

Interoperabilität realer und simulierter Produktionssysteme mittels OPC UA

Interoperability of real and simulated production systems using OPC UA

Elisabeth Schmidl, Matthias Wenk, OTH Amberg-Weiden, Amberg (Germany),
e.schmidl@oth-aw.de, m.wenk@oth-aw.de

Eva Russwurm, Jörg Franke, FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen (Germany),
eva.russwurm@faps.fau.de, joerg.franke@faps.fau.de

Abstract: Simulation-based tools support developers in the engineering process, as they allow decision-relevant investigations to be carried out simulatively in advance. Some of these simulation studies require models that are as close to reality as possible. For their creation, data from real plants are necessary, which is associated with an increased manual acquisition and implementation effort. Furthermore, the different available simulation tools are suitable for different levels of detail. In order to use the synergies of the different tools, they have to be coupled, for which there are often no standardized interfaces yet. This paper presents a concept based on the OPC UA communication standard, which enables automated data transfer from real to simulated production plants, as well as flexible data exchange between different simulation tools.

1 Motivation

Die zunehmende Individualisierung von Produkten und kürzere Innovationszeiten erfordern neue leistungsfähigere Produktionssysteme. Diese müssen über eine wesentlich höhere Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (Nyhuis et al. 2009) verfügen, bei gleichbleibend hoher Produktqualität und Anlagenverfügbarkeit, was zu einer deutlichen Zunahme der Komplexität im Engineeringprozess führt. Um diesen auch in Zukunft beherrschen zu können, wird der Einsatz simulationsbasierter Hilfsmittel vorangetrieben. Die Simulation ermöglicht entscheidungsrelevante Untersuchungen bereits vor der Realisierung der Anlage. Es können beispielsweise Planungsvarianten bewertet, Risikofaktoren identifiziert und die Anlage virtuell in Betrieb genommen werden (Wenk 2014). Außerdem können auf Basis der Simulation mittels moderner maschineller Lernverfahren verschiedene Bereiche, wie der Materialfluss (Jaensch et al. 2018), der Energiebedarf (Schmidl et al. 2021) oder die Fehlererkennung (Sobie et al. 2018) optimiert werden.

Voraussetzung ist die Erstellung geeigneter Simulationsmodelle, die das Verhalten der Anlage möglichst realitätsnah abbilden. Fertige Bibliothekselemente für unterschiedliche Komponenten unterstützen bei der Erstellung der Simulationen. Allerdings beinhalten diese Bibliothekselemente oft kein detaillierteres Verhalten, welches für Anlagenoptimierungen nötig wäre. Auch die Werte aus den Datenblättern der betreffenden Komponenten sind hierfür meist zu ungenau und lückenhaft. Somit müssen aufwändige Messungen an der realen Anlage erfolgen, welche dann häufig manuell in das Simulationsmodell integriert werden.

Je nach benötigtem Detaillierungsgrad existieren für die Simulation von Produktionssystemen entsprechende Simulationstools. Für Optimierungsaufgaben ist jedoch sowohl eine hohe Realitätsnähe als auch das Zusammenwirken mehrerer Produktionsanlagen entscheidend, was zu einer immensen Erhöhung des Rechenaufwandes führt. Deshalb ist es notwendig, detaillierte Komponenten- und Produktionsanlagensimulationen mit gröberen Fabriksimulationen zu koppeln, welche auf unterschiedlichen Rechnern ablaufen. Auch in Abhängigkeit der spezifischen Eigenschaften des zu simulierenden Verhaltens gibt es unterschiedliche zu bevorzugende Simulationssysteme. In dem Beitrag von Tur et al. (2019) wird beispielsweise gezeigt, dass Energieflüsse zeitkontinuierlich simuliert werden sollten, damit ein geringerer Informationsverlust entsteht. Da Produktionsprozesse hinsichtlich des Materialflusses überwiegend zeitdiskret simuliert werden, ist für eine ganzheitliche Betrachtung die Kopplung der unterschiedlichen Systeme notwendig. Da verschiedene Simulationstools oft nicht miteinander kompatibel sind, müssen hierfür geeignete Schnittstellen und Datenaustauschkonzepte entwickelt werden.

