

Florian Kerber (Hrsg.)

Der Digitale Zwilling im industriellen Kontext Eine regionale Perspektive

in Zusammenarbeit mit



Impressum und Kontakt

Herausgeber: Prof. Dr. Florian Kerber

Kontakt: Technologietransferzentrum Flexible Automation Nördlingen
Emil-Eigner-Straße 1, 86720 Nördlingen
Tel +49 9081 8055 174
ttz-noerdlingen@hs-augsburg.de
<https://www.hs-augsburg.de/HSZDR.html>

Hochschule Augsburg
Fakultät für Elektrotechnik
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg
Tel +49 821 5586-0
info@hs-augsburg.de
www.hs-augsburg.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
Einführung.....	6
<u>Teil I: Der Digitale Zwilling im regionalen Verständnis</u>	
Eine Arbeitsdefinition für die regionale Diskussion	9
Das Verständnis in der Praxis – Ergebnisse einer Onlinebefragung	12
<u>Teil II: Praxisbeispiele aus der Region</u>	
Virtuelle Inbetriebnahme einer Roboterzelle für die Getriebemontage	16
Realistische Robotersimulationen	18
Materialflusssimulation für eine FTS-basierte Produktionssteuerung.....	20
Holistischer Ansatz für einen Digitalen Zwilling am TTZ Nördlingen	23
Virtuelle Vermessung eines Digitalen Zwillings mit künstlicher Intelligenz	25
Approximation durch Machine Learning Modelle zur Echtzeitregelung	28
Ausblick.....	33
Autoren	35
Organisationen.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl von Publikationen mit dem Term Digitaler Zwilling	6
Abbildung 2: Arbeitsdefinition Digitaler Zwilling	11
Abbildung 3: Weitergehende Interessen an der Thematik (Mehrfachantworten möglich).....	13
Abbildung 4: Netzansicht virtuelle Inbetriebnahme, Hardware-in-the-Loop	16
Abbildung 5: Robotiklösung der Fa. Mössner	18
Abbildung 6: Robotersimulation einer Bearbeitungslinie zum Entgraten von Motorblöcken .	19
Abbildung 7: Automatisierte Berechnung der idealen Roboterposition.....	19
Abbildung 8: Handhabungszellen TTZ Nördlingen.....	23
Abbildung 9: Softwaretoolchain für SIL einer Handhabungszelle	24
Abbildung 10: Konzept für einen Hypervisor basierten Digitalen Zwilling	24
Abbildung 11: Gesamtsystem.....	25
Abbildung 12: Informationskonstrukt digitaler Zwilling nach Grieves & Vickers (2017).....	28
Abbildung 13: Integrationsstufen des Cyber-Physischen Systems	29
Abbildung 14: Machine Learning als Teil der KI.....	29
Abbildung 15: Grundliegendes Architekturmodell	30

Einführung

Einführung

Prof. Dr. Florian Kerber, TTZ Nördlingen

Der Begriff „Digitaler Zwilling“ wurde Anfang der 2000er Jahre in der Diskussion um Produktlebenszyklen eingeführt [1]. Er beinhaltet konzeptionell drei Bausteine: ein physisches Produkt, ein virtuelles Produkt und eine zu definierende Art der Verbindung zwischen den beiden. Dieses Konzept des Digitalen Zwillings wurde 2012 von der NASA aufgegriffen und näher definiert. Seitdem stieg die Zahl der Veröffentlichungen zum Thema immens an, wie Abbildung 1 zeigt.

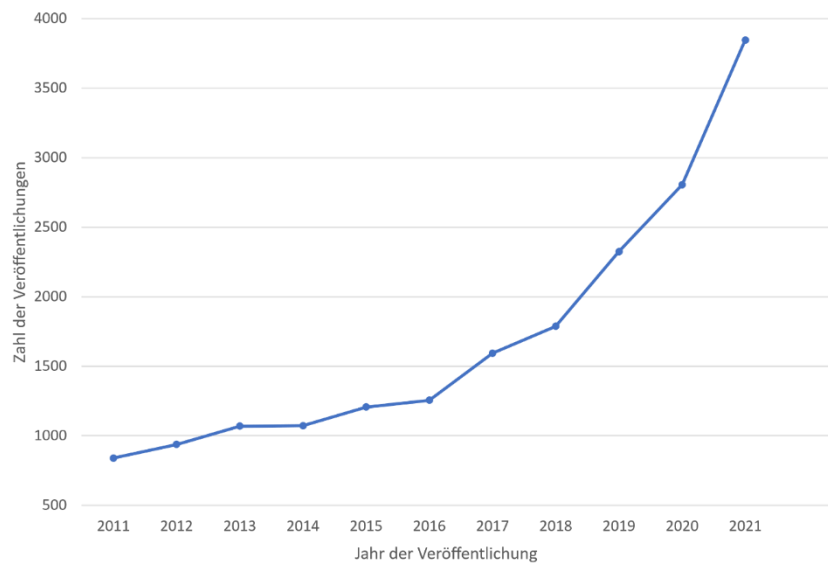


Abbildung 1: Anzahl von Publikationen mit dem Term Digitaler Zwilling¹

Über die Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen und industriellen Anwendungsszenarien wurde der Begriff des Digitalen Zwillings unscharf. So entstanden Organisationen auf nationaler und internationaler Ebene, die sich die Förderung und Verbreitung des Konzeptes des Digitalen Zwillings zur Aufgabe machten. Stand heute ist es allerdings noch nicht gelungen, sich auf ein gemeinsames Verständnis zu einigen.

Besonders für kleine und mittelständische Unternehmen stellen sich deshalb mehrere Herausforderungen bei der Umsetzung und Anwendung Digitaler Zwillinge:

- Aus welchen Bestandteilen sollte ein Digitaler Zwilling bestehen?
- Welche Werkzeuge existieren für die Umsetzung Digitaler Zwillinge in unterschiedlichen Branchen?

¹ Anzahl der Veröffentlichungen auf der Datenbank ScienceDirect (www.sciencedirect.com) zum Stand Februar 2022. Berücksichtigte Arten von Publikationen: Forschungsartikel, Enzyklopädien, Buchkapitel, Nachrichten, Praxisleitlinien, Kurzmeldungen und Software-Veröffentlichungen.

- Wie lassen sich Digitale Zwillinge verwerten?

Die Region Donau-Ries mit ihrer mittelständisch geprägten Wirtschaftsstruktur ist prädestiniert dafür, eine Vorreiterrolle bei der branchenübergreifenden Etablierung, Nutzung und Weiterentwicklung Digitaler Zwillinge zu übernehmen. Ein Konsortium aus Wissenschaftseinrichtungen und Vertretern von Unternehmen des Sondermaschinenbaus hat deshalb eine Initiative gestartet, die Thematik aus regionaler Perspektive voranzutreiben. Auftakt war das Anwenderforum am 14.09.21 am Technologietransferzentrum Flexible Automation Nördlingen (TTZ Nördlingen)². Aus den Ergebnissen dieses Forums entstand das vorliegende Whitepaper. Es beschreibt den (regionalen) Diskussionsstand, zeigt Beispiele für den erfolgreichen Einsatz Digitaler Zwillinge, beschreibt konzeptionelle Weiterentwicklungen und wagt einen Ausblick auf die zukünftige Perspektive jeweils im industriellen Kontext.

Die Initiative von Wirtschaft und angewandter Forschung zur Bündelung der regionalen Kompetenzen im Bereich Digitaler Zwillinge wächst mit der aktiven Beteiligung von Unternehmen und Forschungsgruppen. Daher an dieser Stelle der **Aufruf** an Sie:

Bringen Sie Ihre Kompetenzen ein! Wir freuen uns über jede neue Mitstreiter:in

References

[1] Q. Qi und F. Tao, „Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison“, *IEEE Access*, Bd. 6, S. 3585–3593, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.

² Das Anwenderforum wird 2022 mit zwei Veranstaltungen fortgesetzt. Nähere Informationen unter <https://www.hs-augsburg.de/HSZDR.html>

Teil I: Der Digitale Zwilling im regionalen Verständnis

Eine Arbeitsdefinition für die regionale Diskussion

Prof. Dr. Florian Kerber, TTZ Nördlingen

Um die Unschärfe des Begriffs Digitaler Zwilling zu beseitigen, hat die Initiative eine Arbeitsdefinition als Basis für die weitere Diskussion und Kompetenzentwicklung erarbeitet. Diese regionale Sichtweise auf das Konzept des Digitalen Zwillings wird zu Beginn des Whitepapers vorgestellt.

Der Digitale Zwilling ist die vollständige digitale Repräsentation eines realen Systems. Der Begriff des Systems ist dabei abhängig von der Domäne. Es bestehen somit unterschiedliche Ausprägungsformen im Maschinen- und Anlagenbau, der Bauindustrie und Architektur, der Pflege sowie im sozialen beziehungsweise gesellschaftlichen Kontext. Ausgehend von der Vielfalt des Begriffs wird im Folgenden eine Arbeitsdefinition beschrieben, die den Digitalen Zwilling in drei Dimensionen charakterisiert: Lebenszyklus, Hierarchie und Interdependenz zwischen realem und virtuellem System. Dabei wird bewusst die Analogie zum Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [1] aufgenommen, das in ebenfalls drei Dimensionen einen idealtypischen Rahmen für die systematische Betrachtung der seit 2011 mit dem Begriff „Industrie 4.0“ bezeichneten Transformation der industriellen Produktion darlegt [2].

