

Nachfolgend finden Sie die Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Combining automatic model generation and model adaption for simulation-based digital twins of machine tools“.

Sascha Schaper^{a,b,*}, Alexandra Ast^a, Alexander Verl^b.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005256>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans

ATS Prozessoptimierung Markus Bans

Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



Tagungsband der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems 2025

Kombination von automatischer Modellgenerierung und Modelladaption für simulationsbasierte digitale Zwillinge von Werkzeugmaschinen

Sascha Schaper^{a,b,*}, Alexandra Asta, Alexander Verl^b

^aTRUMPF Machine Tools SE + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen, Deutschland

^bInstitut für Regelungstechnik von Werkzeugmaschinen und Fertigungseinheiten, Universität Stuttgart, Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart, Deutschland

* Korrespondierender Autor. Tel.: +49-7156-303-32613. E-Mail-Adresse: sascha.schaper@trumpf.com

Abstrakt

In der Fertigungsindustrie hat sich die virtuelle Inbetriebnahme zu einer etablierten Methode zur effizienten Qualifizierung von Steuerungssoftware entwickelt. In der Regel kommt eine Software-in-the-Loop-Simulation zum Einsatz, die Kinematiken und Verhaltensmodelle mit einer virtuellen Regelung kombiniert. Diese Simulation bildet die Struktur, die Eigenschaften und das Verhalten einer bestimmten Werkzeugmaschinenvariante virtuell ab und hat das Potenzial, während des Betriebs als simulationsbasierter Digitaler Zwilling wiederverwendet zu werden. Der Digitale Zwilling setzt jedoch voraus, dass die Simulationsmodelle während des Betriebs häufig aktualisiert werden, wenn Änderungen an der realen Werkzeugmaschine auftreten. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt, der automatische Modellgenerierung und Modelladaption kombiniert. Die Modellgenerierung ist erforderlich, um das Simulationsmodell neu zu konfigurieren, wenn physische Komponenten während der Wartung geändert werden. Die Modelladaption wird verwendet, um Simulationsmodellparameter durch das Sammeln und Vergleichen von realen und virtuellen Sensordaten zu optimieren. Durch die Kombination beider Methoden wird der simulationsbasierte Digitale Zwilling auf dem neuesten Stand gehalten, ohne dass Teile des Simulationsmodells manuell geändert oder Modellparameter angepasst werden müssen.

© 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier B.V.

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter der CC BY-NC-ND Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer-Review unter der Verantwortung des wissenschaftlichen Komitees des Internationalen Programmkomitees der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems

Schlüsselwörter: Simulation; Digitaler Zwilling; Werkzeugmaschine; Softwaredefinierte Fertigung; Automatische Modellgenerierung; Modell-Adaption

1. Einleitung

Modulare Werkzeugmaschinen sind auf dem neuesten Stand der Produktionstechnik und können flexibel konfiguriert werden, um spezifische Kundenbedürfnisse zu erfüllen. Gleichzeitig führt das Paradigma der softwaredefinierten Fertigung zu einer zunehmenden Anzahl von Software-(SW)-Funktionen, was zu einem noch höheren Grad an Veränderlichkeit führt [1]. Die Validierung von konfigurationsspezifischer SW für den Betrieb modularer Maschinen stellt eine große Herausforderung dar, die mit herkömmlichen Tests an realen Prototypen nicht mehr zu bewältigen ist. Die virtuelle Inbetriebnahme (VC) begegnet dieser Herausforderung, indem sie automatisch durchgeführte virtuelle Systemtests ermöglicht. Für VC werden Hardware-in-the-Loop (HiL) oder Software-in-the-Loop (SiL)-Simulationen durchgeführt, die ein reales oder virtuelles Steuerungssystem mit Simulationsmodellen einer Werkzeugmaschine kombinieren [2]. Dadurch können SW-Fehler effizient erkannt

und behoben werden, bevor ein echter Prototyp überhaupt existiert.

*

2212-8271 © 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier B.V.

Simulationsmodelle für VC kombinieren technische Daten aus verschiedenen technischen Domänen wie Mechanik, Elektrik und Fluidik, um einen ganzheitlichen virtuellen Prototyp zu erstellen. Darüber hinaus werden bei der Durchführung virtueller Tests die Simulationsmodelle so aufgebaut, dass sie mit der Konfiguration und Version einer entsprechenden Werkzeugmaschine übereinstimmen [3]. Bei der Kombination dieser Modelle mit einer virtuellen Steuerung bildet die SiL-Simulation den Aufbau, die Eigenschaften und das Verhalten einer bestimmten Werkzeugmaschinenvariante

virtuell ab. Dieser konfigurationsspezifische SiL-Aufbau kann als simulationsbasierter Digitaler Zwilling (DT) wiederverwendet werden, um die Betriebsphase zu unterstützen. Im laufenden Betrieb unterliegt die Werkzeugmaschine jedoch ständigen Veränderungen durch Funktionserweiterungen, Wartung, Verschleiß und Umwelteinflüsse [4]. Die Durchführung dieser Änderungen in den Simulationsmodellen ist aufwendig und führt in der Regel zu einer schnellen Obsoleszenz. Wenn die Lücke zwischen Realität und Virtualität zu groß wird, werden Simulationsergebnisse verfälscht und können nicht für Inbetriebnahme-, Diagnose- oder Vorhersagezwecke während des Betriebs verwendet werden [5]. Das simulationsbasierte BMK kann daher nur dann Wert durch Use Cases generieren, wenn die genannten Änderungen häufig integriert werden.

