

Wertgetriebene, modellbasierte Entwicklung Digitaler Zwillinge unter Berücksichtigung ökonomischer und technischer Aspekte

M. Fett, J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, R. Breimann, M. Krastel, E. Kirchner

INHALT Innovative Technologien wie Digitale Zwillinge können eine Vielzahl an Potentialen erfüllen, sind aber mitunter ein erheblicher Aufwand in der Entwicklung. Um das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand frühzeitig beurteilen zu können und angestrebte Anwendungsfälle zu priorisieren, wird im Rahmen dieses Beitrags ein Ansatz präsentiert, welcher ökonomische Aspekte mit technischen kombiniert. So können Anwendungsfälle wertgetrieben und modellbasiert konzeptioniert und entwickelt werden.

ABSTRACT Digital Twins can fulfill a multitude of potentials, but can be a considerable effort to develop. In order to be able to assess the ratio of benefit to effort at an early stage and to prioritize intended use cases, this article presents an approach that can be used to estimate the use case-specific implementation effort of a Digital Twin. Thus, use cases can be conceptualized and developed in a value-driven and model-based manner.

1 Einleitung

Digitale Zwillinge können in der Praxis genutzt werden, um eine Vielzahl an verschiedenen Anwendungsfällen zu erfüllen, beispielsweise die Nutzung als Soft-Sensoren (Virtuelle Sensoren, die basierend auf Simulationsmodellen Sensordaten liefern können. Wird in der Regel an schwer messbaren Bereichen sowie zur Kostenreduktion eingesetzt), Zustandsüberwachung mit präventiver Wartung oder die Nachverfolgung des CO₂-Fußabdrucks durch einen Nachhaltigkeits-Zwilling. Der Nutzen Digitaler Zwillinge ist dabei häufig schwer zu beschreiben, da Mehrwert oft nur indirekt geschaffen wird [1, 2]. Darüber hinaus ist die konkrete Umsetzung entsprechender Digitaler Zwillinge mitunter sehr aufwändig. Der jeweilige Implementierungsaufwand ist dabei einerseits abhängig vom physischen System selbst, andererseits aber insbesondere von den individuellen Anwendungsfällen des Digitalen Zwillinges. Daher ist es sinnvoll, frühzeitig Aufwand und Nutzen abzuschätzen, um die angestrebten Ziele des Digitalen Zwillinges und die hierfür umzusetzenden Pläne kritisch hinterfragen und priorisieren zu können. Im Umkehrschluss können mit einer Aufwandsabschätzung auch low-hanging Fruits identifiziert werden.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Ansatz vorgestellt, welcher ökonomische und technische Faktoren berücksichtigt und es so erlaubt, den Implementierungsaufwand sowie den Nutzen individueller Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge frühzeitig abzuschätzen. Dieser baut auf zwei bestehenden Ansätzen auf. Zum einen auf dem modifizierten V-Modell für die technische Umsetzung Digitaler Zwillinge [3], welches am pmd der TU Darmstadt erarbeitet wurde und mittlerweile bei der F&B-Engineering GmbH zum Einsatz kommt. Zum anderen wird auf der Digital Twin Toolbox for Implementation and Design (DITTID) [4] aufgebaut, diese wurde am LPL der TU München erarbeitet und ist heute Bestandteil des Portfolios der :em engineering methods AG. Durch die Kombination beider Ansätze wird ein ganzheitlicher Ansatz geboten, der eine wertgetriebene, modellbasierte Entwicklung Digitaler Zwillinge ermöglicht. Abschließend wird

der Ansatz an anhand eines realitätsnahen Beispiels angewandt und verdeutlicht.

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die für diesen Beitrag relevanten Grundlagen präsentiert. Dies beinhaltet die Grundlagen Digitaler Zwillinge, das V-Modell für die technische Umsetzung Digitaler Zwillinge, sowie die Digital Twin Toolbox for Implementation and Design (DITTID).

2.1 Grundlagen Digitaler Zwillinge

Ein Digitaler Zwilling ist „[...] ein dynamisches und domänenübergreifendes virtuelles Abbild eines physischen Systems, welches mit diesem zum bidirektionalen Datenaustausch verbunden ist. Der Digitale Zwilling entsteht durch die gezielte, nahtlose und durchgängige Vernetzung von Informationen aus verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer Instanz eines Product-Service-Systems.“ [5]

Das Konzept des Digitalen Zwillinges beschreibt eine virtuelle Repräsentation eines physischen Systems, welches in diesem Kontext dann als Physischer Zwilling bezeichnet wird. Im Kern des Digitalen Zwillinges befinden sich Modelle, welche den physischen Zwilling und insbesondere dessen Verhalten beschreiben. Dabei kann es sich um numerische, analytische oder empirische Modelle handeln, welche während der Entwicklung des Digitalen Zwillinges erstellt werden und während der Nutzung dazu dienen, dass beschriebene Verhalten zu berechnen oder zu simulieren. Die gesammelten und kombinierten Modelle bezeichnet man als Digitalen Master. Dieser dient als „Blueprint“ für jeden entstehenden Physischen Zwilling. Die Modelle werden sodann mit dynamischen Daten aus dem Betrieb des Physischen Zwillinges gespeist, welche von integrierten Sensoren erfasst werden. Hierbei spricht man von einem Digital Shadow, oder Digitalen Schatten. Ermöglicht man dann bidirektionalen Datenaustausch zwischen der Physischen und der Digitalen Welt, handelt es sich um einen Digitalen Zwilling. Für den bidirektionalen Datenaustausch zwi-

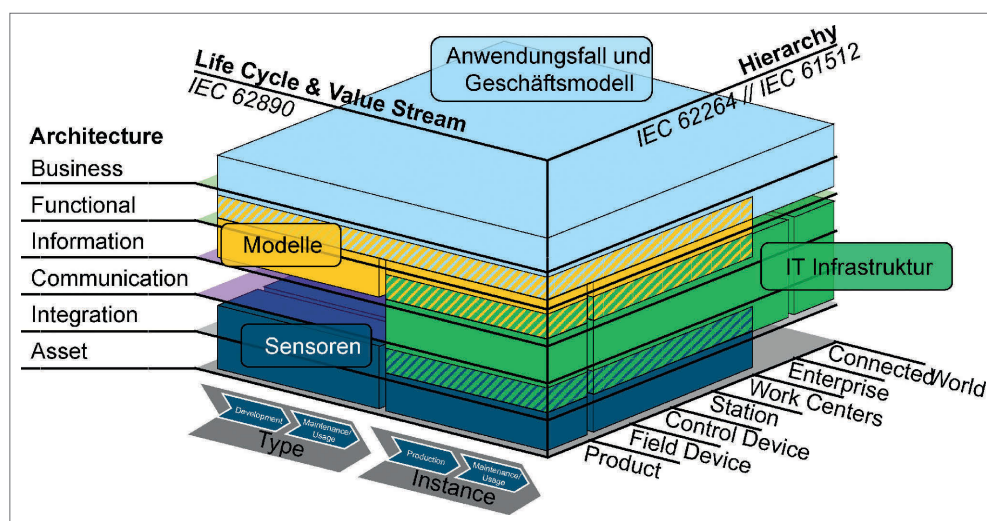


Bild 1 Einsortierung des Konzeptes des Digitalen Zwillings in das RAMI 4.0. Grafik: pmd/in Anlehnung an [11, 12]