Die Beschreibung des dreidimensionalen Modells des Digitalen Zwillings orientiert sich zunächst an der Domäne der Produktionstechnik. Die örtlich-zeitliche Dimension erstreckt sich über den gesamten Lebenszyklus des betrachteten Systems. Dieser beginnt mit der Konzeption und Entwicklung, in der der Typ des Systems vollständig spezifiziert und technisch beschrieben wird. Auf Basis der oftmals prototypischen Implementierung erfolgt eine Test- und Validierungsphase, deren Abschluss im Kontext von Automatisierungssystemen als virtuelle Inbetriebnahme bezeichnet wird. Dabei wird das Verhalten des Prototyps in seiner späteren Einsatzumgebung simuliert und gegen die Anforderungen des Designs abgesichert. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme kann das System entsprechend seines Verwendungszwecks produktiv eingesetzt werden. Es entstehen somit konkrete Instanzen des Systems, die mit jeweils unterschiedlichen realen Umgebungen interagieren. Während dieser Lebensphase sind Veränderungen der einzelnen Instanzen zu erwarten, um sich an veränderte Umgebungsbedingungen anzupassen, Effizienzsteigerungen aus den Erfahrungen des Produktiveinsatzes umzusetzen oder bei geplanten Umrüstungen sowie ungeplanten Störfällen gewartet oder repariert zu werden. Der systemische Lebenszyklus endet mit der Stillsetzung und dem Rückbau. Parallel zu den Lebensphasen der physischen Entität entwickelt sich der Digitale Zwilling weiter, um die Bedürfnisse der jeweiligen Phase zu erfüllen: Während der Konzeptions- und Entwicklungsphase stellt er die Möglichkeiten des modellbasierten Entwicklungsparadigmas zur Verfügung. Mit Hilfe der Spezifikation der physischen Entität können automatische Tests zur Verifikation des Systemverhaltens im Zuge der Virtuellen Inbetriebnahme durchgeführt werden. Im Produktiveinsatz der realen Instanz werden laufend Komponenten-, Qualitäts- und allgemeine Produktionsdaten aufgenommen

und mit dem Digitalen Zwilling verknüpft, um weitergehende Funktionalitäten der Datenanalyse, Optimierung von Prozessen, Prädiktion etc. bereitzustellen. Ebenso können dadurch Weiterentwicklungen im Produktionsablauf, von Produkten (neue Varianten einer Produktfamilie oder neu entwickelte Produktfamilien) oder eingesetzten Komponenten (insbesondere zur Wartung, zum Refurbishing oder Retrofitting) virtuell geplant, simuliert und abgesichert werden.

Die Rückkopplungen zwischen den verschiedenen Lebensphasen ermöglichen eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Präzisierung des Digitalen Zwillings. So können beispielsweise datenbasierte Analysen aus dem Produktivbetrieb zur Detailverbesserung des digitalen Modells eingesetzt werden, die dann wiederum für die Optimierungen der realen Instanz genutzt werden können.

Die zweite Dimension beschreibt die hierarchische Zuordnung des Digitalen Zwillings. In Anlehnung an die gleich bezeichnete Ebene des RAMI 4.0-Modells gibt diese an, welche Bereiche die virtuelle Repräsentation abdeckt. Der grundlegend modulare Aufbau beginnt bei der Repräsentation des Produkts, erstreckt sich über die individuellen Werkstoffeigenschaften und die Prozesse der automatisierten Fertigung bis zum Materialfluss und kann in die Betrachtung auch das Wertschöpfungsnetzwerk integrieren, in das Produkte, Prozesse und Produktionssysteme eingebunden sind. Die Detailtiefe des Digitalen Zwillings kann an den jeweiligen Anwendungszweck angepasst werden. Für einen möglichst vollständigen Digitalen Zwilling ist jedoch das Verhalten jeder einzelnen Komponente so real wie möglich nachzubilden. Dazu eignen sich beispielsweise Multiphysik- oder Co-Simulationen.

Die Kopplungen zwischen realem System und digitaler Repräsentation werden in der dritten Dimension definiert. Wird das digitale Modell isoliert betrachtet, können darin Konstruktionsdaten wie 3D-Computer Aided Design (CAD)-Modelle, Stücklisten, Elektro-CAD, Simulationsmodelle und andere Konstruktionsdokumente zusammengefasst werden. Sie bilden das Verhalten des realen Systems so detailgetreu wie möglich nach. Solche Modelle können bereits im Sinne des Systems Engineering aus der Spezifikation des Verhaltens entstehen und umfassen domänenübergreifende sowie domänenspezifische Modelle mit universellen Schnittstellenmöglichkeiten. Die Struktur des Systems, das heißt die hierarchische Zusammensetzung aus Baugruppen, Unterbaugruppen bis zur einzelnen Komponente, wird ebenso wie das Verhalten der Komponenten in unterschiedlicher Detailtiefe, Darstellungsform und Modellierungsart (Mathematische Modelle technischer Systeme nach physikalischen Erhaltungsprinzipien, ereignisdiskrete Zustandsmodelle, logikbasierte Verhaltensbeschreibungen, Kommunikationsmodelle) beschrieben. Diese Simulationsmodelle sind als Software in the Loop (SIL) mit Entwicklungstools für die Programmierung von Automatisierungskomponenten wie Robotersteuerungen, speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), Smart Cameras sowie anderen Sensoren und Aktoren umsetzbar. Sie sind auch als Hardware in the Loop (HIL) mit der jeweiligen Hardwareschnittstelle koppelbar und können so den Datenaustausch auf unterschiedliche Weise realisieren. Für eine Virtuelle Inbetriebnahme ist die digitale Kopie in der Regel ausreichend. Diese stellt jedoch noch keinen vollständigen Digitalen Zwilling dar. Für diesen

ist eine Kopplung mit der physischen Entität nötig, sodass beide Entitäten Daten miteinander austauschen und miteinander kommunizieren können. Der Digitale Zwilling erlaubt eine automatisierte und bidirektionale Kopplung zwischen digitaler und physischer Entität. Das grenzt ihn vom Digitalen Schatten ab, der nur einen unidirektionalen Daten- beziehungsweise Informationsfluss von der physischen zur digitalen Entität bietet.

Abbildung 2 visualisiert das Ebenenmodell des Digitalen Zwillings entsprechend der verwendeten Arbeitsdefinition.

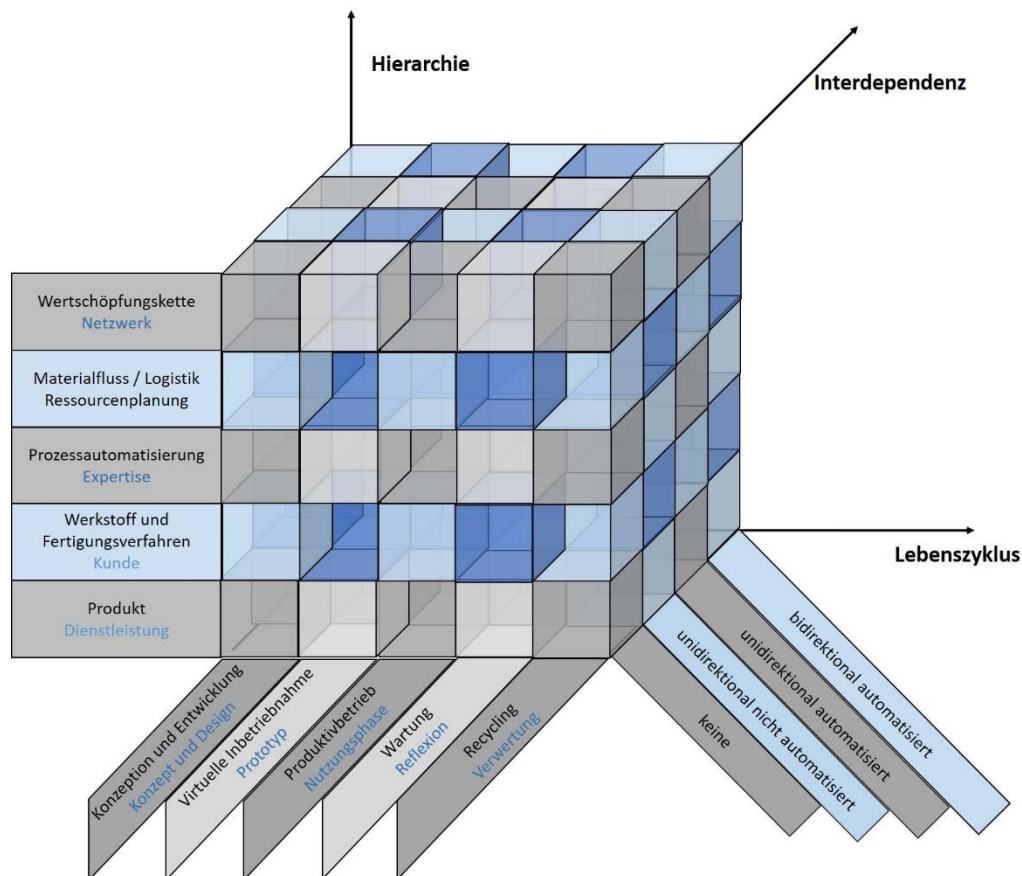


Abbildung 2: Arbeitsdefinition Digitaler Zwilling

References

- [1] DIN SPEC 91345:2016-04, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), Berlin.
- [2] T. Bauernhansl, M. ten Hompel, and B. Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

Das Verständnis in der Praxis – Ergebnisse einer Onlinebefragung

Dr. Gitte Händel, TTZ Nördlingen

Die Vielfalt an Begriffsdefinitionen, die es in der fachlichen Auseinandersetzung über Digitale Zwillinge gibt, wird sich auch in der Praxis niederschlagen, also bei den Mitarbeiter:innen von Unternehmen, die sich mit der Thematik befassen. In Online-Befragungen unternehmen wir daher den Versuch, das Verständnis der Praktiker:innen zu erheben. Die erste Online-Befragung wurde im Zusammenhang mit dem ersten Anwenderforum von Juli bis Oktober 2021 durchgeführt. Das Interesse an der Befragung war prinzipiell groß, die Zahl der vollständigen Antworten mit 19 aber eher gering. Der folgende Bericht beschreibt daher Tendenzen. Die **Teilnehmenden** waren mehrheitlich aus dem technischen Bereich von Industrie, verarbeitendes Gewerbe, aus Unternehmen mit mehr als 251 Mitarbeiter:innen. Diese Struktur bildet die Zielgruppe ab, die mit dem Anwenderforum erreicht werden soll.

