

# **Synchronisierung von digitalen Modellen mit realen Fertigungszellen auf Basis einer Ankerpunktmethode am Beispiel der Automobilindustrie**

## **Synchronization of Digital Models with Real Production Cells Based on an Anchor-Point-Method using Automotive Industry as an Example**

**Behrang Ashtari Talkhestani, M.Sc.\***, **Dr.-Ing. Wolfgang Schlögl \*\***,  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich \*\*\***,

**\* Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)**

**\*\* Siemens AG, Digital Engineering der Siemens-Division Digital Factory**

**\*\*\* Universität Stuttgart, Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme**

**Schlagwörter:** Digitaler Zwilling, Ankerpunktmethode, Virtuelle Inbetriebnahme, Datenmodellierung, Fertigungszellen

### **Kurzfassung**

Die zunehmende Produktvielfalt und die Verkürzung der Produktlebenszyklen erfordern eine schnelle und kostengünstige Rekonfiguration bestehender Produktionssysteme [1]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist ein aktuelles digitales Modell der bestehenden Fertigungszelle, im Folgenden Digitaler Zwilling genannt, eine geeignete Lösung. Der Digitale Zwilling führt zu einer Kostenreduktion durch Verkürzung der Umrüstzeiten durch virtuelle Planung und Simulation basierend auf dem aktuellen Zustand der realen Produktionsanlage als auch durch eine frühzeitige Erkennung von Konstruktions- oder Prozessablauffehlern in der Produktionsanlage. Voraussetzung für die Verwendbarkeit des Digitalen Zwillings vom Produktionssystem ist allerdings, dass ein aktuelles (virtuelles) Anlagenmodell von den mechatronischen Bestandteilen der realen Anlage während der verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus existiert. In diesem Beitrag wird die domänenübergreifende, mechatronische Datenstruktur der virtuellen Fertigungszellen in der Automobilindustrie diskutiert. Es wird eine systematische Ankerpunktmethode vorgestellt, mithilfe derer die Abweichungen zwischen den virtuellen Modellen und der Realität detektiert und ermittelt werden können. Basierend darauf wird eine sogenannte regelbasierte Konsistenzprüfung zur durchgängigen, domänenübergreifenden Synchronisierung der aktuellen mechatronischen Ressourcenkomponenten der Produktionssysteme mit deren virtuellem Anlagemodell vorgestellt.

## **Abstract**

Today, the life of the production systems is often longer than the life cycle of the products, which are produced on these production systems. Therefore, a new design and conversion of the production line is constantly necessary to integrate new products throughout the life cycle of the production plants [1]. To face this challenge one solution is an always in sync digital model of existing manufacturing cells, hereafter called the Digital Twin. The Digital Twin can be used to reduce the complexity of reconfiguration by early detection of design or process sequence flaws of the system in virtual commissioning. However, a prerequisite for a digital twin of the production system is that a current virtual plant model of the structured, mechatronic resource components of the real plant during the different phases of its life cycle. This article discusses the cross-domain mechatronic data structure of the virtual manufacturing cells in the automotive industry in the context of RAMI 4.0. A systematic method is presented to detect deviations between the Digital Twin of the production plants and the real system. Based on this, an anchor-point-method for the continuous, domain-across synchronization of current mechatronic resource components of the body shop in the automotive industry with its virtual plant model is presented.

## **1. Einleitung**

Die Fertigung in Europa steht durch strukturelle Veränderungen in der Weltwirtschaft unter starkem Druck [2]. Steigende Produktvielfalt und kurze Lebenszyklen fordern eine schnelle Rekonfiguration und Umrüstung des Produktionssystems. Nach Jahren steigender Gewinne sind Unternehmen der Automobilindustrie derzeit mit stagnierenden oder sogar abnehmenden Märkten konfrontiert [3]. Aufgrund des daraus resultierenden verstärkten Wettbewerbs um wichtige Marktanteile sind die Automobilhersteller in einem Innovationsrennen tätig, das durch eine steigende Anzahl von Produktvarianten mit zahlreichen Produktderivaten gekennzeichnet ist. Darüber hinaus sinken die Innovations- und Modellzyklen stetig. Zum Beispiel lag im Jahr 1980 der Modellzyklus in der Automobilindustrie gemittelt bei 10,6 Jahren; heute hingegen ist der Lebenszyklus eines Modells etwa 6 Jahre, mit einer sinkenden Tendenz [4]. Diese Bedingungen führen zu einer ständig zunehmenden Komplexität im Produktionsprozess, so dass sich komplexere und hoch automatisierte Fertigungssysteme ergeben. Diese zunehmende Komplexität steht auch im Zusammenhang mit dem steigenden Einsatz und der Verknüpfung von Mechanik und Elektronik sowie Software in Form von mechatronischen Anlagenkomponenten. Die Fertigungszellen in der Automobilindustrie bestehen aus mehreren Robotern (zum Greifen, Fügen etc.), bestehend aus mechanischen und elektronischen Betriebsmitteln (Aktoren, Sensoren und Stellelemente), die für den zellenbezogenen Materialfluss verantwortlich sind, sowie einer übergeordneten, signalverarbeitenden Zellensteuerung (SPS). All diese Komponenten stehen in ständiger Wechselwirkung miteinander. Aus diesem Grund können Fertigungszellen als mechatronische Automatisierungssysteme gesehen werden [5].