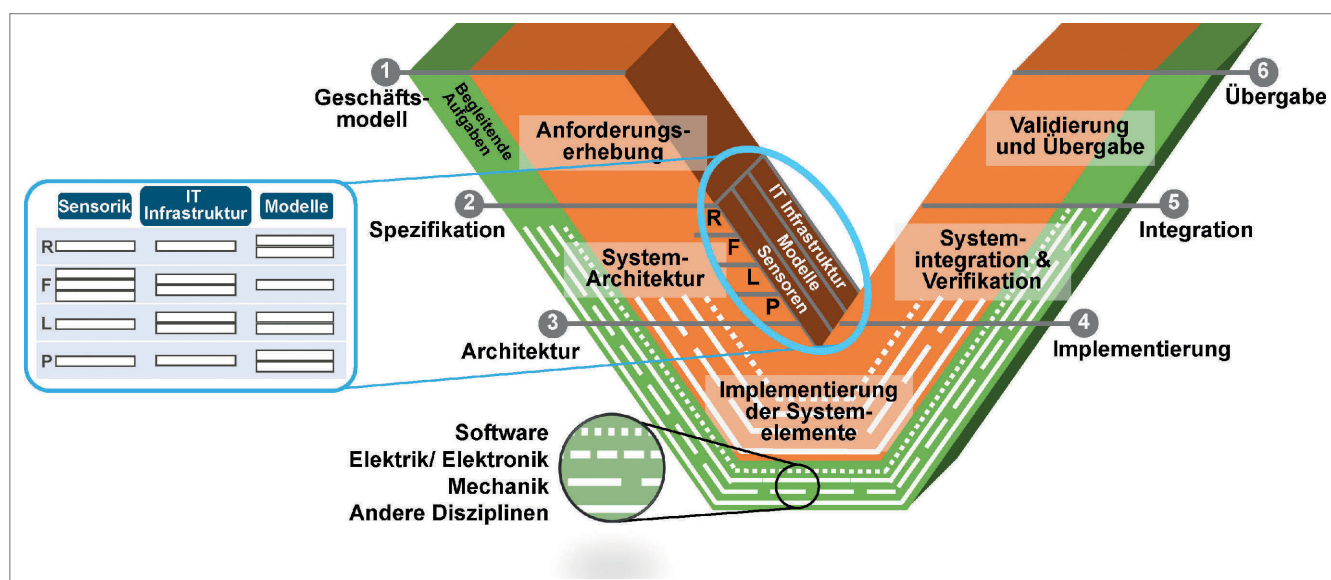


Bild 2 V-Modell für Digitale Zwillinge Grafik: pmd/in Anlehnung an [3]

schen Digitalem und Physischem Zwilling ist eine geeignete IT-Infrastruktur notwendig [6-9].

Für ein besseres Verständnis des Konzeptes des Digitalen Zwillings kann dieses in das Referenzarchitektur Modell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [10] einsortiert werden (**Bild 1**). Dabei wird das Gesamtkonzept aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, welche die Achsen des RAMI 4.0 darstellen. Für den vorliegenden Beitrag ist vor allem die Architecture Achse von Relevanz. Auf den obersten beiden Schichten befinden sich die Anwendungsfälle, welche die wirtschaftliche Nutzbarmachung sowie die Funktionen des Digitalen Zwillings beschreiben. Darunter liegen die Modelle, welche den Kern des Digitalen Zwillings darstellen und ebenfalls die Funktionen, aber auch die Informationsverarbeitung adressieren. Auf den untersten beiden Schichten befinden sich die Sensoren, welche in den physischen Zwilling (das Asset) integriert werden. Zwischen den Modellen und den Sensoren liegt die IT-Infrastruktur, welche eine Schnittstelle zwischen diesen beiden Domänen darstellt. Sie verarbeitet die Daten der integrierten Sensoren, und etabliert eine Kommunikation bis hin zur Informationsverarbeitung durch die Modelle [11, 12].

2.2 Methodiken zur Entwicklung Digitaler Zwillinge

Bei der Digitalisierung technischer Systeme stellt fehlende Expertise und Fachpersonal eine zentrale Hürde da [13], eine Beobachtung, welche zahlreichen Umfragen auch im Kontext Digitaler Zwillinge machen [14]. Diese Hürde kann durch den gezielten Einsatz von geeigneten Vorgehensmodellen und Methoden adressiert werden. Fett et al. [15] haben in einer systematischen Literaturrecherche entsprechende Vorgehensmodelle identifiziert, darüber hinaus finden sich in der Literatur aber noch weitere Vorgehensmodelle (beispielsweise [16-19]).

In mehreren Vorarbeiten wurde von Fett et al. ein eigenes Vorgehen für die Konzeptionierung und Implementierung Digitaler Zwillinge erarbeitet (**Bild 2**). Dieses basiert auf dem V-Modell der VDI 2206 [20] und übernimmt die makroskopische Struktur der Hauptschritte (Anforderungserhebung, Systemarchitektur, Implementierung der Systemelemente, Systemintegration & Verifikation sowie Validierung & Übergabe) nahezu unverändert. Auf einer konkreteren Betrachtungsebene wird das Vorgehen allerdings auf den Kontext Digitaler Zwillinge hin modifiziert beziehungsweise konkretisiert [3]. Dabei wird das Gesamtsystem