Das Verständnis von „Digitaler Zwilling“

Die Teilnehmenden wurden sowohl nach ihrem persönlichen Verständnis des Digitaler Zwillinges gefragt als auch nach dem Verständnis, das in ihrem Unternehmen zugrunde gelegt wird. Das eigene Verständnis ist – wie zu erwarten - eindeutig, über die Sicht des Unternehmens herrscht aber z. T. größere Unsicherheit. Im Vordergrund der persönlichen Verständnisse stehen die Nutzungsdauer über den gesamten Lebenszyklus, die virtuelle Abbildung einer physischen Entität und die Speicherung der Daten während der gesamten Nutzung der Entität.

Der Einsatz Digitaler Zwillinge in den Unternehmen

Die verbreitetste **Form** des Digitalen Zwillinges in den Unternehmen der Antwortenden ist der **Anlagenzwilling**, mehr als die Hälfte (10 von 19) der Antwortenden berichten, dass er in ihren Unternehmen bereits im Einsatz ist. Produkt-, Fabrik- und Prozesszwillinge werden ebenfalls genutzt. Das Antwortverhalten legt nahe, dass bei den meisten Unternehmen nur eine Form des Zwillinges eingesetzt wird.

Die **Einsatzmöglichkeiten** der Digitalen Zwillinge sind vielfältig: 17 Teilnehmer:innen nennen 42 verschiedene geplante oder schon realisierte Einsatzmöglichkeiten. Im Vordergrund stehen **Virtuelle Inbetriebnahme** und **Produktentwicklung**.

Bewertung von Nutzen und Herausforderungen des Einsatzes Digitaler Zwillinge

Welchen Nutzen erwarten sich die Teilnehmer:innen der Umfrage vom Einsatz Digitaler Zwillinge? Fasst man die Antworten „stimme zu“ und „stimme eher zu“ zusammen, so zeigt sich folgende Rangfolge:

Der **Nutzen** der Digitalen Zwillinge liegt für

63 % in der schnelleren Inbetriebnahme von Anlagen

58 % in einer besseren Produktqualität

58% in der Verringerung der Kosten für die Produktentwicklung

53 % in der Verringerung der Dauer der Produktenwicklung.

Die **Herausforderungen** im Einsatz liegen für

79 % in fehlenden Kenntnissen bzgl. Werkzeugen, Tools

63 % im geschulten Fachpersonal

58 % in der schwierigen Vernetzung mit der gewachsenen IT-Struktur

47 % in hohen Kosten für die Einführung

Weitergehende Interessen

Zielsetzung des Anwenderforums, in dessen Rahmen die Online-Befragung erfolgte, ist es, die regionalen Kompetenzen bei der Nutzung von Digitalen Zwillingen zu bündeln. Durch den Austausch von Erfahrungen, die Berichte über Einsätze, die Darstellung theoretischer Modelle sollen die regionalen Unternehmen zum Einsatz der Technologie Unterstützung erhalten. Wir haben daher auch gefragt, welche Themen von weitergehendem Interesse wären. Die Antworten zeigt Abbildung 3.

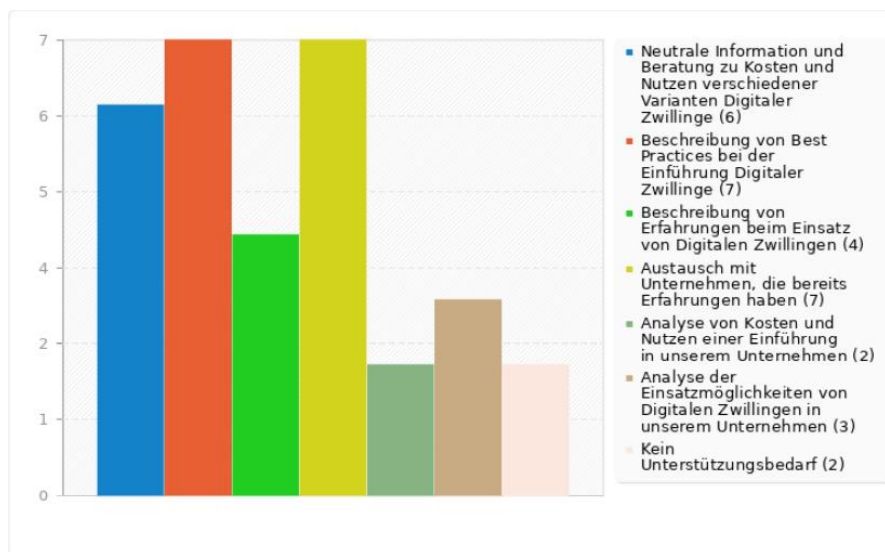


Abbildung 3: Weitergehende Interessen an der Thematik (Mehrfachantworten möglich)

Im Vordergrund stehen der Wunsch nach Austausch, Best Practice-Beispielen und Neutraler Information und Beratung. Die Intentionen des Forums entsprechen also diesen Wünschen.

Bewertung Ergebnisse und Vorgehen

Grundsätzlich hat die Befragung Interesse ausgelöst. Insgesamt haben 129 Personen den Fragebogen angesehen und auch teilweise beantwortet. Die Fragestellungen waren allerdings suboptimal, denn vollständig ausgefüllt wurden tatsächlich nur 19 Fragebögen. Hier gibt es

deutlichen Optimierungsbedarf für die Neukonzeption der Befragung zum nächsten Anwenderforum.³

Wie auch in den regionalen Praxisbeispielen in Teil II deutlich wird, hat sich die gesamtheitliche Sichtweise, wie sie in der Arbeitsdefinition formuliert wurde, in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Die Mehrheit der Anwender nutzt Digitale Zwillinge in den frühen Lebensphasen meist bis zur virtuellen Inbetriebnahme, während die automatisierte bidirektionale Kopplung zwischen realer Instanz und virtuellem Modell während des Produktivbetriebs kaum umgesetzt und genutzt wird. Die hierarchische Dimension wird dagegen größtenteils in der Praxis abgedeckt. Konzeptionelle Weiterentwicklungsschritte werden in Teil III dieses Whitepapers beschrieben und in zukünftigen regionalen Veranstaltungen thematisiert.

³ Die vollständige Auswertung übersenden wir Ihnen gerne nach Anforderung

Teil II: Praxisbeispiele aus der Region

Virtuelle Inbetriebnahme einer Roboterzelle für die Getriebemontage

Alexander Schmidt, Fa. KIENER Maschinenbau GmbH

Die KIENER Maschinenbau GmbH steht in der Branche der Maschinen- und Anlagenbauer unterschiedlichsten Herausforderungen entgegen. Der steigende Automatisierungsgrad der Anlagen bedingt den vermehrten Einsatz mechatronischer Komponenten, was in einer zunehmenden Komplexität der Steuerungssoftware resultiert. Diese Entwicklung führt zu steigenden Inbetriebnahme- und Hochlaufzeiten sowie einem erhöhten Reisebedarf der Mitarbeiter.

Die virtuelle Inbetriebnahme - ein wesentlicher Bestandteil des „Digitalen Zwillings“ - soll diesem Trend entgegenwirken. Die Maschine wird virtuell als Simulationsmodell in ihrem kinematischen, dynamischen und signaltechnischen Verhalten abgebildet. Je nach Ausführung wird die SPS-Steuerung angebunden, wobei diese ebenfalls simuliert (Software-in-the-Loop Simulation) oder als reale Hardware (Hardware-in-the-Loop Simulation) vorhanden sein kann. Alle weiteren Feldgeräte werden im Simulationsrechner oder auf einer zusätzlichen Hardware emuliert, sodass die Steuerungssoftware der Maschine schon vor der realen Inbetriebnahme entwickelt, getestet, validiert und abgenommen werden kann.

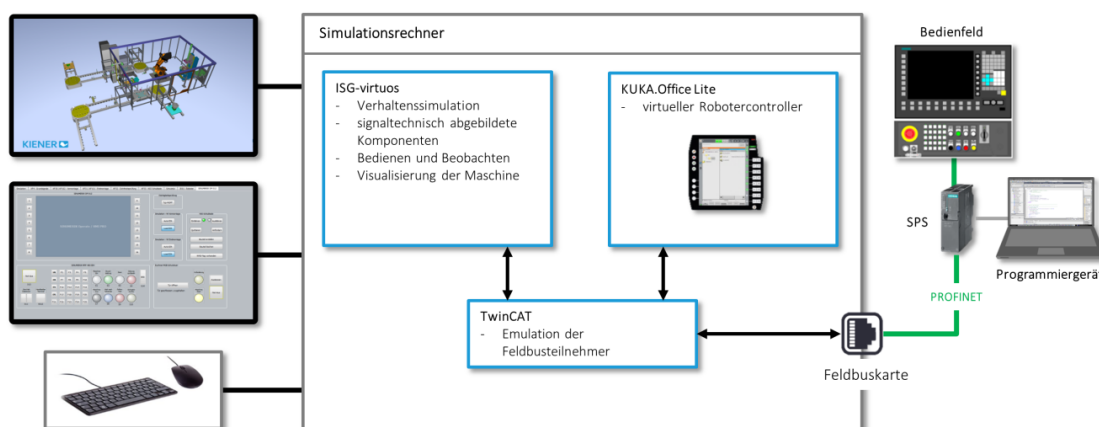


Abbildung 4: Netzansicht virtuelle Inbetriebnahme, Hardware-in-the-Loop

Abbildung 4 zeigt die Netzansicht der Hardware-in-the-Loop Simulation einer Station aus einer Getriebemontagelinie. Hier wurden das originale Bedienfeld sowie die SPS der Station über PROFINET an den Simulationsrechner angebunden. Die Engineering-Plattform von Beckhoff namens TwinCAT übernimmt die Emulation der Feldbusteilnehmer. Die Feldbusteilnehmer tauschen die notwendigen Signale mit der Simulationsplattform ISG-virtuos der Industriellen Steuerungstechnik GmbH aus. Neben der reinen Visualisierung übernimmt ISG-virtuos die Verhaltenssimulation der Maschine. Das bedeutet, dass die vorhandenen Komponenten signaltechnisch abgebildet sind, um die Signale aus der Steuerung zu verarbeiten und die passende Rückantwort zu liefern. Des Weiteren werden hier die Bewegungen der

Maschinenkomponenten kinematisch dargestellt. Eine Bedienoberfläche dient zum Bedienen einzelner Komponente sowie zum Beobachten beziehungsweise Steuern der Signalzustände. Außerdem wird hier der Materialfluss gesteuert, das heißt Bauteile werden an den notwendigen Stellen in die Simulation geladen oder gegebenenfalls wieder entfernt.

