweise vorhersehbar [3]. Genau dieser Zustand wird heute für viele Unternehmen zur Normalität.

Die entscheidende Herausforderung besteht daher nicht darin, Unsicherheit vollständig zu beseitigen. Sie besteht darin, trotz Unsicherheit wirksam entscheiden und handeln zu können.

Das bedeutet auch, dass eine andere Form von Führung notwendig ist. Nicht Führung als Kontrolle. Nicht Führung als Expertentum. Sondern Führung als Fähigkeit, Orientierung zu geben, Entscheidungen zu ermöglichen und Lernen zu beschleunigen.

Die eigentliche Herausforderung: Handeln ohne Gewissheit

Die Diskussion über KI wird häufig als Technologiediskussion geführt. Eigentlich geht es aber um die Fundamente der Organisationen selbst. Die meisten Unternehmen wissen längst, welche Technologien relevant sind. Informationen, Studien und Beispiele sind reichlich vorhanden (z.B. [4]). Die eigentliche Herausforderung besteht darin, aus Möglichkeiten wirksames Handeln entstehen zu lassen. Und genau hier entwickelt sich gerade ein neuer Wettbewerbsfaktor.

Über viele Jahre konnten Unternehmen Wettbewerbsvorteile vor allem durch Wissen, Erfahrung, Prozessbeherrschung und Skalierung aufbauen. Diese Faktoren bleiben wichtig. Gleichzeitig gewinnen jedoch Fähigkeiten an Bedeutung, die in vergleichsweise stabilen Umfeldern weniger im Mittelpunkt standen:

- Schnell zu lernen.
- Entscheidungen unter Unsicherheit zu treffen.
- Verantwortung zu übernehmen, bevor alle Antworten vorliegen.
- Unterschiedliche Perspektiven zusammenzuführen.
- Gemeinsam handlungsfähig zu bleiben.

Diese Entwicklung wird inzwischen auch durch internationale Studien bestätigt. Das World Economic Forum nennt analytisches Denken, Lernfähigkeit, Resilienz und Führungsfähigkeit als zentrale Zukunftskompetenzen [2]. Die OECD betont die Fähigkeit von Organisationen, Wissen aufzunehmen, anzupassen und in Entscheidungen zu übersetzen [5].

Die Frage verschiebt sich damit von „Haben wir genügend Informationen?“ hin zu „Haben wir genügend Orientierung, um den nächsten sinnvollen Schritt zu gehen?“

Handlungsfähigkeit bedeutet, auch dann entscheiden, lernen und handeln zu können, wenn Gewissheit nicht verfügbar ist. Technologien lassen sich kaufen. Handlungsfähigkeit nicht.

Wenn die Antwort nicht KI ist, was dann?

Wenn die eigentliche Herausforderung nicht in der Technologie liegt, stellt sich zwangsläufig die nächste Frage: Was sollten Unternehmen stattdessen tun?

Die Antwort lautet nicht, weniger in KI zu investieren. Im Gegenteil. Technologische Fähigkeiten bleiben entscheidend. Daten, Modelle, Plattformen und digitale Werkzeuge werden weiterhin wichtige Erfolgsfaktoren sein. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass technologische Investitionen allein nicht ausreichen.

Wenn Handlungsfähigkeit zum Wettbewerbsfaktor wird, stellt sich die nächste Frage, wie sie sich gezielt entwickeln lässt. Die folgenden vier Handlungsfelder haben dabei besondere Relevanz.

■ Orientierung schaffen

Je dynamischer das Umfeld wird, desto wichtiger werden klare Leitplanken. Orientierung bedeutet nicht, die Zukunft vorherzusagen. Orientierung bedeutet, Prioritäten sichtbar zu machen und Entscheidungen an einer gemeinsamen Richtung auszurichten. Der Nutzen: schnellere Entscheidungen, weniger Reibungsverluste und höhere Umsetzungsgeschwindigkeit.

■ Entscheidungsfähigkeit stärken

Viele Unternehmen verfügen über ausreichend Fachwissen. Dennoch werden Entscheidungen verzögert, weil Verantwortlichkeiten unklar sind oder zusätzliche Informationen abgewartet werden. Entscheidungsfähigkeit bedeutet, Entscheidungen dort zu treffen, wo Wissen entsteht, Verantwortlichkeiten klar zu gestalten und Lernschleifen bewusst einzuplanen. Das führt zu kürzeren Reaktionszeiten und geringeren Opportunitätskosten.

■ Organisationales Lernen beschleunigen

In dynamischen Umfeldern wird Lernen selbst Teil der Umsetzung. Erfolgreiche Organisationen schaffen gezielt Möglichkeiten, Annahmen zu testen, Erkenntnisse auszuwerten und Erfahrungen schnell zurück in die Organisation zu tragen. Der Nutzen: liegt in schnelleren Anpassungen entsprechend der sich ständig verändernden Rahmenbedingungen.

■ Menschen befähigen

Nicht jeder Mitarbeitende muss KI entwickeln. Aber immer mehr Menschen müssen mit Unsicherheit umgehen, Verantwortung übernehmen und Technologien sinnvoll nutzen. Organisationen, die ihre Mitarbeitenden dazu befähigen, erhöhen ihre Anpassungsfähigkeit weit über die aktuelle KI-Welle hinaus.

Die gemeinsame Wirkung dieser vier Handlungsfelder geht weit über den Umgang mit KI hinaus. Sie stärken die Fähigkeit einer Organisation, auch unter unsicheren Bedingungen handlungsfähig zu bleiben. Und genau diese Fähigkeit wird zunehmend zum entscheidenden Wettbewerbsfaktor.

Denn die Frage ist nicht, ob die nächste technologische Veränderung kommt. Die Frage ist, wie gut Unternehmen darauf vorbereitet sind.

Organisationen, die Orientierung geben, Entscheidungen ermöglichen, Lernen beschleunigen und Menschen befähigen, werden neue Technologien nicht nur schneller einführen. Sie werden ihren Nutzen schneller erkennen, Risiken früher adressieren und Veränderungen wirksamer in wirtschaftlichen Erfolg übersetzen.

Der eigentliche Wettbewerbsvorteil liegt damit nicht in der Technologie selbst. Er liegt in der Fähigkeit, mit ihr erfolgreich umzugehen.

Was bedeutet das für prostep ivip?

Nahezu jede Organisation beschäftigt sich mit ähnlichen Fragen: Wie identifizieren wir sinnvolle Anwendungsfälle? Wie schaffen wir Akzeptanz? Wie gestalten wir Verantwortlichkeiten? Wie integrieren wir neue Technologien in bestehende Prozesse?

Die Antworten darauf entstehen selten isoliert. Genau darin liegt seit jeher eine besondere Stärke von prostep ivip. Der Verein wurde gegründet, um Herausforderungen zu adressieren, die einzelne Unternehmen allein nur schwer lösen können. Über Jahrzehnte hinweg entstanden so Standards, Methoden, Referenzmodelle und gemeinsame Lösungsansätze, die heute in vielen Unternehmen selbstverständlich erscheinen.