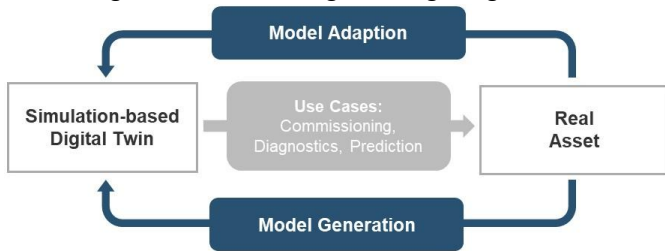


Abb. 1. Simulationsbasierter digitaler Zwilling durch automatische Modellgenerierung und Modellanpassung

Um die Simulationsmodelle mit einer realen Werkzeugmaschine zu synchronisieren, wird in dieser Arbeit eine Architektur für ein simulationsbasiertes BMK vorgestellt, die automatische Modellgenerierung und Modelladaption kombiniert (Abb. 1). Informationen über die aktuelle Werkzeugmaschinenkonfiguration und -version werden verwendet, um strukturelle Änderungen im Simulationsmodell auf der Grundlage eines Modellgenerierungsansatzes durchzuführen. Um das Zeitverhalten abzugleichen, werden reale und virtuelle Sensordaten verwendet, um die Parameter des Simulationsmodells zu optimieren. Die Architektur ist für eine virtualisierte Umgebung konzipiert, um Skalierbarkeit und damit die Anwendbarkeit für eine Vielzahl von eingesetzten Werkzeugmaschinen zu ermöglichen. Die Synchronisation durch Modellgenerierung und -adaption ist die Grundlage, um Anwendungsfälle für ein betriebsparalleles BMK zu realisieren, die jedoch nicht diskutiert werden und in zukünftigen Arbeiten behandelt werden.

Nach der Einführung werden in Abschnitt 2 verwandte Arbeiten zur automatischen Generierung und Anpassung von Simulationsmodellen beschrieben. Der Fokus der Analyse liegt auf Ansätzen in der produzierenden Industrie. In Sektion 3 wird die Architektur für die kombinierte Modellgenerierung und -adaption in einer virtualisierten Umgebung vorgestellt. Die Architektur wird in Abschnitt 4 angewendet, um ein simulationsbasiertes BMK einer Werkzeugmaschine für die Blechbearbeitung zu erstellen. Abschließend wird in Abschnitt 5 ein kurzes Fazit und ein Ausblick auf die künftigen Arbeiten gegeben.

2. Verwandte Arbeiten

In der Fertigungsindustrie hat das DT-Konzept viel Aufmerksamkeit aus verschiedenen Bereichen auf sich gezogen. Durch die Einbeziehung von Asset-Informationen und Simulationsmodellen können DTs einen Mehrwert für serviceorientierte Geschäftsmodelle schaffen [6]. Die Anwendung und die technische Umsetzung von DTs unterscheiden sich jedoch erheblich, was zu Unterschieden in ihren Eigenschaften und Eigenschaften führt. Eine weit verbreitete Definition findet sich in [7], die das BMK als ein digitales Objekt definiert, das über einen bidirektionalen Datenaustausch mit einem physischen Objekt verbunden ist. In der Regel basiert das BMK auf einer einzigartigen Instanz digitaler Modelle, die statische Ingenieurmodelle und dynamische Modelle für logisches oder multiphysikalisches Verhalten umfasst. Dieses instanziierte digitale Modell wird durch Betriebs- und Prozessdaten eines realen Assets ergänzt, das als digitaler Schatten bezeichnet wird [8]. Nach dieser Definition können die für VC erstellten Simulationsmodelle als digitale Modelle bezeichnet werden. In den meisten Fällen wird eine Reihe von Kinematik- und Verhaltensmodellen verwendet, um eine Fertigungsanlage virtuell zu beschreiben [9]. Eine konfigurationsspezifische Instanz dieser Modelle kann die Grundlage für ein simulationsbasiertes BMK bilden.

2.1. Automatische Modellgenerierung

Methoden der automatischen Modellgenerierung werden in der Regel während der Produktentwicklung eingesetzt, um Simulationsmodelle unterschiedlicher Granularität effizient zu erstellen. Das übergeordnete Ziel ist es, den oft zeitintensiven und fehleranfälligen manuellen Modellierungsprozess durch Informationsmapping-Algorithmen zu ersetzen [10]. Die Methoden der automatischen Modellgenerierung für VC lassen sich in zwei allgemeine Ansätze einteilen: Die erste Kategorie umfasst die Generierung von Simulationsmodellen aus Engineering-Daten wie 3D-CAD-Modellen, Schaltplänen oder Automatisierungs-I/O-Tabellen [11] [12] [13]. In der zweiten Kategorie werden vorhandene Teilmodelle von Modulen oder Komponenten kombiniert, um ein individuelles Simulationsmodell eines Produktionssystems zu generieren [14]. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die zweite Kategorie, da diese Methode konfigurationsspezifische Varianten ermöglicht.

[15] Stellt einen Ansatz mit Simulationsmodellen von Werkzeugmaschinenmodulen mit standardisierten Schnittstellen vor. Es wird festgelegt, dass jedes virtuelle Modul mit kommunikativen, funktionalen, mechanischen und energetischen Schnittstellen modelliert werden sollte. Ein Modellgenerator wird verwendet, um auf Basis einer konfigurierten Stückliste ein individuelles Maschinensimulationsmodell für die virtuelle Inbetriebnahme zu erstellen.