Die Robotersteuerung wird mittels KUKA.OfficeLite – einem virtuellen Robotercontroller – simuliert. Hier kann die Software des Roboters wie auf der realen Robotersteuerung entwickelt und getestet werden. Die Achswerte und notwendigen Signale werden über TwinCAT mit ISG-virtuos sowie mit der SPS ausgetauscht.

In der Beispielstation wird ein Werkstück vom Werkstückträger auf Band 1 entnommen, in einer Prüfeinrichtung auf Dichtheit geprüft und anschließend auf den Werkstückträger von Band 2 abgelegt. Das Handling wird von einem Roboter durchgeführt. Die Anlage war eine Neuentwicklung, sodass die virtuelle Inbetriebnahme parallel zum Entwicklungsprozess durchgeführt wurde.

Nachdem das Simulationsmodell der Station fertig gestellt wurde, konnte die SPS-Programmierung starten. Das SPS-Programm wurde in die reale Steuerung geladen und konnte anhand des Simulationsmodells weiterentwickelt und in Betrieb genommen werden. Daraus ergaben sich für die Steuerungstechnik sowie für die Mechanik folgende Vorteile:

- Validierung der Steuerungssoftware am digitalen Modell
- Testen und Verbessern der Funktionsabläufe
- Hoher Reifegrad der SPS-Software zu Beginn der realen Inbetriebnahme
- Vorabnahme der Maschine durch den Kunden am digitalen Modell
- Identifizierung und Behebung von mechanischen Störkonturen am Robotergreifer.

Im Produktionsverlauf der Montagelinie konnte ein weiterer Vorteil der virtuellen Inbetriebnahme genutzt werden. Ein Hochrüsten der SPS-Software auf eine neue Templateversion konnte am digitalen Modell erprobt werden. Die Station war insbesondere aufgrund der beiden Bandkomponenten und der damit verbundenen komplizierten Datentechnik prädestiniert für die Erprobung. Die Station wurde als Musterstation herangezogen, um den Aufwand für das Ausrollen der neuen Softwaregeneration auf die gesamte Linie mit minimierten Stillstandzeiten abschätzen zu können.

Des Weiteren wurde die Umrüstung des Robotergreifers auf einen neuen Getriebetyp am Simulationsmodell vorab validiert und getestet. Somit wurde die Stillstandzeit der Linie aufgrund des Umbaus reduziert, da die SPS-Software größtenteils bereits am Modell vorbereitet werden konnte.

Die Erfahrungen der letzten Jahre mit der virtuellen Inbetriebnahme zeigen, dass noch diverse Hürden zu nehmen sind und die Etablierung im digitalen Engineering ein iterativer Prozess ist. Die Erfahrungen zeigen der KIENER Maschinenbau GmbH aber auch, dass hier ein hohes Maß an Einsparungspotenzial für die Entwicklungs- und insbesondere die Inbetriebnahmephase vorhanden ist, weshalb die Thematik im Unternehmen weiterverfolgt und kontinuierlich ausgebaut wird.

Realistische Robotersimulationen

Christian Kunz, August Mössner GmbH + Co. KG

Mössner entwickelt und baut Sonderlösungen in den Bereichen des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik und der Robotik.



Abbildung 5: Robotiklösung der Fa. Mössner

Mit weit über 1.300 weltweit installierten Robotersystemen liegt der Schwerpunkt bei Mössner auf der virtuellen Inbetriebnahme von Robotersystemen. Mithilfe von proprietären Softwaretools wie ABB RobotStudio, KUKA.SimPro, Fanuc Roboguide oder Siemens Process Simulate und drei Simulationstechnikern werden folgende Vorteile erreicht:

- Frühzeitige Fehlererkennung durch Konzeptabsicherung und Tests
- Parallelisierung von Prozessen
- Robotoptimierte Anlagenlayouts
- Reduktion der Fehlerkosten
- Vereinfachte Kommunikation von Roboterabläufen
- Reduzierung von Kollisionen
- Reduktion der Inbetriebnahmezeit und damit einen schnelleren SOP
- Prozess- und Taktzeitoptimierung in der Simulation
- Schneller Produktwechsel
- Reduzierung der Dauer von Auslandsaufenthalten
- Unterstützendes Tool zur Umsetzung der Projektierungsrichtlinie ohne die reale Hardware

Als Offlineprogrammierung wird bei Mössner die virtuelle Programmierung der Bewegungsbahnen des Roboters bezeichnet. Die programmierten Bahnbewegungen werden anschließend in den realen Roboter oder das herstellerspezifische Programmierool geladen. Wichtige Punkte bei der Offlineprogrammierung sind eine realistische Taktzeitberechnung und eine echte geometrische Wiedergabe des Roboterhaltens.

Für eine realistische Taktzeitberechnung und eine echte geometrische Wiedergabe des Roboterverhaltens benötigt man ein sogenanntes RCS-Modul (Realistic Controller Simulation). In der RRS (Realistic Robot Simulation) kann das echte Verhalten anschließend simuliert werden.

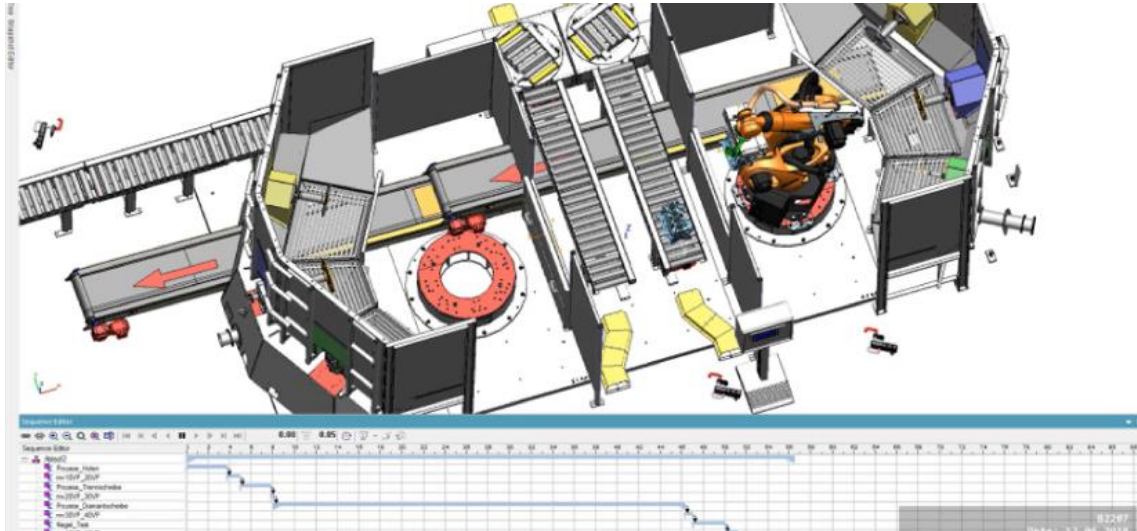


Abbildung 6: Robotersimulation einer Bearbeitungsline zum Entgraten von Motorblöcken

Mössner unterstützt auch andere Unternehmen bei der Robotersimulation. Durch Konzeptuntersuchungen wird der für die entsprechenden Anforderungen benötigte Robotertyp definiert. Neben der Ermittlung der erforderlichen Reichweite, der Positionierung und der Sockelhöhe des Roboters erfolgt eine Traglastberechnung. Anhand von 3D-CAD Daten wird das Simulationsmodell erstellt. Mithilfe dessen werden eventuell auftretende Kollisionen erkannt und die optimale Positionierung der einzelnen Anlagenstationen und der Roboter festgelegt. Durch die Simulation werden nicht nur Kollisionen, sondern auch Bewegungen und Positionen, die durch die Singularität führen, vermieden.

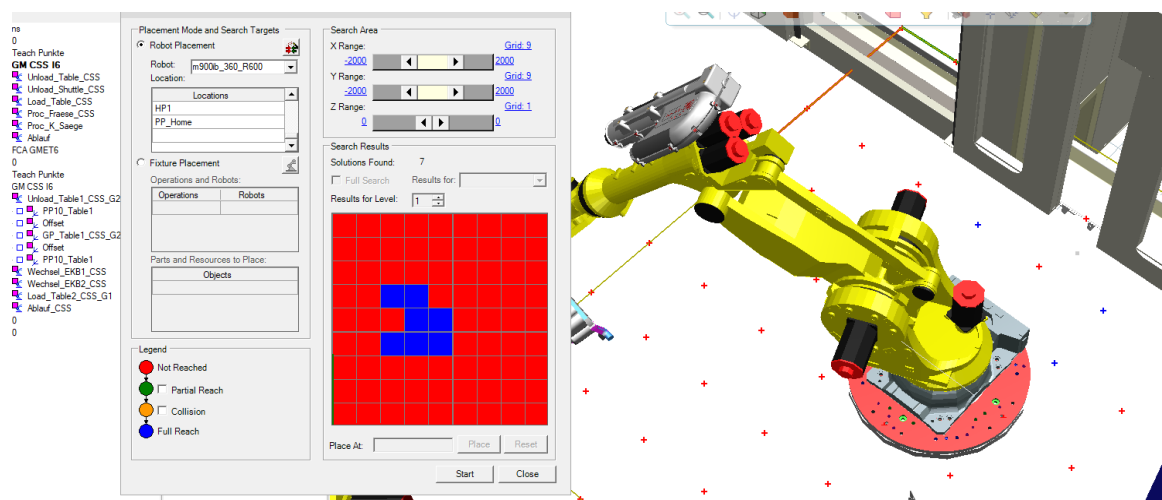


Abbildung 7: Automatisierte Berechnung der idealen Roboterposition

Materialflusssimulation für eine FTS-basierte Produktionssteuerung

Isabella Lichtenstern, TTZ Nördlingen

In dieser Anwendung liegt der Fokus auf dem Materialfluss auf Ebene der Produktionssteuerung. Der dabei betrachtete Digitale Zwilling stellt ein nützliches Werkzeug für eine optimale Produktionsplanung dar und kann, bereits bevor die reale Produktionsumgebung existiert, die Komponenten und deren Vernetzung digital abbilden. Um den Betrieb in Echtzeit wiedergeben, optimieren und alle relevanten Daten integrieren zu können, wurden detaillierte Abbilder von realen Produktionssystemen entwickelt. Im Folgenden wird deren Instanziierung und Einsatz in einer Simulationssoftware, sowie die Prozesslogistiksimulation mit fahrerlosen Transportsystemen (FTS) dargestellt.