Die zugrunde liegende Idee war dabei immer dieselbe: Gemeinsam lernen schafft Fortschritt, den einzelne Organisationen allein nur deutlich langsamer erreichen würden.

Diese Idee könnte heute aktueller sein denn je. Denn die eigentliche Herausforderung der kommenden Jahre besteht m.E. möglicherweise nicht darin, die nächste Technologie zu verstehen. Die eigentliche Herausforderung besteht darin, neue organisatorische Fähigkeiten zu entwickeln.

Für viele der dabei relevanten Fragen existieren derzeit keine allgemein akzeptierte Standards oder etablierte Best Practices. Umso wichtiger werden Räume, in denen Erfahrungen geteilt, Annahmen hinterfragt und neue Ansätze gemeinsam entwickelt werden können. Genau hier könnte eine zusätzliche Säule, eine nächste Entwicklungsstufe für die Community liegen.

Neben dem Austausch über Technologien, Architekturen, Standards und Prozesse gewinnt möglicherweise eine weitere Perspektive an Bedeutung: Die Frage, wie Organisationen ihre Fähigkeit stärken können, unter Unsicherheit wirksam zu lernen, zu entscheiden und zu handeln. Nicht als Ersatz für die technische Arbeit. Sondern als notwendige Ergänzung.

Denn die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen wird sich nicht allein daran entscheiden, welche Technologien verfügbar sind. Sie wird sich zunehmend daran entscheiden, wie schnell Organisationen neue Möglichkeiten erkennen, bewerten und in wirksames Handeln übersetzen können.

Vielleicht liegt darin die eigentliche Chance der aktuellen KI-Diskussion. Sie zwingt uns nicht nur dazu, über neue Technologien nachzudenken. Sie zwingt uns auch dazu, über die Art nachzudenken, wie wir Organisationen entwickeln und darin arbeiten.

Und genau diese Diskussion sollten wir gemeinsam führen.

Der eigentliche Hebel

Die Diskussion über KI wird uns noch lange begleiten. Neue Modelle werden entstehen. Neue Technologien werden auf den Markt kommen. Viele der heutigen Anwendungsfälle werden verschwinden und durch neue ersetzt werden. Genau deshalb wäre es ein Fehler, die aktuelle Entwicklung ausschließlich als Technologiefrage zu betrachten.

KI ist in vielerlei Hinsicht ein Stresstest. Ein Stresstest für die Fähigkeit von Unternehmen, mit Unsicherheit umzugehen. Ein Stresstest für ihre Entscheidungsfähigkeit. Ein Stresstest für ihre Lernfähigkeit. Und letztlich ein Stresstest für ihre Fähigkeit, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen.

Die eigentliche Frage lautet deshalb nicht, wer die beste KI einsetzt. Die eigentliche Frage lautet, welche Organisationen am schnellsten lernen, Entscheidungen treffen und neue Möglichkeiten in Wertschöpfung übersetzen können. Darin liegt der eigentliche Hebel.

Denn die nächste technologische Welle wird kommen. Ob sie KI, Quantencomputing oder anders heißt, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Unternehmen, die Orientierung schaffen, Entscheidungen ermöglichen, Lernen beschleunigen und Menschen befähigen, werden auch mit den Veränderungen danach erfolgreich umgehen können.

Die Antwort ist deshalb nicht „KI“. Die Antwort ist die Fähigkeit einer Organisation, unter Unsicherheit zu lernen, zu entscheiden und zu handeln. KI macht lediglich sichtbar, wie gut sie das bereits kann.

Literatur

- [1] Singla, A. et al.: The state of AI in 2025. Mc Kinsey, 2025
- [2] N.N.: Future of Jobs Report 2025. World Economic Forum, 2025
- [3] Simon, H.: Rational Decision Making in Business Organizations. Nobel Prize, 1978
- [4] Renner, M; Chaban, M.: 1,302 real-world gen AI use cases from the world's leading organizations. Google, 2026
- [5] Crouch, E et al.: AI in Strategic Foresight - Reshaping Anticipatory Governance. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2025



Steven Vettermann ist promovierter Ingenieur, Autor sowie Berater, Coach und Trainer für Leadership, Transformation und KI. Als Ehrenmitglied von prostep ivip verfolgt er die Entwicklung von Digitalisierung, Engineering und Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg seit vielen Jahren.

Der Artikel basiert auf Gedanken aus seinem Buch „Kursänderung – Leadership zwischen Transformationsdruck und Orientierung“ (2026).

Kontakt

Dr. Steven Vettermann
info@stevenvettermann.com
www.stevenvettermann.com

Von der Strategie zur Implementierung –
**ein rollenspezifisches
Weiterbildungsprogramm
zu digitalen Zwillingen**

Melisa Demir, Kai Lindow
Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK Berlin

Entwicklungsansatz

Digitale Zwillinge haben sich in den vergangenen Jahren zu einem zentralen Konzept der industriellen Digitalisierung entwickelt (Deuter/Pethig 2019). Ihre Anwendungsfelder erstrecken sich dabei über zahlreiche industrielle Bereiche: So werden digitale Zwillinge beispielsweise in der Stromerzeugung eingesetzt, um Gasturbinen und Dieselaggregate bei der Wartungsplanung zu unterstützen. In der Fertigungsindustrie begleiten sie Produkte über ihren gesamten Lebenszyklus, von der Konstruktion bis zur Endmontage und auch im Automobilbereich findet die Technologie Anwendung, etwa im Fahrzeugdesign, wo komplexe, vernetzte Systeme optimiert werden sollen (IBM 2021).

In der Praxis stellt die erfolgreiche Einführung digitaler Zwillinge für viele Unternehmen jedoch eine erhebliche Herausforderung dar. Ein zentraler Aspekt ist die Akzeptanz der Technologie: Da die tägliche Arbeit der Endnutzer langfristig von den einhergehenden Veränderungen betroffen ist, hängt der Erfolg maßgeblich von deren Bereitschaft ab, die Technologie auch tatsächlich zu nutzen. Apitzsch et al. betonen daher die Bedeutung umfassender Schulungsmaßnahmen, die über eine rein technische Qualifizierung hinausgehen und auch die Veränderungen im Arbeitsalltag der Mitarbeitenden adressieren (Apitzsch et al. 2020). Auch Fett und Breimann unterstreichen, dass fehlendes Wissen nicht nur die technische Implementierung erschwert, sondern auch zu Skepsis und unpräzisen Erwartungshaltungen gegenüber der Technologie führt (Fett/Breimann 2026).



Bild 1: Kompetenzpyramide

Die langjährige Projekterfahrung des Fraunhofer IPK in der Begleitung industrieller Digitalisierungsvorhaben zeigt dabei, dass sich das benötigte Wissen je nach Rolle und Verantwortungsbereich der Beteiligten erheblich unterscheidet: Während strategische Entscheidungsträger vor allem verstehen müssen, welchen geschäftlichen Mehrwert ein digitaler Zwilling erzeugen kann, benötigen Systemarchitekten Wissen darüber, wie ein solches Vorhaben konzeptionell und organisatorisch umgesetzt wird. Entwickler und IT-Fachkräfte hingegen stehen vor der Aufgabe, den Zwilling technisch zu realisieren und in bestehende Infrastrukturen zu integrieren. Ein einheitliches Schulungsformat kann dieser Heterogenität nicht gerecht werden.