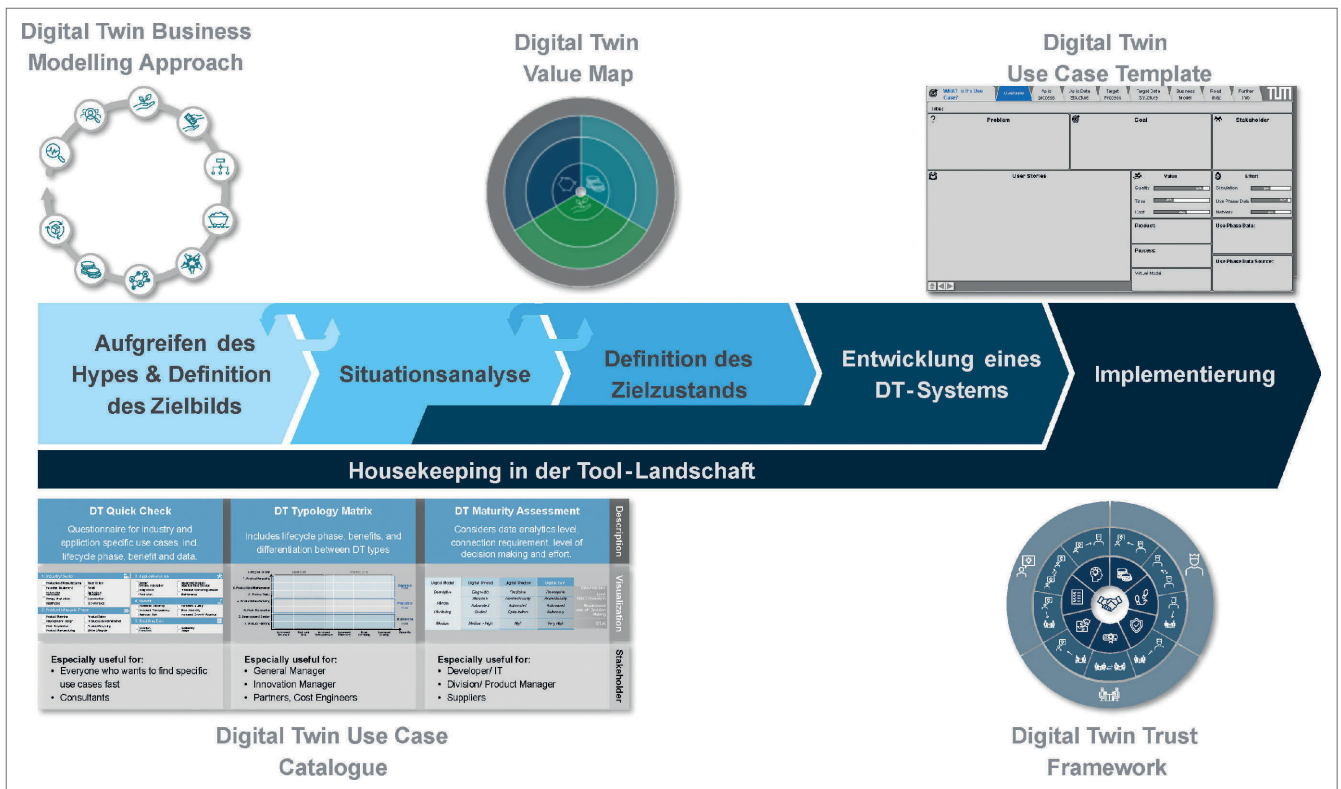


Bild 3 DITTID – The Digital Twin Toolbox for Implementation and Design Grafik: :em engineering methods AG/in Anlehnung an [4]

des Digitalen Zwillings zerlegt in die Domänen Modelle [15], Sensoren [21] und IT-Infrastruktur [12], in denen jeweils domänenspezifische Vorgehensschritte durchgeführt werden. Der Fokus liegt dabei vor allem auf der technischen Umsetzung des Digitalen Zwillings, wofür das Vorgehensmodell auch von der F&B-Engineering GmbH genutzt wird.

Die Digital Twin Toolbox for Implementation and Design (DITTID) von Trauer et al. [4, 22-24] ist eine Sammlung von Vorgehensweisen und Methoden, welche Unternehmen bei der Konzeptionierung und Implementierung Digitaler Zwillinge unterstützen soll. Dabei steht im Vergleich zu den zuvor diskutierten Ansätzen zur technischen Umsetzung Digitaler Zwillinge insbesondere ökonomische sowie unternehmensorganisatorische Faktoren im Vordergrund. Im Kern steht ein fünfstufiges Vorgehensmodell (Bild 3). Sowohl das Vorgehensmodell als auch der Methodenbaukasten werden industriell von der :em engineering methods AG eingesetzt.

3 Überführung in ein Gesamt-Vorgehen

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methodiken weisen trotz des gleichen, übergeordneten Ziels – der Entwicklung Digitaler Zwillinge – unterschiedliche Schwerpunkte auf. So liegt der Fokus des V-Modells aus Abschnitt 2.2 auf der technischen Umsetzung des Digitalen Zwillings, während bei der DITTID ökonomische sowie unternehmensorganisatorische Faktoren im Vordergrund stehen. Die beiden Ansätze bauen auf den gleichen Grundparadigmen auf, wodurch sie sich ergänzen und geeignet sind, in ein Gesamtverfahren überführt zu werden, welches eine breitere Palette an Schwerpunkten abdeckt. Durch die Zusammenführung eröffnen sich darüber hinaus neue Nutzenpotenziale in Form einer Feedbackschleife zur Reifegradbewertung und

Priorisierung von Anwendungsfällen. Bild 4 zeigt den Ablauf des Vorgehens, welches im Folgenden beschrieben wird.

3.1 Initiale Anwendungsfall-Identifikation, Situationsanalyse, Anforderungserhebung und Konzeptionierung der Systemarchitektur

Das Vorgehen beginnt mit der Geschäftsmodell-Entwicklung, sowie der Identifikation geeigneter Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge, welche dabei helfen, die individuellen Unternehmenszielen zu erreichen. Zur Unterstützung kann auf die Digital Twin Value Map [4, 5, 25] zurückgegriffen werden. Diese hilft dabei, aus den übergeordneten Unternehmenszielen konkretere Teilziele abzuleiten, welche durch konkrete Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge erreicht werden können [4, 23, 24]. Darüber hinaus wird die Digital Twin Value Map zur Beschreibung des Wertversprechens genutzt, welches Kernbestandteil eines jeden Geschäftsmodells darstellt [22]. Für jeden der identifizierten Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge werden dann unter Berücksichtigung der Unternehmensziele, unterschiedlicher Stakeholder sowie weiterer Randbedingungen, die Systemanforderungen an das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings ermittelt und das Geschäftsmodell ausdetailliert [22]. In diesem ersten Schritt des Vorgehens sind diese Systemanforderungen, sowie die daraus abgeleiteten, domänenspezifischen Anforderungen an die Modelle, Sensorik und IT-Infrastruktur des Digitalen Zwillings stark anwendungsfallspezifisch [3].