Der Ansatz von [16] verwendet ebenfalls einen Modellgenerator, konzentriert sich jedoch auf Industrieroboter. Basis für das Tool ist ein AutomationML-Datenmodell, das Simulationsmodelle von Robotermodulen enthält. Die Idee ist, auf Basis eines Produktionsplans automatisch ein Kinematikmodell für ein rekonfigurierbares

Fertigungssystem zu erstellen. Die Implementierung verwendet URDF als Ausgabeformat für ein ROS-Build-Tool.

2.2. Modellanpassung

Die Modelladaption erfolgt im Rahmen der betriebsparallelen Nutzung von Simulationsmodellen und beschreibt das generelle Konzept zur Verbesserung der Modellgenauigkeit durch die Verwendung realer Anlagendaten [10] [17]. Das übergeordnete Ziel ist es, die Realitätslücke zwischen realem Pflanzenverhalten und simuliertem Verhalten zu verringern. Diese Lücke entsteht zunächst durch die Abstraktion bei der Modellerstellung und vergrößert sich, wenn Änderungen an einem Produktionssystem oder dessen Umgebung auftreten [18].

Die Arbeit von [19] konzentriert sich auf die Adaption diskreter Ereignissimulationsmodelle. Es wird eine High-Level-Architektur vorgestellt, die auf einem Manufacturing Execution System (MES) basiert, das Shopfloor-Daten für einen Synchronisations- und Validierungsservice sammelt. Die Architektur wird in einer Fallstudie mit einer realen Förderbandanlage angewendet.

Das Modelladaptionkonzept von [18] basiert auf einem PlanDo-Check-Act-Zyklus. Sie unterscheiden zwischen Parameteranpassungen in Verhaltenssimulationsmodellen und strukturellen Anpassungen, die die verwendete Modelltiefe ändern. Das Konzept wird auf einen Sauggreifer angewendet, indem das erzeugte Vakuum des realen Assets gemessen und die Einflussparameter im Modell optimiert werden.

[4] stellt ein Assistenzsystem vor, das einen Open Modelica Simulator aus Functional Mock-Up Units (FMU) generiert, die in einer Bibliothek abgelegt sind. Darüber hinaus ist das Assistenzsystem in der Lage, ein Multi-Objekt-Optimierungsproblem mit einem evolutionären Ansatz zu lösen, um Simulationsmodellparameter zu identifizieren und anzupassen. Die Validierung erfolgt mit einem physikbasierten Modell von zwei Fertigungsmodulen der Werkzeugmaschine.

In [17] wird ein Ansatz vorgestellt, um reale Produktionsdaten in virtuelle Inbetriebnahmesimulationsmodelle einzubeziehen. Es wird ein sechstufiges Prozessmodell vorgestellt, das durch den Modellanpassungsprozess führt, einschließlich der Messung realer und virtueller Signale und der Ausrichtung von Signalen. Die Validierung des Prozessmodells erfolgt durch manuelles Ausführen der sechs Schritte für 14 gemessene Steuersignale eines Materialflussgeräts.

Wie gezeigt, sind in der Literatur bereits mehrere Modelladaptionsansätze auf unterschiedlichen Ebenen der Modellgranularität vorhanden, die teilweise Modellgenerierungskonzepte integrieren. Die Verwendung kompletter SiL-Simulationsaufbauten für ein synchronisiertes BMK ist jedoch kaum erforscht. Daher führt dieser Beitrag die analysierten Konzepte weiter und kombiniert sie für eine Architektur in einer virtualisierten Umgebung.

3. Architektur für die Modellgenerierung und -adaption

Die in diesem Artikel vorgestellte Architektur umfasst die SW-Komponenten, die benötigt werden, um die Simulationsmodelle eines DT mit der physikalischen Struktur und dem Zeitverhalten einer Werkzeugmaschine während ihrer Betriebsphase zu synchronisieren (Abb. 2). Es basiert auf einer SiL-Simulation, die bisher für automatische Systemtests im Rahmen von VC [3] verwendet wurde. Die Architektur verwendet virtuelle Maschinen (VMs), die ein Rechensystem kapseln und als Zielbereitstellungsumgebung für alle beteiligten SW-Komponenten dienen. Drei virtuelle Maschinen realisieren die Bausteine des vorgestellten simulationsbasierten DT:

Der virtuelle Industrie-PC (IPC) ist die exakte Nachbildung eines physischen IPC, der die Verbindung der Maschine zu den Peripheriegeräten darstellt. Zentraler Bestandteil des virtuellen IPC ist das Human-Machine-Interface (HMI), das auf der VM genauso bedient werden kann wie in der Realität. Auf