Vor diesem Hintergrund wurde am Fraunhofer IPK ein Weiterbildungskonzept entwickelt, das rollenspezifisches Wissen zu digitalen Zwillingen strukturiert und gezielt vermittelt. Der Beitrag beschreibt den Entwicklungsprozess, die inhaltliche und didaktische Konzeption sowie die wesentlichen Entscheidungen, die das Programm geprägt haben.

Programmkonzeption: Drei Perspektiven auf digitale Zwillinge

Um dem beschriebenen Wissensdefizit entgegenzuwirken und unterschiedliche Rollen bei der Einführung digitaler Zwillinge gezielt zu befähigen, unterscheidet das entwickelte Weiterbildungsprogramm drei Perspektiven: die strategische, die architektonische und die technologische Dimension. Da ein einheitliches Kursformat der Heterogenität der Zielgruppen nicht gerecht werden würde, wurde jede Perspektive in einen eigenständigen, rollenspezifischen Kurs überführt. Nachfolgend werden die zugehörigen Qualifikationsprofile dargestellt.

Digital Twins Business Consultant - Strategische Perspektive

Die strategische Sicht zielt darauf ab, den Mehrwert digitaler Zwillinge für das Unternehmen aus geschäftlicher Perspektive zu identifizieren und zu realisieren.

Der Kurs vermittelt strategisches Wissen zur Einführung und Gestaltung digitaler Zwillinge im Unternehmen. Er richtet sich an Personen, die fachliche oder strategische Verantwortung für digitale Zwillinge übernommen haben oder dies künftig planen. Besonders profitieren Geschäftsentwickler, Entscheidungsträger und Berater, die grundlegendes Wissen über das Geschäftspotenzial und strategische Ansätze zur Umsetzung erwerben möchten. Die Inhalte umfassen die strategische Entwicklung und Verankerung des Konzepts der digitalen Zwillinge innerhalb der Wertschöpfungskette von Unternehmen sowie die Schaffung der notwendigen organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen und die Beschleunigung des Veränderungsprozesses.

Nach Absolvierung des Kurses ist der Digital Twins Business Consultant in der Lage

- Digital-Twin-Projekte effizient und zukunftssicher zu leiten,
- das Wertschöpfungspotenzial digitaler Zwillinge zu erkennen,
- die Auswirkungen und Wechselwirkungen auf Geschäftsmodelle, Produktentwicklung und Dienstleistungen zu verstehen,
- systematisch Methoden zur Identifikation von Geschäftsmöglichkeiten zu nutzen,
- die technische und finanzielle Machbarkeit einzuschätzen,
- eine Verbindung zwischen verschiedenen Ebenen und Geschäftsbereichen herzustellen.

Digital Twins Solutions Architect - Architektonische Perspektive

Die architektonische Sicht richtet den Blick auf die konkrete Ausgestaltung: Sie übersetzt die strategischen Ziele in ein tragfähiges Zwillingskonzept und dessen Implementierung, etwa durch die Definition von Anwendungsfällen, Wertschöpfungsketten, Governance-Strukturen sowie den Einsatz geeigneter Technologien und Systemarchitekturen.

Der Kurs vermittelt architektonisches Wissen zur Gestaltung und Umsetzung digitaler Zwillinge. Er richtet sich an operative Manager und Teamleiter, die Technologien und Anwendungen kennenlernen und einen umfassenden Überblick über Prozesse, Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung erhalten möchten. Die Inhalte umfassen die architektonische Gestaltung von Digital-Twin-Lösungen sowie die Konzeption und Evaluation von Lösungsalternativen für digitale Assets im Dialog mit dem Top-Management und Fachexperten, die Begleitung und Steuerung der Umsetzung von Digital-Twin-Projekten sowie die Einbettung dieser Lösungen in den Gesamtprodukt- oder Gesamtkontext des Unternehmens.

Nach Absolvierung des Kurses ist der Digital Twins Solutions Architect in der Lage

- Digital-Twin-Projekte effizient und zukunftssicher zu leiten,
- das Wertschöpfungspotenzial digitaler Zwillinge zu erkennen,
- die Erstellung, Integration und den Betrieb von Produkten und Systemen zu planen und zu begleiten,
- systematisch Methoden zur Beschreibung und Analyse von Anwendungsfällen hinsichtlich architektonischer und technischer Auswirkungen anzuwenden,
- die technische und finanzielle Machbarkeit einzuschätzen,
- erforderliche Projektvoraussetzungen hinsichtlich Kompetenzen, Personal, Technologien und Finanzen zu benennen und zu quantifizieren,
- eine Verbindung zwischen verschiedenen Ebenen und Geschäftsbereichen herzustellen.

Digital Twins Technical Developer – Technologische Perspektive

Die technologische Sicht konzentriert sich auf die detaillierte Ausarbeitung und Realisierung des digitalen Zwillings auf IT-Ebene. Dies umfasst die Gestaltung der System- und Schnittstellenlandschaft, die Auswahl und Implementierung von Datenbanken, die Sicherstellung von Informationssicherheit und Datenschutz sowie die Umsetzung der Interaktion mit anderen Systemen und Nutzenden.

Digital Twin Technical Developer sind Produktentwicklungsingenieure mit Spezialisierung auf IT oder IT-Fachkräfte mit technischem Hintergrund. Im Vergleich zu klassischen, teilweise isolierten Softwareentwicklungsprojekten weisen Digital-Twin

Implementierungsprojekte umfangreiche technische Wechselwirkungen mit anderen Disziplinen (z. B. Engineering, Produktion, Service), Fachbereichen (z. B. Regelungstechnik, Produktdatenmanagement) und Kompetenzen (Mensch-Maschine-Interaktion, digitale Fabrik, Data Science) auf. In diesem Zusammenhang entwerfen, implementieren und entwickeln Technical Developer ganzheitliche Lösungen. Der Kurs richtet sich an Technologie-Spezialisten, die den technologischen Ansatz beherrschen möchten, um eine auf die Bedürfnisse ihres Unternehmens zugeschnittene Digital-Twin-Lösung zu erstellen oder zu integrieren.

Nach Absolvierung des Kurses ist der Digital Twin Technical Developer in der Lage

- zugrunde liegende Technologien und IT-Standards von Industrie 4.0 zu benennen,
- die in Produktentwicklung, Produktion und Service eingesetzten IT-Architekturen, -Systeme und Integrationsansätze zu benennen,
- die Erstellung, Integration oder den Betrieb dieser Systeme und ihrer Schnittstellen zu verantworten,
- Methoden der industriellen Data Science und Simulationen sowie zugrundeliegenden Technologien anzuwenden,
- Sicherheitsanforderungen für Digital-Twin-IT-Lösungen zu identifizieren.

Alle drei Kurse richten sich insbesondere an Fachkräfte aus den Bereichen Maschinenbau, Mobilitätslösungen, Computer- und Elektronikherstellung, Medizintechnik, Softwareentwicklung, IT-Systemhäuser sowie IT-Dienstleistungs- und Beratungsunternehmen. Im Folgenden wird die gemeinsame inhaltliche Struktur der Kurse dargestellt.