Anschließend werden für jeden Anwendungsfall Konzeptentwürfe für Modelle, Sensorik und IT-Infrastruktur erstellt. Im Kontext der Modelle bedeutet dies, dass ermittelt wird welches übergeordnete Verhalten des physischen Zwillings durch die Modelle beschrieben werden muss, um die für die Anwendungsfälle

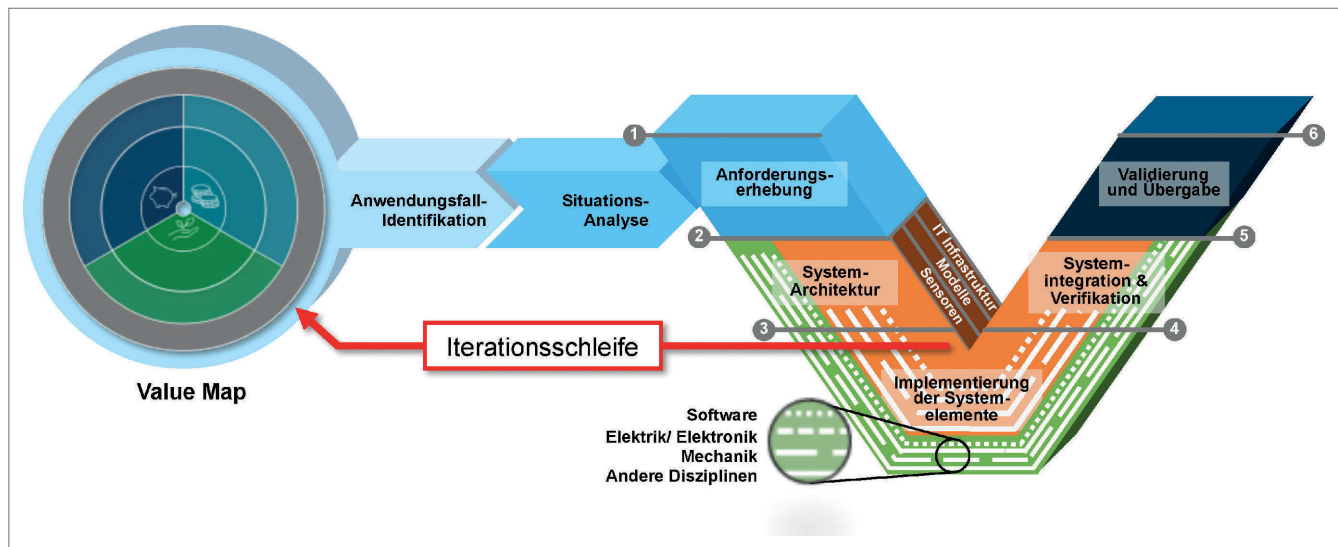


Bild 4 Kombiniertes Vorgehen zur iterativen Entwicklung Digitaler Zwillinge unter Berücksichtigung ökonomischer und technischer Faktoren. Grafik: pmd

notwendige Funktionalität anbieten zu können. Dieses übergeordnete Verhalten wird anschließend hierarchisch zerlegt und so ein erster Entwurf einer Model-Struktur mit entsprechenden notwendigen, zu implementierenden Teilmodelle erstellt [15]. Die Sensoren dienen primär dazu, die Modelle mit den notwendigen Betriebsgrößen zu versorgen. Daher sind sie direkt abhängig davon, welche Eingangsgrößen die identifizierten, zu implementierenden Teilmodelle benötigen. Gemeinsam mit den Anforderungen an das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings und an die Sensorik werden Sensoren mit den passenden Sensorparametern, wie bspw. Messgröße, Messbereich, Abtastrate und Auflösung ausgewählt [21]. Die Schnittstellen und weitere Randbedingungen, welche sich aus den Modellen und Sensoren ergeben, ergänzen weitere domänenspezifische Anforderungen an die IT-Infrastruktur. Darauf aufbauend kann ein Grobentwurf mit den notwendigen Hard- und Softwarekomponenten sowie den Schnittstellendefinitionen erstellt werden [12].

3.2 Iterationsschleife zur Reifegradbewertung und Anwendungsfall-Priorisierung

Die anwendungsfallspezifischen Anforderungen und Konzeptentwürfe für die Modelle, Sensorik und IT-Infrastruktur sind anschließend Gegenstand einer iterativen Feedbackschleife zur Reifegradbewertung und Anwendungsfall-Priorisierung. Hierzu werden die Anforderungen und Konzeptentwürfe der initial identifizierten Anwendungsfälle bezüglich ihrer Kommunalität beurteilt. Sie werden hinsichtlich ihrer Gleichheit untersucht und Überschneidungen und Ähnlichkeiten herausgearbeitet. Dies kann genutzt werden, um Cluster ähnlicher Anwendungsfälle zu bilden. Darüber wird geprüft, inwiefern bereits Modelle, Sensorik und IT-Komponenten für das bestehende System vorhanden sind (Ist-Zustand), welche dafür genutzt werden können, die angestrebten, anwendungsfall- und domänenspezifischen Konzeptentwürfe (Soll-Zustand) umzusetzen. Das Verhältnis aus diesem Soll- und Ist-Zustand resultiert in einer Beschreibung des jeweiligen Reifegrades des Systems für die individuellen Anwendungsfälle.

Die Beurteilung des Reifegrades der individuellen Anwendungsfälle sowie die Cluster-Bildung dieser hinsichtlich ihrer Kommunalität kann dann herangezogen werden, um die initial

identifizierten Anwendungsfälle zu priorisieren. Im Mittelpunkt steht die Frage, welche Anwendungsfälle in einem Cluster zusammengefasst werden können, um durch gemeinsame Umsetzung den spezifischen Implementierungsaufwand zu verringern. Dabei werden die Anforderungen gesammelt und in gemeinsame Konzeptentwürfe überführt. Randständige Anwendungsfälle, welche aufgrund geringer Kommunalität einen sehr hohen Implementierungsaufwand haben, können kritisch reflektiert und bei Bedarf niedriger priorisiert werden.

Im Rahmen der iterativen Feedbackschleife besteht die Möglichkeit, weitere Anwendungsfälle mit der Value Map zu identifizieren, welche innerhalb der festgelegten Anwendungsfall-Cluster liegen oder für welche das System bereits einen hohen Reifegrad hat. Diese sind daher mit geringen Implementierungsaufwand umsetzbar und stellen sogenannte "Low-Hanging Fruits" dar. Obwohl sie nicht initial ausgewählt wurden, kann aufgrund des guten Aufwand-Nutzen-Verhältnisses eine Weiterverfolgung dennoch lohnenswert sein. Ergebnis dieser mehrfach durchführbaren Iterationsschleife sind eine finale Auswahl an umzusetzenden Anwendungsfällen, sowie ganzheitliche Konzeptentwürfe dieser.

3.3 Implementierung und Integration des Digitalen Zwillings

Die final festgelegten Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings und die dafür notwendigen Konzeptentwürfe für Modelle, Sensorik und IT-Infrastruktur werden anschließend implementiert und in entsprechende Systemelemente umgesetzt. In der Domäne der Modelle werden hierzu die definierten Teilmodelle erstellt und entsprechend der Modellstruktur zu einem gesamten Super-Modell des Digitalen Zwillings aggregiert [15]. Hinsichtlich der Sensorik werden die konkreten Sensoren ausgewählt, welche in der Lage sind, die notwendigen Messgrößen mit allen ermittelten Anforderungen zu erfassen. Diese werden anschließend im Rahmen einer konzeptionellen Sensorintegration in das System integriert [21]. Weiter werden die identifizierten, notwendige Hard- und Softwarekomponenten der IT-Infrastruktur, sowie die definierten Schnittstellen konkret umgesetzt und implementiert [12]. Während der Umsetzung dieser domänenspezifischen Systemelemente, werden diese iterativ verifiziert, und abschließend validiert.

