

Systems Engineering als Basis für konstruktionsbegleitende Zusammenarbeit

Eva Russwurm^{1*}, Florian Faltus¹, Joerg Franke¹

¹Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, FAU Erlangen-Nürnberg, Egerlandstraße 7-9, 91058 Erlangen, Deutschland; *eva.russwurm@faps.fau.de

Abstract. Der Ansatz des Systems Engineering (SE) unterliegt einem stetigen Wandel und wird bereits in vielen Unternehmen im Rahmen der Produktentwicklung eingesetzt. Dieser Ansatz, der in Zusammenarbeit, Effizienz und Produktqualität, sowie Kosten viele Vorteile bietet, kann den Herausforderungen der Industrie 4.0 begegnen. Zur Umsetzung des SE werden verschiedene Werkzeuge benötigt. Dazu gehören neben einem PLM-System zur entwicklungsbegleitenden Zusammenarbeit auch verschiedene Simulationsumgebungen, die zu einer Co-Simulation zusammengeführt werden. Eine Möglichkeit, hierfür Kommunikation zu ermöglichen, bietet hier die Verwendung des Kommunikationsstandards OPC UA. Die Anwendung des SE-Ansatzes soll anhand von zwei Anwendungsbeispielen dargestellt werden, nämlich anhand einer ganzheitlichen Simulation einer Produktionsanlage mit Energiemanagement und in einer Lehrveranstaltung.

Einleitung

Die Automatisierung von Produktionssystemen ist durch eine hohe technische Komplexität und starke Interdisziplinarität gekennzeichnet. Die Planung einer Industrieanlage erfordert die Koordination und Integration verschiedener Fachdisziplinen wie Mechanik, Prozess- und Elektrotechnik oder Software in Bezug auf das Vorgehen und die Arbeitsergebnisse.

In diesem Zusammenhang stellt die Automatisierung als Bindeglied das korrekte Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen sicher. Durch den Ansatz Industrie 4.0 und der damit verbundenen Zunahme der IT-Durchdringung in der produzierenden Industrie steigt die Relevanz der Digitalisierung der Fertigung deutlich.

Dies ist schon während der Produktentwicklung ersichtlich, denn bereits hier arbeiten die Ingenieure unterschiedlicher Disziplinen zusammen im Rahmen des Systems Engineering. Hierzu braucht es eine Datenplattform, über welche eine Konsistenz der Daten sichergestellt und Zugriffe ermöglicht werden, sowie eine Möglichkeit des Austauschs über alle Disziplinen hinweg.

In diesem Artikel soll zunächst ein Überblick über die Methodik des Durchgängigen Engineerings gegeben

werden und die Entwicklungsmethodik nach dem V-Modell eingeordnet werden. Im Anschluss daran soll aufgezeigt werden, wie die einzelnen Disziplinen synchron an einer Simulation teilnehmen und damit eine virtuelle Inbetriebnahme gelingen kann. Schließlich soll die Anwendung des durchgängigen Engineerings anhand von zwei Anwendungsfällen dargestellt werden; zum einen der methodische Ansatz in der Lehre mit Studierenden als Basis für zukünftige Zusammenarbeit im Unternehmen und zum anderen der Aufbau einer Co-Simulation für eine automatisierte Produktionsanlage in einem Industrieunternehmen.

1 Durchgängiges Engineering

Im modernen Maschinenbau gibt es kaum noch rein mechanische Produkte. Der Anteil an Elektronik und Software bzw. Maschinensteuerung im Produktentwicklungsprozess (PEP) steigt nicht nur kontinuierlich an, siehe Abbildung 1, sondern wird auch immer komplexer. Während in den 1980er Jahren eine Industrieanlage vorwiegend aus Mechanik bestand und die Mechatronisierung eher unterstützendes Beiwerk bildete, so ist es heutzutage die Software, die maßgeblich die Funktionalitäten einer Anlage bestimmt. Die Gründe hierfür entstehen aus den Anforderungen des Kunden wie Prozessflexibilisierung und Vernetzung aller Anlagen im Betrieb, um einfache Bedienung und Beobachtung der Produktion zu ermöglichen. [1]

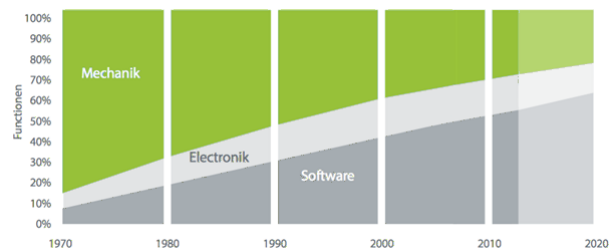


Abbildung 1: Anteil der Einzeldisziplinen im PEP [1]

Daher erfordert bereits eine erfolgreiche Produktentwicklung ein erfolgreiches Zusammenwirken der verschiedenen Kompetenzfelder Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik/Software Engineering. Diese Komplexität kann nicht mehr durch eine kleine Anzahl an Personen abgedeckt werden, sodass Entwicklungsteams interdisziplinärer und größer aufgestellt sein müssen, als dies in der Vergangenheit der Fall war. Dies führt unweigerlich dazu, dass die Gruppen auch an verschiedenen Orten in unterschiedlichen Zeitzonen zusammenarbeiten müssen.