Inhaltliche Struktur

Allen drei Kursen liegt eine ähnliche inhaltliche Gliederung zugrunde, die aus drei Modulgruppen besteht:

	Digital Twins Business Consultant	Digital Twins Solutions Architect	Digital Twins Technical Developer
Basics	Definitions, life cycle of products and digital twins		
	Application examples for digital twins		
	Overview of methodical twin development		
	Overview of capabilities for digital twins		
	Digital twins – Expert insights and industry perspectives		
Strategic Knowledge	Added value and different types of digital twins		
	Challenges and requirements when adopting digital twins		
	Methodic development of digital twins		
	Essential support technologies for enabling digital twins		
	Digital twins for sustainability		
Specific Knowledge	Change management at the organization level	Managing digital twin projects	Engineering IT and APIs
	Competencies and capabilities	Defining digital twin use cases	Clouds and edges
	Designing business models	Detailed consideration of the technologies	Data security and secure architectures
	Digital twins as part of smart products	Digital twin administration	Data analytics and AI
	Leading and measuring digital twin projects	IT-Systems and architecture	Databases
	Proof methods and progress	Data security and secure architectures	Semantics and ontologies
		Twin modeling and testing	Digital Factory
			Simulation and automation
			Extended Reality

Bild 2: Inhalte des Weiterbildungsprogramms

Die **Grundlagen** sollen den einheitlichen Ausgangspunkt aller drei Kurse bilden. Sie vermitteln ein gemeinsames Verständnis digitaler Zwillinge und schaffen die konzeptionelle Basis für die anschließenden Vertiefungen. Die Einbindung von Industrieperspektiven in diesem Teil des Programms dient dazu, das Grundlagenverständnis von Anfang an mit praxisnahen Kontexten zu verknüpfen. Die Grundlagen-Module sind Bestandteil jedes Kurses, da sie die Basis für das weitere Lernen bilden und sicherstellen, dass alle Teilnehmenden über das notwendige Grundwissen verfügen.

Das **strategische Wissen** baut auf den Grundlagen auf und ist Bestandteil des Digital Twins Business Consultant sowie des Digital Twins Solutions Architect. Beide Rollen erfordern die Fähigkeit, digitale Zwillinge in strategische, organisatorische oder architektonische Zusammenhänge einzuordnen. Es werden Vorteile, Herausforderungen und Voraussetzungen für die Einführung digitaler Zwillinge sowie die notwendigen Verantwortlichkeiten und Methoden zur Verwaltung der digitalen Zwillinge über den gesamten Lebenszyklus vermittelt. Diese Inhalte sind essenziell, um strategische Entscheidungen fundiert treffen und Digital-Twin-Projekte erfolgreich steuern zu können.

Literatur

- Andreas Deuter und Florian Pethig.
The Digital Twin Theory. Industrie 4.0
Management, 2019, 35. Jg., Nr. 1,
S.27-30. https://doi.org/10.30844/I40M_19-1_S27-30
- Apitzsch, René/Klimant, Franziska/Schumann, Marco/Winkler, Sven (2020):
Der Digitale Zwilling – Probleme und
Lösungsansätze, in: ZWF Zeitschrift für
Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115
(special), S. 121-124, [online] doi:
<http://dx.doi.org/10.3139/104.112328>
- Fett, M., & Breimann, R. (2026). Digitale
Zwillinge als Wettbewerbsfaktor –
Was den Mittelstand ausbremst.
- IBM (2021): Was ist ein digitaler Zwilling?,
[online] <https://www.ibm.com/de-de/think/topics/what-is-a-digital-twin>

Das **spezifische Wissen** differenziert die drei Kurse inhaltlich voneinander. Im Business Consultant-Kurs lernen die Teilnehmenden, Managementmethoden und Werkzeuge für die strategische Umsetzung von Digital Twins im Unternehmen anzuwenden. Sie erhalten Einblicke in ein Modell, das sowohl sichtbare als auch unsichtbare Faktoren im Unternehmen beleuchtet, und beschäftigen sich intensiv mit Change-Management als verbindendem Element zwischen Technik und Unternehmenskultur.

Im Architektur-Schwerpunkt werden Methoden und Technologien zur Planung und Umsetzung von Digital-Twin-Projekten vermittelt. Die Teilnehmenden lernen, wie sie digitale Zwillinge in bestehende Systemlandschaften integrieren, Schnittstellen gestalten und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Fachbereichen koordinieren.

Im technischen Schwerpunkt steht die praktische Umsetzung im Vordergrund. Hier werden technologische Grundlagen, IT-Standards, Sicherheitsaspekte und innovative Technologien wie Künstliche Intelligenz und digitale Fabrik behandelt. Die Teilnehmenden erarbeiten praxisnahe Lösungen, um digitale Zwillinge zu entwickeln, zu implementieren und zu betreiben.

Die inhaltliche Entwicklung erfolgte durch Expertinnen und Experten des Fraunhofer IPK, die über langjährige Forschungs- und Anwendungserfahrung im Bereich digitaler Zwillinge verfügen. Für die grundlegenden Kursinhalte wurden ergänzend Fachleute aus der Industrie einbezogen, die praxisbezogene Einblicke in ausgewählte Themen und Fragestellungen eingebracht haben. Die Kurse sind bewusst als voneinander unabhängige Angebote konzipiert – Teilnehmende können direkt in den für ihre Rolle relevanten Kurs einsteigen.

Diese Struktur spiegelt das Grundprinzip des Programms wider: ein gemeinsames konzeptionelles Fundament, ergänzt durch rollenspezifische Vertiefungen, die auf die konkreten Aufgaben und Verantwortlichkeiten der jeweiligen Zielgruppe zugeschnitten sind.

Didaktisches Konzept

Die Kurse sind als Online-Selbststudium konzipiert und werden auf der Lernplattform ILIAS in englischer Sprache bereitgestellt. Der Umfang beträgt jeweils 5–8 Stunden. Teilnehmende können die Inhalte zeitlich und örtlich flexibel bearbeiten und ihren Lernfortschritt individuell gestalten. Dies ermöglicht es, die Weiterbildung ohne feste Zeitbindung in den beruflichen Alltag zu integrieren.

Um die Qualität des Lernprozesses im Selbststudium zu sichern und eine rein passive Rezeption der Inhalte zu vermeiden, wird auf einen abwechslungsreichen Methodenmix gesetzt. Zentrale Bausteine sind erklärende

Texte, die durch interaktive Grafiken ergänzt werden. Diese kommen insbesondere bei komplexen Zusammenhängen zum Einsatz und ermöglichen es den Teilnehmenden, Inhalte aktiv zu erkunden und sich diese im eigenen Tempo zu erschließen. Lehrvideos von Expertinnen und Experten des Fraunhofer IPK und aus der Industrie vertiefen ausgewählte Themen, erläutern zentrale Konzepte aus erster Hand und verdeutlichen unterschiedliche Perspektiven aus Forschung und Praxis. Quizformate unterstützen die Lernenden dabei, ihr Verständnis nach einzelnen Abschnitten zu überprüfen, Wissenslücken zu identifizieren und ihren Lernfortschritt unmittelbar zu reflektieren.

