

Methodik zur frühzeitigen Integration prozessspezifischer Einflussfaktoren aus der automatisierten Montage in die Auslegung funktionskritischer Komponenten

Eva Russwurm^{1*}, Florian Faltus¹, Fabian Laukotka², Lukas Schwan², Matthias Brossog¹, Dieter Krause², Jörg Franke¹

¹ Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Germany

² Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design (PKT), Hamburg University of Technology (TUHH), Germany

* Korrespondierender Autor:

Eva Russwurm
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl FAPS
Egerlandstraße 7-9, 91058 Erlangen
Telefon: 09131 - 85 27241
Mail: eva.russwurm@faps.fau.de

Abstract

Dimensioning function-critical components in automated manufacturing systems is critically and depends on the handled objects as well as the handling processes. The processes lead to mechanical forces and torques on the components. During engineering, these process-depending forces are mostly unknown and thus, are taken into consideration by using high safety factors. In order to reduce the resulting over-dimensioning a novel methodology, which facilitates all available information and new methods, is presented. By combining a Co-Simulation, consisting of FEM- and Multi-Physics-Simulations, with MBSE-approaches the digitized workflow iteratively converges the parameters of these critical components. A hardware-in-the-loop-approach assists gathering specific data and validating the final design-parameters.

Keywords

automated manufacturing, methodic design/dimensioning, process-effects, Model based Systems Engineering, Co-Simulation

1. Motivation

Die Dimensionierung einzelner Komponenten im Rahmen der Montagesystementwicklung ist eine Herausforderung, da viele Randbedingungen, insbesondere Material- und Belastungsvariationen, berücksichtigt werden müssen. Diese Herausforderung besteht insbesondere bei Handhabungssystemen, da die im Betrieb wirkenden exakten Kraft- und Momenteneinflüsse zu Beginn des Entwicklungsprozesses noch nicht endgültig bekannt sind. Diese Belastungen ergeben sich aus statischen und dynamischen Kräften, welche im Zusammenspiel des Gesamtsystems entstehen, das zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig auskonstruiert ist. Innerhalb des Handhabungssystems stellt dabei das Greifersystem eine funktionskritische Komponente dar. Durch die genannten Unsicherheiten können Randbedingungen nur überschlägig in die Dimensionierung und Ausgestaltung einfließen. Um Ausfälle solcher funktionskritischen Komponenten zu vermeiden und die Funktionsfähigkeit des gesamten Handhabungssystems zu gewährleisten, werden meist hohe Sicherheitsfaktoren gewählt, wodurch das Gewicht und meist auch die Kosten ansteigen [1, 2]. Zudem fehlen einheitliche Richtlinien zur Auslegung, die dafür sorgen, dass alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden [3].

Neben der Überdimensionierung ist auch die Absicherung des Montageprozesses bereits in der Auslegung ein wesentlicher Handlungsbedarf, da eine mangelnde Absicherung, abhängig von der Anwendung, nicht nur die Funktion, sondern auch die Sicherheit beeinflussen kann [2]. Wenngleich dieser Aspekt eine weitere Motivation darstellt, liegt der Fokus in diesem Paper vor allem auf der Verbesserung des Auslegungsansatzes.

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Definition der funktionskritischen Komponente, wie sie in diesem Paper verstanden wird. Es folgt eine Einordnung von Greifer- und Handhabungssystemen im Kontext der automatisierten Montage. Anschließend werden aktuelle Entwicklungsansätze sowie erforderliche Grundlagen der Co-Simulation und des Model-Based-Systems-Engineering (MBSE) beschrieben.

2.1. Definition „funktionskritische Komponente“

In der automatisierten Montage ist es ein Ziel, Leerlaufzeiten zu vermeiden, weswegen möglichst funktionsfähige und ausfallsichere Systeme eingesetzt werden sollen. Um Fehlerquellen bereits in frühen Entwicklungsphasen festzustellen, wird in der Qualitätssicherung u.a. die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) eingesetzt [4]. Ein Bestandteil dieser ist es, festzustellen, welche Auswirkungen ein Bauteilausfall auf das Gesamtsystem hat [5, 6]. In die Kategorie funktionskritisch fallen dabei jeweils Bauteile oder Prozesse, welche die Funktion eines Produkts beeinflussen und welche bei Versagen zu Produktionsausfällen führen können. In Anlehnung an diese Klassifizierung werden auch in diesem Beitrag unter *funktionskritisch* die Komponenten verstanden, welche kritisch für die Erfüllung der Funktion eines Produkts oder einer automatisierten Montageanlage sind.

2.2. Einordnung von Greifersystemen

Innerhalb von automatisierten Montageanlagen stellen Handhabungssysteme grundlegende Funktionen wie das Speichern, Bewegen oder Halten von Bauteilen zur Verfügung. Während Bewegungssysteme es ermöglichen, das zu produzierende Gut zu drehen, zu wenden, zu schwenken, zu ordnen, zu positionieren oder weiterzugeben, lässt sich dieses durch sog. Haltesysteme greifen, halten, aufnehmen oder entspannen (Bild 1). [7]

Bekannte Vertreter der Haltesysteme als Untergruppe der Handhabungssysteme sind gemäß VDI 2860 die sog. Greifersysteme, zu denen beispielsweise pneumatische Greifer gehören. Das Greifersystem stellt dabei gemäß der Definition aus Kapitel 2.1 eine funktionskritische Komponente im Handhabungssystem und somit im Montagesystem dar.