1.1 Definition mechatronischer Systeme

Der Begriff „Mechatronik“ ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik und bezeichnet „das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse, sowie bei der Prozessgestaltung“ [2]. Das interdisziplinäre Zusammenspiel einer hohen Anzahl verkoppelter Elemente, Schnittstellen und Wechselwirkungen der mechatronischen Module untereinander macht die Anwendung eines ganzheitlichen, disziplinübergreifenden Ansatzes zur Systemdefinition unabdingbar. Hierzu zählen auch Kommunikation und Kooperation zwischen den einzelnen Fachbereichen [3].

Aus diesem Grund kommen für mechatronische Systeme immer häufiger neue Entwicklungsmethoden, die auf dem Grundgedanken des Systems Engineering (SE) basieren, zum Einsatz.

1.2 Strategie des Durchgängigen Engineerings

Die drei Leitgedanken des Simultaneous Engineering sind Parallelisieren, Standardisieren und Integrieren. Dabei bedeutet Parallelisieren zeitliche Optimierung von Teilprozessen, die unabhängig voneinander sind und bearbeitet werden können. Im Bereich der Standardisierung ist es das vorrangige Ziel, Mehr- und Wiederholarbeiten zu vermeiden. Dies gelingt vor allem durch eine vorgegebene einheitliche Gestaltung von Modulen, Komponenten, Phasen und Schnittstellen zwischen Projekten und Abteilungen. Das Ziel der Integration ist es, die Schnittstellen zu Nahtstellen zu machen. Sie dienen der Zusammenführung aller Produktinformationen.

1.3 Multidisziplinärer Ansatz und Parallelisierung von Entwicklungstätigkeiten

Diesem multidisziplinären Aufbau des Modells liegt ein iteratives Vorgehen zugrunde. Integrationsfortschritt und Synchronisationspunkte werden dabei fortwährend geprüft und garantieren eine erfolgreiche Produktentwicklung, bedingt durch frühzeitige Fehlervermeidung.

Weiterhin kann durch die Parallelisierung anstelle einer sequentiellen Produktentwicklung wertvolle Zeit eingespart werden, was sich positiv auf das geforderte Zeitziel (Time-to-market) auswirkt. Damit dieses Ziel eingehalten werden kann, müssen bestimmte Methoden, wie beispielsweise Wiederverwendung innerhalb des SEs angewandt werden [4].

Folglich ist die Verwendung von SE zur Unterstützung des aufkommenden Wandels zu individuellen Produkten als Lösungsansatz zu betrachten.

2 Produktentwicklung entlang des V-Modells

2.1 Anforderung- und Lösungsspezifikation

Ein weiteres Konzept, welches vor allem im Bereich des Requirement Engineering, d.i. die Entwicklung der Anforderungen aus abstrakten Vorgaben des Kunden, genutzt wird, ist der RFLP-Ansatz [5]. In deutschsprachiger Literatur auch AFLP-Ansatz genannt, beschreibt es die Unterteilung in Anforderungen/ Requirements, Funktionen, Logik und physisches Modell. Durch diese vier Bereiche kann das Ziel des Konzepts, nämlich der Entwurf einer einheitlichen Struktur, die auf alle Disziplinen angewendet werden kann, verfolgt werden. Diese interdisziplinäre Zusammenführung resultiert in einer zunächst disziplinunabhängigen Beschreibung des Systems und nimmt eine außerordentliche Rolle besonders in den frühen Entwicklungsphasen von multidisziplinären Produkten ein.

Das physikalische Modell beschreibt die Ausarbeitung der Systemarchitektur durch die Ergänzung physikalischer Eigenschaften unter dem Einsatz von disziplinspezifischen Methoden und IT-Anwendungen [6].

2.2 Mechanik-, Elektrik- und Softwareentwicklung

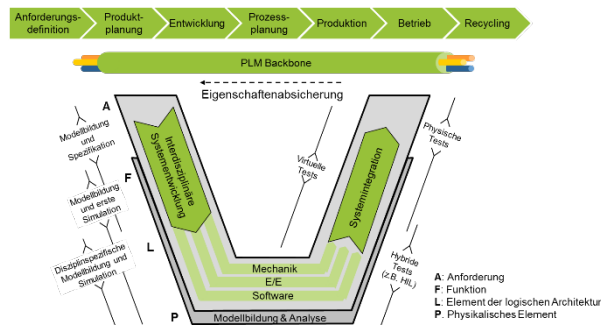


Abbildung 2: MVPE Vorgehensmodell auf Basis VDI 2206 [3]

Im Prozess des Systems Engineering folgt die mechanische Konstruktion auf die Lösungsspezifikation. Simultan mit ihr laufen die Elektrokonstruktion sowie die Softwareentwicklung, wie aus Abbildung 2 ersichtlich. Nach Abschluss der Konstruktionsphase, derer sie angehört, folgt die Realisierung sowie die virtuelle und die tatsächliche Inbetriebnahme [3].