Produktionsleitsystem ProLogCloud

Um die wachsenden Kundenanforderungen an Individuallösungen befriedigen zu können, müssen Unternehmen neben kontinuierlicher Verbesserung ihrer Produkte auch die erforderlichen Fertigungsverfahren fortwährend anpassen, optimieren und flexibilisieren. Kleine Losgrößen führen dabei zu komplexen Produktionsplanungen und hohem Aufwand der Intralogistik. Um die Flexibilität der Materialflussteuerung zu erhöhen, setzen deshalb immer mehr Firmen auf einen automatisierten Materialtransport mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), deren Einsatz ebenfalls koordiniert und geplant werden muss.

Am Beispiel einer vollautomatischen Produktion von Ultraschallsensoren wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts ein zusätzliches Steuerungssystem auf Ebene des MES namens ProLogCloud als Produktionsleitsystem zur automatisierten Materialflussteuerung mit FTF entwickelt. Dabei wird die bisher realisierte starre Verkettung der einzelnen Fertigungsschritte aufgelöst und ein vollflexibles Hybrid Flow Shop-Prinzip mit parallelen Produktionsinseln umgesetzt. Die ProLogCloud, die einen priorisierten Produktionsauftrag aus dem Auftragsverwaltungssystem erhält, steuert zudem die Reservierung des Materials und Leerguts im Lager sowie die Fertigungsprogramme der einzelnen Produktionsinseln.

Anstatt eines teuren, risikoreichen und fehleranfälligen Validierungsansatzes bei der Realinbetriebnahme im Feld konnte die Leistungsfähigkeit und Robustheit des Steuerungssystems anhand von Worst-Case-Szenarien, Maschinenausfällen und anderen Risiken bereits während der Entwicklungsphase evaluiert und die Produktionsprozesse im Voraus geplant werden. Dies geschah durch den gezielten Einsatz einer SIL-Simulation. Die Instanziierung des produktionstechnischen Simulationsmodells in Plant Simulation erfolgte mittels eines parametrischen Modellgenerators. Das generierte Simulationsmodell, das ein Abbild einer geplanten oder bereits existierenden Fabrik darstellt, wurde dann mit der ProLogCloud über eine relationale Datenbank verknüpft, über welche die Produktionsleitsteuerung ebenfalls mit realen Fabriken verknüpft werden kann. Mittels

mehrerer Experimente konnten geringe Lagerkapazitäten oder Engpässe im Voraus vermieden und die ProLogCloud erfolgreich validiert werden.

Zur Steuerung des Materialflusses erzeugt die ProLogCloud unter anderem Transportaufträge, die sowohl in der realen Fabrik als auch im Digitalen Zwilling von einem fahrerlosen Transportsystem ausgeführt werden. Resultierend aus den Ergebnissen einer Marktrecherche wurde das vergleichsweise kompakte ActiveShuttle von Bosch Rexroth ausgewählt, welches den automatisierten Materialtransport übernimmt. Das ActiveShuttle Management System fungiert als Flottenmanagement für die FTF. Für das Auftragsmanagement, die Zuweisung der Transportaufträge und die Routenplanung und -terminierung im Digitalen Zwilling wurde ein virtueller Flottenmanager entwickelt.

Digitaler Zwilling auf Basis von Echtzeitdaten

Da jedoch das Fahrverhalten und das Energiemanagement des FTF zunächst nicht exakt modelliert wurden, wich dessen Verhaltensweise in der Materialflusssimulation deutlich von jener in der realen ab. In der Simulation wurden deshalb die Transportzeiten verfälscht, wodurch wiederum die Folgeprozesse nur ungenügend genau prognostiziert werden konnten. Außerdem war es notwendig, dass auch die Position der Wegpunkte, zwischen denen das FTF sich bewegt, identisch mit der realen Fabrik sind. Für das Active Shuttle wurde deshalb ein Digitaler Zwilling zur optimierten Produktionsplanung auf Basis von Echtzeitdaten entwickelt. Der Digitale Zwilling übernimmt Parameter wie die Beschleunigung, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Position der Hubplattform, Rotationsgeschwindigkeit, Wendekreis, Energieverbrauch und Ladegeschwindigkeit des Fahrzeugs. Ziel war es, eine datengetriebene Logistik im Simulationsmodell zu implementieren, um das reale System in der Simulation besser abbilden zu können. Dafür wurden zunächst über eine Websocket-Schnittstelle die Echtzeitdaten aus dem realen ActiveShuttle extrahiert und via Transmission Control Protocol an das FTF in der Simulation weitergegeben. Das Fahrverhalten und das Energiemanagement konnten dort analysiert und von einer virtuellen Steuerung übernommen werden. Durch den Einsatz der virtuellen Steuerung kann der Digitale Zwilling in unterschiedlichsten Fabrikmodellen eingesetzt werden und benötigt keinen Parallelbetrieb mit dem realen FTF mehr. Mit Hilfe eines Wegenetzgenerators werden auch die Wegpunkte auf Basis der vorgegebenen Positionen virtuell erzeugt. Durch den Einsatz des Digitalen Zwillings können etwa Auskünfte über verschiedene Key Performance Indicators gegeben, Empfehlungen für die Anzahl der benötigten Fahrzeuge prognostiziert oder Änderungen im Fabriklayout getestet werden. Leistungskennzahlen wie Termintreue, Durchlauf- und Rüstzeiten sowie Auslastungen werden so realitätsgetreuer nachgebildet und führen ebenfalls zu einer optimierten Produktionsplanung. Der Digitale Zwilling könnte über eine bidirektionale Verbindung in Zukunft jedoch auch die Logistik aktiv in Echtzeit beeinflussen.

Teil III: Konzeptionelle Weiterentwicklungen des Digitalen Zwillings

Holistischer Ansatz für einen Digitalen Zwilling am TTZ Nördlingen

Florian Förster, TTZ Nördlingen

Am TTZ Nördlingen soll das Thema des Digitalen Zwillings im Kontext zur industriellen Automation aufgearbeitet werden. Dieses gliedert sich dabei in drei Schritte:

- Aufarbeitung Begriffsvariationen und -definitionen
- Erstellung eines Prototyps für ein Digitales Modell für SIL
- Erweiterung der SIL Simulation als Ansatz für einen Digitalen Zwilling

Als Praxisbeispiel wird eine Demonstrationsanlage des TTZ Nördlingen herangezogen, welche aus vier individuellen Handhabungszellen mit für die Automatisierung typischen Komponenten wie SPS, Roboter und Förderband besteht. Die Handhabungszellen können in Abbildung 8 gesehen werden.

Neben dem grundlegenden Vorgehen werden durch einen explorativen Ansatz weitere Themen behandelt die als Forschungsfragen auftreten. Zukunftsthemen sind dabei unter anderem synthetische Datengenerierung, Emulation von Bildverarbeitungssystemen und Security im Digitalen Zwilling.



Abbildung 8: Handhabungszellen TTZ Nördlingen (links: Digitales Modell, rechts: reale Instanz)

Das Ergebnis des Projekts soll sowohl zum Schwerpunktausbau des TTZ beitragen als auch als Demonstrator und Grundstein für weitere Forschung.

Der Prototyp für das Digitale Modell basiert dabei auf Co-Simulation. Die Toolchain und die nachgebildeten Zellkomponenten sind in Abbildung 9 zu sehen.

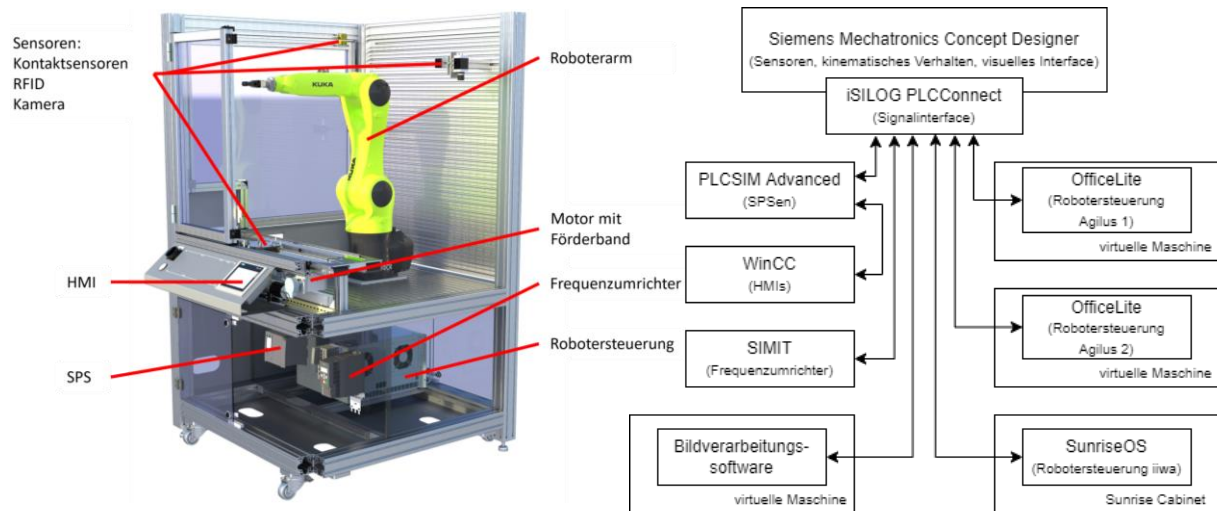


Abbildung 9: Softwaretoolchain für SIL einer Handhabungszelle (Zellkomponenten links, Toolchain rechts)

Die gezeigte Softwarezusammenstellung ist bereits in Erprobung und wird in zukünftiger Arbeit mit dem Fokus auf Performance der Simulation erweitert. Dies soll entweder mithilfe von TwinCAT realisiert werden oder basierend auf einem Hypervisor wie beispielsweise Jailhouse. Insbesondere letzteres bietet eine vielversprechende Basis den Digitalen Zwilling basierend auf der Arbeitsdefinition mit einer realen Anlage zu verbinden. Ein Konzept im Kontext zu den Handhabungszellen kann in Abbildung 10 gesehen werden. Es kann als holistische Herangehensweise an einen Digitalen Zwilling betrachtet werden: ein detailgetreues digitales Modell kann durch Berücksichtigung von Performance und Security mit einer realen Instanz und anderen Services vernetzt werden und in eine Produktionsumgebung integriert werden.

