

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau

***Physics-based Simulation within the Engineering Process – Potentials
for the Development of Assembly Systems in Automotive Industry***

Benny Drescher, TU München, München (Germany), benny.drescher@iwb.tum.de

Peter Stich, Fraunhofer IWU, Augsburg (Germany), peter.stich@iwu.fraunhofer.de

Jens Kiefer, Anton Strahilov, Thomas Bär, Daimler AG, Ulm (Germany),
jens.kiefer@daimler.com, anton.strahilov@daimler.com, thomas.baer@daimler.com

Gunther Reinhart, TU München / Fraunhofer IWU,
München und Augsburg (Germany), gunther.reinhart@iwb.tum.de

Abstract: The paper outlines potentials for an application of physics-based simulation methods in order to improve the development of assembly systems within automotive industry. Therefore, today's characteristics of development processes including the perspective of an automotive manufacturer and its suppliers are visualized by process charts. A milestone-based overview describes current time and quality constraints. Furthermore, potential industry applications for mechatronics, especially physics-based simulation methods are deduced and discussed in four promising use-cases. The use-cases contribute to the integration and broader acceptance of simulation methods in automotive industry.

1 Motivation und Zielsetzung des Beitrages

Der Anteil an Steuerungskomponenten in Maschinen und Anlagen nimmt fortwährend zu. Die Anlagen der Zukunft zeichnen sich demnach durch ein mechatronisches Grundprinzip aus. Sie bestehen aus mechanischen Modulen zur Aufnahme von Kräften und Momenten, werden elektrisch angetrieben und durch komplexe informationstechnische Einheiten synchronisiert (Mensch und Mechatronik 2013). Dieser Trend stellt neue Herausforderungen an den Entwicklungsprozess und erfordert innovative Methoden sowie Entwicklungswerkzeuge.

Die Simulation stellt eine Möglichkeit dar, der Komplexitätszunahme mechatronischer Produktionsanlagen durch eine frühzeitige digitale Absicherung entgegenzuwirken. Die kontinuierliche Weiterentwicklung eingesetzter Verfahren zeigt die Bestrebungen zur Integration der physikbasierten Simulation in die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) von kinematischen Anlagenverhalten. Aktuell finden jedoch solche Ansätze nur in wenigen Bereichen Anwendung, beispielsweise zur Absicherung von Palettiervorgängen in der Verpackungstechnik.

Zentrales Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Identifikation von Einsatzpotenzialen einer physikbasierten Simulation im Zuge des Entstehungsprozesses automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion. Dem Stand der Technik wird dabei zunächst ein repräsentativer Anlagenentstehungsprozess (AEP) gegenüber gestellt, der in Kooperation mit einem Automobilhersteller (OEM) sowie mehreren Zulieferern erfasst worden ist. Dabei werden bestehende Integrationsformen digitaler Werkzeuge sowie unternehmensspezifische Handlungsfelder für neue Simulationsverfahren aufgezeigt. Im Anschluss folgt eine Darstellung branchenspezifischer Potenziale, die nach Relevanz und Machbarkeit für einen Einsatz einer physikbasierten Simulation untersucht wurden und in vier repräsentativen Anwendungsfällen (Use-Cases) zusammengefasst sind.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die virtuellen Techniken repräsentieren etablierte Hilfsmittel zur Unterstützung unternehmensinterner wie auch -übergreifender Geschäfts- und Entwicklungsprozesse. Dazu werden im Folgenden der Stand der Erkenntnisse für Themenfelder des Virtuellen Engineering, der Virtuellen Inbetriebnahme sowie der physikbasierten Simulation skizziert.

2.1 Möglichkeiten der Prozessaufnahme

Das Grundprinzip „IT folgt dem Prozess“ spiegelt die Anforderungen an virtuelle Techniken und im Besonderen an die Simulation im Maschinen- und Anlagenbau wider. Im Vorfeld eines Simulationseinsatzes ist daher eine detaillierte Prozessaufnahme unabdingbar, um daraus die Bedarfe bezüglich der Simulationstechnik abzuleiten. Die Systematisierung von Prozessen kann durch unterschiedliche Modellierungsarten erfolgen, beispielsweise Prozesstabellen oder -landkarten (Koch 2011). Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt die Prozessaufnahme mit Hilfe der *Structured Analysis and Design Technique (SADT)*, die zusätzlich zur Prozessbetrachtung die eingesetzten digitalen Werkzeuge beinhaltet (Ross 1977). Zu jeder Aktivität innerhalb des AEP (z.B. *Mechanik konstruieren*) kann ein skalierbares SADT Prozesselement definiert werden, der hinsichtlich der Abstraktionsstufe der Prozessbetrachtung und um Rahmenbedingungen bzw. Steuerungsinformationen erweiterbar ist.

