

Remote-Lernfabrik – Simulationsmodelle im Anlagenentstehungsprozess und deren Integration in die Virtuelle Inbetriebnahme

Remote Learning Factory – Simulation Models During the Plant Engineering Process and Their Integration into Virtual Commissioning

Benjamin Bastian Massow¹, Thomas Hausberger¹, Dominique Mathäus Geiger¹,
Matthias Klotz¹, Andreas Schlegel², Matthias Putz^{2,3},
benjamin.massow@mci.edu, thomas.hausberger@mci.edu, dm.geiger@mci4me.at,
m.klotz@mci4me.at, andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de,
matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

¹Department Mechatronik, MCI - Die Unternehmerische Hochschule, Innsbruck
(Austria)

²Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz
(Germany)

³Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP), Technische
Universität Chemnitz, Chemnitz (Germany)

Abstract: To meet the increasing demand for automated plants, engineers must learn how to utilize methods such as model-based engineering and virtual commissioning, where project- and experience-based knowledge transfer – as provided by learning factories – is identified as a key success factor in teaching a holistic understanding and problem-solving abilities. This paper presents an approach of a hybrid remote learning factory based on the concept of virtual commissioning, which removes the spatial and temporal access limitations of physical learning factories and extends the possibilities of existing virtual and hybrid approaches. In addition to intended competencies of their respective disciplines, engineers apply three principles using virtual commissioning, namely (i) the efficient reuse of simulation models for virtual commissioning, (ii) utilizing the principle of virtual commissioning during plant operation – in addition to plant engineering –, and (iii) a continuous adjustment of behavior models and kinematical models using data of the plant in operation.

1 Einleitung

Der Trend zu individuellen Produkten und kürzeren Produktlebenszyklen stellt Anlagen- und Sondermaschinenbauer sowie -betreiber vor Herausforderungen. Neue Anlagen müssen schneller entworfen und in Betrieb genommen, Bestandsanlagen

angepasst und optimiert werden – hierbei haben flexibel automatisierte Anlagen einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Unternehmens (Lin et al., 2019). Der fortschreitende Bedarf an automatisierten Anlagen hat insbesondere auch Auswirkungen auf die Nachfrage an Fachkompetenzen von Ingenieuren, wie z.B. zu effizientem Entwurf und Entwicklung von Technologien, zu Automatisierungstechnik und Robotik sowie zum Projektmanagement (World Economic Forum, 2020). Dies führt zu einer Veränderung des benötigten Kompetenzprofils von Ingenieuren – was durch die fortschreitende Globalisierung und den demografischen Wandel weiter verstärkt wird (Abele et al., 2017). Neben Fachkompetenzen in ihren entsprechenden Disziplinen benötigen Ingenieure ein ganzheitliches Verständnis des Anlagenentwicklungsprozesses und aller Teildisziplinen (Hernandez-de-Menendez et al., 2020) sowie adäquater Entwicklungsmethoden.

Das Konzept der Lernfabrik hat sich hier als ein probates Mittel zur Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren erwiesen. Hierbei haben sich insbesondere (i) ein projekt- und erfahrungsbasierter Wissenstransfer (Abellán-Nebot, 2020; Möller et al., 2020; Kovalenko et al., 2020; Pittich et al., 2020), eine kooperative Lernumgebung, (iii) interdisziplinäre und funktionsübergreifende Teams und (iv) die Bereitstellung effizienter (Arbeits-)Methoden (Vila et al., 2017; Madsen und Møller, 2017) als Schlüsselfaktoren herausgestellt. Die aktuell fortschreitende COVID-19-Pandemie hat nicht nur generelle negative Effekte auf die Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren (Ozadowicz, 2020; Qadir und Al-Fuqaha, 2020), sondern auch auf die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von physischen Lernfabriken. Somit gewinnen virtuelle Lernfabriken und Labore mit Fernzugriff (Grodzki et al., 2018; Trementsios et al., 2020; Cimino et al., 2019) an Bedeutung. Wohingegen bei physischen Lernfabriken mit Fernzugriff die Zugangszeiten bzw. die Anzahl der Zugriffe beschränkt ist, können virtuelle Lernfabriken in einer größeren Anzahl verfügbar gemacht werden – durch fehlende reale Komponenten können hierbei jedoch nicht alle Fachkompetenzen praxisnah vermittelt sowie Ergebnisse nicht validiert werden. Ansätze mit einer hybriden Struktur aus realen und simulierten Komponenten (Orduña et al., 2018) fokussieren sich auf Teilkomponenten und -disziplinen der Anlagenentwicklung, betrachten jedoch nicht gesamte Produktionsanlagen, lassen sich nicht selbstständig erweitern und vermitteln somit nicht den Zusammenhang der Fachdisziplinen. Lernfabriken auf Basis des Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme (VDI/VDE 3693 Blatt 1:2016-08; VDI/VDE 3693 Blatt 2:2018-12) ermöglichen die Betrachtung gesamter Produktionsanlagen, wobei jedoch insbesondere der Zeitaufwand und die Komplexität der zu erstellenden Kinematik- und Verhaltensmodelle (Lechler et al., 2019; Lee und Park, 2014) sowie deren aufwändige Integration Teilnehmer an der selbstständigen Erstellung der hierfür nötigen digitalen Anlagenmodelle und somit an der Zusammenführung verschiedener Fachdisziplinen hindert. Dies führt zu einer Einschränkung des Potentials von Lernfabriken auf Basis der Virtuellen Inbetriebnahme, welche somit häufig auf die Vermittlung einzelner Fachkompetenzen, etwa im Bereich der Automatisierungstechnik, begrenzt sind.