Anschließend werden diese im Rahmen einer Systemintegration in das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings zusammengeführt, welches ebenfalls verifiziert und validiert wird [3]. Dabei wird der Digitale Zwilling in bestehende Strukturen des Unternehmens und am Produkt integriert. Dies geschieht zunächst in einem Pilotprojekt und anschließend im regulären Betrieb [4].

4 Evaluierung im Anwendungsfall „Bahntechnik“

Das vorgestellte Konzept wird beispielhaft an einem, von der :em AG entwickelten, Anwendungsfall vorgestellt. Für die Entwicklung des Ausgangszustands wurde die Methodik DITTID angewandt [4]. Basierend auf einer H0-Modelleisenbahn veranschaulicht der Showcase eine praxisnahe Implementierung verschiedener Technologien zur Verwaltung digitaler Zwillinge (**Bild 5**). Hierzu wurden verschiedenste ingenieurtechnische Artefakte aus der Entwicklungsphase – dem Digitalen Master – bidirektional mit Betriebsdaten des Zuges – dem Digitalen Schatten – verknüpft. Integraler Bestandteil des Aufbaus stellt der Bosch Semantic Stack der Bosch Connected Industries (BCI) dar (<https://www.bosch-connected-industry.com/de/de/portfolio/bosch-semantic-stack>). Er dient als Integrationsschicht für die unterschiedlichen Datenobjekte und wird als Digital Twin Registry verwendet. Basierend auf dieser Architektur können mithilfe der Asset Administration Shell (AAS) der Industrial Digital Twin Association (IDTA) [26] konkrete Digital Twin Anwendungsfälle umgesetzt werden.

Für die Engineering-Artefakte wurde eine heterogene Tool-Landschaft gewählt, um eine realitätsnahe Brownfield-Umgebung abzubilden. Anforderungen wurden in ReqMan und Codebeamer erfasst, die Systemarchitektur in Cameo modelliert. Die Produktstruktur entstand in Siemens Teamcenter, 3D-Modelle in Siemens NX und deren Web-Streaming über den instant3Dhub von Threedy. Die Systemsimulation erfolgte in Python. Im Betrieb erfasst ein Messwagen Zuggeschwindigkeit, Strecke, Weichenstellung, Zugposition und Energieverbrauch. Hierbei ist zu erwähnen, dass die verwendete IT-Architektur möglichst realistisch eine heterogene Tool-Landschaft darstellt (**Bild 6**). Die jeweiligen Elemente wurden nicht methodisch gestützt ausgewählt.

Basierend auf dieser Architektur wurde ein Dashboard, eine Digitale Steuerung mit automatisierten Fahrprofilen, sowie ein Digitaler Produktpass (DPP) umgesetzt. Der Digitale Produktpass beinhaltet ein digitales Typenschild, benötigte Übergabedokumente, die Stückliste des Produktes, den Product Carbon Footprint (PCF) runtergebrochen auf die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen inkl. der Nutzung, sowie technische Daten des Produkts. Grundlage hierfür stellen die jeweiligen Submodell-Templates der IDTA dar. Für jedes Element der Modelleisenbahn wurde ein solcher Digitaler Produktpass erstellt. D.h. für die Strecke, die aus mehreren schaltbaren Weichen besteht, sowie den Zug, welcher sich aus der Lokomotive und dem Messwagen zusammensetzt. Der Digitale Produktpass ist digital abrufbar unter: https://digital-nameplate.em.ag/ids/aas/0353_2110_3042_4912.

Dieses bestehende System soll nun mit der vorgestellten Methodik erweitert werden. Zunächst wurden systematisch potenzielle Digital Twin Anwendungsfälle mithilfe der Digital Twin Value Map (siehe oben) identifiziert und bezüglich ihres Wertversprechens bewertet. Der Use Case Katalog [4] wurde dabei nicht angewandt. Ein Thema welches große Teile der europä-

schen Industrie beschäftigt ist der Digitale Batterie Pass (DBP), welcher als eine Unterform des DPPs ab 2027 für viele Hersteller von Batterien und batteriebetriebenen Geräten rechtlich bindend wird [27, 28]. Im Rahmen dieses Demonstrators, soll ein solcher DBP für die Batterie, die zum Betrieb einer Frontkamera nötig ist, umgesetzt werden. Der DBP ermöglicht es Unternehmen, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, die mit dem Digital Twin Business Modelling Approach [22] abgebildet werden können. Beispielsweise kann das Produkt als Service angeboten, eine prädiktive Wartung entwickelt oder Use Cases der Circular Economy, wie Remanufacturing oder Reuse von Komponenten, ermöglicht werden. Neben den Geschäftsmodellen wurden in der Anwendungsfallidentifikation auch die relevanten Stakeholder und deren Bedürfnisse und Anforderungen dokumentiert.

Basierend auf einer IST-Analyse wurden Konzeptentwürfe in den Domänen Modelle, Sensorik und IT-Infrastruktur erstellt. Erforderlich für die Erstellung des DBPs ist die Erfassung der Zustandsdaten der 6V-Batterie. Diese beinhalten den Ladezustand sowie die Temperatur des Akkus. Die Messung des Ladezustandes erfolgt auf Basis einer Spannungsmessung. Die Messelektronik erfordert eine Spannung von 3,3 V. Daher ist ein Spannungsregler nötig, welcher nach Messung der Verbraucher eine Mindestleistung von 0,66 W gewährleisten muss. Da die Spannung der Batterie zu hoch für den Mikrocontroller mit der Messelektronik ist, wird ein Spannungsteiler installiert. Für die Messung der Temperatur wurde auf der Oberseite der Batterie ein digitaler Temperatursensor angebracht und an den Microcontroller angeschlossen.

Der Mikrocontroller muss schließlich in die bestehende IT-Architektur drahtlos eingebunden werden. Hierfür werden die Daten per MQTT-Protokoll an die Datenbank des Demonstrators gesendet. Mittels einer Rest-Abfrage werden die Daten anschließend an das AAS-Submodell des Akkus weitergeleitet. Die gesamte Architektur des Demonstrators ist in **Bild 7** dargestellt. Zur Anzeige des DBP wurde eine Oberfläche in Grafana erstellt.