2.2 Entwicklungsprozesse des Maschinen- und Anlagenbaus

Der Produktentstehungsprozess ist ein Geschäftsprozess (Gausemeier und Berger 2004), der sich durch einen Neuheitsgrad und damit verbundenen Unsicherheiten bezüglich der eingesetzten Technologien und Techniken zur Umsetzung auszeichnet

(Risse 2003). Darauf aufbauend fokussiert der AEP die Teilschritte bis zum Hochlauf einer Produktionsanlagen und ist von folgenden Trends beeinflusst:

Mechatronische Funktionsintegration

Entwicklungsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau zeichnen sich zunehmend durch eine hohe Funktionsintegration verschiedener Disziplinen, der Mechanik, der Elektrik und im Besonderen der Software, aus (Abele und Reinhart 2011; Lewald 2008). Dies führt zu komplexen mechatronischen Produktionsanlagen wie auch Entwicklungsprozessen (Krause und Franke 2007). Ansätze einer interdisziplinären Standardisierung und die Einführung mechatronischer Baukästen sowie der Anwendung von Systems Engineering Methoden stellen dabei Ansätze dar, der Komplexitätszunahme entgegenzuwirken (Pahl et al. 1996).

Verteiltes Engineering

Global verteilte Absatzmärkte führen zu unternehmensübergreifenden Produktionsnetzen mit globalen Standorten, was einen erhöhten Abstimmungs- und Koordinationsaufwand im Engineering erfordert, um die verteilt ablaufenden Prozessschritte zu synchronisieren (Simon 2006). Spiegelberger (2011) spricht in diesem Zusammenhang auch von einem mechatronischen Reifegrad. Die Hersteller digitaler Entwicklungswerkzeuge versuchen diesem Trend durch neue Kollaborationsansätzen gerecht zu werden (Abramovici et al. 1998).

Einsatz digitaler Werkzeuge

Die Digitale Fabrik hat sich als ein Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von Methoden und Werkzeuge zur Simulation und funktionalen Absicherung von Produktionsprozessen etabliert (Verein Deutscher Ingenieure 2008). Vorteile der virtuellen Planung liegen in Zeit- und Kostenersparnissen. Gerade für Zulieferer der Automobilindustrie steigt die Bedeutung der Digitalen Fabrik, denn durch die Vorreiterrolle der OEMs ist ein Zwang zum Einsatz von Simulationsmethoden auch beim Anlagenbauer erkennbar. Unternehmensspezifisch angepasste Methoden zur virtuellen Planung und Simulation mechatronischer Anlagen sind wichtige Voraussetzungen für den Erfolg dieser digitalen Integrationsansätze.

2.3 Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme

Eine durchgängige digitale Anlagenentwicklung und -absicherung hilft, Effizienz und Qualität bei Produktionsanläufen weiter zu steigern. Dabei stellen vor allem die beiden Methoden, das Virtuelle Engineering und die Virtuelle Inbetriebnahme, Lösungen dar, die aus dem Entwicklungsprozess automatisierter Rohbauanlagen heute nicht mehr wegzudenken sind (Kiefer und Borutta 2010).

Die Methode *Virtuelles Engineering* dient dabei der Visualisierung und simulationsgestützten Absicherung von Anlagenabläufen, Taktzeiten und Kollisionen unter Berücksichtigung beliebiger Produktvarianten, basierend auf einem kinematisierten 3D-Modell (Lacour 2011) der Produktionsanlage. In Anlehnung an Kiefer (2007) ist die *Virtuelle Inbetriebnahme* als Methode zur Absicherung der anlagenbezogenen Steuerungstechnik (u.a. SPS-/ RC-Programme, Produktionsleitsysteme) unter Verwendung eines mechatronischen Anlagenmodells zu verstehen. Des Weiteren dient die Virtuelle Inbetriebnahme der frühzeitigen Beurteilung, Optimierung und Absicherung des gesamten Anlagenverhaltens sowie des Zusammenwirkens von

Produkt, Anlagenmechanik, -elektrik und anlagenbezogener Steuerungstechnik vor dem Aufbau der realen Anlage.