Dieser Beitrag präsentiert das Konzept einer hybriden Remote-Lernfabrik auf Basis des Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme und beinhaltet ein reales sowie ein entsprechendes digitales Anlagenmodell im Labormaßstab. Die Struktur dieses Ansatzes ermöglicht es Teilnehmern, das digitale Anlagenmodell selbstständig zu erweitern bzw. zu adaptieren sowie (selbst-)entwickelte Simulationsmodelle als Kinematik- und Verhaltensmodelle zu integrieren. Somit können neben dem Konzept

der Virtuellen Inbetriebnahme verschiedene zur Entwicklung von Produktionsanlagen nötige Fachkompetenzen – u.a. in den Bereichen Mechatronik, Regelungstechnik, Simulation und Modellierung, Automatisierungstechnik, Digitale Fabrik, Robotik, Datenerfassung und -analyse sowie Digitaler Zwilling – sowie modellbasierte Entwicklungsmethoden vermittelt werden. Um Teilnehmern ein innovatives Verständnis der (i) erweiterten Einsatzmöglichkeiten sowie der (ii) ganzheitlichen Integration der Virtuellen Inbetriebnahme in die modellbasierte Entwicklung sowie den Betrieb von Produktionsanlagen zu vermitteln, wenden diese folgende drei Grundsätze

- Effiziente Wiederverwendung von Simulationsmodellen aus der Anlagenentwicklung zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells
- Verwendung des digitalen Anlagenmodells außerhalb der Inbetriebnahme, insbesondere zu Adaption, Umbau und Optimierung der realen Anlage
- Kontinuierliche Anpassung des digitalen Anlagenmodells bzw. der Simulationsmodelle durch Daten der realen Anlage

auf den Ansatz des digitalen Anlagenmodells bzw. auf die erweiterte Virtuelle Inbetriebnahme an. Durch die hybride Struktur und die Möglichkeit des Fernzugriffs sind Teilnehmer in der praktischen Anwendung von Lerninhalten nicht räumlich oder zeitlich begrenzt – somit werden diese in der Erfassung von Zusammenhängen der Fachdisziplinen bzw. der Lerninhalte kontinuierlich unterstützt.

Nach der Vorstellung des Konzeptes der Remote-Lernfabrik (Kapitel 2) wird auf die technische Umsetzung der hybriden Struktur eingegangen (Kapitel 2.1), die effiziente Wiederverwendung von Simulationsmodellen zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells dargestellt (Kapitel 2.2) und dessen erweiterter Einsatz im Anlagenentstehungsprozess und -betrieb erläutert (Kapitel 2.3). Abschließend werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben (Kapitel 3).

2 Konzept der Remote-Lernfabrik auf Basis der Virtuellen Inbetriebnahme

Um die für Anlagenplanungs- und -entstehungsprozesse sowie für Anlagenbetrieb und -evolution benötigten Fachkompetenzen ganzheitlich – d.h. inklusive deren Schnittstellen und Zusammenhängen – zu vermitteln, werden diese anhand eines realen sowie entsprechendem digitalen Anlagenmodells (Abbildung 1) angewendet.