Auf eine formale Zertifikatsprüfung wurde bewusst verzichtet. Eine solche Prüfung würde strukturelle Anforderungen mit sich bringen, etwa standardisierte Prüfungsformate, definierte Bewertungskriterien sowie Regelungen zur Prüfungsaufsicht, die mit dem Charakter eines flexiblen Selbststudienangebots nur schwer vereinbar sind. Das Programm richtet sich an berufserfahrene Fachleute, für die der Wissenserwerb selbst und dessen unmittelbare Anwendbarkeit im Vordergrund stehen. Die integrierten Quizformate erfüllen die Funktion der Lernerfolgskontrolle auf eine dem Format angemessene Weise: Sie begleiten den Lernprozess kontinuierlich, ohne ihn durch eine abschließende Prüfungssituation zu überlagern.

Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat gezeigt, wie aus der Beobachtung heterogener Wissensbedarfe ein strukturiertes Weiterbildungsprogramm entwickelt wurde, das mit drei rollenspezifischen Kursen strategische, architektonische und technologische Perspektiven auf digitale Zwillinge gezielt adressiert. Ein gemeinsames konzeptionelles Fundament, ergänzt durch differenzierte Vertiefungen und ein flexibles Selbststudienformat, bilden dabei die Grundlage für eine praxisnahe Qualifizierung.

Gleichzeitig versteht sich das Programm als Ausgangspunkt, nicht als abgeschlossene Lösung. Angesichts der hohen Dynamik im Themenfeld digitaler Zwillinge wird das Angebot kontinuierlich überprüft und weiterentwickelt. Rückmeldungen der Teilnehmenden sowie neue fachliche Entwicklungen fließen systematisch in zukünftige Überarbeitungen ein. Auf diese Weise entsteht ein Weiterbildungsangebot, das langfristig mitwächst und Unternehmen dabei unterstützt, digitale Zwillinge auch in Zukunft wirksam und wertschöpfend einzusetzen.



Kontakt

M.A. Melisa Demir
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Programm-Management Weiterbildungen
Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung
+49 30 39006-384
melisa.demir@ipk.fraunhofer.de



Kontakt

Dr.-Ing. Kai Lindow
Leitung des Geschäftsfelds Virtuelle
Produktentstehung
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
+49 30 39006-214
kai.lindow@ipk.fraunhofer.de

Data-Driven Rotor Design –

Entscheidungsunterstützung für die multidisziplinäre Auslegung von Rotoren elektrischer Maschinen

Hendrik Stachelhaus, M.Sc., Dr.-Ing. Markus Wagner,
Prof. Dr.-Ing. M. Kreimeyer, Ingénieur ÉCP
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),
Universität Stuttgart

Yuancong Gong, M.Sc., Benedikt Kaiser, M.Sc., Urs Pecha, M.Sc.,
Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour
Institut für Elektrische Energiewandlung (iew),
Universität Stuttgart

Die fortschreitende Elektrifizierung im Automobilsektor führt zu einer steigenden Nachfrage nach kompakten und hocheffizienten Elektromotoren. Um den Anforderungen an Leistungsdichte, Wirkungsgrad und Bauraum gerecht zu werden, ist eine Optimierung sowohl der elektrotechnischen als auch der mechanischen Komponenten erforderlich. Aus elektrotechnischer Sicht steht dabei die elektromagnetische Optimierung des Rotorblechpaketes im Fokus, während die mechanische Funktionalität des Rotors maßgeblich durch die Auslegung der Welle-Nabe-Verbindung (vgl. Bild 1) zwischen Rotorwelle und Blechpaket bestimmt wird.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden Welle-Nabe-Verbindungen bevorzugt als Pressverbände ausgeführt. Aufgrund der Fortschritte in der elektromagnetischen Leistungsfähigkeit sowie neuer Betriebszustände, wie beispielsweise das regenerative Bremsen (Rekuperation), erfährt die Verbindung zunehmend höhere mechanische Belastungen. Zur Gewährleistung der erforderlichen Drehmomentübertragung sind daher größere Übermaße des Pressverbandes notwendig. Dies kann lokal zu plastischen Verformungen führen und eine elastisch-plastische Auslegung erforderlich machen. Die Auslegung von elastisch-plastischen beanspruchten Pressverbänden erfolgt in der Regel mithilfe numerischer Simulationen auf Basis der Finiten-Elemente-Methode (FEM). Hierfür werden zahlreiche Iterationsschritte erforderlich, um den Anforderungen hinsichtlich Leichtbau und Festigkeit gleichermaßen gerecht zu werden.