Um nun einen durchgängigen Informationsfluss und ein disziplinübergreifend stimmiges Produktmodell zu ermöglichen, besitzt die jeweilige Disziplin naturgemäß Schnittstellen mit anderen Disziplinen (Mechanik, Elektrik und Software). Dazu müssen eigens neue Ansätze der Produktentwicklung definiert werden [7]. Die Schnittstellen werden vorwiegend durch das PLM-System abgebildet.

2.3 Weiterentwicklung zum modellbasierten Systems Engineering

Ein möglicher Ansatz ist das Modellbasierte Systems Engineering (MBSE), welches den Übergang des dokumenten- zum modellbasierten Systems Engineerings beschreibt und die MVPE mit dem Systems Engineering vereint. Es handelt sich hierbei um eine „formalisierte Anwendung der Modellierung, um die Aufnahme von Systemanforderungen, -design, -analyse, Verifikation und Validierung ab der Konzeptphase über die Entwicklungsphase bis zu späteren Lebenszyklusphasen zu unterstützen“ [8]. In diesem Fall kommt der Entwurfsphase eine besondere Bedeutung zu, da hier das Systemmodell erstellt wird, welches sämtliche Produktlebenszyklusanforderungen des Produktes beinhaltet.

Bereits während des Produktentwicklungsprozesses entstehen vollständig digitale Produktmodelle (Anlagenmodelle), die eine Verknüpfung der physischen Produkte

mit den zugehörigen virtuellen Modellen aus der Produktentwicklung ermöglichen. Damit gelingt die in der Industrie 4.0 geforderte Vernetzung realer Produktionseinrichtungen mit den in der Produktplanung entstandenen digitalen Abbildungen [10], die dazu beitragen, dass virtuelle und reale Welt miteinander verschmelzen.

Im Rahmen des MBSE entsteht für jedes Produkt ein holistisches und konsistentes Datenmodell über den gesamten Produktlebenszyklus, das enorme Produktivitäts-, Effizienz- und Qualitätssteigerungen ermöglicht, da reale und digitale Prozesse überlappend stattfinden. Beispielsweise wird neben dem Produkt auch die Fertigung digital geplant und durch frühzeitige Simulationen abgebildet und validiert, was zu einer um bis zu 50% verringerten Markteinführungszeit neuer Produkte führt [11]. Das durchgängige Datenmodell ermöglicht durch die Konsistenz Flexibilität im Produktionsprozess, die eine Individualisierung von Produkten ermöglicht.

2.4 Eingliederung des MBSE in den Stage-Gate Prozess und das Quality Gate Modell

Das VDMA Quality Gate-Modell entspricht einem Stage-Gate Prozess nach dem Vorbild Coopers [9]. Er unterteilt Innovations- bzw. Produktentwicklungsprozesse in verschiedene Phasen (englisch: stages), zu welcher jeweils ähnliche Aktivitäten zusammengefasst werden. Die einzelnen Phasen enden mit einer Qualitätskontrolle (Gate), das nur überschritten werden kann, wenn die definierten Anforderungen erfüllt sind. Ausschlaggebend ist hierzu die Einschätzung des Managements. Ein Vorteil dieser Methode ist in der Strukturierung langer Prozesse, die dadurch kontrollier- und steuerbar werden, zu finden. Der regelmäßige Abgleich des Projektteams mit dem Management dient außerdem der Information aller Stakeholder und bezieht schon früh im Prozess interdisziplinäre Unternehmensbereiche (Marketing, Vertrieb etc.) ein. Insgesamt führen Stage-Gate Prozesse zu höherer Qualität und mehr Innovationen [9]; [12].

Das Vorgehen weist viele Parallelen zum V-Modell der VDI Norm 2206 auf und beide Modelle umfassen nahezu die gleichen Schritte. Die Beschreibung der Phaseninhalte, Deliverables und Gate-Kriterien machen aus dem allgemeinen V-Modell einen steuerbaren Prozess. Hier wird jedoch noch nicht modellbasiert gearbeitet, denn die größte Herausforderung ist die Realisierung der Durchgängigkeit im PEP mittels konsistenter Systemmodelle.

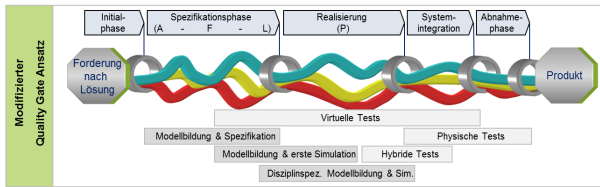


Abbildung 3: Modellbasierter Quality Gate Ansatz

Abbildung 3 stellt den veränderten Quality-Gate Ansatz dar. Die türkisen, gelben und roten Bänder repräsentieren hier ebenso wie im VDMA Quality-Gate Modell die klassischen Disziplinen Mechanik, Elektronik und Software, welche weiterhin als parallel verlaufende Stränge bearbeitet werden. [13]; [14]

Im Rahmen der Weiterentwicklung werden Anforderungs- und Lösungsspezifikationsphase zu einer einzigen Spezifikationsphase zusammengefasst, so dass ein ganzheitliches Systemmodell aus Systemanforderungen, Funktionen und Logik (A, F, L) erstellt und freigegeben werden kann. Auch die Erstellung von Testspezifikationen bildet einen Teil dieser Phase. Die Durchführung quantitativer Simulationen unterstützt zudem die objektive Auswahl von Lösungsalternativen.