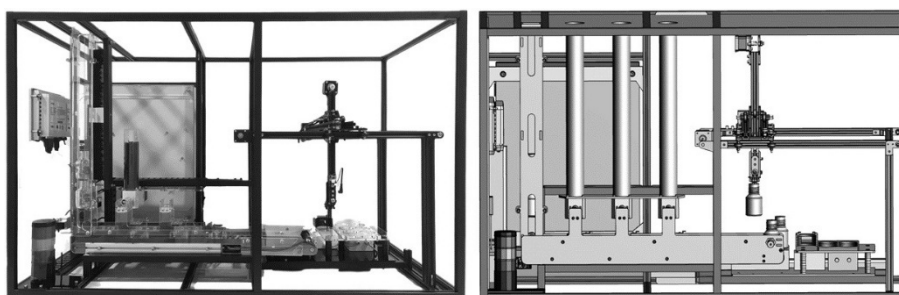


Abbildung 1: Reales Anlagenmodell (links) sowie entsprechendes digitales Anlagenmodell (rechts) der Remote-Lernfabrik.

Beide Anlagenmodelle stellen eine Abfüllanlage für Granulat im Labormaßstab dar und enthalten ein Behälterlager inklusive Vereinzeln, ein Identifikationssystem auf Basis von Radio-Frequency Identification (RFID), ein Fließband, Dosiereinrichtungen, einen kartesischen Roboter, eine Qualitäts- bzw. Gewichtskontrolle, eine Wärmebehandlungsstation sowie ein Lagersystem. Über eine Webschnittstelle oder ein Human-Machine Interface (HMI) auf Basis eines Touchscreens können Aufträge zu individuellen Granulatsmischungen erstellt werden, wobei Auftragsverwaltung, Produktkonfigurationen und Fertigungsablaufpläne über ein Manufacturing Execution System (MES) verwaltet werden. Behälter und Aufträge werden über das RFID-Identifikationssystem verfolgt bzw. identifiziert und zusammen mit Qualitäts- und Gewichtsdaten abgespeichert.

Die Anwendung des erweiterten Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme auf das digitale Anlagenmodell stellt das zentrale Element des Konzeptes der Remote-Lernfabrik dar. Nur mit diesem sind viele Inhalte bzw. Fachkompetenzen ohne nötige Umbaumaßen, ohne die Gefahr der Beschädigung sowie ohne direkten physischen Zugriff auf das reale Anlagenmodell zu vermitteln. Neben der Vermittlung von Fachkompetenzen zur modellbasierten Entwicklung von Anlagen werden drei Grundsätze durch die Anwendung auf die Virtuelle Inbetriebnahme bzw. das digitale Anlagenmodell vermittelt:

1. **Effiziente Wiederverwendung von Simulationsmodellen aus der Anlagenentwicklung zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells:** Als Hindernis zum breiten Einsatz der Methode der Virtuellen Inbetriebnahme wird insbesondere der Zeitaufwand und die Komplexität der zu erstellenden Kinematik- und Verhaltensmodelle gesehen (Lechler et al., 2019; Lee und Park, 2014). Daher werden den Teilnehmern – im weiteren Sinne der Digitalen Fabrik (Matysczok und Seewaldt, 2019; Bracht et al., 2018) – Möglichkeiten der durchgängigen Verwendung von Simulationsmodellen nähergebracht. Hierzu wenden diese insbesondere Methoden der automatischen Codegenerierung an.
2. **Verwendung des digitalen Anlagenmodells außerhalb der Inbetriebnahme, insbesondere zu Adaption, Umbau und Optimierung der realen Anlage:** Aktuell wird das Konzept der Virtuellen Inbetriebnahme insbesondere zur Vorbereitung der Inbetriebnahme von Anlagen und nur vereinzelt auch zu anderen Zwecken im Anlagenentstehungsprozess (Schauerte, 2017; Metzner et al., 2019) eingesetzt. Insbesondere der potenzielle Einsatz im Anlagenbetrieb wird nur vorgeschlagen und angedeutet. Daher werden den Teilnehmern Möglichkeiten zur Verwendung der Virtuellen Inbetriebnahme bzw. des digitalen Anlagenmodells zur Planung und Entwicklung von Adaptionen und Erweiterungen im Betrieb befindlicher Anlagen nähergebracht. Hierzu wenden diese insbesondere die unter Punkt 1. genannte Wiederverwendung von Simulationsmodellen und eine effiziente Methode zur Implementierung des gleichen Steuerungsprogramms auf realer sowie digitaler Anlage an.
3. **Kontinuierliche Anpassung des digitalen Anlagenmodells bzw. der Simulationsmodelle durch Daten der realen Anlage:** Zur der unter Punkt 2. genannten Verwendung des Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme zur Planung und Entwicklung von Adaptionen und Erweiterungen im Betrieb befindlicher Anlagen muss die digitale Anlage das gleiche Verhalten wie die reale Anlage aufweisen. Da die Kinematik- und Verhaltensmodelle zumeist durch analytische Modellierung unter Verwendung theoretischer Parameter (etwa aus Datenblättern)