In diesem Artikel soll auf Basis von OPC UA ein Ansatz vorgestellt werden, welcher es ermöglicht, die Interoperabilität zwischen realen und simulierten Produktionssystemen zu erhöhen. Dadurch wird die automatisierte Optimierung von Simulationsmodellen sowie die flexible Kopplung von Simulationsmodellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad erleichtert.

2 Stand der Technik

Es gibt bereits verschiedene Ansätze, das Verhalten von Simulationskomponenten realitätsnah abzubilden. In dem Beitrag von Seow und Rahimifard (2011) wird der Energiebedarf ermittelt und simuliert, indem Daten von Geräteherstellern mit eigenen empirischen Messstudien kombiniert werden. Kohl et al. (2014) zeichnen die Lastprofile während der verschiedenen Betriebszustände auf und stellen die Ergebnisse mittels Datentabellen zur Verfügung. Allerdings werden in beiden Fällen einige der Schritte zur Datenerhebung und der darauf aufbauenden Erstellung eines realitätsnahen Simulationsmodells manuell durchgeführt.

Das Gebiet der Co-Simulation beschäftigt sich damit, unterschiedliche Simulationswerkzeuge miteinander zu koppeln. Einen wichtigen Ansatz stellt hier das Functional Mock-up Interface (FMI) dar, welches eine standardisierte Schnittstelle zum Austausch dynamischer Modelle liefert (Blochwitz et al. 2012). Allerdings muss bereits zu Beginn der Modellierung entschieden werden, welche Werkzeuge als Functional Mock-up Unit (FMU) exportiert werden und welche Werkzeuge wiederum diese FMU's importieren, um miteinander zu interagieren, was zu einer geringeren Flexibilität während der Simulation führt. Außerdem unterstützen einige Simulationstools nicht oder nur teilweise den FMI-Standard (fmi-standard 2021).

Darüber hinaus ist die High-Level Architecture (HLA), eine vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium definierte Architektur, zu nennen (IEEE Standards Association 2010). HLA ist bereits 2000 zu einem internationalen Standard geworden und wurde entwickelt, um die verteilte Modellierung und Simulation zu ermöglichen. Straßburger (2019) zeigt in seinem Beitrag die Vorteile von HLA auf, wie die dedizierte Synchronisationsunterstützung für Simulationssysteme und die ausgefeilte Datenverteilung. Allerdings wird hier auch die mangelnde Akzeptanz in der Fertigungsindustrie erwähnt, weshalb der Standard von kaum einem in diesem Bereich verfügbarem Simulationstool unterstützt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Kopplung von Simulationstools bietet die plattformunabhängige und service-orientierte Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) (OPC Foundation 2010). Kommunikation findet zwischen einem OPC UA-Server und einem OPC UA-Client statt, wobei auch mehrere Clients gleichzeitig auf einen Server zugreifen können. Hierbei werden Security Aspekte unterstützt. Zudem bietet OPC UA die Möglichkeit, Daten und Methoden in einem Informationsmodell semantisch zu beschreiben und zu strukturieren. Hensel et al. (2016) stellen ein Konzept vor, in dem jedes Simulationswerkzeug mit einem Adapter kommuniziert, welcher über einen OPC UA-Server und einen OPC UA-Client verfügt. Über diesen Adapter registrieren sich die Werkzeuge an einem zentralen Server, welcher die Co-Simulation koordiniert. Der zentralisierte Ansatz sowie die Notwendigkeit des Servers führen jedoch zu einer Minderung der Flexibilität und zusätzlichem Entwicklungsaufwand.

Ziel dieser Arbeit ist die Erhöhung der Interoperabilität realer und simulierter Daten auf Basis standardisierter und in der Produktion sowie Produktionssimulation etablierter Schnittstellen. Derzeit wird OPC UA von den meisten hier verwendeten Simulationstools unterstützt, weshalb sich die im Folgenden vorgestellte Methode auf diese Kommunikationsarchitektur beschränkt. Darauf aufbauend wird ein dezentrales System vorgestellt, welches es ermöglicht, flexibel verschiedene Simulationstools und reale Anlagen zu koppeln.