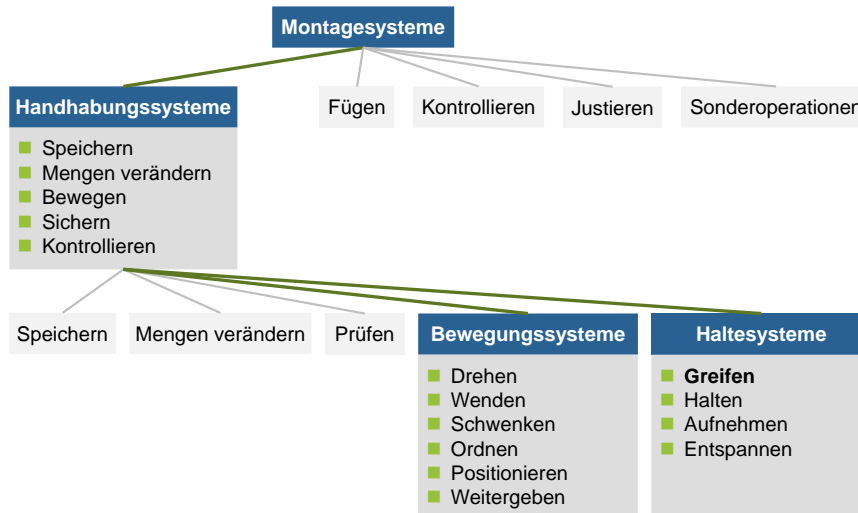


Bild 1: Fokussierung auf Bewegungs- und Haltesysteme als Teilsysteme von Handhabungs- und Montagesystemen in Anlehnung an [7]

2.3. Aktuelle Entwicklungsansätze für Greifersysteme

Bei der Gestaltung von Greifersystemen als Teil komplexer mechatronischer Montagesysteme steht die Sicherstellung der technischen Funktionen im Vordergrund. Wesentlich hierbei ist eine Absicherung bezüglich der statisch und dynamisch auf das Greifobjekt einwirkenden Kräfte während des gesamten Handhabungsvorgangs [8]. Da ein Großteil der verwendeten Modelle zur Berechnung von Greifkräften stark vereinfachte Annahmen trifft, werden in der Literatur Sicherheitsfaktoren von 2 bis 4 empfohlen [3].

Aufgrund der fortschreitenden Flexibilisierung von Greifersystemen, die sich z. B. in der Ergänzung zusätzlicher Sensorik oder in der Nutzung flexibler Kinematiken wie anthropomorpher Greiferhände sowie der Gestaltungsmöglichkeiten durch additive Fertigung niederschlägt, steigt auch gleichzeitig die Komplexität der Absicherung der entworfenen Greifersysteme.

In der Praxis können für die Greiferauswahl und -auslegung existierende Ansätze, wie im Folgenden aufgezeigt, kategorisiert werden [2]: Im einfachsten Fall erfolgt eine manuelle Auslegung von Greifersystemen für spezifische Anwendungsfälle anhand von Leitfäden mit einer begleitenden Entscheidungsunterstützung durch Tabellenwerke, Diagramme, Fragenkataloge und Checklisten. Automatisierte Methoden der Greiferauswahl umfassen Expertensysteme mit Datenverarbeitung, die es ermöglichen, die Komplexität bei der Auslegung zu beherrschen. Diese Lösungen können entweder herstellerneutral oder auch herstellerspezifisch ausgeführt sein und führen den Benutzer durch seinen individuellen Konfigurationsprozess (s. [9]). Automatisierte Methoden der Greiferauslegung hingegen umfassen die rechnergestützte Auslegung von Greiferbacken für mechanische Greifer sowie deren Optimierung mittels genetischer Algorithmen. Mittels einer dynamischen Greifersimulation haben [10] ein System zur Auslegung von Greiferbacken für Parallelgreifer entwickelt. Die dynamische Simulation berücksichtigt an dieser Stelle allerdings ausschließlich das Greifersystem, während der Gesamtkontext des Handhabungssystems nicht simulativ abgebildet wird. Bei der rechnergestützten Konfiguration und Auslegung wird auf Grundlage zuvor bestimmter Eingangsparameter eine passende Greiferlösung vorgeschlagen und dazugehörige CAD-Daten automatisiert mit ausgegeben.