Derzeit arbeiten die Automobilhersteller mit Hochdruck daran, diese beiden innovativen Absicherungsmethoden auch für andere automatisierte Gewerke (z.B. für die automatisierte Montage) gewinnbringend nutzbar zu machen. Innerhalb der Daimler AG werden die Methoden des Virtuellen Engineering und der Virtuellen Inbetriebnahme seit 2012 beispielsweise bereits für operative Umfänge im Kontext automatisierter Montageanlagen genutzt. Die prozessuale Verankerung dieser beiden Methoden kann dabei Abbildung 1 entnommen werden.

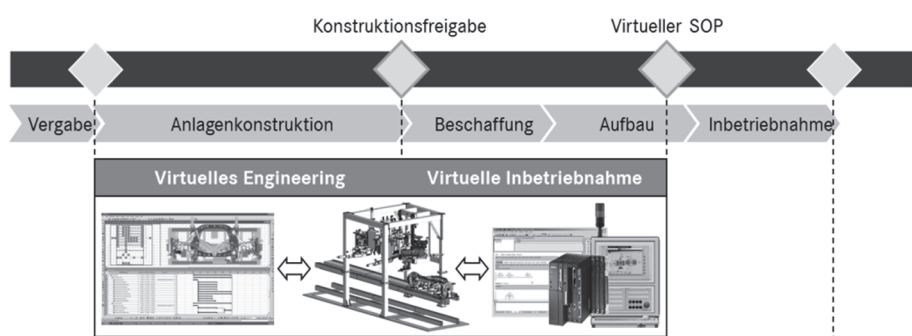


Abbildung 1: Eingliederung der Methoden Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme in den Anlagenentstehungsprozess bei Daimler (Kiefer und Walla 2012)

Im Rahmen mehrerer Projekte konnten bereits vielfältige Nutzenpotentiale der beiden Absicherungsmethoden Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme nachgewiesen werden, wie unter anderem:

- Effizienzsteigerung im gesamten Anlagenentstehungsprozess
- Frühzeitige Sicherstellung der Produkt-, Prozess- und Anlagenqualität
- Bessere Beurteilung des Anlagenreifegrades während des Anlagenentstehungsprozesses
- Schnellere und stabilere Produktionsanläufe – insbesondere nach Produktintegrationen im laufenden Produktionsbetrieb
- Verbesserte Softwarequalität und höhere Anlagenverfügbarkeit während des Produktionsbetriebs

2.4 Physikbasierte Anlagensimulation

Die physikbasierte Anlagensimulation ist ein neuer Lösungsansatz zur Integration von physikbasierten Modellen in die Virtuelle Inbetriebnahme bzw. mechatronische Simulation (Roßmann und Jung 2008; Spitzweg 2009; Lacour 2011). Der Ansatz der physikbasierten Simulation ermöglicht es, bestehende Simulationsmodelle mit physikalischen Effekten zu erweitern, um das dynamische Verhalten der Anlage, beispielsweise Effekte wie Kollision oder Reibung, abbilden zu können (Roßmann und Jung 2008). Dabei wird das Verhalten der Simulationsobjekte über physikalische Gesetzmäßigkeiten und optimierte Berechnungsverfahren aus der

Computergrafik echtzeitfähig simuliert (Bender 2007). Durch die Ableitung des Materialflussverhaltens aus der 3D-Geometrie entfällt der Programmieraufwand für die Simulation im 3D-Bereich weitgehend (Wünsch 2010). Der Ansatz einer physikbasierten mechatronischen Simulation reduziert daher den Modellierungsaufwand zur Simulation auf eine Parametrierung der physikalischen Eigenschaften und eine Kinematisierung der Modelle.