3 Konzept der dezentralen Kommunikation

Mittels OPC UA-Server können alle realen und simulierten Systeme ihre Daten den anderen Teilnehmern zur Verfügung stellen (Abb. 1). Um mit dem gewünschten Detaillierungsgrad auf die Daten der realen Anlagen zugreifen zu können, werden OPC UA-Server in den Steuerungen der unterschiedlichen Ebenen der Automatisierungspyramide integriert. Auf der Feldebene sind dies einzelne Komponenten, die mit der entsprechenden Intelligenz ausgestattet werden (1). Moderne speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) der Steuerungsebene haben derzeit meist einen OPC UA-Server integriert und können dadurch die Daten eines Anlagenmoduls bereitstellen (2). Auch viele Softwareprogramme für übergeordnete SCADA- und MES-Systeme beinhalten mittlerweile OPC UA-Server, wodurch unter anderem Produktionsplanungsdaten ausgelesen werden können (3). Die Simulationswerkzeuge werden ebenfalls unterschiedlichen Ebenen zugeordnet und stellen ihre Daten mit dem entsprechenden Detaillierungsgrad über einen OPC UA-Server bereit. Dazu gehören einzelne physikalische Komponentensimulationen (4), Produktionsanlagensimulationen (5) und Fabriksimulationen (6).

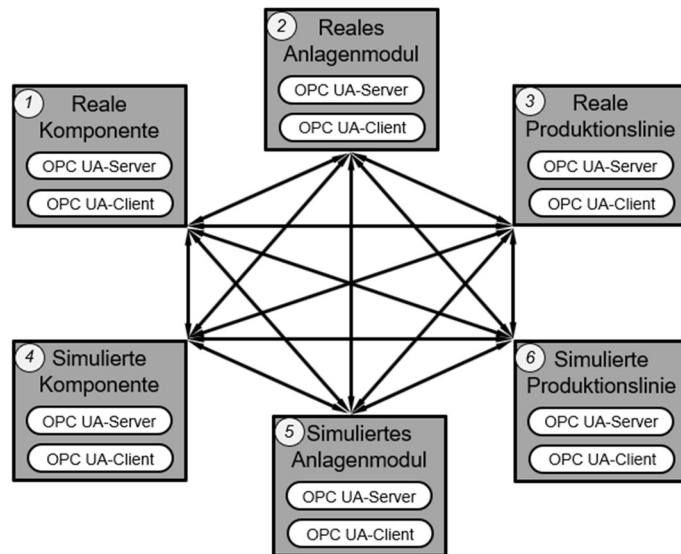


Abbildung 1: Kommunikation zwischen realen und simulierten Systemen

Jedes System mit implementiertem OPC UA-Client kann auf einen OPC UA-Server eines beliebigen anderen Systems zugreifen und so mit diesem interagieren. Neue Systeme können flexibel ergänzt und nicht mehr benötigte entfernt werden, ohne dabei die Kommunikation anderer Systeme zu gefährden.

Für Steuerungen, Softwareprogramme und Simulationstools, die über keinen OPC UA-Server verfügen, können Softwareadapter erstellt werden, die über eine interne Kommunikation Daten austauschen und diese über einen OPC UA-Server zur Verfügung stellen. Ist kein OPC UA-Client vorhanden, kann auch hier mittels Adapter Abhilfe geschaffen werden. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Konstellationen.