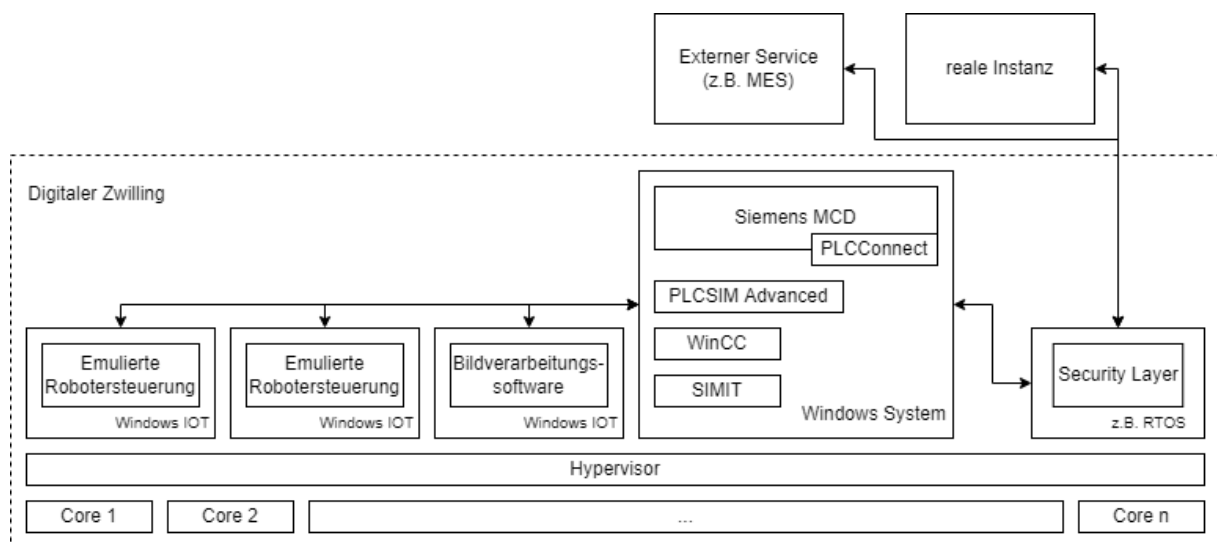


Abbildung 10: Konzept für einen Hypervisor basierten Digitalen Zwilling

Virtuelle Vermessung eines Digitalen Zwillings mit künstlicher Intelligenz

Prof. Dr.-Ing. Peter Eichinger, Hochschule Aalen

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, dass für die zuverlässige automatisierte Vermessung aller auf einer Werkzeugmaschine gefertigten Werkstücke verwendet werden kann. Hierzu werden Ansätze des digitalen Zwillings und der künstlichen Intelligenz in einem technischen System verbunden. Aus Prozessdaten und einem Maschinenmodell der Werkzeugmaschine wird zunächst ein digitaler Zwilling des Werkstücks ermittelt, dieser wird dann virtuell vermessen. Zur Bestimmung, ob die virtuelle Vermessung hinreichend genau sein wird oder ob eine reale Vermessung stattfinden muss, wird eine künstliche Intelligenz entwickelt. Diese künstliche Intelligenz wird selbstlernend sein. Hierzu werden automatisierte Abgleiche zwischen den virtuellen und physikalischen Vermessungen umgesetzt. Zusätzlich sollen die Parameter des mathematischen Maschinenmodells zur Generierung des digitalen Zwillings, durch eine weitere künstliche Intelligenz, optimiert werden.

Durch diesen Ansatz kann perspektivisch nicht nur die Prüflast von Unternehmen reduziert, sondern auch die Prüfquote erhöht werden. Hierdurch lassen sich nicht nur Kosten für die Prüfung und Ausschuss reduzieren, sondern auch Fehler im Produktionsprozess schneller abstellen. Zudem sind die Auswirkungen der Qualitätsverbesserung auf die Kundenzufriedenheit positiv.

In der folgenden Abbildung ist das Gesamtsystem dargestellt.

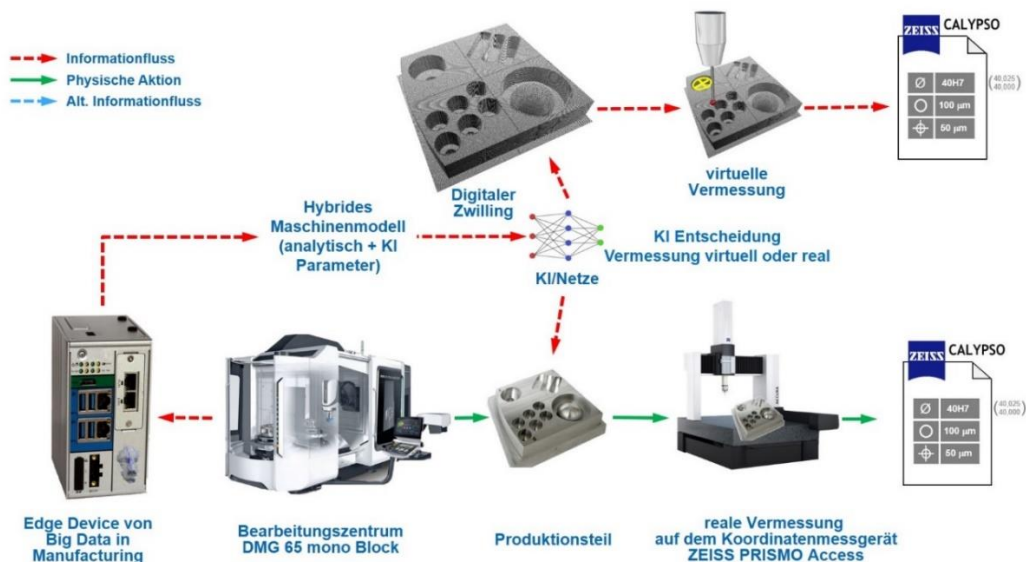


Abbildung 11: Gesamtsystem

Produktionsdatenerfassung

Zunächst werden die Daten mitgeschrieben, die während der Produktion eines Werkstücks anfallen. Beispiele hierfür sind: Achsbewegungen, Geschwindigkeiten, Temperatur, Motorströme, Zeiten, Werkzeuge, Programmparameter wie Programmname, Programmzeile etc., Spindeldrehzahl und weitere. Wichtig ist, dies in ausreichender hoher Frequenz, also in guter zeitlicher Auflösung zu tun. Es wird angestrebt, Daten im Bereich zwischen 500 Hz und 15.000 Hz aufzunehmen, je nach Datenquelle. Die Edge Device zeichnet die Daten von der Steuerung des Bearbeitungszentrums und von weiteren Sensoren in der notwendigen Auflösung auf.

Maschinenmodell

Parallel hierzu wird ein Maschinenmodell erstellt. Dieses Modell ermöglicht es im folgenden Schritt, aus den Prozessdaten ein virtuelles Werkstück, den Digitalen Zwilling zu erstellen. Das Maschinenmodell enthält zum einen die Achskonfiguration, also welche Achse auf welcher aufbaut, zum anderen aber auch Korrekturdaten, die zum Beispiel die Durchhängung oder das Wegdrücken einzelner Achsen während des Produktionsvorgangs beschreiben.

Digitaler Zwilling

Mit Maschinenmodell und Prozessdaten kann jetzt ein virtuelles Werkstück über eine genaue Schnittsimulation erstellt werden. Durch Projektion des Werkzeugs entlang eines gemessenen Bewegungspfades kann jetzt ein Abtrag in einem 3D Volumenmodell erzeugt werden. Der so entstandene Digitale Zwilling des realen Werkstücks ist auf Grund des Maschinenmodells und der Prozessdaten nicht nur eine Simulation des erzeugenden Maschinenprogramms, sondern eine realitätsnahe nichtdeterministische und individuelle Reproduktion des Produktionsteils.

Virtuelle Vermessung

Da es für das real gefertigte Werkstück ein Messprogramm gibt, sei es nun auf der Maschine, manuell oder auf einer Messmaschine im Messraum, kann diese „Messanweisung“ auch für den Digitalen Zwilling für alle geometrischen Größen wie Planheit, Winkeligkeit, Rundheit, Abmessungen, Positionen etc. durchgeführt werden. Das Ergebnis ist ein virtuelles Messprotokoll. Anzumerken ist, dass das Ergebnis unmittelbar nach der Produktion des realen Werkstücks im Zeitraum von Sekunden vorliegen kann, sofern die Maschine entsprechend vernetzt ist.

Reale Vermessung

Zusätzlich wird, zumindest in der Aufbauphase der Trainingsmenge, das reale Werkstück mit dem Messprogramm auf einer Messmaschine vermessen. Man erhält ein reales Messprotokoll. Dies ist die Basis für ein selbstständiges oder ein geführtes Lernen des Systems. Auch im Produktivmodus könnte ein gewisser Prozentsatz von Teilen real vermessen werden, um die Trainingsmenge aktuell zu halten. Dieser Anteil wäre aber wesentlich geringer, als die oben erwähnte Stichprobe.