Die bisherigen Ergebnisse zur physikbasierten Simulation im Maschinen- und Anlagenbau beschränken sich auf die Simulation formstabiler Objekte und weniger Prozessgüter. Die Abbildung des biegeschlaffen Bauteilverhaltens ist mit den aktuellen Methoden aufgrund der notwendigen Rechenleistung nicht für eine Absicherung der Steuerungstechnik einsetzbar. Neuartige Ansätze für eine effiziente Simulation biegeschlaffer Objekte stellen aktuell Schwerpunkt mehrerer Forschungsaktivitäten im Bereich der Computergraphik dar. Die innovativen Ansätze stehen momentan jedoch nur eingeschränkt in den Physik-Engines wie Bullet oder PhysX® zur Verfügung und werden bislang nicht zur Physiksimulation in der Produktionstechnik eingesetzt. Neue Ansätze bei der Modellerstellung (Reinhart und Stich 2011) sowie weitere Funktionalitäten bei der Integration biegeschlaffer Bauteile tragen zukünftig aber wesentlich dazu bei, die physikbasierte Simulation auf zusätzliche Anwendungsgebiete auszuweiten (Reinhart und Stich 2013). Für die industrielle Anwendung der physikbasierten Simulation umfasst die Systemlandschaft eine Reihe geschlossener Software-Lösungen, wie beispielsweise Exporior der iSILOG GmbH, Demo3D der SimPlan AG oder industrial physics der machineering GmbH. Die physikbasierte Simulation des Anlagenverhaltens ist mittels dieser Systeme lediglich für wenige, meist primitive Kollisionsgeometrien der Prozessgüter möglich und fokussiert Anwendungsgebiete aus der Verpackungstechnik und der Logistik. Zusätzlich bieten die Softwaresysteme nur eingeschränkt Schnittstellen zu bestehenden CAD-Systemen und finden aufgrund einer mangelnden Einbettung in die bestehenden Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse der Anlagenbauer somit nur sporadisch Anwendung.

3 Ist-Analyse des derzeitigen Entwicklungsprozesses automatisierter Montageanlagen

Aktuelle Anlagenentstehungsprozesse innerhalb des Automobilbaus sind, wie in Abbildung 2 dargestellt, in mehrere Phasen unterteilt, die vorwiegend sequentiell durchlaufen werden. Ein durchschnittlicher AEP erstreckt sich dabei über etwa ein Jahr, wobei die Dauer der einzelnen Phasen in Abhängigkeit von der Komplexität der Montageanlage variiert.

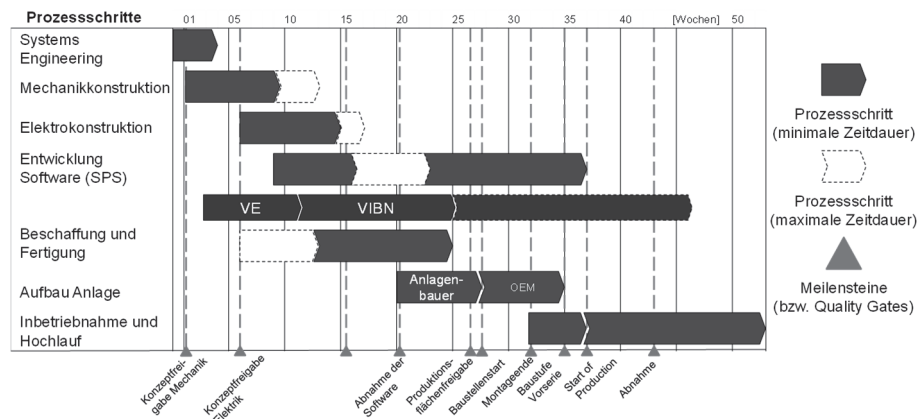


Abbildung 2: Phasen und Meilensteine im heutigen AEP automatisierter Montageanlagen mit Erweiterung durch Virtuelles Engineering (VE) und Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)

Die wichtigsten Meilensteine, die unternehmensspezifisch weiter detailliert sein können, stellen im Verlauf des Entwicklungsprozesses die Konstruktions-, Konzept-, Fertigungsfreigabe sowie Abnahmepunkte dar. Die Phase des Systems Engineerings ist als initialer Schritt von besonderer Bedeutung. Dabei werden in der unternehmensspezifischen Ausgestaltung in einem *Grobgerüst* gemeinsame Dokumente, Funktionen und Merkmale der Produktionsanlage strukturiert und während des Entwicklungsprozesses sukzessiv mit weiteren Daten angereichert. Somit steht ein zentrales Dokument zur Verfügung, das Transparenz schafft und redundante Aufwände vermeidet. Spezifische PDM- oder übergreifende PLM-Werkzeuge zur Bearbeitung der Funktionssicht sind in dieser frühen Phase aktuell zwar noch nicht im Einsatz, jedoch laufen im Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus bereits einige Pilotprojekte zu dieser Thematik.