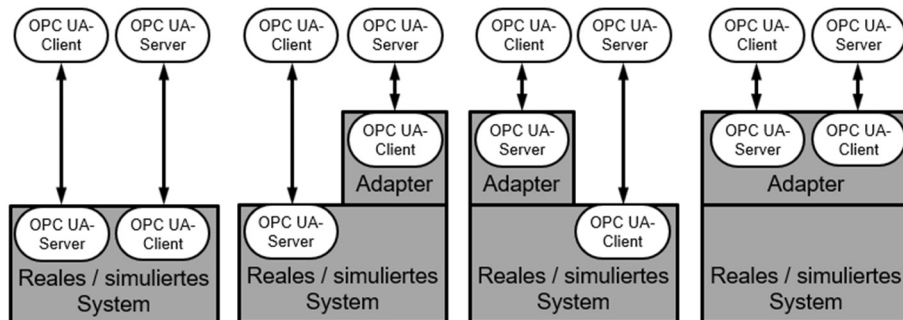


Abbildung 2: Übersicht der Kommunikation ohne und mit Adapter

Auch zusätzliche Software, wie z.B. ein Datenverarbeitungssystem auf einem Edge Device, kann für weitere Anwendungen mittels OPC UA-Client auf die OPC UA-Server zugreifen, um Daten auszulesen oder Methoden auszuführen.

Die Verwendung eines einheitlichen Informationsmodells bei der Strukturierung der Namensräume in den OPC UA-Servern ist wichtig, damit die OPC UA-Clients automatisiert auf die richtigen Daten zugreifen können. In diesem Beitrag wird zwischen dem Datenaustausch zur automatisierten Optimierung von Simulationsmodellen und der Co-Simulation unterschieden. Im Folgenden wird für diese beiden Fälle jeweils der Kommunikationsworkflow beschrieben und eine Methodik vorgestellt, den Namensraum zu modellieren.

3.1 Datenaustausch zur automatisierten Modelloptimierung

Für die Optimierung der Simulationsmodelle liest ein Edge-Device mittels eines OPC UA-Clients die Daten aus dem OPC UA-Server einer Informationsquelle während des Produktivbetriebs aus (Abb. 3). Als Informationsquellen dienen beispielsweise reale Anlagen oder detaillierte Modelle anderer Simulationstools. Um noch weitere Daten aufzunehmen, kann das Edge-Device die Informationsquelle (außerhalb des Produktivbetriebs) mittels OPC UA-Methoden in verschiedene Zustände schalten. Die ausgelesenen Werte werden in einer Datenbank abgespeichert. Auf Basis dieser Datensammlung können analytisch detaillierte Simulationsergebnisse und -kurven ermittelt werden. Die Ergebnisse können ebenfalls in der Datenbank abgespeichert und dadurch der Simulation zur Verfügung gestellt werden. Alternativ kann ein Modellgenerator dazu verwendet werden, ein optimiertes Simulationsmodell zu erstellen.

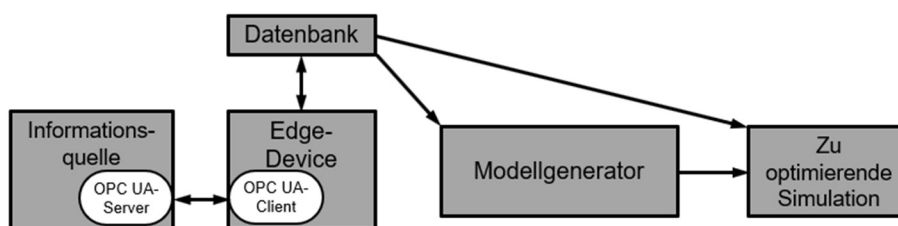


Abbildung 3: Kommunikationsübersicht zur automatisierten Modelloptimierung

Um einen automatisierten Zugriff des Edge-Devices auf die Informationsquellen zu gewährleisten, müssen die Namensräume der OPC UA-Server einheitlich modelliert werden. Dabei wird wie nachfolgend beschrieben vorgegangen.