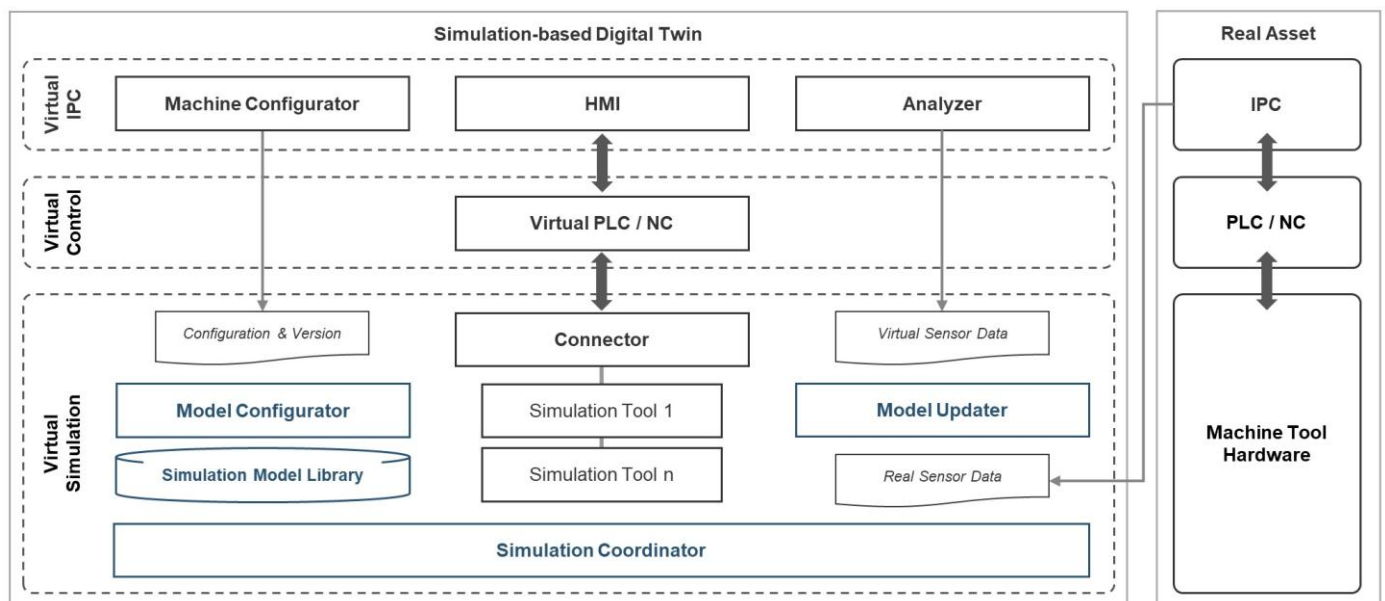


Abb. 2. Architektur für einen simulationsbasierten Digitalen Zwilling

3.2. Modell-Konfigurator

dem IPC läuft auch der Maschinenkonfigurator, der die Hardwareigenschaften der Werkzeugmaschine definiert und die Steuerungssoftware parametrisiert. Die Ausgabe dieses Maschinenkonfigurators wird als Eingabedatenquelle für die automatische Modellgenerierung verwendet. Als dritte Komponente des virtuellen IPC implementiert der Analyzer ein Messwerkzeug für die virtuellen Steuersignale, die für die Modelladaption benötigt werden.

Die virtuelle Steuerung führt die SPS- und NC-Software der Maschine aus. Er empfängt Signale von den virtuellen Sensoren der Simulationsmodelle, verarbeitet diese gemäß den HMI-Befehlen und gibt Aktorsignale an die Simulationsmodelle zurück.

Die virtuelle Simulation umfasst alle Komponenten, um die physikalische Struktur, Eigenschaften und Funktionen der Werkzeugmaschinenhardware nachzubilden. In den meisten Fällen wird dies durch die Verwendung von Verhaltens- und Kinematikmodellen in einer Co-Simulation erreicht. Zusätzliche physikbasierte Modelle könnten verwendet werden, um den Detaillierungsgrad zu erhöhen. Ein Connector-Dienst synchronisiert die verschiedenen Simulationswerkzeuge und stellt eine Verknüpfung mit der virtuellen Steuerung her. Dies erhöht die Flexibilität des DT, indem verschiedene Werkzeug- und Steuerungshersteller kombiniert werden können. Bei der kombinierten Modellgenerierung und -anpassung ist das Zusammenspiel zwischen Simulationskoordinator, Modellkonfigurator und Model Updater von wesentlicher Bedeutung und wird in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

3.1. Simulations-Koordinator

Der Simulationskoordinator fungiert als zentrales Orchestrierungswerkzeug der virtuellen Simulation. Immer wenn ein simulationsbasiertes BMK für eine reale Werkzeugmaschineninstanz initialisiert wird, lädt und installiert der Koordinator alle für die Simulation benötigten Artefakte und löst die Synchronisationssequenz aus. Während des Startvorgangs verarbeitet es das Feedback aller SW-Komponenten, greift bei Abweichungen ein und verifiziert den erfolgreichen Start der Simulation. Mit Hilfe des Simulationskoordinators kann ein simulationsbasiertes BMK bei Bedarf für einen Anwendungsfall initialisiert und bei Leerlaufzeiten abgeschaltet werden. Dadurch wird ein ressourcenintensiver Betrieb eines Always-on-BMK vermieden.

Die verschiedenen Artefakte, die auf der VM orchestriert werden müssen, werden über eine Paketverwaltungssoftware bereitgestellt. Dabei wird der eigentliche Inhalt der Artefakte abstrahiert und komprimiert. Die Paketverwaltungssoftware stellt die modularen Simulationsmodelle zur Verfügung, die für die Generierung des BMK benötigt werden, sowie alle Werkzeuge für dessen Erstellung und Betrieb. Dazu gehören die Simulationswerkzeuge, die die Modelle ausführen und berechnen, sowie der Modellkonfigurator und der Model Updater, mit denen die Simulationsmodelle mit der realen Werkzeugmaschine synchronisiert werden.

Der Modellkonfigurator ist für die automatische Generierung von Simulationsmodellen entsprechend der realen Konfiguration und Version der betrachteten Werkzeugmaschine verantwortlich. Es verwendet modulare Simulationsmodelle mit gut beschriebenen Schnittstellen, die in verschiedenen Bibliotheken gespeichert sind. Der Modellkonfigurator besteht aus einem zentralen Teil für die Auswahl und Anbindung der richtigen Modelle und mehreren werkzeugspezifischen Generatoren, die diese Teilmodelle im entsprechenden Simulationstool zu einem Gesamtmodell zusammensetzen.