Die Mechanik-Konstruktion bestimmt die Geometrie der Produktionsanlage (SADT in Abbildung 3 links), wobei die 3D-Konstruktion die Grundlage ist, von der weitere Entwicklungsdaten abgeleitet werden. Zur Erstellung dieser Konstruktionsdaten werden verstärkt Modulbaukästen eingesetzt, aus deren Standardbauteilen geschätzte 80 Prozent der Anlage bestehen. Die Ausgestaltung der Bausteine erfolgt dabei anhand von Richtlinien und Standards der OEMs. Zulieferer müssen daher einige Standard-Anlagenmodule in mehreren Entwicklungsumgebungen umsetzen, was eine Redundanz in der Datenerstellung und Pflege zur Folge hat. Die digitalen Werkzeuge werden in dieser Phase kundenspezifisch eingesetzt. Dies hat zur Folge, dass sich kundenorientierte Teams herausbilden, die sich auf einzelne Werkzeugketten fokussieren, die vom OEM gefordert werden. Beispiele der Entwicklungswerkzeuge sind Catia oder Delmia (Dassault Systèmes), ProE (PTC) sowie MS-Office Systeme. Innerhalb der Mechanik-Konstruktion entstehen, unter Berücksichtigung von Standards des OEM und der Produktvarianten, Fertigungszeichnungen, Pneumatikpläne und Taktzeitdiagramme sowie FMEA-Analysen und Beschaffungslisten.

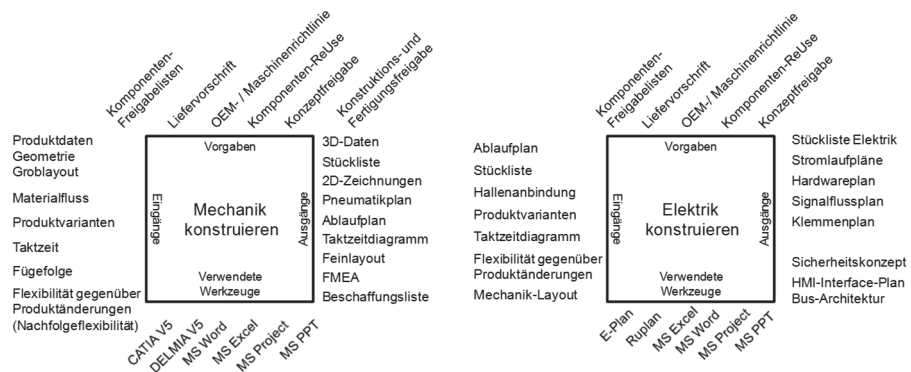


Abbildung 3: SADTs für die Prozessschritte Mechanik und Elektrik konstruieren

Die Elektro-Konstruktion umfasst die Festlegung der Busarchitektur, die Konstruktion von Schaltschränken und die Festlegung von Elektronik-Funktionen der automatisierten Anlage (SADT in Abbildung 3, rechts). Dieser Aspekt der Konstruktionsphase wird oftmals an weitere Zulieferer fremdvergeben, wodurch zusätzliche Abstimmungs- und Koordinationsaufwände entstehen. Auch müssen dadurch die Anforderungen des OEMs weitergereicht und eine zusätzliche Prüfung der Entwicklungsergebnisse eingeplant werden. Auf Grundlage der Anlagengeometrie und der benötigten Aktorik wie auch Sensorik können die Schaltschränke und elektronischen Komponenten dimensioniert werden. Dies bedeutet auch, dass Signalfluss-, Stromflusspläne sowie die Stücklisten für die Elektronik-Bauteile entstehen. Eingesetzte digitale Werkzeuge sind in dieser Phase E-CAD-Systeme (z. B. Eplan, Ruplan), sowie SAP- und MS-Office-Anwendungen.