Falls für den Anlagentyp bereits ein standardisiertes Informationsmodell (Companion Specification) existiert, wird auf diesem aufgesetzt. Ansonsten wird die Hierarchie der Anlage ermittelt (z.B. Linie, Modul, Technologiefunktionen, Komponenten) und darauf aufbauend die Struktur der anfallenden Daten (Variablenknoten) aufgebaut. Die Werte der Messgeräte werden entsprechend dem jeweiligen Messpunkt zugeordnet. Da die Übertragungsgeschwindigkeit von OPC UA meist größer einer Millisekunde ist, werden sich schnell ändernde Anlagenwerte zusammen mit den Zeitwerten als historische Daten oder in Arrays zwischengespeichert und gebündelt zur Verfügung gestellt. Um die Anlage in verschiedene Zustände versetzen zu können, erhalten die schaltbaren Komponenten OPC UA-Methoden (Methodenknoten), die von einem OPC UA-Client aufgerufen werden können. Über

Referenzen werden Beziehungen zwischen den Knoten hergestellt. Dadurch werden z.B. Abschalt- und Anschaltabhängigkeiten schaltbarer Komponenten dargestellt.

3.2 Co-Simulation

Mit Hilfe der Co-Simulation ist es möglich, Simulationen auf unterschiedliche Tools (je nach Detaillierungsgrad und spezifischen Eigenschaften) aufzuteilen, die miteinander gekoppelt sind. Dadurch kann der Rechenaufwand optimiert und der Informationsverlust minimiert werden.

Simulationstools mit OPC UA-Client können auf die Daten der OPC UA-Server anderer Simulationen zugreifen und mit diesen interagieren (Abb. 4). Dadurch können Daten ausgelesen, aber auch Ereignisse anderer Simulationen getriggert werden.

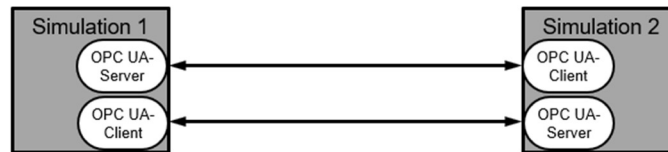


Abbildung 4: Kommunikationsübersicht zur flexiblen Co-Simulation

Die eigenständige Kopplung und Organisation zwischen den Tools führt zu einer hohen Flexibilität. Um dies zu ermöglichen, werden die Namensräume der OPC UA-Server identisch strukturiert.

Zuerst werden Variablenknoten modelliert, welche Ereignisse anderer Simulationen auslösen können. Ihnen untergeordnet finden sich Variablenknoten, die die jeweiligen Ereignisse mit weiteren Daten anreichern. Danach folgen die Knoten, welche die simulierten Daten des Modells zur Verfügung stellen. Diese können, wie in Kapitel 3.1 dargestellt, hierarchisch strukturiert und, wenn aufgrund schneller Signale notwendig, mit Zeitwerten gebündelt übertragen werden.

4 Fallstudien und Ergebnisse

Das vorgestellte Konzept wird an drei Fallstudien getestet. Während sich die erste Fallstudie auf die Optimierung des Simulationsmodells einer Montageanlage konzentriert, wird dieses Simulationsmodell in einer zweiten Fallstudie mit einer Fabriksimulation gekoppelt. In der dritten Fallstudie wird die Kopplung unterschiedlicher Simulationstools, mit dem Ziel ein Energiemanagementsystem im Vorfeld in Betrieb zu nehmen, vorgestellt.

4.1 Optimierung des Simulationsmodells einer Montageanlage

Das für diese Fallstudie verwendete reale Montagemodul beinhaltet vier Förderbänder, eine pneumatische und zwei elektrische Handhabungseinheiten. Es ist virtuell mit dem Simulationstool ISG-virtuos abgebildet. Das Ziel besteht darin, das energetische und zeitliche Verhalten der simulierten Anlagenkomponenten in Bezug auf Ein- und Ausschaltvorgänge zu optimieren. Der Workflow wird in Abbildung 5 dargestellt.