In der Literatur werden fünf relevante Domänen von Handhabungssystemen identifiziert, die Einfluss auf die Gestaltung eines Greifersystems haben: Das Handhabungsgerät (Industrieroboter), das Handhabungsobjekt, der Handhabungs- und Montageprozess, Umwelteinflüsse sowie das Greifersystem selbst bzw. dessen Wirkelemente. [2]

Mit bestehenden Ansätzen der Greiferauswahl und -auslegung werden diese Einflüsse nicht ganzheitlich und exakt genug berücksichtigt. Insbesondere die auf ein Greifersystem einwirkenden dynamischen Belastungen (Domäne Prozess) werden häufig unterschätzt und sollten daher in der Auslegung nicht nur überschlägig, sondern detailliert betrachtet werden. [8]. Der in Kapitel 4 vorgestellte Ansatz bietet das Potential, an allen genannten Domänen von Handhabungssystemen anzusetzen (Bild 2).

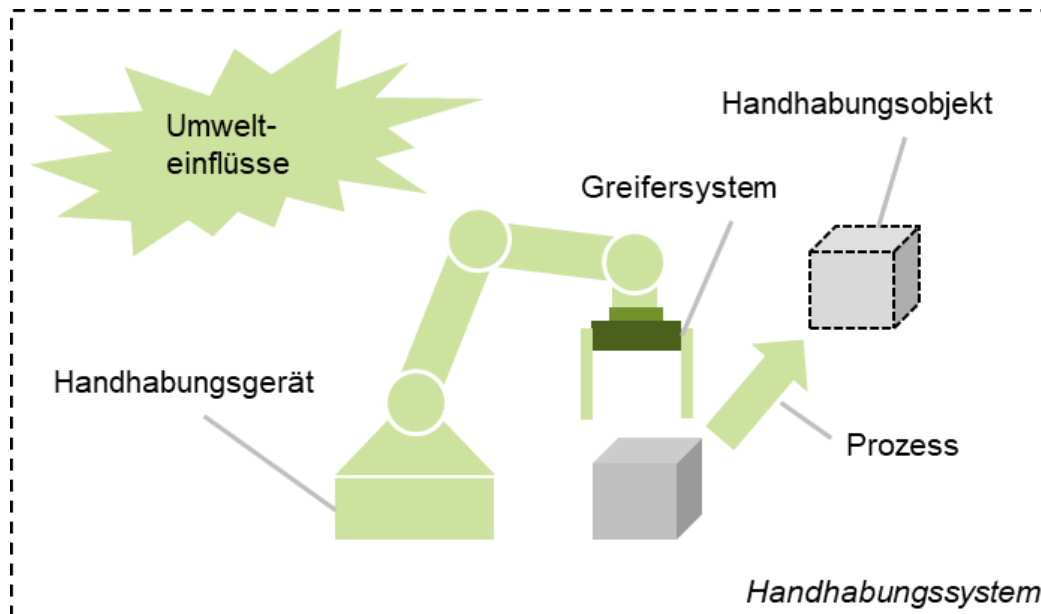


Bild 2: Domänen eines Handhabungssystems in Anlehnung an [2]

2.4. Co-Simulation

Der steigende Komplexitätsgrad von Montagesystemen macht es erforderlich, weitere Simulationsumgebungen zu verknüpfen. Um das zu realisieren, hat in den vergangenen Jahren die verteilte Simulation an Bedeutung gewonnen. Dabei handelt es sich zunächst um ein Simulationsmodell, das im Sinne von Ebenen des Gesamtmodells auf unterschiedliche Modelle mit je eigener Zielsetzung aufgeteilt wird. Zwischen den einzelnen Teilmodellen existieren Datenflüsse über Datenbanken, welche die Konsistenz dieser sicherstellen. [11]. Die Daten, die das Montagesystem digital beschreiben, sind in allgemeingültigen Datenbanksystemen verfügbar und grundsätzlich von allen am Entwicklungsprozess beteiligten Personen nutz- und veränderbar. Die auf diese Weise entstehenden Produktdatenmodelle, welche sowohl als fachübergreifende Informationsträger, als auch als Bindeglied zwischen den einzelnen Produktentstehungsbereichen fungieren, bilden die Grundlage der Co-Simulation [11, 12]. Diese besteht, wie in Tabelle 1 aufgezeigt, aus einer partitionierten Simulation oder einer Werkzeugkopplung. Damit werden die bereits während der Entwicklung entstandenen, disziplinspezifischen Simulationslösungen, welche im Hinblick auf Abbildungsgenauigkeit und Berechnungsperformanz sehr leistungsfähig und exakt sind, verknüpft, so dass ein Gesamtmodell des Montagesystems entsteht, welches sämtliche auftretende Wechselwirkungen berücksichtigt und in die einzelnen Simulationsumgebungen überträgt. [13]

Tabelle 1: Matrix der Simulationsarchitekturen [11]

		Anzahl der Simulationstasks	
		=1 (Geschlossene Simulation)	>1 (verteilte Simulation)
Anzahl der Modellierungswerkzeuge	=1 (Geschlossene Simulation)	Monolithische Simulation	Partitionierte Simulation Co-Simulation
	>1 (verteilte Modellierung)	Modellkopplung	Werkzeugkopplung Co-Simulation

Die Umsetzung der Co-Simulation innerhalb des Produktentwicklungsprozesses ist nicht trivial. Im Kontext der multidisziplinären Modellierung wird ein zentrales Problem in der Vereinigung von Modellen verschiedener Simulationsdisziplinen zu einem multidisziplinären Gesamtmodell genannt [14]. Denn zunächst sind die relevanten Daten der einzelnen Modelle über eine neutrale einheitliche Datenschnittstelle mittels eines einheitlichen Datenformats bereitzustellen. Hersteller von Simulationssoftware bestätigen mittlerweile diese These durch die Integration von neutralen Datenschnittstellen [15].