oder auf Grund von statistischen Annahmen (etwa aus ähnlichen Anlagen) entstanden sind, und zudem ständige Änderungen der Anlagen stattfinden, sollten diese – im weiteren Sinne des Digitalen Zwillings (Negri et al., 2017; Shen et al., 2020) – kontinuierlich an das Verhalten der realen Anlagenkomponenten angepasst werden. Die Teilnehmer wenden daher Methoden der datenbasierten Modellentwicklung bzw. -anpassung an. Hierzu identifizieren diese die nötigen Daten, extrahieren diese aus Datenbanken oder zeichnen diese neu auf, passen Simulationsmodelle entsprechend an und implementieren diese mit unter Punkt 1. genannten Methoden wieder auf dem digitalen Anlagenmodell.

Somit vermittelt dieser Ansatz der Remote-Lernfabrik den Teilnehmern neben fachlichen Kompetenzen ein innovatives Verständnis der (i) erweiterten Einsatzmöglichkeiten sowie der (ii) ganzheitlichen Integration der Virtuellen Inbetriebnahme in die Entwicklung sowie den Betrieb von Produktionsanlagen.

2.1 Struktur der Remote-Lernfabrik

Abbildung 2 zeigt die hybride Struktur der Remote-Lernfabrik. Im Gegensatz zu physischen Lernfabriken unterliegt dieser Ansatz keinen räumlichen und zeitlichen Zugangsbegrenzungen. In Ergänzung zum realen Anlagenmodell kann auf eine skalierbare Anzahl digitaler Anlagenmodelle zugegriffen werden. Durch eine einfach zu bedienende Werkzeugkette auf Basis automatischer Codegenerierung können Teilnehmer alle in der Anlagenentwicklung entstandenen Simulationsmodelle als Kinematik- und Verhaltensmodelle in das digitale Anlagenmodell integrieren (1). Im Sinne der Virtuellen Inbetriebnahme kann das gleiche Steuerungsprogramm – durch Anbindung an eine einheitliche Schnittstelle – sowohl zur Steuerung des digitalen (2) als auch des realen Anlagenmodells (3) verwendet werden.

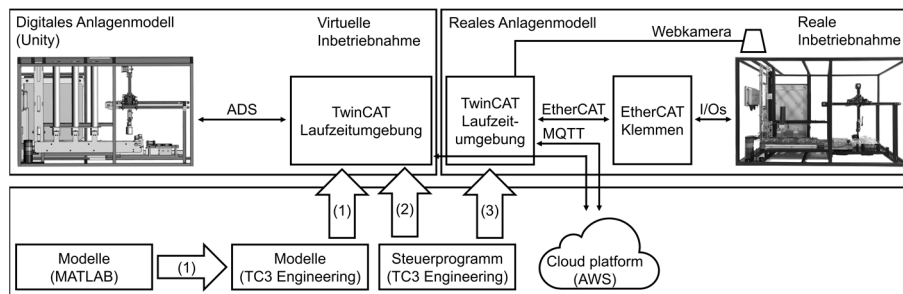


Abbildung 2: Struktur der Lernfabrik mit digitalem und realem Anlagenmodell.

Das reale Anlagenmodell wird durch eine software-emulierte speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) – im Speziellen durch eine Beckhoff TwinCAT 3 Echtzeit-Laufzeitumgebung (XAR) – gesteuert, welche auf einem Industrie-PC läuft. Sensoren und Aktoren der Anlage wie Schrittmotoren, Gleichstrommotoren, RFID-Leser, digitale und analoge Ein- und Ausgänge sowie serielle Geräte sind über entsprechende Klemmen angeschlossen. Diese sind über das Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) Echtzeit-Kommunikationsprotokoll an die Laufzeitumgebung angebunden. Das digitale Anlagenmodell wird – analog zur realen Anlage – vom gleichen Steuerungsprogramm gesteuert. Da die Interprozesskommunikation (IPC) sowie die Ausführung der Simulationsmodelle einen Einfluss auf die Realisierung einer harten Echtzeit haben