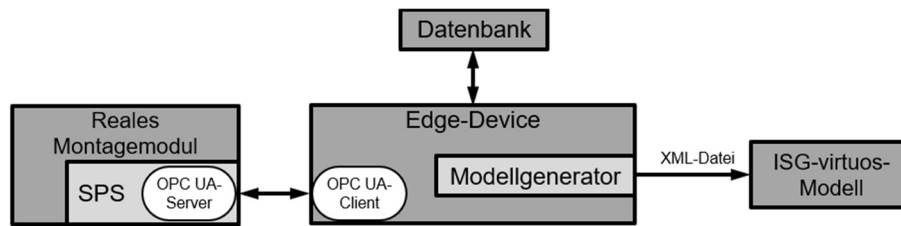


Abbildung 5: Kommunikationsübersicht zur Optimierung einer Montagesimulation

Das Montagemodul wird von einer SPS gesteuert, welche über einen integrierten OPC UA-Server alle nötigen Daten und Interaktionsmöglichkeiten bereitstellt. Die Strukturierung des Namensraumes geschieht bei einer hierarchischen und funktionalen Programmierung des SPS-Programmes (Zizler et al. 2018) automatisch. Ein Edge-Device liest die nötigen Informationen über das Modul aus und kann anhand vorgegebener Aus- und Einschaltregeln das Modul in die relevanten Zustände versetzen. Während dieses Vorgangs werden die Zustände der Komponenten sowie die Leistungen aufgezeichnet. Danach wird analytisch ausgewertet, welche Änderungen von Zuständen mit welchen Leistungsänderungen korrelieren und welche Zeiten hierfür jeweils benötigt werden. Ein ebenfalls im Edge-Device implementierter Modellgenerator erstellt anhand der Ergebnisse eine XML-Datei. Die Software ISG-virtuos importiert die XML-Datei und erstellt daraus ein neues und optimiertes Simulationsmodell.

Abbildung 6 zeigt im Vergleich den realen Leistungsverlauf, den simulierten Verlauf basierend auf vorhandenen Datenblatt- und Datenbankwerten und den optimierten Verlauf beim schrittweisen Aus- und Einschalten der Anlage.

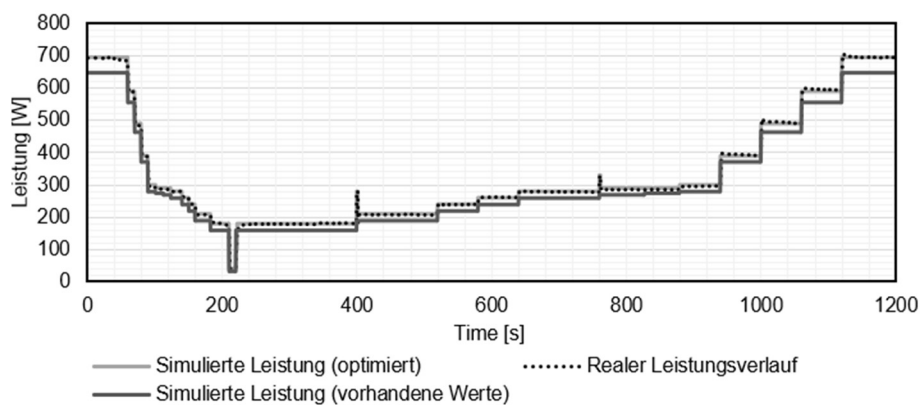


Abbildung 6: Realer und simulierter Leistungsverlauf

Die in den Datenblättern der Komponenten aufgeführten und in Datenbanken von früheren Messungen gespeicherten Leistungsdaten, sind für einige Simulationsstudien zu ungenau. Eine automatisierte Optimierung des Simulationsmodells führt, wie hier dargestellt, aufwandsarm zu einer ausreichend genauen Simulation.

4.2 Kopplung der Montageanlagensimulation mit einer Fabriksimulation

In der zweiten Fallstudie wird das in der ersten Fallstudie simulierte Montagemodul mit einer Fabriksimulation gekoppelt (Abb. 7). Für die Fabriksimulation wird das Simulationswerkzeug Plant Simulation eingesetzt. Da beide Simulationstools nur über einen OPC UA-Client verfügen, wird für die Implementierung der OPC UA-Server jeweils ein Softwareadapter erstellt.