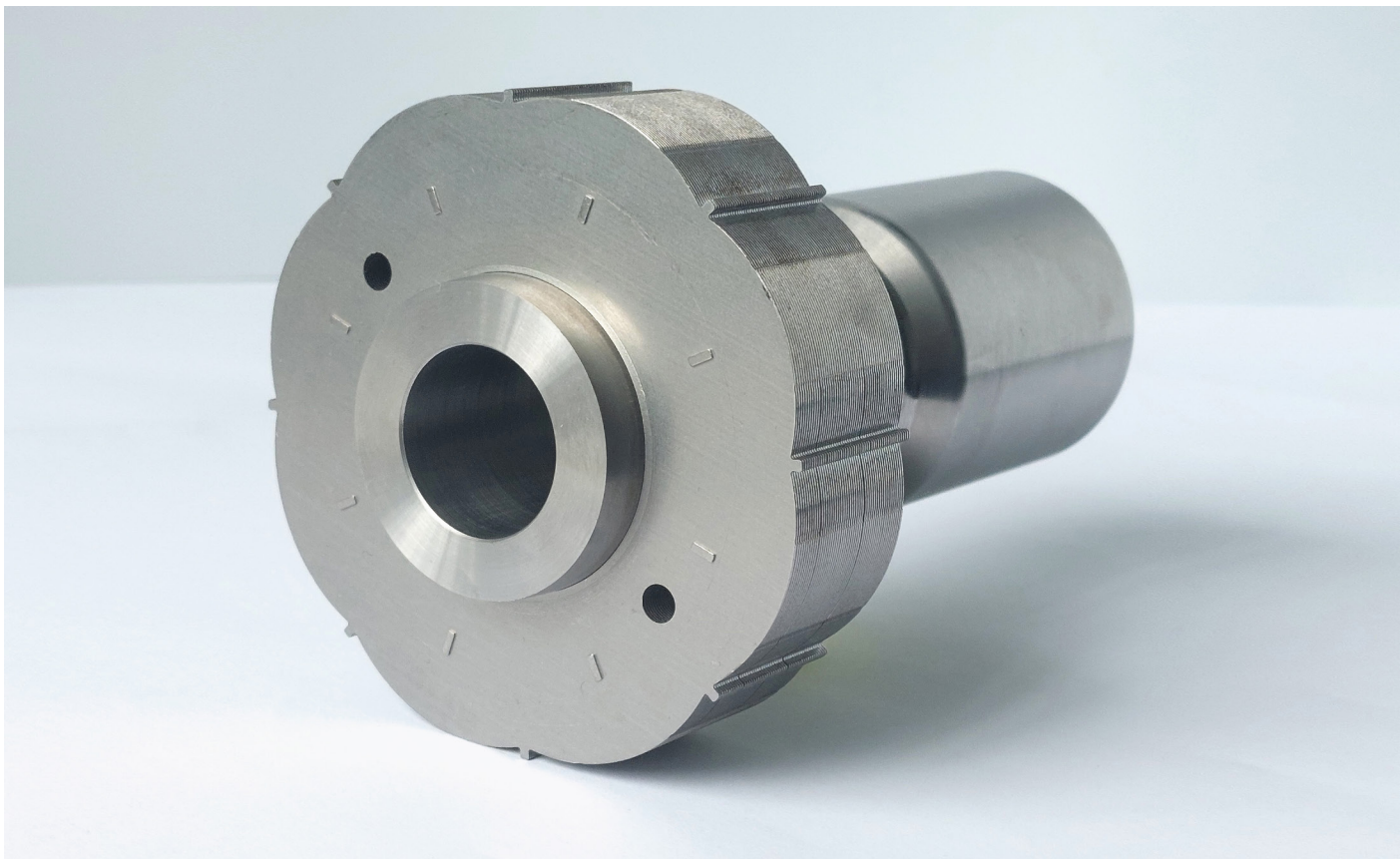


Bild 1: Welle-Nabe-Verbindung zwischen Rotorwelle und Blechpaket in Form eines Pressverbandes

Ein höheres Übermaß des Pressverbandes führt zu einem erhöhten Fugendruck zwischen Rotorwelle und Blechpaket. Dieser ist zwar für die sichere Drehmomentübertragung erforderlich, kann jedoch die elektromagnetischen Eigenschaften des Blechpaketes nachteilig beeinflussen. Die Auswirkungen der mechanischen Spannungen im Blechpaket werden bei der Auslegung elektrischer Maschinen bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Gleichzeitig wirken sich elektrotechnische Optimierungsmaßnahmen auf die mechanische Auslegung des Pressverbandes aus. Insbesondere beeinflussen geometrische Merkmale wie Flussbarrieren in den Elektroblechen die Fugendruckverteilung innerhalb der Kontaktfuge des Pressverbandes. Darüber hinaus kann die Optimierung des Arbeitspunktes des Elektromotors auf höhere Drehzahlen bei gleichbleibendem oder höherem Drehmoment zu Fugendruckverlusten infolge erhöhter Fliehkräfte führen. Sowohl die Auslegung der Flussbarrieren als auch die drehzahlabhängigen Fugendruckverluste erfordern eine Vielzahl numerischer Simulationen.

Die Auslegung von Elektromotoren erfolgt derzeit überwiegend in voneinander getrennten Simulationen, in denen die mechanischen bzw. elektromagnetischen Eigenschaften domänenspezifisch optimiert werden. Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen den Eingangs- und Zielparametern beider Simulationen sind zahlreiche Iterationen zwischen den beteiligten Fachdisziplinen erforderlich. Eine systematische Entscheidungsunterstützung für Entwickler existiert bislang nicht. Gleichzeitig erschweren die großen Datenmengen aus zahlreichen Simulationsiterationen sowie konkurrierende Zielgrößen eine effiziente und robuste Entscheidungsfindung. Dies führt zu erhöhten Entwicklungsaufwänden, einer eingeschränkten Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen sowie dem Risiko, vorhandene Innovationspotenziale nicht vollständig auszuschöpfen.

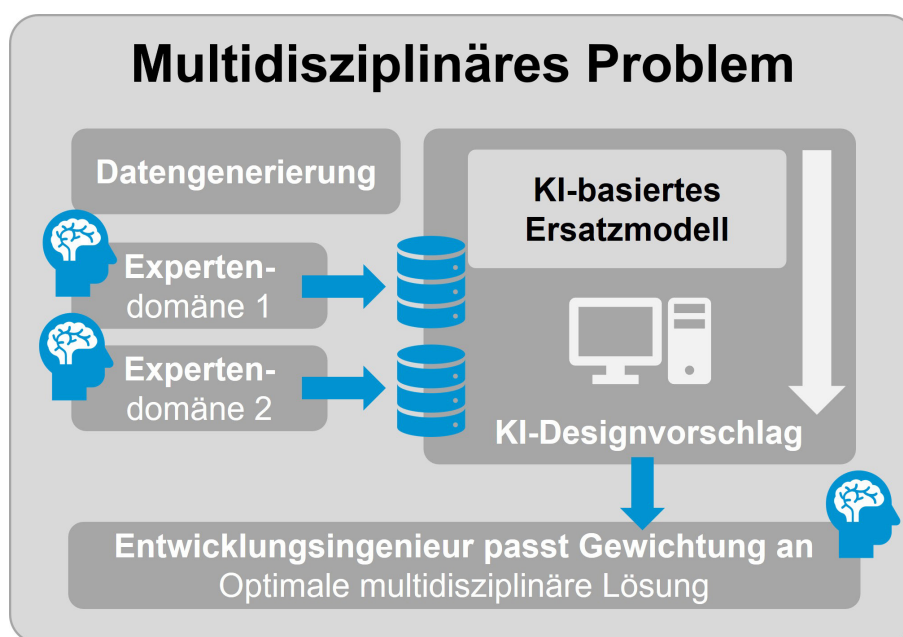


Bild 2: Schematische Vorgehensweise einer domänenübergreifenden KI-gestützten Produktentwicklung

Vor diesem Hintergrund wird an der Universität Stuttgart vom Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) gemeinsam mit dem Institut für Elektrische Energiewandlung (iew) an der multidisziplinären Auslegung von Rotoren elektrischer Maschinen geforscht. Das langfristige Ziel des Forschungsvorhabens ist die Verknüpfung etablierter methodischer Entwicklungsansätze, wie beispielsweise VDI 2221 und VDI 2225, mit datengetriebenen Methoden des Machine Learnings und der Künstlichen Intelligenz. Im Fokus steht dabei die Entwicklung eines ganzheitlichen methodischen Ansatzes, der gleichzeitig mechanische und elektromagnetische Zielgrößen berücksichtigt und Entwickler bei der Entscheidungsfindung unterstützt (vgl. Bild 2). Erste domänenübergreifende Untersuchungen, in denen die Auswirkungen verschiedener geometrischer Parameter von Rotorwelle und Blechpaket auf die mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften mithilfe eines KI-basierten Ersatzmodells analysiert wurden, zeigen vielversprechende Ergebnisse. Diese bestätigen das Potenzial einer integrierten, datengetriebenen Auslegung zur Reduzierung von Entwicklungsaufwänden und zur Identifikation multidisziplinär optimierter Rotor-designs.



Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour
Institut für Elektrische Energiewandlung
Universität Stuttgart
nejila.parspour@iew.uni-stuttgart.de



Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer
Leiter des Lehrstuhls
für Produktentwicklung und
Konstruktionstechnik
matthias.kreimeyer@iktd.uni-stuttgart.de
www.iktd.uni-stuttgart.de

Bleiben Sie informiert rund um alle prostep ivip Events, Veröffentlichungen und Neuigkeiten!