Die anschließende Realisierungsphase beinhaltet die disziplinspezifische Modellbildung und Simulation, die spätestens in der Integrationsphase zusammengeführt und durch physische Tests ergänzt wird. Abschließende Tests werden in der Abnahmephase durchgeführt.

Wird während des PEP mit sich weiterentwickelnden Modellen gearbeitet, ist die Simulation als unterstützendes Modul von großer Bedeutung. Weiterhin bilden die ersten Simulationsstudien, die, wie in Abbildung 3 dargestellt, bereits in der Spezifikationsphase starten, die Grundlage für den digitalen Zwilling des Produktes bzw. der Produktionsanlage [15].

3 CO-Simulation zur Synchronisierung der Disziplinen

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [16, S. 3]

3.1 Simulation von Produktionssystemen

Heutzutage ist es notwendig, ein automatisiertes Produktionssystem nicht nur in der Mechanik (z. B. mittels Fi-

nite-Elemente-Simulation) hinsichtlich Festigkeit auszuliegen, sondern das gesamte mechatronische Modell zu betrachten und Wechselwirkungen zwischen Modulen und Modellen zu berücksichtigen, denn es handelt sich dabei um ein komplexes Gebilde. Die gesamte Komplexität steigt mit der Zahl der Elemente ebenso wie durch die Verknüpfungen zwischen den Elementen hinsichtlich Toleranz oder Dynamik. Um die Komplexität beherrschbar zu gestalten, gliedert man das System in mehrere – teils hierarchische – Ebenen. In jeder Ebene können relevante Fragestellungen durch die Simulation beantwortet werden.

Dabei gilt, dass zunächst die Fragestellungen und Lösungen in den einzelnen Ebenen betrachtet, ausgewertet und ggf. verbessert werden. Dies geschieht unabhängig von Simulationen anderer Ebenen. Eingeordnet in den Einsatz des MBSE bedeutet dies, dass sowohl einzelne Baugruppen der Anlage getrennt, aber auch, dass die einzelnen Disziplinen unabhängig voneinander betrachtet werden können. Dass der zweitgenannte Ansatz keine sinnvollen Lösungen ergeben wird, ist spätestens bei Betrachtung mechatronischer Modelle erwiesen, denn mechanische, elektrische und informationstechnische (Software) Aufgaben müssen integriert gelöst werden.

Insgesamt hat sich die Simulation als eine gewinnbringende Methode erwiesen, Diskussionspunkte aufzuzeigen, aber auch komplexe Entscheidungsprozesse zu unterstützen. [17] In der Simulationstechnik liegen also große Chancen zur Verbesserung bei Planung und Betrieb von Produktionssystemen [18].

3.2 Multiphysikalische Simulationsprogramme

Von diversen Herstellern gibt es bereits Simulationsprogramme, die für die Lösung mechatronischer Anforderungen prädestiniert sind. Beispiele hierfür bilden der Mechatronics Concept Designer (MCD) von Siemens PLM, iPhysics von machineering oder virtuos von isg. Diese Systeme bieten nicht nur eine Simulationsumgebung, sondern auch Schnittstellen zur virtuellen Inbetriebnahme [19].

Es handelt sich hierbei um Werkzeuge für mechanische und elektromechanische Simulation (Computer-Aided-Engineering), Fertigung, Werkzeug- und Vorrichtungsbau, Qualitätsprüfung und mechatronische Konzeptentwicklung [20]. Dabei können in der Mechanikkonstruktion modellierte Geometrien zu einem Simulationsmodell erweitert werden, das neben der mehrkörperphysikbasierten Simulation auch Aspekte der Automatisie-

rungstechnik beinhaltet und so das physikalische Verhalten unterschiedlicher Lösungskonzepte visualisiert. Ausgehend vom Ansatz des MBSE und einem domänenübergreifenden Lösungskonzept fördern die Simulationstools eine frühzeitige interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mechanik, Elektronik und Softwareentwicklung. Dies spiegelt sich besonders durch Kostenersparnis und beschleunigte Produktentwicklungszeiten wider.

3.3 Kopplung von Simulationsprogrammen

Der genannte steigende Komplexitätsgrad von Produktionssystemen macht es erforderlich, weitere Simulationsumgebungen zu verknüpfen. Hierzu hat in den vergangenen Jahren die verteilte Simulation an Bedeutung gewonnen. Dabei handelt es sich zunächst um ein Simulationsmodell, das im Sinne von unterschiedlichen Ebenen auf unterschiedliche Modelle aufgeteilt wird. Zwischen den einzelnen Teilmodellen existieren Datenflüsse über Datenbanken, welche die Konsistenz dieser sicherstellen. Digitale Produktdaten in Form von Arbeitsplänen, Berechnungen und CAD-Modellen sind in verschiedenen Datenbanksystemen verfügbar und von allen am Entwicklungsprozess beteiligten Personen nutz- und veränderbar. Die entstehenden Produkt- oder Produktdatenmodelle, welche sowohl als fachübergreifende Informationsträger, als auch als Bindeglied zwischen den einzelnen Produktentstehungsbereichen, wie beispielsweise Planung und Konstruktion fungieren, bilden die Basis der verteilten Simulation.