Während des Betriebs ist der Modellkonfigurator dafür verantwortlich, dass die konfigurationspezifische Instanz des Simulationsmodells immer mit dem realen Asset übereinstimmt. Folglich müssen die Modelle immer dann neu konfiguriert werden, wenn strukturelle Veränderungen in der Anlage vorgenommen werden. So könnten beispielsweise bei Wartungsarbeiten Maschinenkomponenten auf eine andere Variante umgestellt oder auf eine neue Version der gleichen Variante aktualisiert werden. Darüber hinaus können Modifikationen auftreten, wenn die Werkzeugmaschine um zusätzliche Module erweitert wird, um neue Funktionen anzubieten oder die Produktivität zu verbessern. Die genannten strukturellen Änderungen werden vom Servicetechniker übernommen und in den Maschinenkonfigurator auf dem virtuellen IPC übertragen. Sobald eine neue Konfiguration registriert ist, wird der Simulationskoordinator benachrichtigt und die Modellgenerierung beginnt ohne manuelle Benutzerinteraktion.

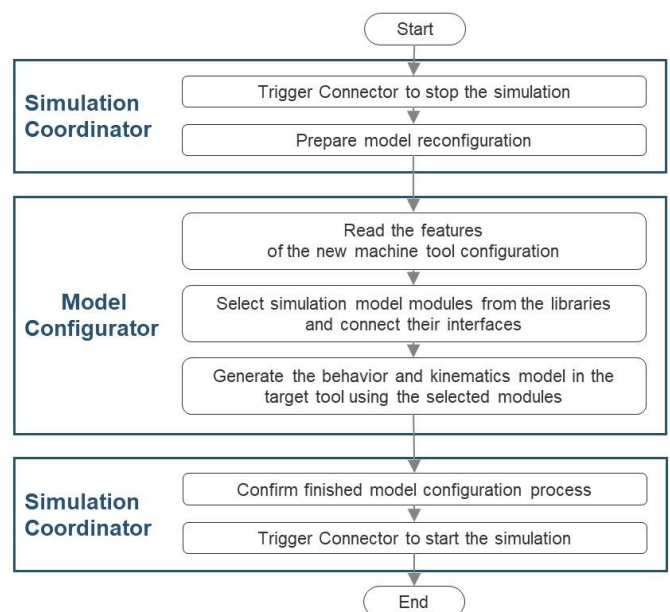


Abb. 3. Rekonfigurationsprozess der Simulationsmodelle

Abbildung 3 zeigt den Rekonfigurationsprozess des BMK. Der Simulationskoordinator initialisiert den abgebildeten Workflow, indem er den Konnektor auffordert, die Simulation zu stoppen. Wenn dies erledigt ist, werden die neuesten Modellbibliotheken auf die VM geladen, und der Modellkonfigurator wird ausgelöst, um die neue

Werkzeugmaschinenkonfiguration zu lesen. Es erfolgt die Modulauswahl, die auf den im Maschinenkonfigurator ausgewählten Merkmalen und der zugehörigen Serienversion basiert. Diese Informationen werden benötigt, um die benötigten partiellen Simulationsmodelle aus den Bibliotheken zu identifizieren. Neben dem Auswahlprozess müssen die Schnittstellen der verschiedenen Modelltypen durch den Modellkonfigurator angebunden werden.

Ist die Modellkonfiguration abgeschlossen, werden verschiedene Modellgeneratoren für die Übergabe an die Simulationswerkzeuge verwendet. Diese Generatoren ermöglichen die Verbindung zwischen den Modellbibliotheken und bestimmten Werkzeugen. Mehrere Modellgeneratoren ermöglichen die Verwendung des branchenführenden Simulationswerkzeugs für jeden Modelltyp, ohne die Einschränkung eines gemeinsam genutzten Modells. Voraussetzung ist die Bereitstellung einer entsprechenden Schnittstelle zur Modellgenerierung im jeweiligen Simulationstool. Entweder kann eine API verwendet werden, um ein Simulationsmodell direkt in ein Tool zu laden und zu ändern, oder das Tool bietet einen Importmechanismus.

Nachdem der Modellkonfigurator fertig ist, überprüft der Simulationskoordinator die Einrichtung und löst den Neustart der Simulation aus. Zu diesem Zeitpunkt ist das BMK wieder einsatzbereit und besteht aus den gleichen Modulen wie die reale Werkzeugmaschine.

3.3. Modell-Updater

Der Model Updater passt die konfigurierten Simulationsmodelle automatisch an das Verhalten der realen Werkzeugmaschine an. Der Analyzer in der realen und virtuellen Umgebung liefert die benötigten Sensordaten, indem er identisch ausgewählte reale und virtuelle SPS-Signale in bestimmten Zeitintervallen misst (Abb. 4). Um die Divergenz zwischen beiden Messzyklen zu reduzieren, wird der identische Analyzer verwendet. Dies ist nur möglich, weil das Betriebssystem und alle enthaltenen Tools des realen und virtuellen IPC die gleiche Leistung erbringen. In beiden Fällen löst der Model Updater die Messung aus und definiert, welche SPS-Signale benötigt werden. Der Prozess wird durch Ereignisse ausgelöst, die entweder von externen Anwendungen, geplanten Zeitintervallen oder einer manuellen Benutzerüberschreibung stammen. Der Aktualisierungszyklus endet, wenn die Abweichung zwischen realen und virtuellen Sensordaten einen Schwellenwert k erreicht, der für jedes Werkzeugmaschinenmodul vordefiniert ist.