(Süß et al., 2016), werden die Verhaltens- bzw. Simulationsmodelle der Komponenten – mit entsprechend kürzeren Zykluszeiten – auch in der Echtzeit-Laufzeitumgebung ausgeführt. Die Visualisierung der digitalen Anlage läuft in der Laufzeitumgebung Unity und enthält kinematisierte Konstruktionsdateien, virtuelle Sensoren sowie – zur Simulation des Stauverhaltens – eine physikbasierte Simulation. Beide Laufzeitumgebungen laufen auf einer virtuellen Maschine und kommunizieren über das Automation Device Specification (ADS) Protokoll. Über diese Struktur kann eine sowohl (a) einfach für Teilnehmer zu bedienende als auch (b) echtzeitfähige Umsetzung der Virtuellen Inbetriebnahme realisiert werden.

Durch die hybride Struktur dieses Ansatzes können die Anwendungs- und Adaptionmöglichkeiten bestehender virtueller und hybrider Ansätze erweitert, hierdurch Probleme simuliert und u.a. eine problembasierte Lernstrategie (Tisch et al., 2016) angewendet werden. Hierbei wird (i) ein Problem in das digitale Anlagenmodell eingebracht – z.B. unvorhergesehene Störgrößen in Regelkreisen –, (ii) den Teilnehmern entsprechende modellbasierte Lösungsmethoden vermittelt, (iii) das Problem in der digitalen Anlage gelöst und auf der realen Anlage implementiert sowie (iv) die angewendeten Lösungsmethoden diskutiert und reflektiert.

2.2 Wiederverwendung von Simulationsmodellen aus der Anlagenentwicklung zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells

Im weiteren Sinne des Begriffs der Digitalen Fabrik nimmt die Anwendung verschiedener (Simulations-)Modelle – sowie insbesondere deren Wiederverwendung zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells – eine zentrale Rolle im Ansatz der Remote-Lernfabrik ein. Durch eine einfach zu bedienende Struktur und Werkzeugkette wird der Zeitaufwand und die Komplexität zur Integration der Kinematik- und Verhaltensmodelle für Teilnehmer stark herabgesetzt und ihnen dadurch die Möglichkeiten der durchgängigen Verwendung von Simulationsmodellen nähergebracht. Hierdurch erfahren sie – neben fachspezifischen modellbasierten methodischen Vorgehensweisen – das Innovationspotential ganzheitlicher modellbasierter Ansätze.

Um hierzu effektiv – bereits in der Anlagenentwicklung verwendete – Simulationsmodelle in das digitale Anlagenmodell integrieren zu können, wird ein besonderer Fokus auf die Verwendung von Methoden zur automatischen Codegenerierung gelegt. Hierzu werden die zur modellbasierten Entwicklung erstellten Simulationsmodelle in Verhaltens- oder Kinematikmodelle überführt. Mit Hilfe automatischer Codegenerierung werden diese in entsprechenden C/C++ Code bzw. entsprechende TwinCAT Object Model (TcCOM) überführt und innerhalb der TwinCAT 3 Echtzeit-Laufzeitumgebung ausgeführt. Hierdurch ist es Teilnehmern möglich, die Kinematik- und Verhaltensmodelle effektiv zu erstellen bzw. das digitale Anlagenmodell selbstständig zu ändern, zu erweitern und zu optimieren.

Abbildung 3 zeigt am Beispiel des modellbasierten Entwurfs der Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Fließbandantriebes die Verwendung o.g. Vorgehensweise zur Wiederverwendung des dynamischen Fließbandmodells bzw. dessen Integration in die Virtuelle Inbetriebnahme. Die Teilnehmer setzen hierfür folgende Schritte um: (1) Analytische Modellierung des Fließbandes, (2) modellbasierter Reglerentwurf in MathWorks MATLAB, (3) Model-in-the-Loop

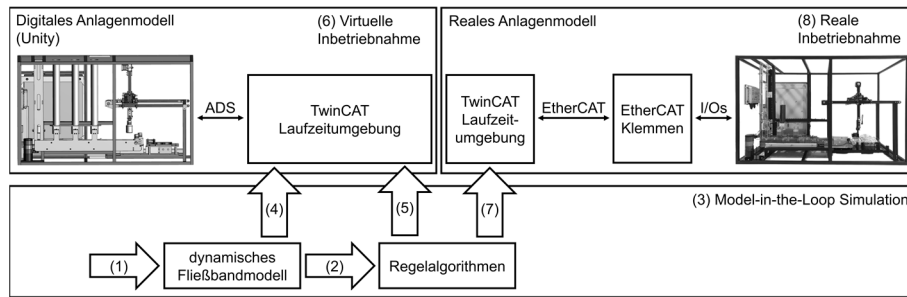


Abbildung 3: Wiederverwendung des zur modellbasierten Auslegung der Positions- und Geschwindigkeitsregelung erstellten dynamischen Fließbandmodells als Verhaltensmodell der Virtuellen Inbetriebnahme bzw. des digitalen Anlagenmodells.