Die verteilte Simulation wird auch als Co-Simulation bezeichnet [21] und kann, wie in Tabelle 1 aufgezeigt, aus einer partitionierten Simulation oder einer Werkzeugkopplung bestehen.

		Anzahl der Simulationstasks	
		= 1 geschlossene Simulation	> 1 verteilte Simulation
Anzahl der Modellierungswerkzeuge	= 1 geschlossene Modellierung	monolithische Simulation	partitionierte Simulation Co-Simulation
	> 1 verteilte Modellierung	Modellkopplung	Werkzeugkopplung Co-Simulation

Tabelle 1: Matrix der Simulationsarchitekturen [21]

Die bereits genannten, im Kontext der Digitalen Fabrik entstandenen, disziplinspezifischen Simulationslösungen sind sehr leistungsfähig im Hinblick auf die Abbildungsgenauigkeit als auch auf die Berechnungsperformance. Allerdings sind diese für die virtuelle Abbildung ausgewählter Vorgänge ausgelegt.

Für eine umfassende Modellbildung des gesamten

Prozess-, Maschinen- und Anlagenverhaltens mit sämtlichen auftretenden Wechselwirkungen müssen hochauflösende Teilmodelle verschiedenster Simulationsdomänen in das digitale Abbild der Produktionsanlage integriert und in einer Gesamtsimulation gekoppelt werden. [22]

Im Kontext der multidisziplinären Modellierung von NC-Bearbeitungsmaschinen wird ein zentrales Problem in der Vereinigung von Modellen verschiedener Simulationsdisziplinen zu einem multidisziplinären Gesamtmodell genannt [23]. Denn grundsätzlich müssen die relevanten Daten der einzelnen Modelle über eine neutrale einheitliche Datenschnittstelle mittels eines einheitlichen Datenformats bereitgestellt werden. Hersteller von Simulationssoftware bestätigen mittlerweile diese These durch die Integration von neutralen Datenschnittstellen [24].

Weiterhin braucht es ein Simulationstool als Basis, das die Daten aller einzelnen Simulationstools weitergibt. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze und Tests in diversen Kontexten, jedoch kein System, das sich etabliert hat. In den hier aufgezeigten Anwendungsfällen soll ein Ansatz für eine Co-Simulation zur ganzheitlichen Simulation einer Produktionsanlage, die mit Gleichstrom betrieben wird, aufgezeigt werden.

4 IT-Infrastruktur

Zur Umsetzung des MBSE und damit verbunden der Simulation wird eine funktionsfähige und weitreichende Infrastruktur benötigt. Eine gängige Plattform zur sinnvollen Umsetzung des SE bilden PLM-Systeme, um das modellbasierte Arbeiten zu unterstützen und abzubilden. Zur Abbildung von Co-Simulationen werden weitere, möglichst echtzeitfähige Formate des Datenaustauschs benötigt.

4.1 PLM-System als Basis für das MBSE

Product Lifecycle Management (PLM) beschreibt einen „ganzheitlichen Ansatz zur unternehmensweiten Verwaltung und Steuerung aller Produktdaten und Prozesse des gesamten Lebenszyklus entlang der erweiterten Logistikkette“ [25].

Im Rahmen der Veränderung der Entwicklungsmethodik haben sich die Aufgaben des Ingenieurs von einer kreativen Entwicklungstätigkeit zu organisatorischen und kommunikativen Aufgaben (Planung, Beschaffung) verändert. Entsprechende IT-Werkzeuge zur effizienteren Bewältigung der Aufgaben sind notwendig [26] um die Digitalisierung zu beherrschen.

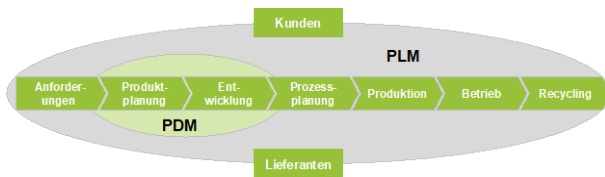


Abbildung 4: Abgrenzung zwischen PLM und PDM nach [27]

Diese Herausforderungen können nur durch den Einsatz von Product-Data-Management- (PDM) und PLM-Software bewältigt werden [27]. Erstere fokussieren die Phase der Produktentwicklung, während der Ansatz des PLM das Konzept erweitert, indem der gesamte Lebenszyklus von der ersten Idee bis zum Recycling betrachtet wird [28]. Demnach stellt PLM ein Konzept und nicht ein IT-System dar. Die PLM-Software ist eine Komponente des Konzeptes, dient der Integration von IT-Werkzeugen zu einer Entwicklungsumgebung und unterstützt das Zusammenspiel der Werkzeuge modell-, system-, prozess- und verfahrenstechnisch [3]. Ganzheitliche PLM-Konzepte ergeben sich aus Strategie, Prozessen und der IT-Lösung [32].