ENGINEERING
INTEROPERABILITY
DAY 2026
JT & STEP FOR DIGITAL CONTINUITY
1. Oktober 2026
NH Frankfurt Flughafen West



Social Media

Mit LinkedIn gut informiert!

Hier erhalten Sie unsere Neuigkeiten am schnellsten - über unseren LinkedIn Kanal prostep ivip Association! Am besten gleich vernetzen und immer up to date bleiben.



Newsletter

Schon angemeldet?

Der prostep ivip Newsletter informiert Sie über alle Aktivitäten rund um den Verein - sei es um die Arbeit und Ergebnisse der Projektgruppen, Events, den KI-Marktplatz u.v.m.

[!\[\]\(7bc43b319a082987e20f7bf78f4bab80_img.jpg\) Hier geht's zur Anmeldung!](#)

Neu im Homepage-Bereich der Mediathek Web-Seminare, Podcasts und Videos von prostep ivip



In diesem Bereich der prostep ivip Mediathek finden Sie ein breites Spektrum an Videos, Podcasts und Web-Seminaren rund um die Themen, die prostep ivip voranbringen – von Updates zu aktuellen Publikationen über Einblicke hinter die Kulissen unserer Projektgruppen bis hin zu vielem mehr.

Die prostep ivip Projektgruppen öffnen ihre Türen: In informativen Web-Seminaren präsentieren unsere Experten aktuelle Arbeitsergebnisse und geben Ihnen fundierte Einblicke in zukunftsweisende Themen der digitalen Produktentstehung – kostenlos, ohne Anmeldehürden und jederzeit abrufbar.

Ihre Vorteile auf einen Blick:

- Gebündeltes Expertenwissen aus unterschiedlichen Branchen, direkt anwendbar im Arbeitsalltag
- Persönlicher Zugang zu den Projektgruppenverantwortlichen – für individuelle Fragen oder vertiefenden Austausch
- Volle Flexibilität – Sie entscheiden, wann und wo Sie sich informieren, ganz ohne Verpflichtung
- Umfassender Überblick über die vielfältige Arbeit der prostep ivip Projektgruppen – unverbindlich und auf einen Blick

Die Videos stehen auch in englischer Sprache zur Verfügung, einige davon zusätzlich auf Japanisch..

➔ **Jetzt Web-Seminare, Podcasts und Videos entdecken**

Die Wissensplattform für digitale industrielle Exzellenz

Im prostep ivip Verein gestalten wir die digitale Landschaft von morgen - in unserem globalen Netzwerk mit über 170 Mitgliedsunternehmen, die Innovation vorantreiben

Entdecken Sie unser digitales Ökosystem

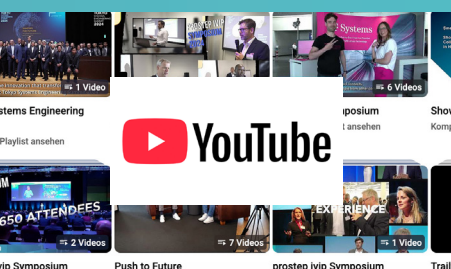
Mediathek

Greifen Sie auf unsere umfassende Bibliothek mit Whitepapers, Positionspapieren und Implementierungsleitfäden zu - erstellt von Branchenführern und technischen Experten.



YouTube-Kanal

Schauen Sie aufschlussreiche Interviews, Webinar-Aufzeichnungen und praxisnahe Demonstrationen, die komplexe Konzepte der digitalen Transformation greifbar machen.



LinkedIn community

Werden Sie Teil unseres lebendigen Professional Networks, in dem Vordenker Erkenntnisse teilen, Trends diskutieren und gemeinsam an Lösungen arbeiten.

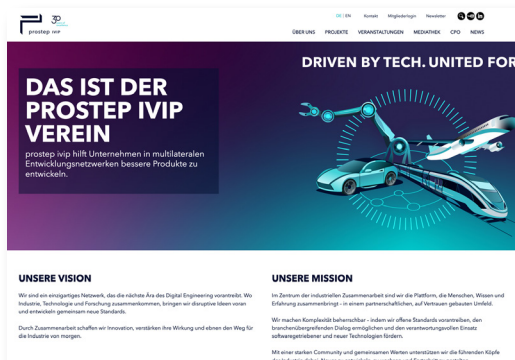


Ihre Vorteile als Mitglied bei prostep ivip

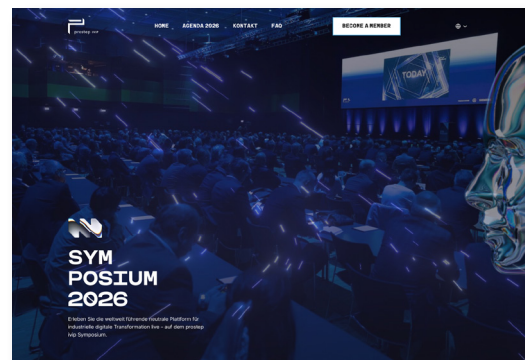
- **IMMER EINEN SCHRITT VORAUS:** Zugang zu aktuellen Standards, Implementierungsleitfäden und Best Practices
- **EXPERTENWISSEN:** Vernetzen Sie sich mit Vordenkern und technischen Experten Ihres Fachgebiets
- **PRAXISNAHE LÖSUNGEN:** Entdecken Sie umsetzbare Ansätze für Ihre digitalen Herausforderungen
- **GLOBALES NETZWERK:** Tauschen Sie sich mit Gleichgesinnten aus, die vor ähnlichen Transformationsaufgaben stehen

Ein Klick – grenzenloses Innovationspotenzial

Besuchen Sie unsere Websites für weitere Informationen



Entdecken Sie das prostep ivip Symposium



Informieren Sie sich über die übrigen prostep ivip-Veranstaltungen



Nehmen Sie Kontakt mit uns auf!



Machen Sie Leser zu Kunden – schalten Sie jetzt Ihre Anzeige!



Etabliert und wegweisend seit 1994: das ProduktDaten Journal von prostep ivip! Zweimal jährlich präsentieren hier Experten aus Industrie und Wissenschaft neueste Entwicklungen und Projekte.

prostep ivip – Ihr Digitalisierungspartner:
40% Anwender, 40% Systemadministratoren und
20% Forschung & Entwicklung

So erreichen Sie zu 100% Top-Management, IT und Business unserer Mitglieder!