Die Produktionsplanung von Fertigungszellen in einer digitalen Fabrik ist oft ein sequenzieller Prozess, der mit der Mechanik beginnt, mit der Elektrik fortfährt und mit dem Automatisierungsdesign sowie der virtuellen Inbetriebnahme endet. Schließlich enthalten virtuelle Ressourcenkomponenten mechanische, elektrische und steuerungstechnische Ressourcendaten, welche gebündelt und zu strukturierten, interdisziplinären Komponenten zusammenfasst werden. Diese Komponenten werden im Folgenden als mechatronische Ressourcenkomponenten bezeichnet. Virtuelle Fertigungszellen setzen sich aus mehreren virtuellen Ressourcenkomponenten zusammen. Basierend auf diesen virtuellen, mechatronischen Fertigungszellen werden die Anlagen aufgebaut und in Betrieb genommen. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Anlagen in Betrieb genommen wurden, werden viele Änderungen (z. B. durch Altern von mechatronischen Komponenten, Einsetzen von

Ersatzteilen, Optimierung, Reparatur etc.) in Fertigungszellen vorgenommen. Da in der Automobilindustrie solche Änderungen in kurzer Zeit in den realen Fertigungszellen vorgenommen werden müssen [5], werden sie in der Praxis durch Experten der jeweiligen Domäne (Mechanik, Elektrik, Software) durchgeführt und meist unzureichend dokumentiert. Ein Beispiel dafür ist der Anschluss einer neuen mechatronischen Ressourcenkomponente am Förderband zur Optimierung des Verhaltens des Produktionssystems. Hierzu werden die internen Experten zuerst die physikalischen Anschlüsse der Komponente an das Förderband herstellen. Anschließend werden die entsprechenden Sensoren und Aktoren der mechatronischen Komponente an die digitale Eingangsbaugruppe und Ausgangsbaugruppe der SPS, basierend auf dem elektrischen Schaltplan von der Komponente, angeschlossen. Nach der Änderung des SPS-Codes im Programm wird dieses in die Steuerung geladen, welche zuvor angehalten werden muss. Da es sehr zeitaufwendig und schwierig ist, die betroffenen Änderungsdaten der Ressourcenkomponente im virtuellen Planungsmodell in den drei Domänen zu erkennen und zu synchronisieren, werden diese Änderungen meistens nur nicht formalisiert dokumentiert und im besten Fall in einem digitalen Daten-Backbone (z. B. Teamcenter) als Archiv-Daten (PDF, Excel etc.) abgelegt. Mit der Zeit führt dies zu einer Lücke zwischen dem digitalen Anlagenmodell zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme und der realen Anlage während des Betriebs.

Während des gesamten Lebenszyklus der Produktionsanlagen ist eine ständige Neugestaltung bzw. ein Umbau der Produktionslinie notwendig, um neue Produkte zu integrieren [1]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, eine Lösung ist ein aktuelles, digitales Modell der Fertigungszellen, Digitaler Zwilling, während des gesamten Lebenszyklus der Produktionsanlagen.

Im Kapitel 2 wird zunächst der Digitale Zwilling von Fertigungszellen präsentiert und seine Auswirkungen auf die zukünftige Produktionsplanung diskutiert. Im Kapitel 3 werden die benötigten Grundlagen der mechatronischen Datenstruktur in der Produktionsplanung präsentiert. Darauf aufbauend wird das Konzept für eine Ankerpunktmethode im Kapitel 4 beschrieben, mit deren Hilfe im Produktionssystem aktuellen, mechatronischen Ressourcenkomponenten mit ihren virtuellen Anlagemodellen abgeglichen und synchronisiert werden können.

## **2. Digitaler Zwilling der Fertigungszellen**

Das Konzept der Verwendung von "Zwillingen" stammt aus dem Apollo-Programm der NASA (Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde), wo mindestens zwei identische Raumfahrzeuge gebaut wurden, um die Bedingungen des Raumfahrzeugs während der Mission zu spiegeln. Ein auf der Erde verbleibendes Fahrzeug heißt Zwilling. Der Zwilling wurde ausgiebig für die Ausbildung während der Flugvorbereitung verwendet. Während der Flugmission wurde er verwendet, um Alternativen auf dem erdgebundenen Modell zu simulieren, wo die verfügbaren Flugdaten verwendet wurden, um die Flugbedingungen so genau wie möglich zu spiegeln und damit die Astronauten in der Umlaufbahn in kritischen Situationen zu unterstützen [6], [7]. Der Begriff „Digitaler Zwilling“ wurde zum ersten Mal in der integrierten Technologie-Roadmap der NASA in die Öffentlichkeit gebracht. Nach [7] Ein Digitaler Zwilling ist eine integrierte Simulation-Modell eines Fahrzeugs oder Systems, das die verfügbaren physikalischen Modelle, Sensor-Updates, Flottenhistorie usw. verwendet, um das Leben des entsprechenden fliegenden Zwillings zu spiegeln.