Weiterhin ist eine Basis für die Co-Simulation notwendig. Das dafür genutzte oder entwickelte Tool hat die zentrale Aufgabe, sämtliche Daten aller einzelnen Simulationswerkzeuge weiterzugeben und ggf. aufzubereiten. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze und Tests in diversen Kontexten, jedoch kein System, das sich etabliert hat. [13, 14]

2.5. Model-Based-Systems-Engineering (MBSE)

Nachdem der Umstieg auf modellbasiertes Arbeiten bei Geometrien bereits überwiegend vollzogen wurde, gibt es seit einigen Jahren den Trend, auch weitere Informationen modellbasiert zu dokumentieren [16]. So findet das MBSE auch in der Entwicklung von Produkten und Prozessen zunehmend Anklang. Dabei hilft der Einsatz von MBSE nicht nur Projektkosten einzuhalten [17], sondern auch die generelle Handhabung von Daten, insbesondere von Meta-Informationen, wird erleichtert. Gerade interdisziplinäre Projekte zeichnen sich durch zunehmende Verknüpfungen und Abhängigkeiten, also Meta-Informationen aus, die sich mit MBSE-Ansätzen gut in Form von Systemmodellen dokumentieren und verwalten lassen [18].

Neben den bereits vielfach verwendeten Definitionsdiagrammen gibt es in MBSE-Werkzeugen auch die Möglichkeit, ganze Abläufe und Vorgehen in Prozessdiagrammen zu definieren. Je nach Werkzeug, können diese Prozesse dann auch simuliert oder sogar ausgeführt werden [19]. Über das SysML-Element *opaque behaviour* besteht die Möglichkeit ausführbare Blöcke in die Modellierung zu integrieren. Diese Blöcke werden dabei in verschiedenen Programmiersprachen programmiert [20]. In Kombination mit externen Code-Bibliotheken entsteht somit eine Vielzahl an Möglichkeiten, Prozessmodelle mit weiteren Funktionen zu erweitern. So führt der Cameo Systems Modeler beispielsweise modellierte Prozessdiagramme aus und bietet über SysML-Elemente eine individuell programmierbare Schnittstelle zu externen Programmen. Diese Ansätze und Werkzeuge des MBSE lassen sich dadurch auch auf andere Anwendungsfelder mit ähnlichen Herausforderungen aus der Produktentwicklung übertragen.

3. Forschungsziel und Vorgehensweise

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass funktionskritische Komponenten in Handhabungssystemen, wie beispielsweise Greifersysteme, nicht nur statischen, sondern auch dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Insbesondere diese auftretenden

dynamischen Belastungen resultieren dabei aus prozessspezifischen Einflussfaktoren, welche aufgrund einer bestehenden Prozessvielfalt in aktuellen Auslegungsprozessen nicht berücksichtigt werden können. Dies resultiert in einer erheblichen Überdimensionierung sowie Problemen bei der Absicherung des Handhabungsprozesses.

Um die Überdimensionierung von funktionskritischen Komponenten zu reduzieren, wird hier am Beispiel von Greifersystemen ein simulationsgestützter Auslegungsansatz vorgestellt. Dazu wird ein Werkzeug benötigt, das die Systemintegration in frühere PEP-Phasen verschiebt und bereits hier eine bessere Betrachtung der resultierenden Prozesskräfte auf das Greifersystem ermöglicht. Klassische Auslegungsprozesse setzen auf eine Vielzahl verschiedener Entwicklungsschritte und Programme, die manuell durch den Entwickler verwendet werden, und sich dabei meist an einem definierten Prozess orientieren. Durch manuelle Interaktion und auftretende Iterationsschleifen ist dies im Hinblick auf die abzuschätzenden Prozesskräfte ein aufwändiges Vorgehen. Daraus ergibt sich die Forschungsfrage, wie ein Entwicklungsprozess für funktionskritische Komponenten in Handhabungssystemen aufgebaut sein muss, damit die resultierenden Kräfte sowie Belastungsvariationen schon in frühen Phasen der Entwicklung berücksichtigt werden, und somit Überdimensionierung vermeidbar ist und Belastungsvariationen berücksichtigt werden. Dabei sollen nicht nur eine Lösungsvariante, sondern integrativ die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten solcher Handhabungssysteme durch die dafür notwendige Varianzbetrachtung, untersucht werden, um die unterschiedlichen Belastungssituationen erfassen zu können. Zudem ist zu klären, wie eine durchgängige, teilautomatisierte Durchführung des Vorgehens ermöglicht wird, um den Entwicklungsaufwand zu reduzieren und die vollen Potentiale des digitalisierten Arbeitens nutzen zu können. Es bedarf eines domänenübergreifenden Ansatzes, der das Know-How aus Teilbereichen der Produktentwicklung und der automatisierten Montage verbindet.