Machine Learning Ansatz des Maschinenmodells

Es ist relativ einfach, das Maschinenmodell mathematisch um Einflussgrößen wie Durchbiegung, thermische Ausdehnung oder dynamische Faktoren zu erweitern. Sehr komplex und zeitaufwendig ist dagegen die Ermittlung der dazu gehörigen Parameter. Es sollen verschiedene ML-Techniken verglichen werden, um deren Nutzbarkeit im industriellen Umfeld bewerten zu können. Folgende Basisansätze sollen dabei berücksichtigt werden:

Neuronale Netze: Neuronale Netze können sehr gut auf Parameter für mathematische Formeln trainiert werden, da die Ausgabeneuronen direkt in die Gleichungen und Algorithmen integriert werden können. Es wird also im besten Fall ein direktes Ergebnis erzeugt. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass Neuronale Netze oft eine große Trainingsmenge benötigen, um die darin enthaltenen Muster erkennen zu können.

Regressionsmodelle: Während Neuronale Netze bei geringer Trainingsmenge oftmals kein brauchbares Ergebnis erzeugen, haben Regressionsmodelle die Eigenschaft, bereits mit sehr wenigen Daten nahe am Optimum zu liegen, wenn das Problem einfacher Natur ist. Es ist also möglich (aber nicht automatisch wahrscheinlich), dass mit kleinen Datenmengen ein statistischer Ansatz schneller gute Ergebnisse liefern könnte.

Approximation durch Machine Learning Modelle zur Echtzeitregelung

Prof. Dr. Dieter William Joenssen, Hochschule Aalen

„Produzieren heißt die in unserem Bereiche vorhandenen Dinge und Kräfte kombinieren. Anderes oder anders produzieren heißt diese Dinge und Kräfte anders kombinieren. [...] Form und Inhalt der Entwicklung in unserem Sinn ist dann gegeben durch die Definition: Durchsetzung neuer Kombinationen.“ Dieses Zitat von Schumpeter (1934) ist Leitbild der folgenden Betrachtungen, die anwendungsorientierte Erprobung einer Kombination von zwei neuen Technologien der Digitalisierung, dem digitalen Zwilling und dem Machine Learning.

Der digitale Zwilling kann als ein Satz von virtuellen Informationskonstrukten verstanden werden, der ein potenziell oder tatsächlich hergestelltes Produkt – von der Mikro atomaren bis zur Makro geometrischen Ebene – vollständig beschreibt (vgl. Grieves & Vickers, 2017). Optimalerweise kann jegliche Information, die vom physischen Objekt extrahiert werden kann, auch durch den digitalen Zwilling bestimmt werden. Demnach sind digitale Zwillinge mehr als nur Daten. Sie sind auch Algorithmen, die Rückschlüsse auf das physikalische Objekt (bspw. ein Produktionssystem) erlauben (vgl. Abbildung 12). Sie basieren auf expliziter Modellierung bspw. unter Ausnutzung physikalischer Zusammenhänge.

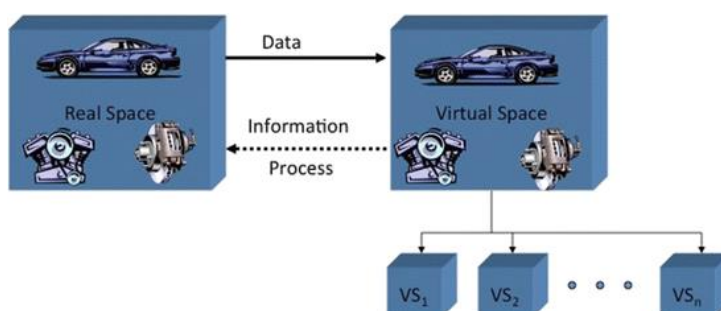


Abbildung 12: Informationskonstrukt Digitaler Zwilling nach Grieves & Vickers (2017)

Kritzinger et al. (2018) erweitern die Definition und berücksichtigen den Integrationsgrad. Sollte der Rückfluss an Informationen von dem digitalen Objekt an das physische Objekt nicht gegeben sein, sehen sie einen digitalen Schatten (vgl. Abbildung 13). Dies entspräche der Sicht von Grieves & Vickers (2017). Für einen Digitalen Zwilling fordern aber Kritzinger et al. (2018) den Rückfluss an das physische Objekt. Häufig wird allerdings in der Praxis heute eher ein digitaler Schatten verwendet. Hierbei ist dies auch nachvollziehbar, da der automatische Datenfluss zurück zum physischen Objekt weiterhin eine Herausforderung darstellt. Zumindest wird auch auf eine automatische Regelung verzichtet, da die Methoden noch nicht derart weit verbreitet sind. Es herrscht ein Vertrauensdefizit.

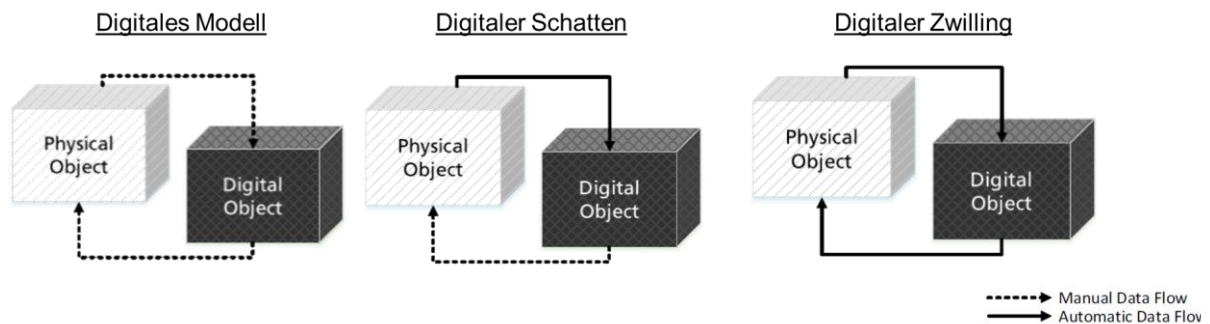


Abbildung 13: Integrationsstufen des Cyber-Physischen Systems nach Kritzinger et al. (2018)

Machine Learning ist– neben Natural Language Processing, Knowledge Representation und Automated Reasoning – eine Teildisziplin der künstlichen Intelligenz. Im Machine Learning werden Programme oder Algorithmen betrachtet, entwickelt und verwendet, die aus Erfahrung lernen (Russell & Norvig 2020, vgl. Abbildung 14). Hierdurch wird klar, dass im Machine Learning implizit vorhandenes Wissen verwendet wird und keine explizite Modellierung von Zusammenhängen erfolgt. Hier finden die Algorithmen durch Daten die entsprechenden Zusammenhänge.

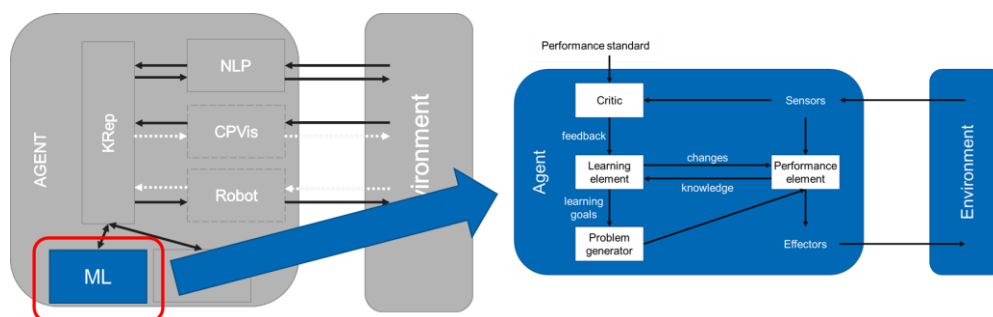


Abbildung 14: Machine Learning als Teil der KI

Hieraus wird klar, dass beides, der digitale Zwilling und Machine Learning, zur Modellierung verwendet wird. Wobei das Erstere explizit vorgegebenes Wissen eines Ingenieurs erfordert und das letztere rein auf implizites Wissen aus den Daten über das System erstellt wird.

Durch neue Möglichkeiten der Simulation, gegeben durch die Methoden des digitalen Zwillings, kann das Verhalten eines physikalischen Objekts – in einem Prozess – genauer denn jemals prognostiziert werden. Eine solche Prognose wäre dienlich in einem Regelkreis, in dem die Prognosegüte eine wesentliche Rolle für das Regelverhalten spielt. Allerdings, wie so häufig bei aufwendigen Simulationen, ist der digitale Zwilling nicht geeignet zur Regelung aller Prozesse, da diese geringere Latenzen erfordern als der digitale Zwilling garantieren kann. Ferner wird in der Praxis der digitale Zwilling auf Basis von Daten aus der Entwicklung aufgebaut und für eine virtuelle Inbetriebnahme verwendet. Eine Mitführung des Systems zur Berücksichtigung von Abnutzung oder technischen Neuerungen findet nicht statt.

Geringere Latenzen versprechen hingegen Modelle, die mittels Machine Learning berechnet werden. Machine Learning Modelle werden zur Regelung von komplexen Systemen seit geraumer Zeit eingesetzt (sog. Model Predictive Control). Ihre Genauigkeit ist im Wesentlichen eine Funktion der Menge und Genauigkeit der Daten über das physische System. Dies impliziert auch, dass das physische Objekt vorhanden ist und bereits bei der Inbetriebnahme oder Produktion Daten generiert. Somit wäre das Einsatzgebiet von Machine Learning auf nach der Inbetriebnahme beschränkt und bräuchte einige Zeit, um die Prognosegenauigkeit des digitalen Zwillings zu erreichen.