Im Kontext von I4.0 sind Cyber-Physische Systeme (CPS) laut [8] „gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze“.

Die Cyber-Physischen Systeme (CPS) benötigen Zugang zu sehr realistischen digitalen Modellen des aktuellen Standes des Prozesses und ihres eigenen Verhaltens im Zusammenspiel mit ihrer Umgebung in der realen Welt, die hier als Digitaler Zwilling bezeichnet wird. Ein wichtiger Aspekt des Digitalen Zwillings ist die Simulation. Ein Digitaler Zwilling eines Produktionssystems kann durch Verwendung von modellbasierter Simulation nicht nur während des Designs und der Planung, sondern auch während der anderen Phasen des Lebenszyklus, beispielsweise zur Prozessoptimierung genutzt werden [6]. Heutzutage wird die Optimierung von mechatronischen Produkten und Systemen durch Simulation basierend auf dem Digitalen Zwilling des Systems während des Betriebs, z. B. als Komponente der Produktionsanlagen immer wichtiger. Der Digitale Zwilling eines Systems vereinigt Daten und Informationen über Ressourcen, Prozesse, Produkte etc.

### **2.1. Der Engineering-Prozess der Fertigungszellen**

Stand der Technik in der Automobilproduktion ist die digitale Planung mithilfe des virtuellen, mechatronischen Anlagenmodells von Fertigungszellen [9]. Die digitale Planung ist eine domänenübergreifende Zusammenarbeit zwischen den Domänen Mechanik, Elektrik und Software. Die verschiedenen Domänen existieren hierbei parallel zueinander, beginnend mit der Definition eines gemeinsamen Konzepts von Produkt und Produktionsanlagen. Basierend auf dem Konzept der Produktionsanlage muss ein Anlagenmodell entwickelt werden, das alle mechatronischen Ressourcenkomponenten und automatisierten Systeme enthält, die für die Durchführung der verschiedenen Produktionsprozesse notwendig sind.

In Bezug auf das Engineering von verschiedenen mechatronischen Komponenten für spezielle Produktionsprozesse einer Produktionsanlage gibt es oft einen sequenziellen Prozess, der mit der Mechanik beginnt, mit der Elektrik fortfährt und mit dem Automatisierungsdesign endet. Die Systemintegration hat das Ziel, das System einschließlich des SPS-Codes zu überprüfen. In Bezug auf Produktionsmaschinen erfolgt die Systemintegration entweder durch Inbetriebnahme der realen automatisierten Systeme oder durch Validierung des SPS-Codes gegen das virtuelle Anlagenmodell, basierend auf Verhaltensmodellen der mechatronischen Ressourcenkomponenten. Dies wird als virtuelle Inbetriebnahme bezeichnet [8]. In diesem Beitrag wird der Fall der Systemintegration von Fertigungszellen durch Validierung mithilfe von virtueller Inbetriebnahme betrachtet.

Nach der Validierung des SPS-Codes gegen die Verhaltensmodelle von mechatronischen Ressourcenkomponenten wird das mechatronische System integriert und in Betrieb genommen. Schließlich wird ein hierarchisches, mechatronisches Datenmodell der Produktionsanlage als Digitaler Zwilling in einem Daten-Backbone gespeichert.

### **2.2. Datenstruktur der Fertigungszellen**

Im Kontext der Produktion stellen Ressourcen [10] „alle Mittel dar, die zur Durchführung eines Prozesses oder allgemein zur Erfüllung einer Aufgabe notwendig sind“. Wie im Bild 1 dargestellt wird, können diese Mittel in vier verschiedene Klassen (Betriebsstätten Betriebsmittel Betriebshilfsmittel und Personal) untergliedert werden. Die Betriebsmittel bezeichnen nach [10] "alle Maschinen, Geräte und Anlagen, die der Durchführung von Fertigungs-, Handhabungs-, Transport-, Prüf- und Lagerschritten dienen". Bezogen auf die Automobilproduktion können, entsprechend ihres funktionalen Umfangs, sowohl Komponenten, Funktionsgruppen, Stationen als auch komplette Anlagen als Betriebsmittel verstanden werden.