4.2 OPC UA als Kommunikationsstandard

Im Bereich der Automatisierung steht das Ziel effektiver, kostengünstiger und zeitsparender zu entwickeln und möglichst im Sinne von „First-time-right“ Anlagen direkt beim Kunden produktionsfähig in Betrieb zu nehmen, an erster Stelle. Ebenso wie der Bedarf nach Standardisierung und Modularisierung in der Software-Landschaft laut wird, entsteht eine erhöhte Nachfrage nach einer auf Kommunikationsebene standardisierten Schnittstelle zwischen mehreren Komponenten.

In diesem Zuge ist OPC entstanden. OPC steht für „Open Platform Communications“ und ist ein Kommunikationsprotokoll, das vor allem im Rahmen von Industrie 4.0 verwendet wird und das den standardisierten Zugriff auf Geräte, Maschinen und andere Systeme im industriellen Umfeld ermöglicht. Es bildet die Schnittstelle zwischen Steuerungssystemen und der Steuerungsebene, wodurch ein gleichmäßiger Datenaustausch unabhängig vom Hersteller ermöglicht wird. Die aktuellste Spezifikation stellt „Unified Architecture“ kurz UA dar. OPC UA besteht aus einem Server und dem Client, wobei der OPC UA-Server die Basis bildet. Das logische Gegenstück zum OPC UA-Server ist der Client. Durch das Verbinden mit dem Server können jene Daten ausgelesen werden, welche der Server bereitstellt. [29]; [30]

Mit Hilfe des beschriebenen OPC UA-Standards

wurde die Co-Simulation für eine automatisierte Produktionsanlage realisiert, welche mit einem eigenen Gleichstromkreis auf Industrieniveau mit einer Spannung von 650 V DC versorgt wird. Hier spielt neben der multiphysikalischen Simulation des Prozessablaufs die Simulation des Energieversorgungsnetzes eine bedeutende Rolle.

5 Virtuelle Inbetriebnahme als Systemintegration

Die Virtuelle Inbetriebnahme stellt ein Werkzeug der Digitalen Fabrik dar. Sie wird der Phase „Planung der Fertigungsanlagen“ zugeteilt und findet somit zeitlich vor der Phase „Montage und Inbetriebnahme der Fertigungsanlagen“ statt [31]. Sie bezeichnet die Steuerungsinbetriebnahme an einem virtuellen Maschinenmodell, welches die mechanischen, elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Funktionalitäten einer automatisierten, mechatronischen Anlage abbildet [33].

Bei den drei Arten der virtuellen Inbetriebnahme (Model-in-the-loop (Mil), Software-in-the-loop (Sil) und Hardware-in-the-loop (Hil)) wird immer am Modell getestet. Es gilt also, das Modell so realitätsnah wie möglich zu modellieren. Die Begriffe „Modell“, „Software“ und „Hardware“ beziehen sich in diesem Zusammenhang darauf, in welcher Form die Steuerung vorliegt, die verwendet wird, die Steuerung innerhalb des Modells, Steuerung durch eine simulierte Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) (über das Programm PLCSim Advanced) oder die Steuerung als Hardware-Komponente.

In jeder frühen Phase kann die Simulation nach Model-in-the-loop verwendet werden. Hier wird die Ablaufsteuerung direkt im physikalischen Modell eingefügt und innerhalb des Modells getestet. Dabei handelt es sich eher um eine prozessbegleitende Simulation, da sukzessive einzelne Schritte durch die Steuerung übernommen werden. An dieser Stelle wird aber bereits das physikalische Anlagenmodell verwendet, das auch bei den beiden anderen Formen der virtuellen Inbetriebnahme genutzt wird. In einem weiteren Schritt kann das Steuerungsprogramm zunächst mit einer simulierten Steuerung am Modell getestet werden (Sil). Dies hat gegenüber der Hil den Vorteil, dass noch nicht die gesamte Peripherie (Ein- und Ausgangsmodule) definiert und modelliert sein müssen. Denn, wird die reale Steuerung genutzt, ist es notwendig, die gesamte Peripherie und die Profibus-Verbindung ebenso zu simulieren, wie die gesamte Anlage durch das physikalische Modell.



Abbildung 5: Darstellung der Hil unter Verwendung einer realen Steuerung mit einem Human-Machine-Interface (HMI) und einer Simulation-Unit (1) und der SII mit einer simulierten Steuerung, simuliertem HMI (2) und dem multiphysikalischen Modell (3) im MCD, sowie beispielhafter, cloudbasierter Visualisierung von Produktionsdaten.

6 Anwendungsfälle

Die aufgezeigte Methodik des MBSE und eine Modellumgebung für eine Co-Simulation wurden anhand von zwei Anwendungsfällen im Bereich der Lehre und der Forschung umgesetzt. Die Ziele der beiden Fälle sind durchweg verschieden, sollen aber beide dazu beitragen, dass Produktentwicklung zukünftig, kostengünstiger, besser und effizienter durchgeführt werden kann.