Naheliegender ist es daher, im Geiste Schumpeters, beide Ansätze zu kombinieren, um die gegenseitigen Nachteile der Technologien zu kompensieren. Mit einem geeignetem Versuchsplan können – zu oder vor der physischen Inbetriebnahme – nahezu unbegrenzt Daten über das physische System durch den digitalen Zwilling generiert werden. Diese Daten können schlussendlich verwendet werden, um ein Machine Learning System anzulernen, welches dann im Gegenzug als Echtzeit-Regler verwendet werden kann. Eine schematische Darstellung kann Abbildung 15 entnommen werden.

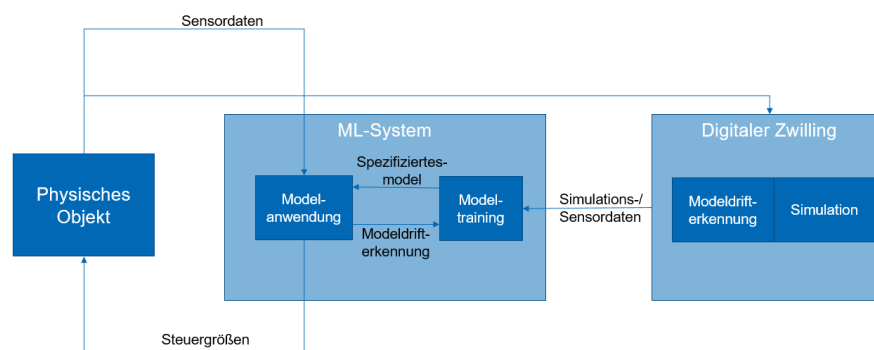


Abbildung 15: Grundlegendes Architekturmodell

Offen für eine weitere Betrachtung bleiben folgende Fragen:

- Wie ist die Prognosegüte / -stabilität unterschiedlicher Machine Learning Modelle in der Abbildung des digitalen Zwillings?
- Welchen Grenznutzen hat ein weiterer Simulationslauf auf die Prognosegüte?
- Wie unterscheidet sich das Machine Learning Modell in der Anlaufphase gegenüber dem steady state?
- Wie viel früher kann ein Machine Learning Modell, das am digitalen Zwilling trainiert wurde, zur Prozessregelung verwendet werden?
- Um wie viel kann die Regelgüte verbessert werden?
- Welche Simulationen sind relevant für den digitalen Zwilling?
- Kann das Machine Learning Modell die neuen Beziehungen auch abbilden? Wo sind hier die Grenzen?

- Wie sieht ein Architekturmodell aus, bei dem der digitale Zwilling mit einem dynamisch lernenden Machine Learning System gekoppelt ist?

Die Beantwortung dieser offenen Fragen soll sich in Zukunft durch Nutzung, Experiment und weiterer Methoden gewidmet werden.

References

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer, Cham.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.

Russell, S.J. & Norvig, P. (2020) Artificial Intelligence A Modern Approach. Pearson.

Ausblick

Ausblick

Prof. Dr. Florian Kerber, TTZ Nördlingen

Dieses Positionspapier zum Digitalen Zwilling hat das Ziel, das gemeinsame Verständnis einer der Schlüsseltechnologien für die digitale Transformation der industriellen Produktion aus regionaler Perspektive zu entwickeln und zu dokumentieren. Grundlage hierfür bildet das Ebenenmodell aus Teil I, das einen theoretischen Zusammenhang für die unterschiedlichen Facetten des Digitalen Zwillings herstellt. Praktische Umsetzungsbeispiele zur virtuellen Inbetriebnahme von Roboterzellen und der Offlinesimulation von Roboterapplikationen zeigen in Teil II auf, welcher Nutzen sich mit den heute verfügbaren Entwicklungswerkzeugen in der Praxis der industriellen Automatisierung erzielen lässt. Zugleich werden die Herausforderungen beschrieben, die sich gerade für kleine und mittelständische Anwender der Technologie Digitaler Zwillinge stellen. Die Studienergebnisse aus der Befragung zum ersten Anwenderforum in Nördlingen belegen dies auch statistisch: Neben dem Informationsbedarf zu technischen Fragestellungen steht auch die regionale Vernetzung zur Bündelung von Kompetenzen in diesem schnell wachsenden Feld im Vordergrund des Interesses der befragten Vertreter aus Industrie und Handwerk. Daraus leiten die Autoren den Auftrag ab, die Initiative mit weiteren Veranstaltungen im Format des Anwenderforums fortzusetzen und die Plattform für den technischen Austausch für Interessierte aller Branchen zu öffnen.

Dies wird jedoch nicht ausreichen, um langfristig im überregionalen Konkurrenzumfeld bestehen zu können. Die noch immer schwierig umzusetzende Verhaltensmodellierung zur detailgetreuen Nachbildung des realen Verhaltens, die fehlende Datendurchgängigkeit und Schnittstellenoffenheit zur kompletten virtuellen Verknüpfung von Produkt-, Prozess- und Produktionszwillingen sowie nicht zuletzt die Standardisierung von Entwicklungsmethoden und –werkzeugen zeigt den Forschungsbedarf auf, der auch knapp 20 Jahre nach Etablierung des Konzepts Digitaler Zwillinge besteht. Mit den in Teil III präsentierten Ansätzen werden einzelne Fragestellungen adressiert. Dies betrifft insbesondere die datenbasierte Modellierung von Echtzeitsystemen im geschlossenen Kreis, die Nutzenpotentiale insbesondere in der Produktivphase des Lebenszyklus technischer Systeme aufzeigt. Die Initiatoren dieser regionalen Initiative wollen deshalb auch daran weiterarbeiten, auf den skizzierten Handlungsfeldern Fortschritte durch gemeinsame Projektaktivitäten zu erreichen.

Autoren und Organisationen

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Peter Eichinger ist Professor im Studiengang Mechatronik an der Hochschule Aalen. Im Rahmen verschiedener Projekt- und Abschlussarbeiten wurde die Thematik Digitaler Zwilling mit unterschiedlichen Tools und in unterschiedlichen Anwendungen untersucht.

Florian Förster ist seit 2020 am TTZ Nördlingen. Derzeit widmet er sich seinem Masterstudium in Applied Research an der Hochschule Augsburg und dem TTZ Nördlingen. Seine Themengebiete umfassen unter anderem den Digitalen Produktionszwilling, SIL und die Virtuelle Inbetriebnahme.

Dr. Gitte Händel ist Strategische Projektmanagerin am TTZ Nördlingen. Ihre Aufgabengebiete sind u.a. die (Weiter-) Entwicklung der Angebote für Informations- und Technologietransfer und die regionale Vernetzung.

Prof. Dr. Dieter William Joensen ist Dekan der Fakultät Maschinenbau und Werkstofftechnik an der Hochschule Aalen. Als ehemaliger Lead Data Scientist, setzt er bei der strategischen Entwicklung der Fakultät klar auf Digitalisierung und künstliche Intelligenz. Kompetenzen hierzu vermittelt er seinen Studenten und Projektpartnern aus Industrie und Forschung.

Prof. Dr. Florian Kerber ist seit 2014 Professor für Regelungstechnik und Grundlagen der Mechatronik an der Hochschule Augsburg. Seit 2016 ist er zudem wissenschaftlicher Leiter des Technologietransferzentrums für flexible Automation Nördlingen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Prozessentwicklung für die Industrie 4.0, innovativen Assistenzsystemen und Robotik sowie dem Digitalen Produktionszwilling.

Christian Kunz ist Leiter Vertrieb, Projektmanagement sowie Forschung und Entwicklung bei der August Mössner GmbH + Co. KG in Eschach. Tätigkeitsfelder sind schwerpunktmäßig der technische Vertrieb sowie die Simulationstechnik.

Isabella Lichtenstern arbeitet als MAPR-Angestellte im Forschungsschwerpunkt Digitaler Zwilling des TTZ Nördlingen. Parallel dazu entwickelt Sie im Rahmen ihrer Masterarbeit einen Digitalen Zwilling auf Basis von Echtzeitdaten.

Alexander Schmidt ist seit 2018 bei der KIENER Maschinenbau GmbH in der Abteilung der elektrischen Konstruktion angestellt. Im Unternehmen liegen seine Zuständigkeiten bei der Organisation sowie Durchführung von Simulationen und virtuellen Inbetriebnahmen.

Organisationen

Die **August Mössner GmbH + Co. KG** ist ein mittelständisches Unternehmen in Eschach im Ostalbkreis. Rund 140 Mitarbeiter:innen entwickeln und bauen Sonderlösungen in den Bereichen des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik und der Robotik. Die Produkte von Mössner werden weltweit insbesondere bei Aluminiumschmelzwerken, bei Herstellern von Güterwaggons sowie in der Gießerei- und Automobilindustrie eingesetzt.

Die **Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft** ist die Hochschule für Angewandte Wissenschaften mit technisch-wirtschaftlichem Schwerpunkt in Aalen. Sie wurde gegründet in 1962 und ist mit etwa 6000 Studenten eine der größten Hochschulen in Baden-Württemberg. Sie ist bekannt für exzellente Lehre, hohe Forschungsleistung und starke Vernetzung mit der regionalen Industrie.

Die **KIENER Maschinenbau GmbH** ist ein mittelständisches Familienunternehmen im Ostalbkreis mit circa 420 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Die KIENER Firmengruppe mit insgesamt 680 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern umfasst die Firmen KIENER Maschinenbau GmbH, LACOM GmbH und COMAG Engineering GmbH. Die Kompetenzen liegen in der Entwicklung und Herstellung von automatisierten Maschinen und Montageanlagen in den Bereichen Montage-, Handhabungs- und Automatisierungstechnik. Die KIENER Maschinenbau GmbH ist international tätig und Partner von bekannten Premium-Automobilherstellern und deren Zulieferern für maßgeschneiderte Komplettlösungen.

Das **Technologiezentrum (TTZ) Flexible Automation Nördlingen** ist seit 2011 eine Außenstelle der Hochschule Augsburg im Landkreis Donau-Ries. Forschungsschwerpunkte sind neben den Digitalen Produktionszwillingen die Prozessentwicklung für die Industrie 4.0 und Innovative Assistenzsysteme und Robotik. Partner sind vor allem mittelständische Unternehmen in der näheren Umgebung.