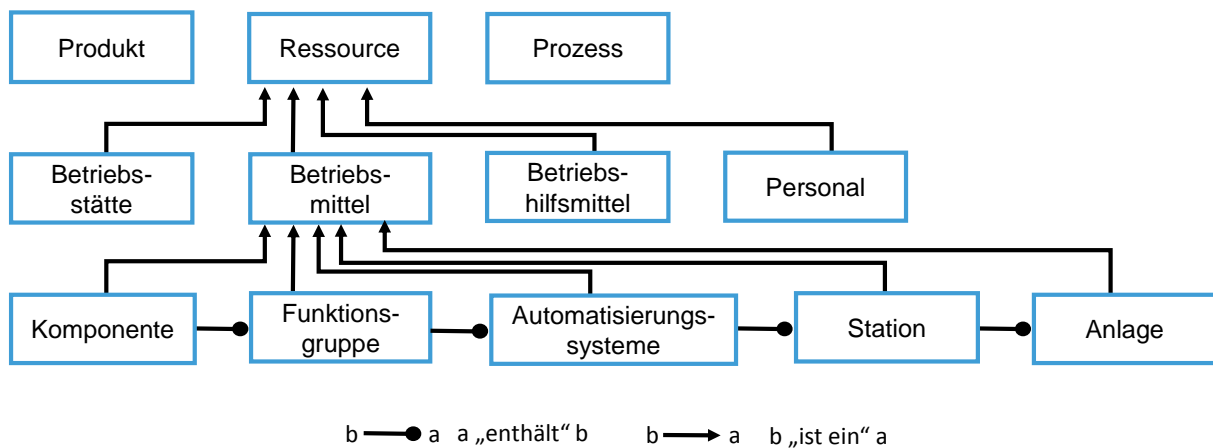


Bild 1: Übersicht über Abhängigkeiten der Fertigungszellen nach [10]

Die Komponenten stellen die kleinste, materielle Systemeinheit innerhalb der Produktion oder innerhalb einer Produktionsanlage dar. Als Komponenten können z. B. Aktoren und Sensoren bezeichnet werden [10]. Funktionsgruppen können als Bündelung von Komponenten verstanden werden, die als eine Art Funktionseinheit der Erfüllung einer definierten Aufgabe dienen. Hardwareseitig sind Funktionsgruppen durch ein mechanisches und elektrisches Zusammenwirken definiert. Softwareseitig ist die gemeinsame Ansteuerung durch einen SPS-Programmbaustein kennzeichnend. Ein Beispiel für eine Funktionsgruppe ist eine Spannerstelle, die aus einem mechatronischen Spanner sowie aus mehreren mechanischen Komponenten (z. B. Stellelemente zur Fixierung) besteht [10].

Als nächste Hierarchieebene werden sogenannte Automatisierungssysteme (Roboter, Förderer etc.) eingeführt. Die Automatisierungssysteme setzen sich zu einer kompletten mechatronischen Station zusammen. Die Strukturierung von mechatronischen Robotern, Förderern usw. ist, so weit wie möglich auf den Aufbau der Station, wie beispielsweise eine mechatronische Schweißvorrichtung, ausgerichtet [11]. Eine Produktionsanlage setzt sich aus mehreren Stationen (z. B. Vorrichtungen, Roboter mit Schweiß-/Greifwerkzeugen) zusammen, die jeweils durch eine SPS gesteuert werden.

In diesem Beitrag werden im Folgenden sowohl die mechatronischen Komponenten als auch die mechatronischen Funktionsgruppen als mechatronische Komponenten bezeichnet. In [12] wird eine mechatronische Komponente als ein gekapseltes Objekt vorgestellt, das aus mechanischen, hydraulischen, elektrischen und informationstechnischen Elementen besteht. In [5] wird eine mechatronische Komponente als ein mechatronisches Datenmodell vorgestellt, das strukturierte Informationen über mechanische (beispielsweise 3D-Geometrien), elektrische, pneumatische und hydraulische, funktionsbeschreibende, technische, betriebswirtschaftliche, organisatorische und steuerungstechnische Informationen enthält.

Industrielle Umsetzungen von Modellen von gekapselten Elementen mit mechanischen, hydraulischen, elektrischen und informationstechnischen Elementen sind nach [13] mit EPLAN bzw. Mind8 Engineering Center und Automation Designer der Siemens AG möglich.

### 2.3. Ankerpunkte der mechatronischen Komponenten

Alle mechatronische Komponenten im System über Schnittstellen bzw. bestimmte Eigenschaften charakterisiert sind, diese hinterlassen Spuren im digitalen Datenmodell. Im Fall der Elektrik also beispielsweise Anschlüsse, Stromlaufpläne etc. Das Datenmodell einer mechatronischen Komponente kann mit drei sogenannten Ankerpunkten, die voneinander abhängig sind, repräsentiert werden. Im Bild 2 werden die Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente in den drei Domänen Mechanik, Elektrik und Software dargestellt.

Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Konsistenz zwischen den Daten und Informationen der zugehörigen Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente. Ein Beispiel dafür ist, wenn die mechatronische Komponente einen elektrischen Sensor enthält, müssen die Daten und Informationen des entsprechenden Sensors in allen drei Ankerpunkten identifizierbar sein, da sonst das Datenmodell inkonsistent ist.