6.1 Co-Simulation zur ganzheitlichen Simulation einer automatisierten Produktionsanlage

Die weiter anhaltende, oder besser gesagt, sukzessive ansteigende Verknappung von Ressourcen ist mittlerweile ein weltweites Problem, weshalb die Energiewende eingeleitet wurde. So sollen zukünftig im Kontext von Fertigungsanlagen erneuerbare Ressourcen wie Photovoltaikanlagen oder Windkraftwerke genutzt werden und Speichertechnologien (Akkumulatoren, Kondensatoren) in die Anlagen integriert werden. Es entstehen in den Fertigungshallen Smart Grids, die den Energiebedarf der Fertigung decken und die Verteilung der Ressourcen optimal nutzen. Die Energieversorgung muss deshalb über eine weitere Steuerung geregelt werden.

Das physikalische Verhalten von Akkumulator oder PV-Anlage lässt sich jedoch in den gängigen multiphysikalischen Simulationsumgebungen ebenso wenig abbilden, wie die Entnahme der Energie aus dem Versorgungsnetz. Hierzu müssen weitere Simulationen genutzt werden. Im vorliegenden Fall wurde für die Simulation des Akkumulators MATLAB Simulink genutzt. Für die Simulation des Prozessablaufs der Fertigungsanlage

wurde auf den MCD zurückgegriffen. In der vorliegenden Simulationsstudie wurden beide Umgebungen mittels eines OPC UA-Servers verbunden. Weiterhin verfügt jedes Tool über einen OPC UA-Client. Darüber werden in diskreten Zeitschritten Zustandsvariablen ausgetauscht und das Energiemanagement getestet werden. Beginnt beispielsweise in der Prozesssimulation ein energieintensiver Arbeitsschritt, so entlädt sich der Akkumulator in der eigenen Simulation maximal, wie in Abbildung 6 dargestellt ist.

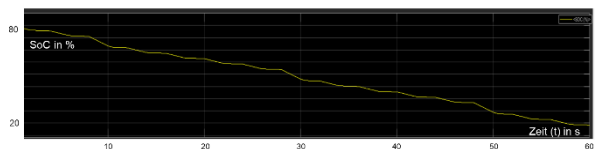


Abbildung 6: Verlauf des Ladezustandes über den Entladeprozess (in MATLAB Simulink)

Ist dieser vollständig entladen, wird der energiereiche Prozess gestoppt und erst wieder gestartet, wenn der Akkumulator durch die PV-Anlage geladen wurde.

Mit dieser Anwendung wird vor allem die Machbarkeit einer Co-Simulation mittels OPC UA bewiesen. Sämtliche Modelle sind aber im PLM-System abgelegt, denn der Aufbau des Produktentwicklungsprozesses wurde entlang des SE durchgeführt.

6.2 Praktikum für Studierende als Basis der zukünftigen Zusammenarbeit in Unternehmen

Ein weiterer Anwendungsfall diesbezüglich wurde in der Lehre umgesetzt. Die Studierenden erarbeiten in jedem Semester in einem interdisziplinären Team ein Entwicklungsprojekt anhand eines Fördersystems am lehrstuhleigenen I4.0-Demonstrator.

In einem fiktiven Entwicklungsteam werden verschiedene Rollen verteilt, deren Aufgabe es entweder ist, die mechanische, elektronische oder informationstechnische Konstruktion zu erstellen und zu kontrollieren, oder für die entwicklungsbegleitende Simulation Sorge zu tragen bzw. das Anlegen des Modells bereits in der Spezifikationsphase zu überwachen. Das Planspiel soll dazu beitragen, die beschriebenen Grundlagen des SE verstehen und nachvollziehen zu können, denn von der Aufnahme der Anforderungen aus den Erklärungen der Kunden bis zur Inbetriebnahme des Förderbandes durchlaufen die Studierenden alle Schritte des Produktentwicklungsprozesses, mit allen notwendigen Iterationen. Durch die Anwendung der Methodik des SE bereits im Studium, soll

ein Beitrag geleistet werden, Einführung und Anwendung in der Industrie voranzutreiben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Ansatz, modellbasierter Entwicklung mithilfe von PLM-Systemen den Anforderungen, die durch Industrie 4.0 an Hersteller mechatronischer Systeme gestellt werden, gerecht werden kann. Hier spielt die Simulation eine wichtige Rolle. Simulation in einem multiphysikalischen Tool ist nicht ausreichend, so dass Co-Simulationen genutzt werden müssen. Einen Ansatz hierfür bietet die Verwendung des OPC UA-Standards. Dieser Ansatz kann erweitert werden, so dass damit eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden kann. Um diesen Ansatz zu etablieren wird dieser möglichst praxisnah Studierenden vermittelt.