Die Entwicklung der Software umfasst die Definition des Funktionsumfangs des Steuerungsprogramms. Dazu werden auch Symbolisten für Ein- und Ausgänge festgelegt und die Schrittfolgen der Anlage beschrieben (SADT in Abbildung 4, links). Die Softwareentwicklung beginnt während der Elektronik-/ Mechanik-Entwicklung, zieht sich jedoch aufgrund von Anpassungen der Software und aufwändiger Tests bis zum Abschluss der Inbetriebnahme beim OEM. Digitale Werkzeuge, die in dieser Phase zum Einsatz kommen, sind abhängig von der verwendeten Steuerungs- bzw. Robotertechnik (z.B. Step7, ROBCAD).

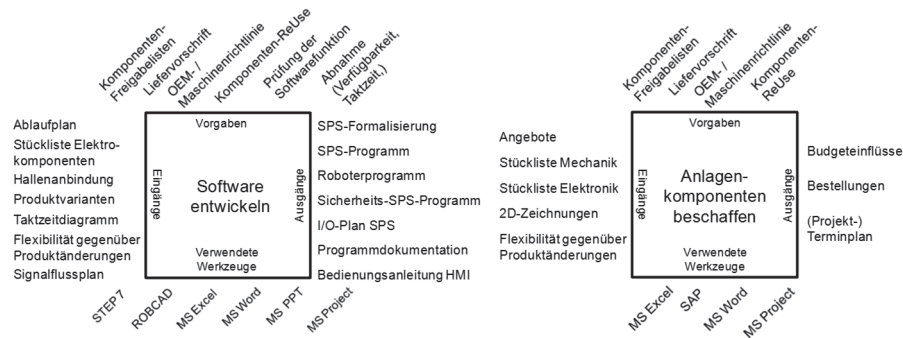


Abbildung 4: SADTs für die Prozessschritte *Software entwickeln* und *Anlagenkomponenten beschaffen*

Die Beschaffung (SADT in Abb. 4, rechts), hauptsächlich von mechanischen Bauteilen, beginnt parallel zur Mechanik-/ Elektronik-Entwicklung, wobei der Zeitraum je nach Komplexität der Bauteile variiert. Der Aufbau der Automatisierungsanlage beinhaltet die Planung der Montage, die Festlegung der Prüfreihefolge, das Prüfen der Toleranzen und die Aufnahme von Fehlern (SADT in Abb. 5, links). Dies erfolgt in einem ersten Schritt beim Anlagenbauer und nach erfolgreichem Test beim OEM. Dabei ist ein Paradigmenwechsel erkennbar, da aufgrund des oftmals vorliegenden Zeitdrucks häufig der interne Aufbau beim Zulieferer entfällt. Dadurch kann die Inbetriebnahme ausschließlich beim OEM erfolgen. Die Herausforderungen während der Baustellenphase sehen die Unternehmen in der Koordination und der Abstimmung mit dem OEM. Die Inbetriebnahme umfasst die Abnahme durch den OEM, wobei die spezifizierten Anforderungen anhand von Checklisten und Prüfprotokollen abgenommen werden (SADT in Abb. 5 rechts). Der nachfolgende Hochlauf erfordert zudem weitere Nachbesserungen und ist durch mehrere Produktionsstufen gekennzeichnet, in denen Produktionskennzahlen kontinuierlich gesteigert werden.

Die Aufnahme des IST-Prozesses in der Automobilindustrie hat ergeben, dass die Methoden der Virtuellen Inbetriebnahme im Bereich der Montage z. T. nur im begrenzten Rahmen eingesetzt werden. Verbesserungspotenziale in Kosten und Qualität sind hauptsächlich in der Softwareentwicklung durch die Verringerung von Fehlern und die Absicherung der Produktionsvorgänge (Schrittketten) erkennbar. Die Methoden der interdisziplinären Simulation werden dennoch bei vielen Zulieferern als ein vielversprechendes Hilfsmittel für zukünftige Projekte angegeben, um Entwicklungszeiten zu reduzieren. Dies ist laut Expertenmeinung maßgeblich durch geringere Aufwände der Aufbau-Phase begründet, da der physische Aufbau der Anlage beim Zulieferer und diesbezügliche Tests durch eine digitale Absicherung ersetzt werden können.