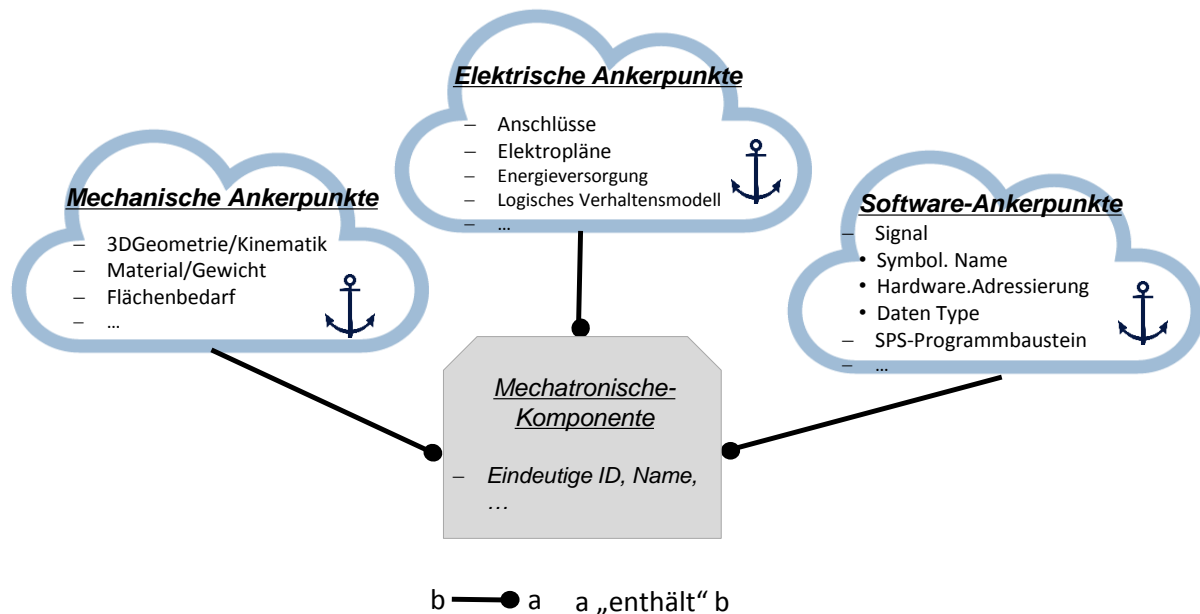


Bild 2: Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente

Hierbei ist es entscheidend, die drei Ankerpunkte einer neuen mechatronischen Komponente in der realen Welt zu detektieren und das gekapselte Datenmodell der Datenstruktur des Digitalen Zwillings der Fertigungszelle hinzuzufügen.

Daher muss zuerst eine systematische Methode vorgestellt werden, damit die drei Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente der realen Anlage detektiert werden können. Im nächsten Schritt muss die Konsistenz zwischen den Ankerpunkten überprüft werden. Nach der Überprüfung der Konsistenz zwischen den drei Ankerpunkten kann das Modell als ein gekapseltes mechatronisches Datenmodell validiert werden.

### 3. Ankerpunktmethod zur Synchronisierung des Digitalen Zwillings mit der realen Fertigungszelle

In diesem Abschnitt werden die domänenübergreifende, mechatronische Datenstruktur der virtuellen Fertigungszellen und die Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente diskutiert. Auf diesen aufbauend wird ein Konzept beschrieben, mithilfe dessen, basierend auf Datenvergleich und -analyse zwischen dem SPS-Code der realen Anlage und dem zuletzt gespeicherten SPS-Code im Daten-Backbone (z. B. Teamcenter), die Abweichungen zwischen den Ressourcenkomponenten der Planungsmodelle und der Realität detektiert werden können. Dieses Konzept lässt sich in die Schritte (1) „Änderungsdetektion“ und (2) „Regelbasierte Konsistenzprüfung“ unterteilen. In „Änderungsdetektion“ wird der Software-Ankerpunkt in der Software-Domäne, durch Analyse und Vergleich von SPS-Code und die Ankerpunkte der Domänen Elektronik und Mechanik mithilfe weiterer Änderungsdokumentationen aus zusätzlichen Quellen gefunden. Anschließend wird im Schritt „Regelbasierte Konsistenzprüfung“ die zu diesen Ankerpunkten gehörende Komponente identifiziert und in den Digitalen Zwilling integriert.