Im Zuge einer Forschungskoooperation wurde ein erster gemeinsamer Lösungsansatz deutlich. So wird die Erfahrung mit Handhabungssystemen aus der automatisierten Montage und deren beschriebener Problematik durch die Erfahrung mit der methodischen Beherrschung von Variantenvielfalt sowie dem virtuellen Testen ergänzt. Das Schaffen einer Verbindung zwischen Software-Tools der Bauteilauslegung und einer realistischen Abbildung des Gesamtauslegungsprozesses ermöglicht es, Bauteile präziser und weniger überdimensioniert zu gestalten und dabei diverse Modifikationen und Varianten, bis hin zu betriebskritischen Szenarien, zu berücksichtigen. Der simulationsgestützte Auslegungsansatz wird mittels eines realen Systems überprüft.

4. Methodischer Ansatz zur Auslegung funktionskritischer Komponenten

Der Entwicklungsprozess wird bereits in einem frühen Entwicklungsstadium erweitert, so dass mittels einer verteilten Simulation (Co-Simulation [11]) die bisher noch unbekanntten Kräfte, Momente und weitere Prozessparameter aus dem Handhabungsprozess mit einer Multi-Physikalischen Simulation ermittelt und anschließend in einer FEM-Simulation auf Komponenten-Ebene verwendet werden [13]. Durch die simulative Bestimmung der Randbedingungen für die FEM-Simulation an den Systemgrenzen aus der gesamten Anlage wird eine realitätsnähere Auslegung ermöglicht und die Überdimensionierung iterativ reduziert.

Um die beschriebene Vielfalt an Kräften und Varianten im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, bietet sich die Verwendung von SysML-Modellen zur digitalen Verwaltung der Daten an. Ein innovativer Ansatz stellt zudem die Implementierung des Entwicklungsprozesses in einem ausführbaren SysML-Prozessmodell dar. Dieses führt die einzelnen Schritte des Entwicklungsprozesses teilautomatisiert durch, übergibt dazu die notwendigen Daten aus den Systemmodellen oder externen Quellen an die verschiedenen Programme und berücksichtigt die Ergebnisse für den weiteren Entwicklungsverlauf. Dieser

Ansatz ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Die einzelnen Aspekte werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

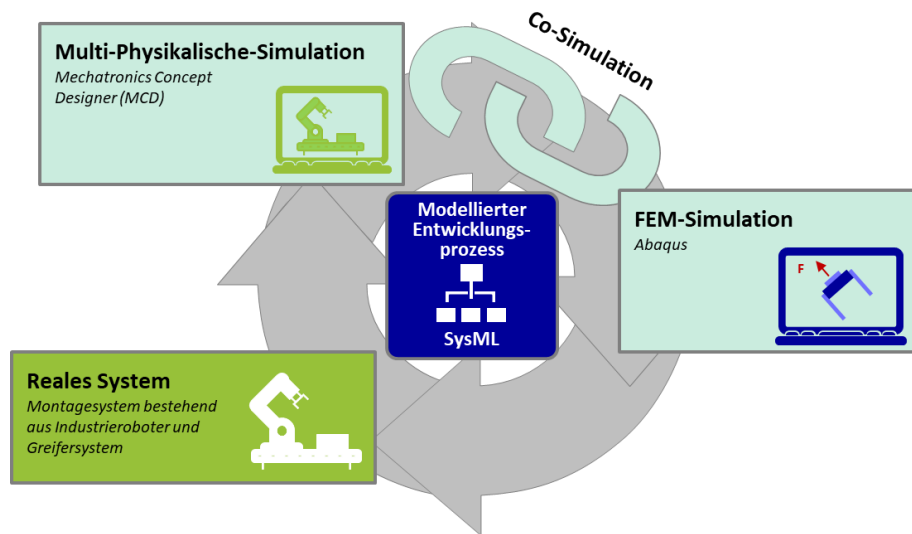


Bild 3: Teilautomatisierte datengetriebene Entwicklungsmethodik bestehend aus Multi-Physikalischer- und FEM-Simulation, realem System und funktionalem SysML-Modell des Entwicklungsprozesses

4.1. Co-Simulation

Im Kontext des Systems Engineering Prozesses ist es sinnvoll, bereits im frühen Entwicklungsstadium verschiedene Lösungsalternativen mit Hilfe von Simulationen zu prüfen. Im Folgenden wird die Co-Simulation, welche im Beispiel aus einer Multi-Physikalischen und einer FEM-Simulation besteht, als ein integraler Bestandteil der Methodik näher beschrieben.