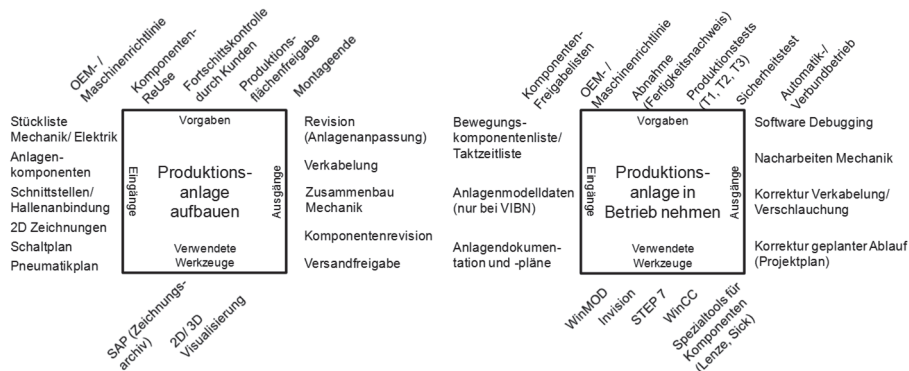


Abbildung 5: SADTs für die Prozessschritte Produktionsanlage aufbauen und in Betrieb nehmen

4 Identifizierte Nutzenpotentiale einer physikbasierten Anlagensimulation

Auf Basis des analysierten Anlagenentstehungsprozesses konnten vier wesentliche Use-Cases (UC) identifiziert werden, die im Folgenden im Detail dargestellt werden:

UC 1: Kontaktbehandlung zur Realitäts- und Effizienzsteigerung in der Anlagensimulation

Der erste Use-Case umfasst die Abbildung und effiziente Simulation von Kontaktbedingungen im Automobilbau. In bisher eingesetzten Werkzeugen zur mechanischen Simulation müssen diese Bedingungen manuell programmiert werden, was zum einen mit einem hohen Aufwand verbunden ist, zum anderen eine weitere Fehlerquelle im Entwicklungsprozess darstellt. Über eine starrkörperbasierte physikbasierte Simulation wird in diesem Anwendungsszenario das mechatronische Modell erweitert. Die Vorteile liegen, neben dem reduzierten Modellierungsaufwand, vor allem in einer wesentlich höheren Anzahl möglicher Testszenarien und einer höheren Aussagekraft der Simulationsstudien.

UC 2: Berücksichtigung des Verhaltens biegeschlaffer Bauteile in der Anlagensimulation (Einsatzgebiete: VE und VIBN)

Biegeschlaffe Bauteile (z.B. Tankrüssel, Roboter-Schlauchpaket) sind häufig Bestandteil von Produkten oder Montageanlagen und beeinflussen direkt den Produktionsprozess. Einzelne Aspekte des Verhaltens biegeschlaffer Bauteile sollen durch eine physikbasierte Simulation im Rahmen des Virtuellen Engineering abgebildet werden. Dadurch werden die Voraussetzungen für eine frühzeitige Erkennung potentieller Störungen im Ablauf des Montageprozesses aufgrund formlabilen Bauteilverhaltens geschaffen.

UC 3: Energieberechnung und -visualisierung von automatisierten Montageanlagen

Das Vorgehen zur Absicherung der Anlagengeometrie sowie der Anlagenabläufe im Rahmen des Virtuellen Engineering soll um Energiebetrachtungen erweitert werden. Ziel ist es dabei, die realen Energieverbräuche der verfahrbaren Komponenten einer automatisierten Montageanlage (z.B. Hubtisch, Roboter) mit Hilfe der physik-

basierten Simulation zu berechnen und zu visualisieren. Diese Ergebnisse können anschließend als Basis für eine Analyse und Steigerung der Energieeffizienz der Montageanlagen dienen.

UC 4: Auslegung und Absicherung von Befüllprozessen

Die Absicherung von industriellen Befüllanlagen birgt erhebliches Verbesserungspotential: Der dem eigentlichen Befüllprozess häufig vorangehende Evakuierungsprozess der Luft aus einer zu befüllenden Komponente (z.B. Bremssystem) hängt entscheidend von der Bauteilgeometrie ab und wird bei der Prozess- und Anlagenentwicklung derzeit nicht berücksichtigt. Im Rahmen des Virtuellen Engineering kann mit Hilfe einer geeigneten physikbasierten Simulation der Evakuierungs- und Befüllprozess abgebildet und somit die optimalen Prozess- und Anlagenparameter frühzeitig erkannt und eingestellt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag skizziert den heutigen Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen im Automobilbau, illustriert die hierbei eingesetzten Methoden und Techniken und stellt auf Grundlage der durchgeführten IST-Analyse Einsatzpotentiale der physikbasierten Anlagensimulation dar.