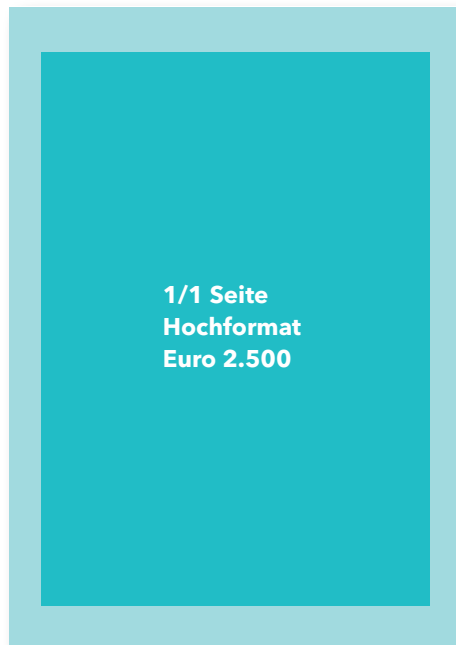
Wissenstransfer ist das höchste Ziel des Thinktanks prostep ivip. Nutzen Sie unsere Netzwerke – und treffen Sie mit einer Anzeige genau Ihre Zielgruppe: Die Entscheider der Top-Unternehmen der Automobil-, Flugzeug- und allgemeinen Fertigungsindustrie sowie Forschung!

Das ProduktDaten Journal erscheint zweimal jährlich als E-Paper (PDF-Download verfügbar) in deutscher und englischer Sprache. Neben den hochkarätigen wissenschaftlichen Inhalten des ProduktDaten Journals bietet sich Ihnen künftig die Möglichkeit, in werblicher Form noch gezielter auf Ihr Unternehmen oder Ihre Produkte aufmerksam zu machen.

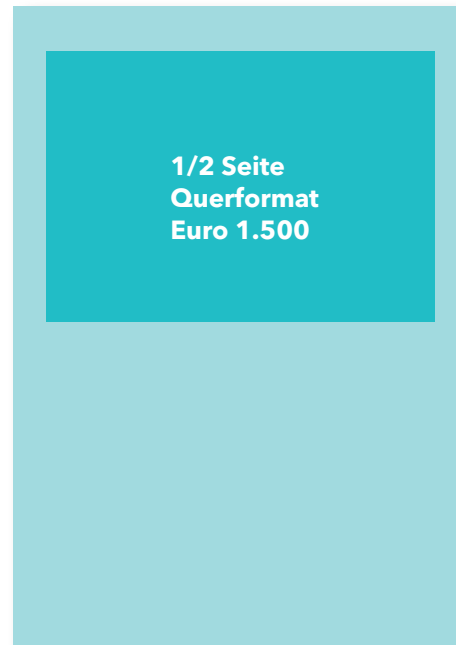
Hier finden Sie alle Informationen zu Ihrer möglichen Anzeige im nächsten ProduktDaten Journal!

Anzeigenformate und -preise

gültig ab 01.09.2025



1/1 Seite angeschnitten DIN A4.
Platzierung auf den Umschlagseiten
U2, U3 oder U4, maximal 3 Anzeigen
pro Heft, 4-farbig.
Euro 2.500,00



1/2 Seite Querformat angeschnitten
210 x 146 mm.
Platzierung im redaktionellen Teil,
maximal 1 Anzeige pro Heft, 4-farbig.
Euro 1.500,00

Telefon +49 151 20528679
fabienne.kreusch@prostep.org

prostep ivip Verein
Heinrich-Hertz-Straße 3-7
64295 Darmstadt
www.prostep.org

Kontakt

Hinweise für Autoren

Vorab

Text/Artikel

Bitte im Vorfeld Zusendung eines Abstracts zum Artikel

- Richtwert pro Seite: 2.900 Zeichen* + 1 Grafik
- Foto des Ansprechpartners
- Rubrik Neue Mitglieder: 1.000 Zeichen* + 1 Grafik,
- Wissenschaft & Forschung: 17.500 Zeichen* + 5 Grafiken
- Fachbeiträge von Unternehmen: 12.000 Zeichen* + 4 Grafiken
- Beiträge aus den Projektgruppen: 12.000 Zeichen* + 4 Grafiken
- In der Beitragsüberschrift keine Produktnamen verwenden
- Formatierung des Textes auf Überschrift, Einleitung, Zwischenüberschriften und Aufzählungen beschränken.
- Bitte als Kontakt den Namen des Autors, Firma/Organisation, Titel, Telefon und/oder E-Mail-Adresse angeben, gerne auch mit Foto
- Bitte eine englische Version des Textes gleich mitschicken.
- Layout: Korrekturumlauf möglich sowohl für die deutsche als auch für die englische Ausgabe

*inkl. Leerzeichen

Fotos/Grafiken

- Text und Fotos/Grafiken getrennt abspeichern
- Bitte die Bildzuordnung im Text deutlich machen, eindeutige Bildunterschrift
- Grafiken in deutscher und englischer Sprache erstellen!
- Grafikformate: TIFF, JPG, Powerpoint für Grafiken, EPS
- Auflösung: mind. 300 dpi
- Stellen Sie ein konkretes Projekt, nicht das Produkt in den Vordergrund!

Und außerdem...

Wir behalten uns aus redaktionellen Gründen vor, Ihren Beitrag auch in einer späteren Ausgabe zu veröffentlichen.

Bitte haben Sie Verständnis dafür, dass sich die Redaktion aus Layout-/Umfangsgründen Kürzungen vorbehält.

Sie haben Fragen rund um prostep ivip? Wir helfen gerne weiter!



Dr. Alain Pfouga
General Manager
alain.pfouga@prostep.org
+49 178 9509402



Fabienne Kreusch
Public Relations & Event Manager
fabienne.kreusch@prostep.org
+49 151 20528679



Nora Tazir
Technical Program Manager
nora.tazir@prostep.org
+49 6151 9287-434



Sabrina Reis
Member Relations & Project Controls Manager
sabrina.reis@prostep.org
+49 6151 9287-312



Kirsten Cornet
Account Manager
kirsten.cornet@prostep.com



Rachel Bauer
Research & Innovation Manager
rachel.bauer@prostep.org
+49 151 14085968



Angelika Fels
New Member Communication Coordinator
angelika.fels@prostep.org

Impressum

ProduktDaten Journal, ein Journal zu Anwendungen, Produkten, Standards in der Produktdaten-technologie

Herausgeber

prostep ivip e.V.

Redaktion

prostep ivip e.V.
Fabienne Kreusch (Redaktionsleitung)
Heinrich-Hertz-Straße 3-7
64295 Darmstadt
Telefon: +49 151 20528679
fabienne.kreusch@prostep.org

Layout und Produktion

prostep ivip e.V.
in Zusammenarbeit mit
Müller-Stoiber & Reuss
Poststraße 9
64293 Darmstadt

Erscheinungsweise

halbjährlich

Bezug

für Mitglieder des prostep ivip e.V.
kostenlos

Verfälschung und Schutzrechte

Nachdruck - auch auszugsweise -, Vervielfältigung oder sonstige Verwertung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers unter ausführlicher Quellenangabe gestattet. Gekennzeichnete Artikel stellen die Meinung des Autors, nicht unbedingt die der Redaktion dar. Alle Unterlagen, insbesondere Bilder, Zeichnungen, Prospekte etc., müssen frei von Rechten Dritter sein. Mit der Einsendung erteilt der Verfasser / die Firma automatisch die Genehmigung zum kostenlosen weiteren Abdruck in allen Publikationen des Herausgebers, bei dem auch das Urheberrecht für veröffentlichte Manuskripte verbleibt.

Copyright by prostep ivip e.V.

ISSN 1436-0403