References

- [1] Armin Barnitzke. *Maschinensoftware muss modularer werden: Branchenumfrage*. In: Automationspraxis - die anwenderorientierte Fachzeitschrift für Führungskräfte in der Industrie; 2014 Dezember 2014: 12/2014. p. 1–3.
- [2] Harashima F, Tomizuka M, Fukuda T. *Mechatronics - "What Is It, Why, and How?" An editorial*. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1996; 1: Nr. 1. p. 1–4.
- [3] 2206. 2004. *Richtlinie VDI 2206*. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
- [4] Renault O, Expert P IM. *Reuse/Variability Management and System Engineering*. In: Poster Workshop of the Complex Systems Design & Management Conference CSD&M 2014; 2014.
- [5] Kleiner S, Husung S, Schulze S O, Tschirner C, Kaffenberger R. *Model Based Systems Engineering: Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxis*. In: Tag des Systems Engineering 2016. p. 13–22.
- [6] Eigner M, Roubanov D, Zafirov R. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer; 2014.
- [7] Fay Alexander. *Durchgängiges Engineering von Leitsystemen* (Konferenz für Durchgängige Anlagenplanung 2013). Nürnberg, 20.03.2013
- [8] Technical Operations International Council on Systems Engineering (INCOSSE). *Systems Engineering Vision (2025)*. URL https://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=b69eb4c6_4 – Überprüfungsdatum 22.02.2021
- [9] Cooper R G. *Stage-gate systems: A new tool for managing new products*. In: Business Horizons 1990; 33: Nr. 3. p. 44–54.
- [10] Spath, D. *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0: Studie*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.; 2013.
- [11] Russwurm S. *Software: Die Zukunft der Industrie*. In: Sandler, U (Hrsg.): Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 21–36.
- [12] Szinovatz A, Müller C. *Management der Komplexität im Innovationsprozess Vom Stage-Gate-Modell zum Survival-of-the-Fittest-Modell*. In: Schoeneberg, K-P (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2014. p. 93–112.
- [13] Geisberger E, Schmidt R. *Abschlussbericht des Projekts "ProMiS" - Projektmanagement für interdisziplinäre Systementwicklungen: Aus dem Themenfeld "Software in technischen Produkten - Anwendung von Methoden und Vorgehensweisen für eine ingenieurmäßige Software-Entwicklung in der Produktion"* im Rahmen des Forschungsvorhabens des BMBF "Forschung für die Produktion von Morgen"; [Leitfaden für die Anwendung von Projektmanagement und Systemspezifikation mit einem Praxishandbuch auf CD-ROM]; [Software VDMA]; gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Frankfurt am Main, c 2004 (Software vfl77400)
- [14] Augustin C. *Leitfaden für die Anforderungsanalyse: Software* aus der Reihe Methoden und Verfahren. Frankfurt am Main: VDMA-Verl.
- [15] Sauer O, Schleipen M, Ammermann C. *Digitaler Fabrikbetrieb*. In: Zülch, G; Stock, P (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific; 2010. p. 559–566.
- [16] *VDI-Richtlinie 3633; Blatt 1*. 1993. VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1
- [17] Feldmann K. *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion: Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele*. Berlin [u.a.]: Springer; 2000.
- [18] Reinhart G, Feldmann K, Heitmann K. *Simulation-Schlüsseltechnologie der Zukunft*. In: Stand und Perspektiven. München: Utz, Wiss 1997.
- [19] Lechler T, Fischer E, Metzner M, Mayr A, Franke J. *Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems*. In: Procedia CIRP 2019; 81. p. 1125–1130.
- [20] Siemens Industry Software GmbH & Co. KG. : *NX : Transformation des gesamten Produktentstehungsprozesses durch integrierte Softwarelösungen für Konstruktion, Simulation und Fertigung*. 2012
- [21] Günther F C: *Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs*. München, TU München. 2017
- [22] Scheifele C: *Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für*

- die virtuelle Inbetriebnahme*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen: Dissertation. 2019
- [23] Pritschow G, Berkemer T, Bürger T, Croon N, Korajda B, Röck S. *Die simulierte Werkzeugmaschine*. In: Heisel, U (Hrsg.): *Stuttgarter Impulse: Zukunft gestalten - Zeichen setzen*; FtK 2003, Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, 13. bis 15. Oktober 2003; Tagungsband; [schriftliche Fassung der Vorträge. Stuttgart: Ges. für Fertigungstechnik; 2003. p. 219–246.
- [24] Pritschow G, Röck S. *“Hardware in the Loop” Simulation of Machine Tools*. In: CIRP Annals 2004; 53: Nr. 1. p. 295–298.
- [25] Schuh G. *Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management 3. 2.*, vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer; 2012.
- [26] Eigner M, Stelzer R. *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2.*, neu bearb. Aufl. Dordrecht: Springer; 2013.
- [27] Eigner M, Roubanov D, Zafirov R. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin: Springer Vieweg; 2014.
- [28] Sandler U. *Das PLM-Kompendium: Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Management*. Springer Science & Business Media; 2009.
- [29] Lange J, Iwanitz F, Burke T J. *OPC: Von Data Access bis Unified Architecture. 5.*, durchgesehene Auflage. Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH; 2014.
- [30] Mahnke W, Leitner S-H, Damm M. *OPC Unified Architecture*. 1st ed. Berlin: Springer; 2009.
- [31] *VDI 4499*. 2008. VDI 4499 Blatt 1 Digitale Fabrik - Grundlagen
- [32] WZL RWTHAachen. *PLM*. URL <http://www.plm-info.de> – Überprüfungsdatum 08.06.2015
- [33] Wenk M. *Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen - Aufwand-Nutzen, Umsetzungsstrategien, zukünftige Entwicklungen*. In: VDE-Verlag (Hg.) 2008 – Elektrische Automatisierung - Systeme und Komponenten. p. 533.