Multi-Physikalische Simulation

Die Multi-Physikalische Simulation wird exemplarisch innerhalb des Mechatronics Concept Designers (MCD) betrachtet, welcher eine Modulanwendung von NX darstellt, bei der eine funktionale Maschinenentwicklung im Fokus steht. Dabei können einfach modellierte Geometrien zu einem Simulationsmodell erweitert werden, das neben der mehrkörperphysikbasierten Simulationstechnologie auch Aspekte der Automatisierungstechnik beinhaltet. Mit Hilfe der Simulation kann das physikalische Verhalten unterschiedlicher Lösungskonzepte visualisiert werden, wodurch deren mögliche Schwachstellen identifiziert werden können. Ausgehend von einem domänenübergreifenden Lösungskonzept wird so eine frühzeitige interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mechanik, Elektronik und Softwareentwicklung ermöglicht, was für die ganzheitliche Betrachtung des Handhabungssystems benötigt wird.

Finite-Elemente-Methode Simulation

Insbesondere bei der Kalkulation expliziter Auslegungsgrößen an den funktionskritischen Komponenten, wie Spannungen oder Dehnungen, ist es zudem von Bedeutung auch die genaue Geometrie der auszulegenden Komponente, wie im Beispiel die des Greifersystems, sowie die des Handhabungsobjekts miteinzubeziehen, um beispielsweise Spannungsspitzen ermitteln zu können. Hierfür können Simulationen basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt werden. Neben der reinen Geometrie können dabei auch Umwelteinflüsse, wie beispielsweise unterschiedliche Temperaturen simuliert werden. Um aussagekräftige Ergebnisse aus der FEM-Simulation zu erhalten, ist es hierbei von großer Bedeutung die Randbedingungen an den Systemgrenzen realitätsnah abzubilden.

Schnittstellen und Datenaustausch

Um den Auslegungsprozess von Greifersystemen zu verbessern wird in der Methodik auf die Co-Simulation zurückgegriffen. Die Multi-Physikalische Simulation eignet sich dafür, die dynamischen Prozesskräfte und -momente auf einer abstrahierten Systemebene zu berechnen. Hierbei können, wie in Bild 4 dargestellt, neben dem Handhabungsgerät ① und dem Handhabungsprozess ② auch stark vereinfacht das Greifersystem ④ sowie das Handhabungsobjekt ③ berücksichtigt werden. Der Handhabungsprozess zeichnet sich dabei durch eine hohe Vielfalt aus, welche u.a. auf die verschiedenen Handhabungsobjekte, Geschwindigkeiten und Bewegungen zurückzuführen ist, welche in der Auslegung zu berücksichtigen ist. Mittels Programmierschnittstelle kann die Multi-Physikalische Simulation genutzt werden, um die geometrisch diskretisierte FEM-Simulation auf Komponenten-Ebene mit Daten zu versorgen. Die in der Multi-Physikalischen Simulation errechneten dynamischen Prozesskräfte aus dem automatisierten Montageprozess werden dabei an die FEM-Simulation übergeben und als Randbedingungen an den Systemgrenzen verwendet. Hierdurch ist es möglich, diese zuvor unbekanntenen Prozesskräfte in die Auslegung miteinzubeziehen, um so den gesamten Auslegungsprozess zu verbessern und einer Überdimensionierung entgegenzuwirken. Auch die Berücksichtigung von Umwelteinflüssen ⑤ ist in der FEM-Simulation, bspw. über die Änderung von Reibkoeffizienten, in Ansätzen möglich. Gleichzeitig können die Ergebnisse aus der FEM-Simulation zurück an die Multi-Physikalische Simulation übergeben werden, um das vorliegende Multi-Physikalische Modell mit den Ergebnissen anzureichern. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei eine klare Definition der nötigen Schnittstellen und der daraus resultierenden Datensätze, welche zwischen den verschiedenen Programmen ausgetauscht werden sollen. Weiterhin ist bei der vorliegenden Kopplung der verschiedenen Programme zu beachten, dass das multiphysikalische Modell als Master für alle anderen Simulationen dient und den zeitlichen Ablauf der Simulationen vorgibt.

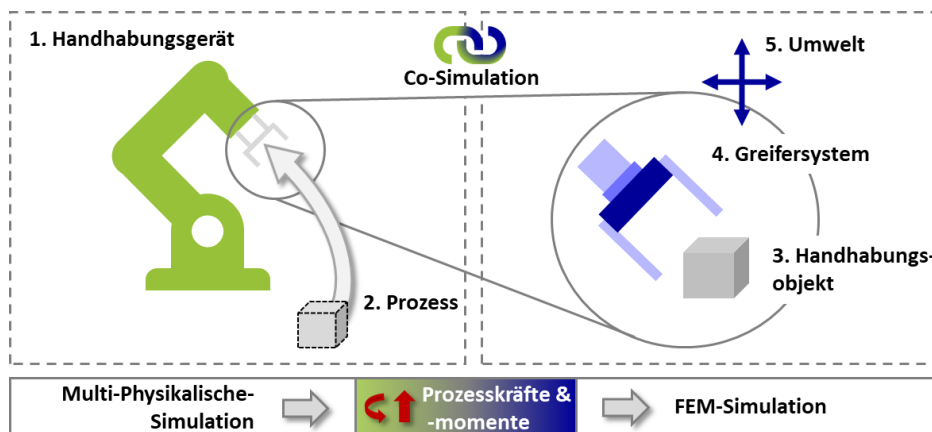


Bild 4: Co-Simulation bestehend aus Multi-Physikalischer Simulation und FEM-Simulation