### 3.1. Änderungsdetektion

Wie in Kapitel 2.2 diskutiert, bestehen die Fertigungszellen aus verschiedenen verteilten Automatisierungssystemen, die alle zentral durch eine SPS gesteuert werden. Dementsprechend kann der Software-Code einer SPS als Datenquelle der aktuellen, mechatronischen Ressourcenkomponente der realen Anlage in der realen Welt gesehen werden. Im letzten Schritt der Produktionsplanung einer Fertigungszelle wird der Software-Code einer SPS gegen die Verhaltensmodelle der automatisierten Systeme, sowie die der mechatronischen Komponenten, in der so genannten virtuellen Inbetriebnahme, getestet. Das Ziel der virtuellen Inbetriebnahme ist es, den entwickelten SPS-Code zu validieren, indem man die Reihenfolge der Aktionen der Aktoren und Sensoren überprüft. Nach der virtuellen Inbetriebnahme und der Validierung des SPS-Codes, im Folgenden SPS-Code im Referenzzeitpunkt genannt, wird der SPS-Code im Daten-Backbone gespeichert und darauf basierend die Software-Ankerpunkte aller Komponenten des Digitalen Zwillings aktualisiert. In Bezug auf den Digitalen Zwilling werden die Fertigungszellen integriert und im Betrieb genommen. Wie in Kapitel 1 diskutiert, werden im Laufe der Zeit viele Änderungen in der realen Anlage durchgeführt und der Software-Code der zentralen SPS damit geändert. Dementsprechend können durch Abgleich und Analyse der Daten und Informationen zwischen dem aktuellen SPS-Code und dem gespeicherten SPS-Code im Referenzzeitpunkt die Informationen über Änderungen an Signalen, wie symbolische Namen, Hardware-Adressierung, etc. sowie über Änderungen an SPS-Programmbausteinen der Aktoren und Sensoren in der realen Anlage detektiert werden. Aus dem Daten-Backbone wird der SPS-Code im Referenzzeitpunkt in ein neutrales, XML-basiertes Datenformat zum Austausch von Anlagenplanungsdaten (z. B. AutomationML und etc.) exportiert, welches mit dem aktuellen SPS-Code verglichen wird. Nach der Detektion der Software-Ankerpunkte der hinzugefügten bzw. gelöschten mechatronischen Komponente müssen die anderen Ankerpunkte detektiert werden.

Wie in Kapitel 3.1 diskutiert, kann eine mechatronische Komponente bzw. Funktionsgruppe als Bündelung von deren Komponenten verstanden werden. Daher können, basierend auf der Datenintegration und Datenanalyse, im letzten Schritt eine Vielzahl an Daten und Informationen über die Software-Ankerpunkte der elementaren Komponenten detektiert werden. Diese Daten werden alle basierend auf Änderungsszenarien in einer Änderungsmanagementdatenbank klassifiziert und gespeichert. Wird zum Beispiel ein neues Signalsymbol mit neuer Hardware-Adressierung im SPS-Code detektiert, bedeutet dies, dass ein neuer Sensor an die SPS angeschlossen wurde. Diese Daten und Informationen müssen alle in einem wissensbasierten Änderungsmanagementsystem gespeichert werden.

Andere Datenquellen in der realen Welt sind Änderungsinformationen, die bei Änderungen in Dokumenten festgehalten wurden. Die dokumentierten Änderungsinformationen enthalten Daten und Informationen über elektrische Ankerpunkte der mechatronischen Komponenten. Zum Beispiel, wenn eine neue Funktionsgruppe an der Anlage angeschlossen wird, müssen die zugehörigen elektrischen Daten wie Schaltpläne, Anschlüsse, Verbindungstyp (Kabel, ...) in den Änderungsinformationen dokumentiert werden.