Der Model Updater lässt sich in drei SW-Komponenten mit unterschiedlicher Funktionalität unterteilen (Abb. 4): Die Vergleichskomponente befasst sich mit der Vorverarbeitung der Messdaten. Es muss in der Lage sein, mit booleschen Signalen und komplexen Signalen der SPS umzugehen. In der zweiten Komponente erfolgt die Optimierung der Parameter des Simulationsmodells. Um dies zu erreichen, müssen die realen und virtuellen Sensordaten abgeglichen werden. Bei Verhaltensmodellen umfasst dieser Schritt in der Regel gängige Optimierungsmethoden wie die Kurvenanpassung. Parameter, die angepasst werden können, können die Verzögerung und

Steigung eines Rampenelements oder die Konstanten eines PID-Elements sein. In der dritten Komponente des Model Updaters werden die berechneten Parameter an die Simulationsmodelle übertragen. Dieser Schritt erfordert Mechanismen für die Online-Parameterübergabe in den Simulationswerkzeugen, da dieser Schritt während der Simulationslaufzeit stattfindet.

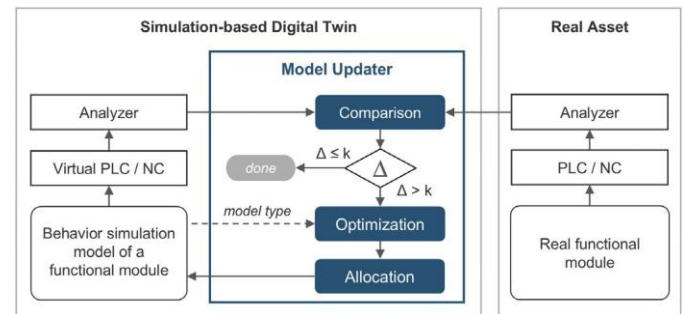


Abb. 4. Arbeitsablauf zur Modellanpassung für ein Verhaltenssimulationsmodell

4. Anwendung für eine modulare Werkzeugmaschine

Die vorgeschlagene Architektur wird bei einem Werkzeugmaschinenhersteller für die flexible Blechbearbeitung angewendet. Die Simulationsmodelle einer kombinierten Stanz-Laser-Maschine werden verwendet, um einen Proof-of-Concept durchzuführen. Diese Werkzeugmaschine kann aus einem Stanzmodul und einem Lasermodul bestehen, um beide Fertigungsverfahren für eine Vielzahl von Blechteilen zu kombinieren. Ein Plattformansatz ermöglicht die Konfiguration verschiedener Varianten, einschließlich unterschiedlicher Bearbeitungsgrößen.

4.1. Neukonfiguration von Simulationsmodellen aufgrund der Erweiterung

Um die simulationsbasierte DT der Stanz-Lasermaschine zu realisieren, werden 3D-Kinematikmodelle und Verhaltenssimulationsmodelle verwendet. Sie sind entsprechend der realen Systemarchitektur der Werkzeugmaschine modularisiert und mit kommunikativen, funktionalen und mechanischen Schnittstellen modelliert. Dem modularen Ansatz folgend, enthält jedes Teilkinematikmodell die Geometrie der enthaltenen Teile, die als starre Körper gruppiert sind, die interne Kinemattkette, Bedienelemente und mehrere mechanische Schnittstellen. Die Schnittstellen ermöglichen die Verbindung zwischen den Teilmodellen, indem sie eine Ein- oder Ausgaberrichtung, den Freiheitsgrad sowie die Position und Orientierung bereitstellen. Die mechanischen Schnittstellen werden vom Modellkonfigurator verwendet, um die Kinemattkette der gesamten Werkzeugmaschine aufzubauen. Die Verhaltensmodelle hingegen werden als kausale Blockdiagramme modelliert, die logische Elemente enthalten, um das Zeitverhalten von Werkzeugmaschinenmodulen zu beschreiben. Darüber hinaus beinhalten sie kommunikative Schnittstellen zur I/O-Schnittstelle der virtuellen Steuerung und funktionale Schnittstellen zum Austausch von Signalen mit den Kinemattkettmodellen. Die Simulationsmodelle wurden in

zwei Bibliotheken zur Verfügung gestellt und dienten als zentrale Informationsquelle des Modellkonfigurators.

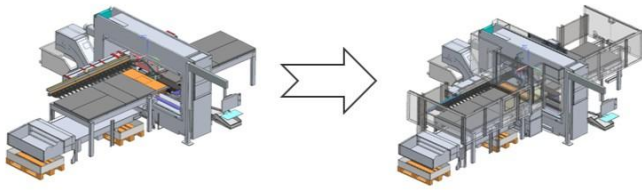


Abb. 5. Rekonfiguration des Kinematikmodells aufgrund struktureller Änderungen

453

Um den eingeführten Prozess zu validieren (Abb. 3), dient eine gängige Rekonfigurationsaufgabe als Anwendungsszenario. Während des Betriebs wird eine bestehende Stanzmaschine um ein Lasermodul, einen Düsenwechsler und die benötigte Einhausung erweitert. Da dieser Schritt mehrere Funktionen der Werkzeugmaschine ändert und neue Funktionen enthält, muss das simulationsbasierte BMK entsprechend neu konfiguriert werden. Basierend auf den beschriebenen 3D-Kinematikmodellen und Verhaltensmodellen war der Modellkonfigurator in der Lage, alle benötigten Module auszuwählen und deren Schnittstellen anzubinden. Anschließend wurden zwei entwickelte Modellgeneratoren verwendet, um die Simulationsmodelle im Zielwerkzeug zusammenzusetzen. Das Ergebnis des Konfigurationsprozesses ist in Abb. 5 dargestellt, die die strukturellen Änderungen im Kinematikmodell zeigt.