4.2. Modellierter Entwicklungsprozess

In Anlehnung an die Verwendung von Modellen im MBSE wird auch der gezeigte Entwicklungsprozess durch Modelle abgebildet. Die Meta-Informationen des Montagesystems sowie der Entwicklungsmethodik liegen in Form von SysML-Modellen vor. Zusätzlich ist auch der Entwicklungsprozess modelliert. Durch die Modelle können zum einen Abhängigkeiten und Zusammenhänge identifiziert und zum anderen der gesamte Ablauf des Entwicklungsprozesses simuliert werden. Über Schnittstellen werden externe Anwendungen und Daten mit dem Prozessmodell gekoppelt (vgl. Kapitel 2.5), wodurch die Möglichkeit entsteht, dieses für eine (teil-) automatisierte Steuerung des Entwicklungsprozesses direkt aus dem SysML-Prozessmodell heraus zu verwenden. Das Prozessmodell hat dabei Zugriff auf

alle Informationen und Daten aus den Modellen und somit auch auf die definierten Randbedingungen, Anforderungen und Parameter. Über die Schnittstellen kann es externe Werkzeuge (Toolbox), wie bspw. FEM-Simulationen anstoßen und basierend auf Rückgabewerten den weiteren Entwicklungsprozess steuern. Nötige Iterationen mit abgeänderten Werten oder die Berücksichtigung zusätzlicher Informationen können auf diese Weise (teil-) automatisiert durchgeführt werden. Dieses Prozessmodell ist exemplarisch, auf abstrakter Ebene in Bild 5 dargestellt. Der abgebildete Ablauf ist dabei als exemplarische Verdeutlichung des Ansatzes und nicht als so definierter Ablauf zu verstehen. Selbiges gilt auch für die Werkzeuge der Toolbox sowie die Verknüpfungen zwischen diesen Elementen.

Die Herausforderung bei der Implementierung stellt die Integration der verschiedenen Werkzeuge (der Toolbox) in das Prozessmodell dar. Beispielsweise über die programmierbaren *opaque behaviours* (vgl. Kapitel 2.5) besteht jedoch die Möglichkeit diese Schnittstellen auf verschiedene Arten umzusetzen.

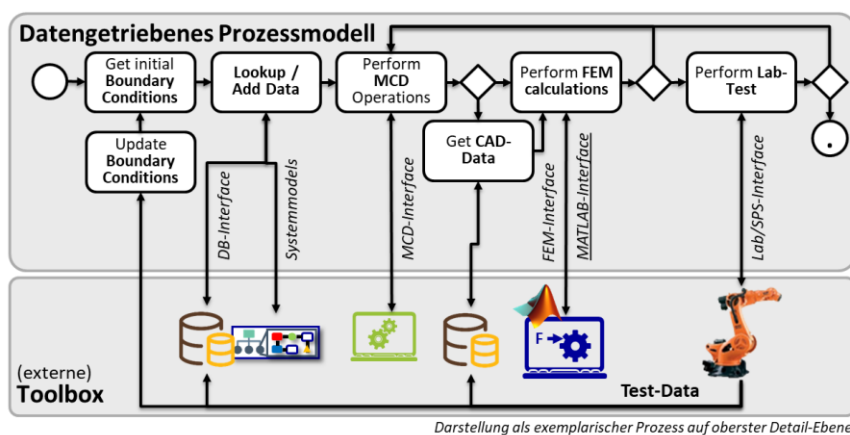


Bild 5: Vereinfachte Darstellung der Modellierung des datengetriebenen Entwicklungsprozesses

4.3. Reales System

Neben der Co-Simulation und dem modellierten Prozess ist das reale System ein weiterer wichtiger Bestandteil der entwickelten Methodik. Da gemäß Feldmann et al. [8] frei programmierbare Industrieroboter die höchste Anzahl an Freiheitsgraden und Funktionalitäten aufweisen, eignen sie sich gut als Beispiel für ein reales Handhabungssystem. Durch Bewegungen erzeugt der Roboter prozessspezifische Momente und Kräfte, welche während des Handhabungsprozesses an den Systemgrenzen auf das Greifersystem wirken. Entsprechende Greifersysteme sind nach Kapitel 2.2 als funktionskritische Komponente Bestandteil des realen Systems und sind gemäß der Methodik detaillierter Untersuchungsgegenstand, um einer Überdimensionierung entgegenzuwirken und den Greifprozess abzusichern. Das reale System dient als Vorlage für das Systemmodell und systemspezifische Daten, wie beispielsweise CAD-Modelle, welche entsprechend für den weiteren Zugriff des Prozessmodells in Datenbanken abgespeichert werden. Weiterhin können sowohl die Multi-Physikalischen- und die FEM-Simulationen einzeln, als auch im Verbund als Co-Simulationen anhand des realen Systems validiert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In Handhabungssystemen besteht das Problem, dass dynamische Kräfte und Momente in der Auslegung funktionskritischer Komponenten aufgrund einer bestehenden Prozessvielfalt nur überschlägig berücksichtigt werden, was eine Überdimensionierung entsprechender Komponenten zur Folge hat. In diesem Beitrag wurde eine Methodik vorgestellt, wie dieser Überdimensionierung entgegengewirkt werden kann. Dabei wurde der Fokus auf