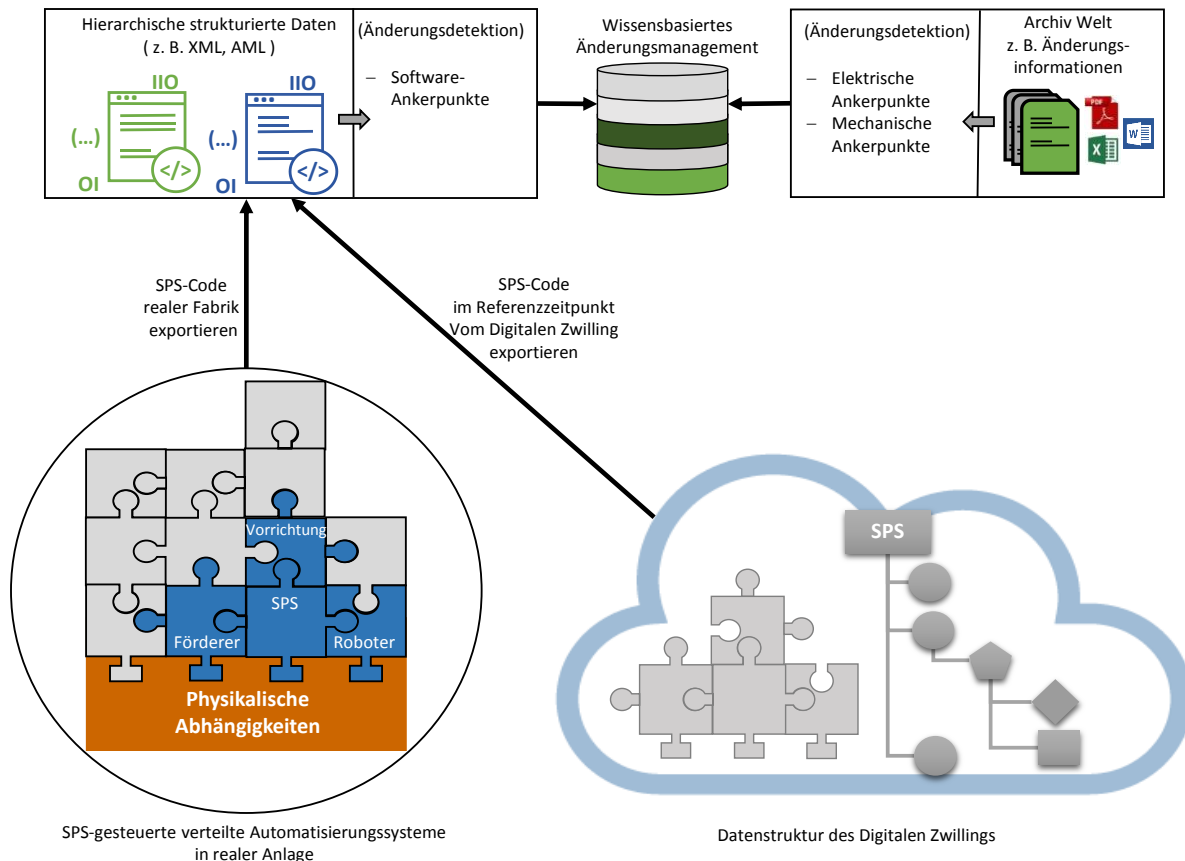


Bild 3: Änderungsdetektion basierend auf Ankerpunkten der mechatronischen Komponenten

Diese Informationen können als elektrische Ankerpunkte der mechatronischen Komponente gesehen werden. Außerdem werden Daten wie Bestellnummern der mechatronischen Komponenten in den Änderungsinformationen dokumentiert. Dadurch können mit Hilfe einer Ressourcenbibliothek die genauen mechanischen Ankerpunkte (3D-CAD und Kinematik) sowie das logische Verhaltensmodell der mechatronischen Komponente extrahiert werden. Diese elektrischen und mechanischen Ankerpunkte müssen auch in dem wissensbasierten Änderungsmanagementsystem gespeichert werden.

### 3.2. Regelbasierte Konsistenzprüfung

Nur durch konsequente Verknüpfung einzelner Komponenten entsteht ein System, das eine Gesamtfunktion erfüllt. Konsistenz kann als Freiheit von Widersprüchen definiert werden. Inkonsistenzen treten auf, wenn Konsistenzregeln verletzt werden [14].

Dieser Abschnitt behandelt die Konsistenzprüfung der Kompatibilität zwischen Ankerpunkten einer mechatronischen Komponente. Es wird überprüft, ob die Daten und Information der drei detektierten Ankerpunkte prinzipiell zusammenpassen können. Die Herausforderung der Konsistenzprüfung besteht darin, die Verbindungen zwischen den gemeinsamen Ankerpunkten einer Komponente zu überprüfen. Daher müssen die gespeicherten detektierten Ankerpunkte aus den drei Domänen in dem wissensbasierten Änderungsmanagement regelbasiert abgeglichen und aneinander angepasst werden. Wenn drei konsistente Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente detektiert wurden, muss die Konsistenzprüfung im nächsten Schritt überprüft werden, wo das Datenmodell der mechatronischen Komponente an die hierarchische virtuelle Datenstruktur im Digitalen Zwilling angeschlossen werden muss. Im Digitalen Zwilling können allerdings Tausende von Modellelementen enthalten sein. Daher ist eine Konsistenzprüfung zwischen allen Komponenten des Digitalen



Zwillings und der detektierten, mechatronischen Komponente unmöglich. Es muss eine hierarchische Datenstruktur von klassifizierten Automatisierungssystemen der Fertigungszellen (Ressourcenbibliothek), basierend auf vorgegebenen Datenmodellen der Datenbibliothek eines industriellen Tools (z. B. Automation Designer der Siemens AG) entwickelt werden. Durch diese Hierarchisierung muss die Konsistenzprüfung zwischen detektierten mechatronischen Komponenten und Komponenten des digitalen Zwillings nur in einer bestimmten Ebene durchgeführt werden. Eine Überprüfung gleicht zum Beispiel die korrekten elektrischen Ankerpunkte (z. B. Anschlüsse) der mechatronischen Komponente mit den Datenmodellen des Digitalen Zwillings ab. Basierend auf der regelbasierten Konsistenzprüfung wird ein konsistentes Modell des Digitalen Zwillings mit der aktuellen, hierarchischen Datenstruktur erstellt. Durch die Synchronisierung, basierend auf der Ankerpunktmethode der elektrischen Verhaltensmodelle für alle hinzugefügten bzw. gelöschten mechatronischen Komponenten, ermöglicht der Digitale Zwilling für eine virtuelle Inbetriebnahme eine schnellere Umrüstung oder Rekonfiguration der realen Produktionsanlage.