Basierend auf dieser Analyse lässt sich der Implementierungsaufwand gut abschätzen. Da viele Komponenten der bestehenden IT-Infrastruktur wiederverwendet werden können, jedoch zusätzliche Sensorik erforderlich ist, ist der Aufwand dieses Anwendungsfalles als mittel einzustufen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages wurden zwei Ansätze zur Entwicklung Digitaler Zwillinge miteinander kombiniert. Der daraus entstandene Ansatz kombiniert Methoden zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit und eines wertgetriebenen Vorgehens mit Methoden zur detaillierten modellbasierten Analyse und Entwicklung des technischen Systems. Die Anwendung am realen Bahntechnik Modell verdeutlicht die Umsetzbarkeit der vorgestellten Methodik. Durch die vorgesehene Iterationsschleife lässt sich der Implementierungsaufwand eines Digital Twin Anwendungsfalles anhand dieses Ansatzes leichter bewerten. Im Rahmen dieser Studie konnte der vorgeschlagene Ansatz nicht in Gänze angewandt werden. Außerdem hat es sich hierbei lediglich um die Weiterentwicklung eines bestehenden Systems gehandelt. Die Eignung des Ansatzes für neuentwickelte Digital Twin Anwendungen kann somit nicht bewertet werden. In Zukunft gilt es, diese Methodik im industriellen Kontext und an einem komplexeren technischen System zu evaluieren. Darüber hinaus sollte die Reifegrad- und

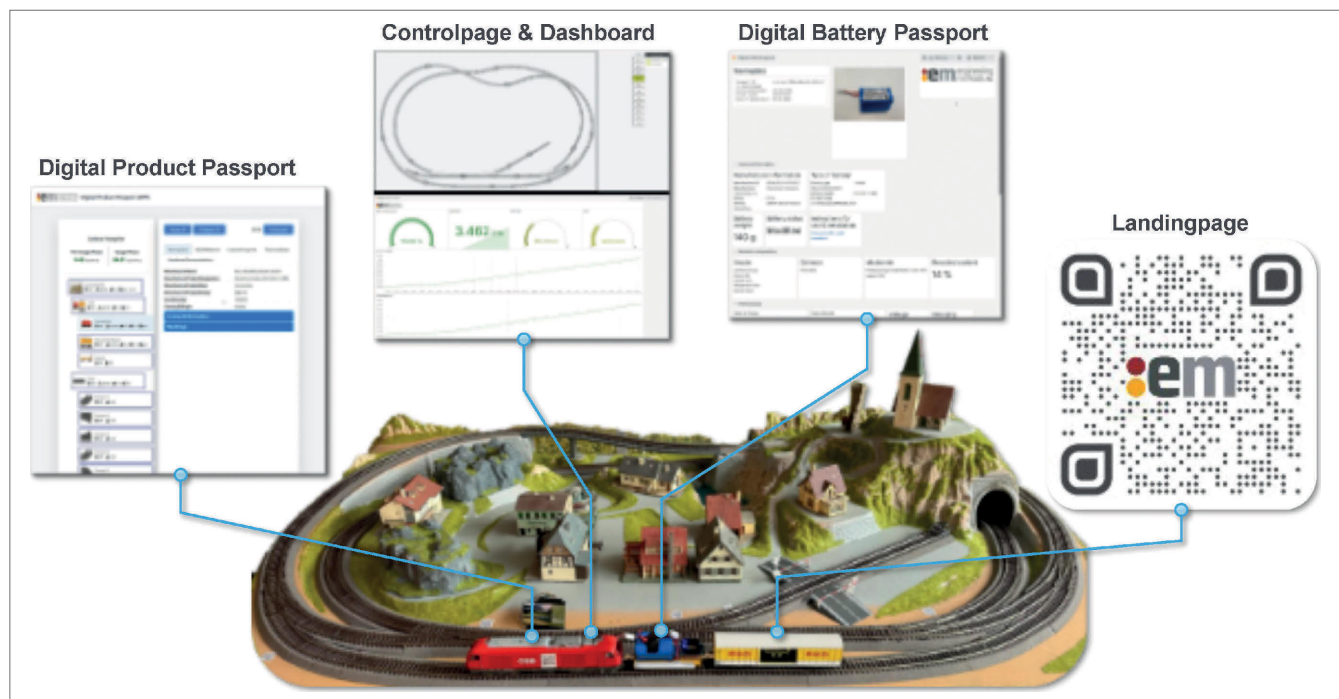


Bild 5 Der Digital Twin Showcase der :em engineering methods AG Grafik: :em engineering methods AG

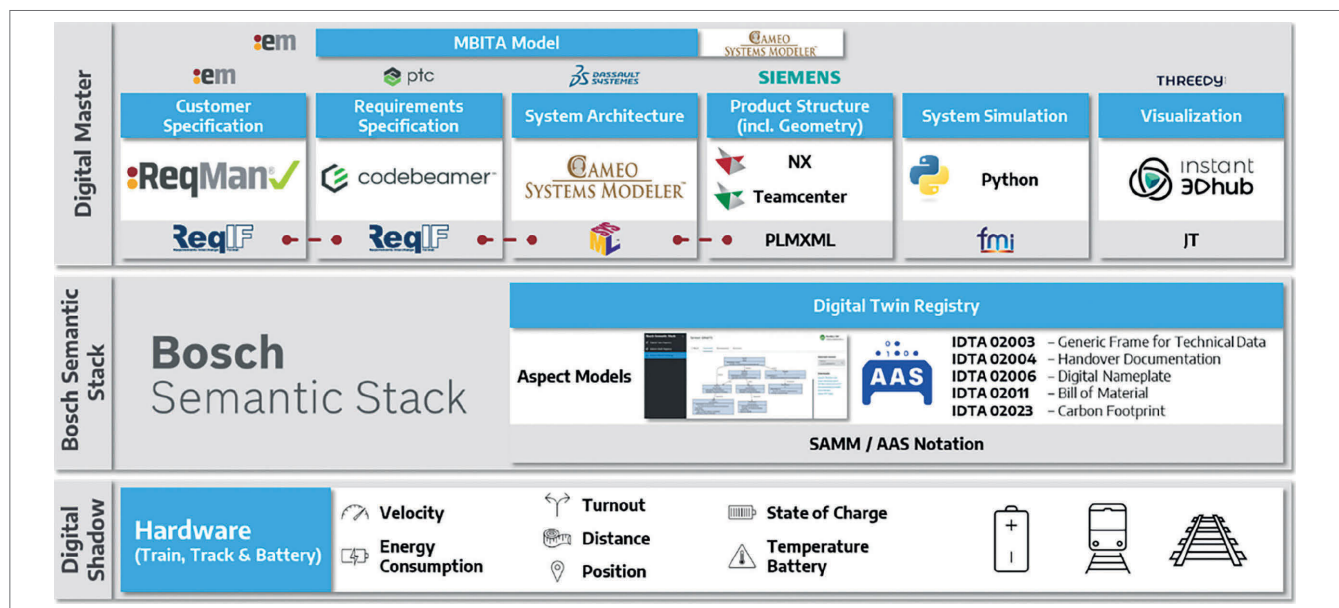


Bild 6 Heterogene IT-Landschaft des Digital Twin Demonstrator. Grafik: :em engineering methods AG

Aufwandsabschätzung im Iterationsschritt methodisch unterstützt werden. Insgesamt kann die Kombination der zwei Ansätze als positiv beschrieben werden.