Greifersysteme als ein Beispiel für eine funktionskritische Komponente in einem Handhabungssystem gelegt. Die Methodik besteht im Wesentlichen aus einer Co-Simulation, einem modellierten Prozess sowie einem realen System. Die dynamischen Prozesskräfte werden dabei aus der Multi-Physikalischen Simulation ermittelt und an die FEM-Simulation übergeben. Über einen modellierten Prozess erfolgt die Steuerung des Entwicklungsprozesses teilautomatisiert und auch der Zugriff auf im Entwicklungsprozess benötigte Daten ist über Systemmodelle oder entsprechende Schnittstellen möglich. Mit Hilfe der vorgestellten Methodik wird es erstmals möglich, die Vielfalt an auftretenden Prozesskräften von Handhabungssystemen in den frühen Entwicklungsphasen genauer zu berücksichtigen und damit die vorherrschende Überdimensionierung sowie die Gefahren einer mangelnden Absicherung des Montageprozesses zu reduzieren.

Literatur

- [1] Haibach, Erwin: Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3., korrigierte und erg. Aufl. Berlin: Springer, 2006.
- [2] Schmalz, Johannes Karl Bernhard: Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen. München: Universitätsbibliothek der TU München. Dissertation. 2018.
- [3] Hesse, Stefan: Robotergreifer: Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik. München: Hanser, 2004.
- [4] Werdich, Martin: Methoden und Begriffe im Umfeld (und deren Schnittstellen zur FMEA). In: Werdich, Martin (Hrsg.): FMEA – Einführung und Moderation. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 123–174.
- [5] VDI/VDE: VDI/VDE 2862 Blatt 1 - Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen - Anwendungen in der Automobilindustrie (2012).
- [6] IATF: IATF 16949: 2016 Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie (2016).
- [7] Lotter, Bruno (Hrsg.); Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [8] Feldmann, Klaus (Hrsg.); Schöppner, Volker (Hrsg.); Spur, Günter (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren, 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, 2014.
- [9] Schunk GmbH & Co. KG: Online configurators and intelligent CAD models minimize design effort for gripping systems, URL https://schunk.com/gb_en/press/press-service/press-releases/article/6928-online-configurators-and-intelligent-cad-models-minimize-design-effort-for-gripping-systems/, Aktualisierungsdatum: 23.09.2019 – Überprüfungsdatum 26.07.2021.
- [10] Wolniakowski, Adam: Task and Context Sensitive Gripper Design Learning Using Dynamic Grasp Simulation. In: Journal of intelligent and robotic systems, 87 (2017), Nr. 1, S. 15–42. doi: 10.1007/s10846-017-0492-y
- [11] Günther, Felix Christian: Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs. München: Universitätsbibliothek der TU München. Dissertation. 2017.
- [12] Lechler, Tobias; Fischer, Eva; Metzner, Maximilian; Mayr, Andreas; Franke, Jörg: Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. In: Procedia CIRP 81 (2019), S. 1125–1130.
- [13] Scheifele, Christian: Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, Dissertation. 2019.
- [14] Röck, Sascha et al.: Die Simulierte Werkzeugmaschine. In: Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, 2003, S. 219–246.
- [15] Pritschow, Günter; Röck, Sascha: "hardware in the loop" simulation of machine tools. In: CIRP Annals 53 (2004) Nr. 1, S. 295–298.
- [16] Sendler, Ulrich; Weilkens, Tim: Was Sie schon immer über MBSE, PLM und Industrie 4.0 wissen sollten. In: Maurer, Maik; Schulze, Sven-Olaf (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013, S. 303–314.
- [17] Honour, Erich : Systems engineering return on investment. Dissertation. University of South Australia, 2013.
- [18] Seiler, Florian et. al.: MBSE zur Unterstützung der Produktentwicklung von modularen Produktarchitekturen. In: Krause, Dieter; Hartwich, Tobias; Rennpferdt, Christoph (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 111–134.
- [19] NoMagic Inc., Cameo Simulation Toolkit Documentation, URL <https://docs.nomagic.com/display/CST190SP2/User+Guide>, Überprüfungsdatum 04.05.2021.
- [20] NoMagic Inc., Creating executable opaque behaviors, URL <https://docs.nomagic.com/display/MD2021x/Creating+executable+opaque+behaviors>, Überprüfungsdatum 04.05.2021.