(MiL) Simulation durch Implementierung des Fließbandmodells sowie der Positions- und Geschwindigkeitsregelung in MathWorks Simulink, (4) Überführung des Fließbandmodells in ein entsprechendes TcCOM und Implementierung der Verhaltensmodelle innerhalb der Echtzeit-Laufzeitumgebung des digitalen Anlagenmodells, (5) Überführung der Regelalgorithmen in entsprechende TcCOM und Integration in die zu testende Steuersoftware innerhalb der Echtzeit-Laufzeitumgebung, (6) Virtuelle Inbetriebnahme bzw. Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation und iterative Optimierung der Regelalgorithmen, (7) Integration der Regelalgorithmen in Steuersoftware bzw. Echtzeit-Laufzeitumgebung des realen Anlagenmodells und (8) Inbetriebnahme des realen Anlagenmodells bzw. Testen der Regelalgorithmen in Echtzeit gegen das reale Fließband über das EtherCAT Protokoll.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Model-in-the-Loop (MiL) Simulation zum Test der modellbasierten Auslegung der Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Fließbandes sowie die Wiederverwendung des Simulationsmodells als Verhaltensmodell in der Virtuellen Inbetriebnahme.

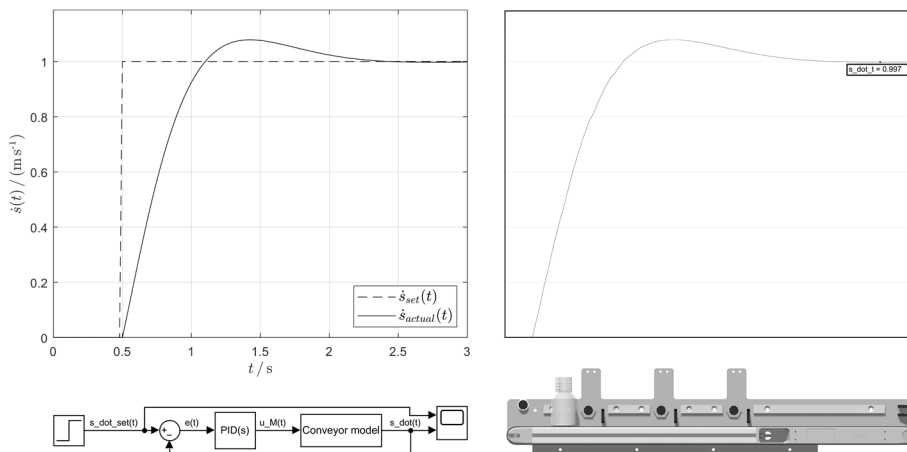


Abbildung 4: Wiederverwendung des Simulationsmodells des Fließbandes: Model-in-the-Loop (MiL) Simulation zur modellbasierten Auslegung der Positions- und Geschwindigkeitsregelung (links) sowie Integration als Verhaltensmodell der Virtuellen Inbetriebnahme bzw. des digitalen Anlagenmodells (rechts).

2.3 Verwendung des digitalen Anlagenmodells in Anlagenentwicklung und -betrieb

Abbildung 5 zeigt die erweiterte Verwendung der Virtuellen Inbetriebnahme in der Remote-Lernfabrik. Teilnehmer (1) integrieren Simulationsmodelle der modellbasierten Entwicklung als Verhaltens- und Kinematikmodelle in das digitale Anlagenmodell und verwenden dieses zur Virtuellen Inbetriebnahme, (2) modellbasiert entwickelte Komponenten werden auf dem digitalen Anlagenmodell getestet und in die reale Anlage integriert, (3) das Steuerungsprogramm wird am digitalen Anlagenmodell getestet, optimiert und an der realen Anlage implementiert, (4) Verhaltens- und Kinematikmodelle des digitalen Anlagenmodells werden wiederholt durch Daten der realen Anlage angepasst, um (5) Anlagenoptimierungen und (6) Anlagenänderungen am digitalen Anlagenmodell zu entwickeln, zu testen und wiederum an der realen Anlage zu implementieren. Somit wird Teilnehmern durch die Arbeit an der Remote-Lernfabrik insbesondere ein innovatives Verständnis der (i) Einsatzmöglichkeiten sowie der (ii) ganzheitlichen Integration der Virtuellen Inbetriebnahme in Entwicklung sowie Betrieb von Produktionsanlagen vermittelt.