4.2. Anpassung eines Simulationsmodells auf der Grundlage von Sensordaten

Trotz des frühen Implementierungsstadiums wurden die vorgeschlagenen SW-Komponenten des Model Updaters anhand eines beispielhaften Verhaltensmodells rudimentär validiert. In der zuvor beschriebenen Konfiguration der Stanz-Laser-Maschine ist der Düsenwechsler Teil der hinzugefügten Module und bietet die Funktionalität, verschiedene Düsen während des Betriebs zu montieren. Wenn ein neuer Düsenwechselvorgang ausgelöst wird, wird die Kassette, die die Düsen für den Wechselvorgang bereitstellt, geöffnet und anschließend geschlossen, wenn der Vorgang beendet ist. Dieser Mechanismus wird über zwei SPS-Ausgangssignale gesteuert und von zwei Endlagensensoren überwacht. Das Verhaltensmodell für die Düsenwechslerkassette besteht aus einer Schnittstelle für diese vier SPS-Signale, einer Umrichterlogik und einem Rampenelement für die Motordrehzahl (Abb. 6). Er ist eng mit seinem Kinematikmodell gekoppelt, das die Bewegung visualisiert und die Positionssensoren einbezieht. Durch Variieren der Rampengeschwindigkeit des Motors ändert sich die Öffnungs- und Schließzeit der Kassette. Um eine korrekte Verhaltensübereinstimmung zwischen der realen Werkzeugmaschine und dem simulationsbasierten BMK zu erreichen, sollten die Öffnungs- und Schließzeit nahezu übereinstimmen.

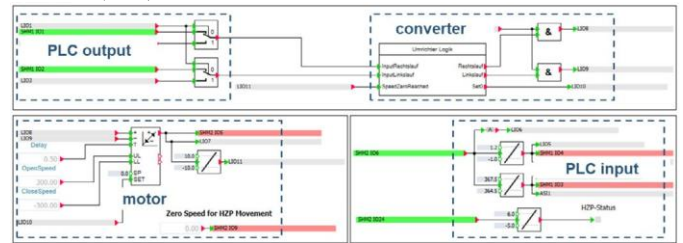


Abb. 6. Verhaltensmodell des Düsenwechslers

Für den beschriebenen Anwendungsfall der Modelladaption wurde der Model Updater verwendet. Als Datengrundlage wurden 20 Zeitmessungen mit den Analyzern an der realen Werkzeugmaschine und dem simulationsbasierten DT durchgeführt. Die Daten wurden protokolliert und mit Hilfe von CSV-Dateien an den Model Updater übertragen. Anschließend wurden die jeweiligen Messungen zusammengeführt und verglichen. Wie in Abbildung 7 dargestellt, betrug die Zeit zwischen dem Öffnungssignal (Abb. 7, blau) und der geöffneten Rückmeldung (Abb. 7, rot) 2,1 Sekunden für die reale Werkzeugmaschine und 1,2 Sekunden für das Verhaltensmodell. Daraus ergab sich ein Zeitunterschied von 0,9 Sekunden, was zeigt, dass die Kassette an der realen Werkzeugmaschine langsamer ist. Basierend auf den gemessenen Zeiten und der

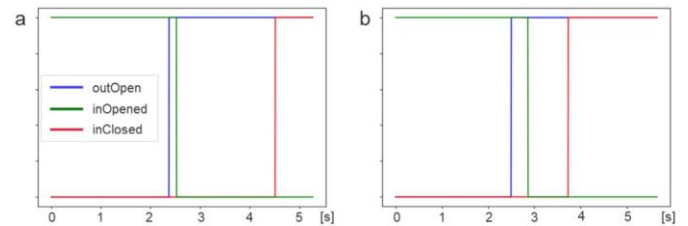


Abb. 7. Vergleich von (a) realen und (b) virtuellen SPS-Signalen

aktuellen Motordrehzahl war der Model Updater in der Lage, eine neue reduzierte Geschwindigkeit als Eingabe für den Rampenblock zu berechnen. Danach wurde eine weitere Messung durchgeführt, die einen Zeitunterschied von weniger als 0,1 Sekunden ergab.

5. Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag leistet einen Beitrag zur aktuellen Forschung zu simulationsbasierten DTs, indem er eine Architektur für die kombinierte automatische Modellgenerierung und -anpassung vorschlägt. Das Konzept basiert auf drei virtuellen Maschinen, die alle benötigten SW-Komponenten integrieren, einschließlich der Kernanwendungen: Model Configurator, Model Updater und Simulation Coordinator. Der Modellkonfigurator verwendet Bibliotheken, um automatisch ein konfigurationsspezifisches Simulationsmodell für eine Werkzeugmaschine zu generieren. Der Model Updater verwendet reale und virtuelle Sensordaten, um die Parameter des Simulationsmodells zu optimieren, was zu einem angepassten Verhalten führt. Die Architektur wurde mit einer Werkzeugmaschine für die Blechbearbeitung getestet, um ihre Anwendbarkeit zu demonstrieren.

Zukünftige Arbeiten sind erforderlich, um die Architektur weiter zu verifizieren und zu validieren, inwieweit reale Anlage und BMK synchronisiert werden können. Da sich die Implementierung in einem frühen Stadium befindet, müssen die technischen Aspekte der Architekturbausteine detailliert und in weiteren Anwendungsszenarien getestet werden. Darüber hinaus sollte sich die zukünftige Forschung auf die Frage konzentrieren, wie simulationsbasierte DTs einen Mehrwert für den Betrieb von Werkzeugmaschinen generieren können, z.B. durch die Generierung virtueller Sensordaten für die Analytik. Dieses Paper hat die technische Grundlage für diese zukünftigen Anwendungsfälle gelegt, indem es ein aktualisiertes DT ermöglicht.