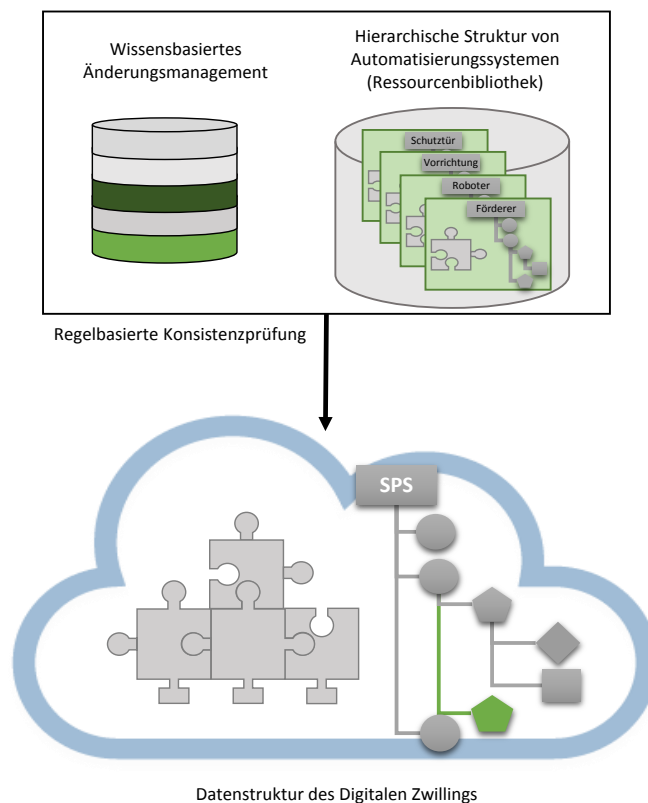


Bild 4: Synchronisierung mit einer Regelbasierten Konsistenzprüfung

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden folgende Punkte vorgestellt und diskutiert:

- Der Digitale Zwilling der realen Fertigungszellen wurde erläutert.
- Seine Datenstruktur wurde diskutiert.
- Die Bedeutung des Digitalen Zwillings im Engineering-Prozess und bei der Simulation wurde aufgezeigt.
- Ein Konzept zur Synchronisierung des Digitalen Zwillings mit der realen Anlage während des gesamten Lebenszyklus wurde vorgestellt.
- Dieses Konzept basiert auf Änderungsdetektion.

- Die Änderungsdetektion basiert auf einer Ankerpunktmethode, welche eine regelbasierte Konsistenzprüfung zur Synchronisierung des Digitalen Zwillings verwendet.
- Die verwendeten Ankerpunkte zur Identifikation der geänderten mechatronischen Komponenten beziehen sich auf die Domänen Mechanik, Elektronik und Software.

Diese regelbasierte Konsistenzprüfung muss noch weiter detailliert werden. Zudem muss eine hierarchische Strukturierung der Automatisierungssysteme realisiert werden.

## 5. Literatur

- [1] W. Walla and J. Kiefer, "Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry," in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, J. Hesselbach and C. Herrmann, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 207–212.
- [2] F. Jovane, E. Westkämper, and D. Williams, *The ManuFuture road: towards competitive and sustainable high-adding-value manufacturing*: Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] G. Schuh, B. Kampker, and B. Franzkoch, "Anlaufmanagement, Kosten senken–Anlaufzeit verkürzen–Qualität sichern," *wt Werkstattstechnik online*, vol. 95, no. 5, pp. 405–409, 2005.
- [4] R. Kalmbach, "Von der Technik zum Kunden," in *Markenmanagement in der Automobilindustrie*: Springer, 2003, pp. 35–60.
- [5] J. Kiefer, "Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau," 2008.
- [6] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015.
- [7] Mike Shafto, Mike Conroy, Rich Doyle, Ed Glaessgen, Chris Kemp, Jacqueline LeMoigne, Lui Wang, "Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap: Technology Area 1," [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-ID\\_rev4\\_NRC-wTASR.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf), 2012.
- [8] W. Huber, *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [9] B. Drescher et al., "Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess-Einsatzpotentiale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau," *Simulation in Produktion und Logistik*. HNI-Verlagsschriftenreihe, pp. 271–282, 2013.
- [10] M. Bergert, "Virtuelle Inbetriebnahme-Standardisierte Verhaltensmodellierung mechatronischer Betriebsmittel im automobilen Karosserierohbau," *Automatisierungstechnische Praxis*, vol. 51, no. 7, pp. 40–46, 2009.
- [11] J. Kiefer, "Mechatronic-oriented Engineering of Manufacturing Systems Taking the Example of the Body Shop," 2008.
- [12] M. Weyrich, F. Steden, J. Wolf, and M. Scharf, Eds., *Identification of mechatronic units based on an example of a flexible customized multi lathe machine tool*: Toulouse, France, 5 - 9 Sept. 2011. Piscataway, NJ: IEEE, 2011.
- [13] G. Frank, "Durchgängiges mechatronisches Engineering für Sondermaschinen," *Dissertation*, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015.
- [14] T. Helbig, J. Hoos, and E. Westkämper, "Consistency Check of the Functional Solution Model in Special Purpose Machinery," *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 380–385, 2016.