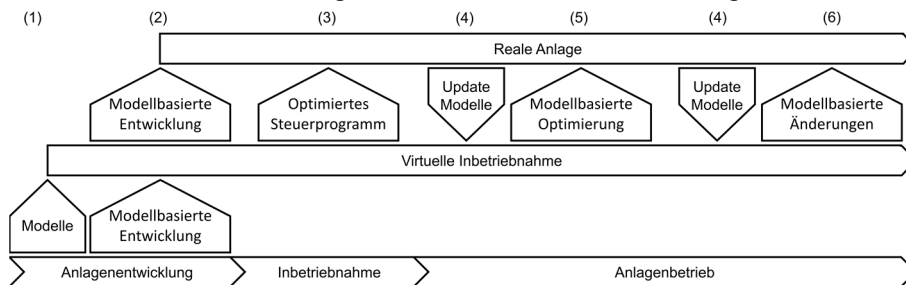


Abbildung 5: Verwendung der Virtuellen Inbetriebnahme in der Remote-Lernfabrik.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Ingenieure im Anlagen- und Sondermaschinenbau benötigen ein ganzheitliches Verständnis aller beteiligten Fachkompetenzen sowie adäquater Entwicklungsmethoden. Hierbei hat sich das Konzept der Lernfabrik als ein probates Mittel zur Aus- und Weiterbildung erwiesen. Der vorgestellte Ansatz einer hybriden Remote-Lernfabrik auf Basis des Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme hebt die räumlichen und zeitlichen Zugangsbegrenzungen physischer Lernfabriken auf und erweitert die Anwendungs- und Adaptionmöglichkeiten bestehender virtueller und hybrider Ansätze. Somit kann Ingenieuren durch die Anwendung von drei Grundsätzen – (i) effiziente Wiederverwendung von Simulationsmodellen zur Erstellung des digitalen Anlagenmodells, (ii) Verwendung des digitalen Anlagenmodells außerhalb der Inbetriebnahme sowie (iii) kontinuierliche Anpassung des digitalen Anlagenmodells durch Daten der realen Anlage – ein innovatives Verständnis der erweiterten Einsatzmöglichkeiten sowie der ganzheitlichen Integration des Konzeptes der Virtuellen Inbetriebnahme in die modellbasierte Entwicklung sowie den Betrieb von Produktionsanlagen vermittelt werden.

Zur breiteren Integration des Ansatzes der Virtuellen Inbetriebnahme sollten Konzepte zum standardisierten Austausch von Bauteil- und Komponentenbibliotheken entwickelt und in industrielle Softwareumgebungen integriert werden.