Literatur

- [1] Trauer, J.; Mutschler, M.; Mörtl, M. et al.: Challenges in Implementing Digital Twins – a Survey. In Proceedings of ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC-CIE 2022), August 14-17, 2022, St. Louis, Missouri. ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, St. Louis, Missouri, USA, 8/14/2022 – 8/17/2022; the American Society of Mechanical Engineers: New York, N.Y., 2022, ISBN 978-0-7918-8621-2.
- [2] Fett, M.; Zwickler, J.; Wilking, F. et al.: A survey on the industry's perception of digital twins – a follow-up to the digital twin workshop at the DESIGN Conference 2022. Proc. Des. Soc. 2024, 4, 2039-2048, doi:10.1017/pds.2024.206.
- [3] Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S. et al.: Utilization of RFLP in V-Model methodology for the interdisciplinary development of Digital Twins. Forsch Ingenieurwes 2025, 89, doi:10.1007/s10010-025-00812-3.
- [4] Trauer, J.: On the Conception and Implementation of Digital Twins – Supporting Companies in the Development of Digital Twins; TUM, 2024.
- [5] Christ, A.; Koch, P.; Krastel, M. et al.: Ready or not – the Digital Twin is coming! How can companies prepare for it? ProductData Journal 2022, 12-17.
- [6] Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.-D. et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“ Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2020, 115, 47-50, doi:10.3139/104.112311.

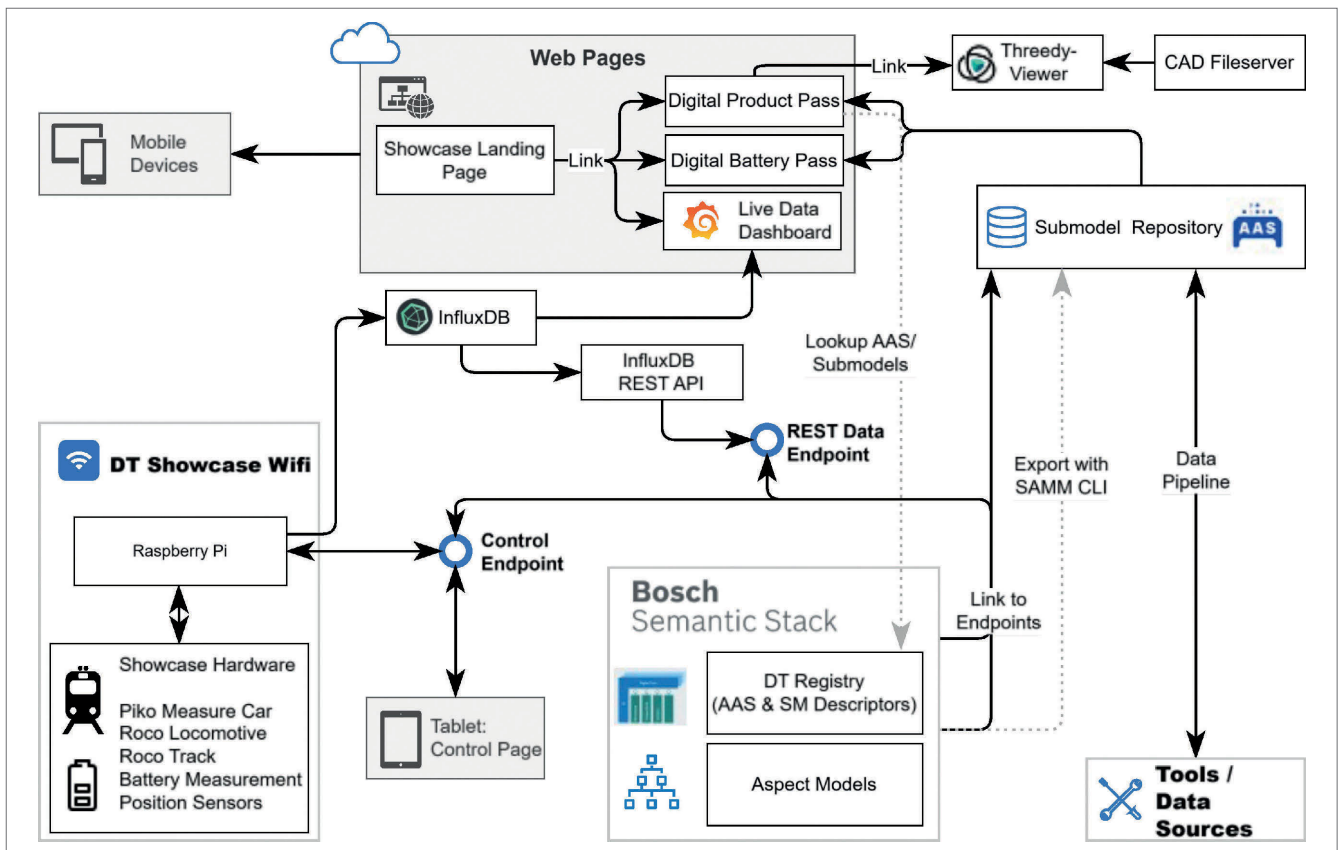


Bild 7 Netzwerkarchitektur des Digital Twin Showcases Grafik: em engineering methods AG