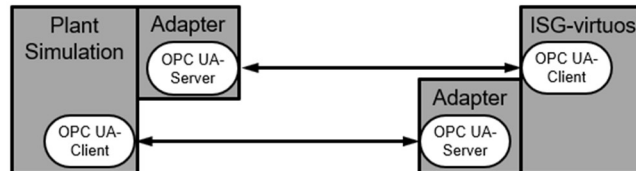


Abbildung 7: Kommunikationsübersicht zur Kopplung von Plant Simulation und ISG-virtuos

Somit kann die Software Plant Simulation die Information bereitstellen, dass ein neues Werkstück in das Montagemodul einfährt und welche Charge produziert wird. Die Software ISG-virtuos kann diese Daten auslesen, auf das einfahrende Werkstück reagieren und einen detaillierten Montageprozesse simulieren. Dabei werden Informationen, wie z.B. genaue Energiebedarfe und zeitliches Verhalten, über den OPC UA-Server bereitgestellt. Plant Simulation kann mittels OPC UA-Client auslesen, wann das Werkstück fertig bearbeitet wurde und es zur nächsten Bearbeitungsstation, welche eventuell ebenfalls detailliert über eine Co-Simulation angebunden ist, weitertransportieren. Die Simulationen laufen dabei auf getrennten Rechnern ab, wodurch mehr Rechenleistung zur Verfügung steht.

4.3 Kopplung mit der Simulation energetischer Erzeuger

Das Ziel der dritten Fallstudie ist es, zusätzlich zum Prozessablauf das Energiemanagement im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme im Vorfeld in Betrieb zu nehmen. Hierzu werden drei Simulationssysteme miteinander gekoppelt (Abb. 8).

Die Produktionsinfrastruktur wird in Plant Simulation symbolisch aufgebaut und bildet damit den Backbone, der mittels OPC UA-Client die Daten der anderen Simulationssysteme ausliest, zusammen mit den eigens simulierten Planungs- und Logistikdaten auswertet und mittels OPC UA-Server bereitstellt. Die physikalische Simulation wird in NX (Mechatronics Concept Designer) durchgeführt und von der simulierten SPS PLCSim Advanced gesteuert. Die Sensor- und Anlagendaten der Simulation werden über einen OPC UA-Server bereitgestellt. Die Komponenten der (Leistungs-)Elektronik (z.B. von einer PV-Anlage oder einem Akkumulator) werden in MATLAB Simulink zeitkontinuierlich simuliert. Die Ergebnisse können ebenfalls mittels OPC UA-Server bereitgestellt werden.