Bestätigungen

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) herzlich für die Unterstützung des Forschungsprojekts "Software-Defined Manufacturing für die Automobil- und Zulieferindustrie" (SDM4FZI).

Referenzen

- [1] F. Frick, C. Ellwein, A. Lechler, M. Neubauer, A. Verl, Softwaredefinierte Fertigung: Referenzarchitektur, in: 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), IEEE, 2024, S. 1289–1295. doi:10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609236.
- [2] C. Scheifele, A. Verl, O. Riedel, Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen, Procedia CIRP 79 (2019) 397–402. doi:10.1016/j.procir.2019.02.104.
- [3] S. Schaper, A. Ast, A. Verl, Automatische Erstellung von Simulationsmodellen/Automatic generation of simulation models for scalable virtual commissioning in a virtualized environment, wt Werkstattstechnik online 114 (05) (2024) 197–204. doi:10.37544/1436-4980-2024-05-33.
- [4] C. Harle, M. Barth, A. Fay, Betriebsparallele Anpassung einer Cosimulation für diskrete Fertigungsanlagen, in: 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2021, S. 1–8. doi:10.1109/ETFA45728.2021.9613719.
- [5] S. Fur, S. Ajdinovic, A. Lechler, A. Verl, Auf dem Weg zu einer Implementierung von simulationsbasierten digitalen Zwillingen in cyber-physischen Produktionssystemumgebungen, in: 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2023, S. 1–4. doi:10.1109/ETFA54631.2023.10275580.
- [6] A. Werner, F. Schuseil, M. Hämmerle, S. Schaper, K. Holzle, Modularer digitaler Zwilling – ein Ansatz zur Generierung und Nutzung von Produktnachhaltigkeitsinformationen im Hinblick auf serviceorientierte Geschäftsmodelle, International Journal of Production Research (2024). doi:10.1080/00207543.2024.2366997.
- [7] W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn, Digitaler Zwilling in der Fertigung: Eine kategorische Literaturübersicht und -klassifizierung, IFAC PapersOnLine 51 (11) (2018) 1016–1022. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [8] R. Stark, T. Damerau, Digitaler Zwilling, in: S. Chatti, T. Tolio (Hrsg.), CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 1–8. doi:10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
- [9] N. Striffler, T. Voigt, Konzepte und Trends der virtuellen Inbetriebnahme – ein umfassender Überblick, Journal of Manufacturing Systems 71 (2023) 664–680. doi:10.1016/j.jmsy.2023.10.013.
- [10] D. Deubert, L. Klingel, A. Selig, Online-Simulation auf Maschinenebene: eine systematische Überprüfung, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 131 (3-4) (2024) 977–998. doi:10.1007/s00170-024-13065-1.
- [11] E. Westkämper, T. Baudisch, W. Schlögl, G. Frank, Automatische Modellgenerierung zur virtuellen Inbetriebnahme von spezialisierten Produktionsmaschinen, Softwaretechnik-Trends 32 (2) (2012) 82–83. doi:10.1007/BF03323491.
- [12] R. Neugebauer, U. Schob, Reduzierung des Modellerstellungsaufwands für die virtuelle Inbetriebnahme von Steuerungsprogrammen, Production Engineering 5 (5) (2011) 539–547. doi:10.1007/s11740-011-0317-y.
- [13] G. S. Martinez, S. Sierla, T. Karhela, V. Vyatkin, Automatische Generierung eines simulationsbasierten digitalen Zwillings einer industriellen Prozessanlage, in: IECON 2018 - 44. Jahreskonferenz der IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2018, S. 3084–3089. doi:10.1109/IECON.2018.8591464.
- [14] R. Rosen, J. Jakel, M. Barth, O. Stern, R. Schmidt-Vollus, Simulation und Digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus: Standpunkte und Thesen, VDI-Statusreport, VDI/VDE-Gesellschaft (2020).
- [15] S. Scheifele, A. Verl, Automatisierte Generierung von Steuerungssystemen aus der virtuellen Maschine, Procedia Technology 26 (2016) 349–356. doi:10.1016/j.protcy.2016.08.045.
- [16] B. Kaiser, A. Reichle, A. Verl, Modellbasierte automatische Generierung von digitalen Zwillingsmodellen für die Simulation rekonfigurierbarer Fertigungssysteme für den Holzbau, Procedia CIRP 107 (2022) 387–392. doi:10.1016/j.procir.2022.04.063.
- [17] A. Kampker, S. Wessel, N. Lutz, S. Heine, A. Mayr, A. Kuhn, Modellverbesserung durch reale Datenverbindung für die virtuelle Inbetriebnahme im Anlaufmanagement skalierbarer Produktionssysteme, Procedia CIRP 99 (2021) 645–649. doi:10.1016/j.procir.2021.03.087.
- [18] D. Dittler, P. Lierhammer, D. Braun, T. Müller, N. Jazdi, M. Weyrich, A novel model adaption approach for intelligent digital twins of modular production systems, in: 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2023, S. 1–8. doi:10.1109/ETFA54631.2023.10275384.
- [19] G. Lugaresi, S. Gangemi, G. Gazzoni, A. Matta, Online-Validierung simulationsbasierter digitaler Zwillinge unter Ausnutzung der Zeitreihenanalyse, in: 2022 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, 2022, S. 2912–2923. doi:10.1109/WSC57314.2022.10015346.

Dies war eine Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Combining automatic model generation and model adaption for simulation-based digital twins of machine tools“.

Sascha Schaper^{a,b,*}, Alexandra Ast^a, Alexander Verl^b.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005256>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0
International (CC BY 4.0)

S.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>