Literatur

- Abele, E.; Chryssolouris, G.; Sihm, W.; Metternich, J.; ElMaraghy, H.; Seliger, G.; Sivard, G.; ElMaraghy, W.; Hummel, V.; Tisch, M.; Seifermann, S.: Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals* 66 (2017) 2, S. 803–826.
- Abellán-Nebot, J.V.: Project-based experience through real manufacturing activities in mechanical engineering. *International Journal of Mechanical Engineering Education* 48 (2020) 1, S. 55–78.
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Einleitung, Definition und Stand der Umsetzung sowie der Bezug zu Industrie 4.0. In: Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (Hrsg.): *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018, S. 1–25.
- Cimino, C.; Negri, E.; Fumagalli, L.: Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry* 113 (2019), S. 103130.
- Grodotzki, J.; Ortelt, T.R.; Tekkaya, A.E.: Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0. *Procedia Manufacturing* 26 (2018), S. 1349–1360.
- Hernandez-de-Menendez, M.; Escobar Díaz, C.A.; Morales-Menendez, R.: Engineering education for smart 4.0 technology: a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 14 (2020) 3, S. 789–803.
- Kovalenko, I.; Balta, E.C.; Qamsane, Y.; Koman, P.D.; Zhu, X.; Lin, Y.; Tilbury, D.M.; Morley Mao, Z.; Barton, K.: Developing the Workforce for Next-Generation Smart Manufacturing Systems: A Multidisciplinary Research Team Approach. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems* 5 (2020) 2.
- Lechler, T.; Fischer, E.; Metzner, M.; Mayr, A.; Franke, J.: Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 1125–1130.
- Lee, C.G.; Park, S.C.: Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. *Journal of Computational Design and Engineering* 1 (2014) 3, S. 213–222.
- Lin, B.; Wu, W.; Song, M.: Industry 4.0: driving factors and impacts on firm's performance: an empirical study on China's manufacturing industry. *Annals of Operations Research* (2019).
- Madsen, O.; Møller, C.: The AAU Smart Production Laboratory for Teaching and Research in Emerging Digital Manufacturing Technologies. *Procedia Manufacturing* 9 (2017), S. 106–112.
- Matysczok, C.; Seewaldt, M.: VDI Fachausschuss Digitale Fabrik - Darstellung der aktuellen Aktivitäten und Richtlinien. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2019*, 2019, S. 39–48.
- Metzner, M.; Krieg, L.; Merhof, J.; Ködel, T.; Franke, J.: Intuitive Interaction with Virtual Commissioning of Production Systems for Design Validation. *Procedia CIRP* 84 (2019), S. 892–895.
- Möller, D.P.; Jehle, I.A.; Hou, W.: Engineering Education in Intelligent Manufacturing. In: *2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, Chicago, IL, USA, 31.07.2020 - 01.08.2020, 2020, S. 7–12.

- Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* 11 (2017), S. 939–948.
- Orduña, P.; Garcia-Zubia, J.; Rodriguez-Gil, L.; Angulo, I.; Hernandez-Jayo, U.; Dziabenko, O.; López-de-Ipiña, D.: The WebLab-Deusto Remote Laboratory Management System Architecture: Achieving Scalability, Interoperability, and Federation of Remote Experimentation. In: Auer, M.E.; Azad, A.K.M.; Edwards, A.; Jong, T. de (Hrsg.): *Cyber-Physical Laboratories in Engineering and Science Education*. Cham: Springer International Publishing 2018, S. 17–42.
- Ożadowicz, A.: Modified Blended Learning in Engineering Higher Education during the COVID-19 Lockdown—Building Automation Courses Case Study. *Education Sciences* 10 (2020) 10, S. 292.
- Pittich, D.; Tenberg, R.; Lensing, K.: Learning factories for complex competence acquisition. *European Journal of Engineering Education* 45 (2020) 2, S. 196–213.
- Qadir, J.; Al-Fuqaha, A.: A Student Primer on How to Thrive in Engineering Education during and beyond COVID-19. *Education Sciences* 10 (2020) 9, S. 236.
- Schauerte, H., 2017: Plug & Work Konzept der SMS group – Schnelle, professionelle Inbetriebnahme mit Hilfe von Prozess- und Produktionssimulation im klassischen Anlagenbau. *MATLAB EXPO 2017*, Juni 2017.
- Shen, W.; Hu, T.; Yin, Y.; He, J.; Tao, F.; Nee, A.: Digital twin based virtual commissioning for computerized numerical control machine tools. In: *Digital Twin Driven Smart Design*: Elsevier 2020, S. 289–307.
- Süß, S.; Magnus, S.; Thron, M.; Zipper, H.; Odefey, U.; Fassler, V.; Strahilov, A.; Klodowski, A.; Bar, T.; Diedrich, C.: Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. In: *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Berlin, Germany, 06.09.2016 - 09.09.2016, 2016, S. 1–9.
- Tisch, M.; Hertle, C.; Abele, E.; Metternich, J.; Tenberg, R.: Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (2016) 12, S. 1355–1375.
- Trentsios, P.; Wolf, M.; Frerich, S.: Remote Lab meets Virtual Reality – Enabling immersive access to high tech laboratories from afar. *Procedia Manufacturing* 43 (2020), S. 25–31.
- Vila, C.; Ugarte, D.; Ríos, J.; Abellán, J.V.: Project-based collaborative engineering learning to develop Industry 4.0 skills within a PLM framework. *Procedia Manufacturing* 13 (2017), S. 1269–1276.
- VDI/VDE 3693 Blatt 2:2018-12: Virtuelle Inbetriebnahme - Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen.
- VDI/VDE 3693 Blatt 1:2016-08: Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Glossar.
- World Economic Forum: *The Future of Jobs Report 2020*. Geneva, Switzerland 2020.