- [7] Wilking, F.; Schleich, B.; Wartzack, S.: Digital Twins– Definitions, Classes an Business Scenarios for different Industry Sectors. Proc. Des. Soc. 2021, 1, 1293-1302, doi:10.1017/pds.2021.129.
- [8] Czwik, C.; Martin, G.; Anderl, R. et al.: Cyber-Physische Zwillinge. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2020, 115, 90-93, doi:10.3139/104.112310.
- [9] Trauer, J.; Schweigert-Recksiek, S.; Engel, C. et al.: What is a Digital Twin? – Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. Proc. Des. Soc.: Des. Conf. 2020, 1, 757-766, doi:10.1017/dsd.2020.15.
- [10] DIN SPEC 91345:2016-04, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0); Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [11] Fett, M.; Macko, S.; Wilking, F. et al.: Retrofitting Digital Twins of Existing Systems 2024, 1-8, doi:10.1109/ISSE63315.2024.10741101.
- [12] Fett, M.; Kraft, M.; Wilking, F. et al.: Medium-Level Architectures for Digital Twins: Bridging Conceptual Reference Architectures to Practical Implementation in Cloud, Edge and Cloud-Edge Deployments. Electronics 2024, 13, 1373, doi:10.3390/electronics13071373.
- [13] Fett, M.; Breimann, R.; Mustafa, A. et al.: Barriers and drivers of digitalization of technical products: a survey in industry. Forsch Ingenieurwes 2025, 89, doi:10.1007/s10010-025-00856-5.
- [14] Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S. et al.: Practical insights into the perception of digital twins: An analysis of surveys. Forsch Ingenieurwes 2025, 89, doi:10.1007/s10010-025-00879-y.
- [15] Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S. et al.: A Literature Review on the Development and Creation of Digital Twins, Cyber-Physical Systems, and Product-Service Systems. Sensors (Basel) 2023, 23, doi:10.3390/s23249786.
- [16] Riedelsheimer, T.; Gogineni, S.; Stark, R.: Methodology to develop Digital Twins for energy efficient customizable IoT-Products. Procedia CIRP 2021, 98, 258-263, doi:10.1016/j.procir.2021.01.040.
- [17] Schulte, S. N.; Kremer, G.; Stark, R.: Von der Theorie zur Anwendung – Entwicklungslitfad für Digitale Zwillinge/From Theory to Application – a Development Guide for Digital Twins. Konstruktion 2025, 77, 52-57, doi:10.37544/0720-5953-2025-01-02-52.
- [18] Stark, R.; Freseman, C.; Lindow, K.: Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. CIRP Annals 2019, 68, 129-132, doi:10.1016/j.cirp.2019.04.024.
- [19] Wilking, F.; Behringer, M.; Fett, M. et al.: Concept of a Modular and System Model Driven Digital Twin for Engineering Education. In 2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), 14-16 June 2023 : conference location: Lille, France. 2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), Lille, France, 6/14/2023-6/16/2023; IEEE: Piscataway, NJ, 2023; pp 1-7, ISBN 979-8-3503-2723-6.
- [20] VDI. Development of mechatronic and cyber-physical systems: VDI/VDE 2206:2021-11, 2021.
- [21] Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S. et al.: Sensor selection and integration for Cyber-Physical Systems in context of Digital Twins – A systematic review of requirements. In 2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), 14-16 June 2023 : conference location: Lille, France. 2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), Lille, France, 6/14/2023 – 6/16/2023; IEEE: Piscataway, NJ, 2023; pp 1-7, ISBN 979-8-3503-2723-6.
- [22] Trauer, J.; Mac, D. P.; Mörtl, M. et al.: A digital twin business modelling approach. Proc. Des. Soc. 2023, 3, 121-130, doi:10.1017/pds.2023.13.
- [23] Trauer, J.; Pfingstl, S.; Finsterer, M. et al.: Improving Production Efficiency with a Digital Twin Based on Anomaly Detection. Sustainability 2021, 13, 10155, doi:10.3390/su131810155.
- [24] Schweigert-Recksiek, S.; Trauer, J.; Engel, C. et al.: Conception of a digital twin in mechanical engineering – A case study in technical product development. Proc. Des. Soc.: Des. Conf. 2020, 1, 383-392, doi:10.1017/dsd.2020.23.
- [25] Schweigert-Recksiek, S.; Trauer, J.; Krastel, M.: Wie der digitale Zwilling Mehrwert schafft – eine Nutzensystematik. Konstruktionspraxis 2023.
- [26] IDTA. IDTA – Der Standard für den Digitalen Zwilling. Available online: <https://industrialdigitaltwin.org/> (accessed on 30 April 2025).
- [27] European Union. 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. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj> (accessed on 30 April 2025).
- [28] European Union. 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. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj> (accessed on 30 April 2025).

Michel Fett

pmd, TU Darmstadt
F&B-Engineering GmbH

Jakob Trauer

:em engineering methods AG

Sebastian Schweigert-Recksiek

:em engineering methods AG

Richard Breimann

pmd, TU Darmstadt
F&B-Engineering GmbH

Marcus Krastel

:em engineering methods AG

Eckhard Kirchner

pmd, TU Darmstadt

Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)
64289 Darmstadt
www.pmd.tu-darmstadt.de

:em engineering methods AG
64295 Darmstadt
www.em.ag

F&B-Engineering GmbH
64295 Darmstadt
www.fb-engineer.ing

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

Quantenfehlerkorrektur mit logischen Qubits

Quantencomputer verfügen über immenses Potenzial, weil sie hochkomplexe Berechnungen deutlich schneller als aktuelle Supercomputer durchführen könnten. Ebenso immens ist Stand heute allerdings die Hürde auf dem Weg zur praktischen Anwendung von Quantencomputern: die Fehleranfälligkeit ihrer Hardware. Weltweit arbeiten Forschende deshalb an Verfahren zur Quantenfehlerkorrektur, um die Berechnungen von Quantencomputern zuverlässiger zu machen.

Vor diesem Hintergrund haben die Neqxt GmbH (Eigenschaft: neQxt), das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF und die Point 8 GmbH das Projekt Snaqcs-2025 (Eigenschaft: snaQC2025) gestartet, um einen Ansatz zur Quantenfehlerkorrektur entscheidend voranzutreiben. Mit Simulations- und Integrationsverfahren, Software-Tools für Analyse und Optimierung sowie skalierbarer und fehlerresistenter Quantenalgorithmen wollen die Verbundpartner robuste logische Quantenbits (Qubits) für Quantencomputing-Hardware entwickeln. Auf diesem Weg soll die Fehleranfälligkeit physikalischer Qubits kompensiert werden, um Quantencomputing einen großen Schritt näher in Richtung praktische Nutzung zu bringen.



Florentin Reiter (Fraunhofer IAF), Carsten Zwilling (point8), Sascha Heußen (neQxt), Florian Kruse (point8), Roman Bansen (neQxt), Nikolas Knake (VDI TZ), Jesko Merkel (point8), Tobias Nauck (Fraunhofer IAF), Edoardo Carnio, Lina Vandr  (neQxt). Foto: Markus Speier

Das Qubit ist die wichtigste Komponente eines Quantencomputers. Es übernimmt als zentrale Informationseinheit dieselbe Funktion wie das Bit beim konventionellen Computer, es kann aber im Gegensatz zum Bit mehrere Zustände gleichzeitig annehmen. Durch Quantenverschränkung sind zudem mehrere Qubits unabhängig von ihrer Distanz zueinander verbunden.

Am 14. Januar 2026 trafen sich Vertreter der drei Verbundpartner zum Projekt-Kick-off in Köln. Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unterstützt das Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme „Anwendungsorientierte Quanteninformatik“ für drei Jahre mit 2,5 Mio. Euro. (Quelle: *ibd*). www.iaf.fraunhofer.de