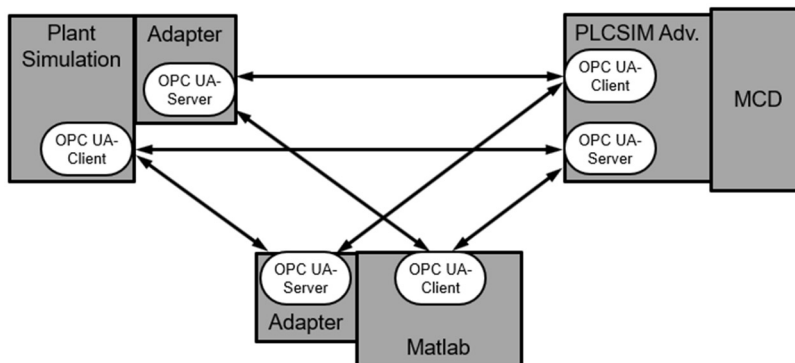


Abbildung 8: Kopplung von drei Simulationssystemen

Die PLCSIM Adv. liest über einen OPC UA-Client die Daten von Plant Simulation und MATLAB Simulink aus und kann, in Abstimmung mit dem Backbone, beispielsweise den Prozessablauf der Anlage anpassen, wenn der Akkumulator den minimalen Ladezustand erreicht hat und durch die PV-Anlage keine zusätzliche Energie bereitgestellt werden kann. Des Weiteren kann auch die Simulation in MATLAB Simulink auf die Daten der beiden anderen Simulationssysteme zugreifen, wodurch z.B. die Ladezyklen des Akkumulators optimiert werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe simulationsbasierter Werkzeuge können Entwickler im Engineeringprozess vorab entscheidungsrelevante Untersuchungen durchführen. In diesem Beitrag wurden Möglichkeiten vorgestellt, die Interoperabilität zwischen realen und simulierten Produktionssystemen zu erhöhen. Durch einheitliche Informationsmodelle realer und simulierter Anlagen ist das automatisierte Auslesen benötigter Daten zur Optimierung von Simulationsmodellen möglich. Für die Co-Simulation werden den Informationsmodellen Variablenknoten zum Auslösen von Ereignissen vorangestellt. Folglich können Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden und Eigenschaften flexibel und ressourcenverteidend gekoppelt werden.

Damit die Interoperabilität künftig für Anwender aus unterschiedlichen Bereichen gewährleistet werden kann, ist es notwendig, Informationsmodelle für die verschiedensten Anlagentypen in gemeinsamen Gremien und für alle zugänglich zu standardisieren.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie für die Förderung des Forschungsprojekts ISAC@OTH-AW.

Literatur

- Blochowitz, T. et al.: Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models. In: Proceedings of the 9th International Modelica Conference, Linköping University Electronic Press, 2012, S. 173–184.
- fmi-standard: Tools. <https://fmi-standard.org/tools/>, letzter Zugriff am 10.05.2021.
- Hensel, S.; Graube, M.; Urbas, L.; Heinzerling, T.; Oppelt, M.: Co-Simulation with OPC UA. In: 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, 2016, S. 20-25.
- IEEE Standards Association: IEEE 1516-2010 - IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)-- Framework and Rules, 2010.
- Jaensch, F.; Csiszar, A.; Kienzlen, A.; Verl, A.: Reinforcement Learning of Material Flow Control Logic Using Hardware-in-the-Loop Simulation. In: 2018 First International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Laguna Hills, 2018, S. 77–80.
- Kohl, J.; Spreng, S.; Franke, J.: Discrete Event Simulation of Individual Energy Consumption for Product-varieties. In: ElMaraghy, H. (Hrsg.): Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Amsterdam, Elsevier B.V., 2014, S. 517–522.
- Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S.: Wandlungsfähige Produktionssysteme - Ergebnisse der BMBF-Vorstudie „Wandlungsfähige Produktionssysteme“. In: wt Werkstattstechnik online (Band 4), 2009, S. 205-210.
- OPC Foundation: Norm IEC/TR 62541-1:18.02.2010. OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and Concepts, 2010.
- Schmidl, E.; Fischer, E.; Steindl, J.; Wenk, M.; Franke, F.: Reinforcement learning for energy reduction of conveying and handling systems. In: Procedia CIRP, Volume 97, 2021, S. 290-295.
- Seow, Y.; Rahimifard, S.: A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (3), 2011, S. 258–264.
- Sobie, C.; Freitas, C.; Nicolai, M.: Simulation-driven machine learning: Bearing fault classification. In: Mechanical Systems and Signal Processing Volume 99, 2018, S. 403-419.
- Straßburger, S.: On the Role of Simulation and Simulation Standards in Industry 4.0. In: 2019 Simulation Innovation Workshop (SIW), Orlando, USA, 11.-15.02.2019.
- Tur, B.; Fischer, E.; Franke, J.; Bergs, C.; Schulze, C.: Modelling of Energy Storage Devices and Converters for Energy Flow Simulation in Plant Simulation. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): ASIM 2019. Simulation in Produktion und Logistik. Auerbach/Vogtl.: Wissenschaftliche Scripten, 2019, S. 97-110.
- Wenk, M.: Potentiale der Virtuellen Inbetriebnahme für die industrielle Anwendung und die Lehre. In: Tagungsband AALE 2014, Regensburg, 08.-09.05.2014, S. 175-184.
- Zizler, E.; Wenk, M.; Martens, B.: Self-Learning Energy Management System on the Process Control Level. In: Applied Mechanics and Materials, Vol. 882, 2018, S. 3-9.