Die bis dato durchgeführten Arbeiten liefern eine hervorragende Basis für den noch zu bestreitenden Weg der operativen Nutzbarmachung der physikbasierten Simulation zur Verbesserung des AEP. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

- Sammeln und Gewichten der Use-Case-spezifischen Anforderungen
- Analyse und Bewertung verfügbarer Ansätze zur Physiksimation
- Methodenentwicklung zu deren operativen Nutzbarmachung im AEP
- Entwicklung eines Einführungskonzepts für eine operative Anwendung

Danksagung

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Forschungsprojekts *Auslegung automatisierter Produktionsanlagen im Automobilbau mit Hilfe einer physikbasierten mechatronischen Simulation* (AutoPhyS, GZ: RE 1112/35-1), das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft großzügig gefördert wird. Die Autoren danken der DFG für die Unterstützung bei der Projektbeantragung und -durchführung.

Literatur

- Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.
- Abramovici, M.; Gerhard D.; Langenberg, L.: Supporting Distributed Product Development Processes with PDM. In: Krause, F.-L. (Hrsg.) New Tools and Workflows for Product Development CIRP Seminar STC Design. Berlin: Fraunhofer IRB 1998.
- Bender, J.: Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität. Karlsruhe, Universität Karlsruhe 2007.

- Gausemeier, J.; Berger, T.: Ideenmanagement in der strategischen Produktplanung – Identifikation der Produkte und Geschäftsfelder von morgen. In: Konstruktion Nr. 9. Düsseldorf: Springer 2004, S. 64-68.
- Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Universität des Saarlandes 2007.
- Kiefer, J.; Borutta, H.: Virtuelle Inbetriebnahme im Rohbau Werk Wörth, In: 6. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, Fulda, 2010.
- Kiefer, J.; Walla, W.: Potentiale im Sonderanlagenbau am Beispiel der PKW-Hochzeit, In: 8. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, Regensburg, 2012.
- Koch, S.: Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Six Sigma, Kaizen und TQM. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.
- Krause, F.-L.; Franke, H.-J.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. München, Wien: Hanser 2007.
- Lewald, A.: Gedanken zur Mechatronik aus Sicht eines PLM Anbieters (PTC). In: Eigner, M. (Hrsg.): Mechatronik - die Herausforderung an Integration im Produktentstehungsprozess. Tagungsband - Jahrestagung 2008 - Berliner Kreis. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2008.
- Lacour, F.-F.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. München: Utz 2011.
- Mensch und Mechatronik, <www.mensch-mechatronik.de>. Zugegriffen am 05.06.2013.
- Pahl, G; Beitz, W.; Wallace, K.: Engineering design. A systematic approach, 2. Auflage. Berlin: Springer 1996.
- Reinhart, G.; Stich, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftreihe 2011.
- Reinhart, G.; Stich, P.: Physikbasierte Modelle formlabiler Objekte zur Auslegung produktionstechnischer Systeme. Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftreihe 2013.
- Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie. Berlin: University of Berlin 2003.
- Roßmann, J.; Jung, T.: Dynamiksimulation für Virtuelle Welten: Erfahrungen, Anwendungen, Methoden. In: 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftreihe 2008.
- Ross, D. T.: Structured analysis (SA). A language for communicating ideas. In: IEEE Transactions on Software Engineering. 1977.
- Simon, S.: Benchmark im Werkzeugmaschinenbau. Ein Beitrag zur wettbewerbsfähigen Produktentwicklung. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt 2006.
- Spiegelberger, B.: Anwendergerechte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse für kleine und mittlere Unternehmen im Maschinenbau. Göttingen: Sierke 2011.
- Spitzweg, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. München: Utz 2009.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik Grundlagen. Berlin: Beuth 2008.
- Wünsch, G.: Testen Testen Testen. In: Mechatronik & Engineering, 2010.