

# Interaktive simulationsgestützte Programmierung bei der Entwicklung mechatronischer Verpackungsanlagen

*Dipl.-Ing. Peter Stich, M.Sc. Dipl.-Ing.(FH) Stefan Krottil, Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*

*Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik,  
Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen  
Beim Glaspalast 5, 86153 Augsburg, Peter.Stich@iwu.fraunhofer.de*

## 1 Einleitung

Aufgrund des rasanten technischen Fortschritts, unter anderem bedingt durch Megatrends wie Funktionsintegration, Individualisierung oder Digitalisierung [AR11], sind die Produkte aber auch die Prozesse einem stetigen Wandel unterworfen. Die ehemals systembestimmende Mechanik wird auch in Zukunft noch das Grundgerüst stellen, das elektrisch angetrieben und durch komplexe informationstechnische Einheiten gesteuert wird [MM12o]. Längst ist die Software jedoch zu einem wesentlichen Innovationstreiber im Maschinen- und Anlagenbau geworden [VDM11o].

Der interdisziplinäre Entwurf systembestimmender Anlagenmodule und die disziplinübergreifende Synchronisation der Entwicklungsergebnisse ist heute eine große Herausforderung. Im Vergleich zu anderen Entwicklungsprozessen existieren hier nur eingeschränkte Möglichkeiten, die Qualität der informationstechnischen Einheiten bereits im Vorfeld sicherzustellen. Zusätzlich entstehen im meist mechanisch geprägten Entwicklungsprozess durch die späte Einbindung der weiteren Disziplinen sowie die unterschiedlichen Sichtweisen Missverständnisse und zeitliche Engpässe. In deren Folge gefährden Maschinen mangelhafter Qualität die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Dieser Gegensatz ist nur durch eine neue Orientierung der Entwicklungsprozesse, unterstützt durch innovative Methoden und Werkzeuge, lösbar [WUE07].

Ein Ansatz, den Herausforderungen im Entwicklungsprozess zu begegnen, ist die simulative Unterstützung der Entwicklung. Allerdings rechtfertigt die Aussagekraft der mechatronischen Modelle aufgrund des hohen Aufwands bei deren Erstellung und Pflege oftmals noch nicht den Einsatz in der industriellen Praxis [RW06]. Die Synchronisation der benötigten Daten, die in vielen Fällen erst im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium möglich ist, stellt ein weiteres Hemmnis da. Dies wird zusätzlich durch die Tatsache verstärkt, dass die Rückspiegelung des Erkenntnisgewinns aus der Simulation in die bestehenden Entwicklungswerkzeuge nur schwer automatisierbar ist. Zudem erschwert, gerade im Bereich der Verarbeitungsmaschinen, sowohl die prozess- als auch produktseitige Beherrschung formlabilen Objektverhaltens die Auslegung produktionstechnischer Systeme. Mit aktuellen

Ansätzen eines digitalen Engineerings und den zugehörigen Entwicklungswerkzeugen ist die Abbildung dieser Effekte nur eingeschränkt möglich.

Dem Trend der Modularisierung im Maschinen- und Anlagenbau folgend, ist die Erstellung der Motion-Programme über parametrierbare Standardbausteine ein Ansatz, die Softwareentwicklung zu vereinfachen. Aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Anlagenkomponenten, beispielsweise sich überschneidende Arbeitsbereiche, ist die lösungsspezifische Anpassung der Softwarebausteine meist noch ein manueller Prozess. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen stehen Entwickler auf dem Weg zu einer simulationsgestützten Entwicklung von Bewegungssteuerung mehreren Herausforderungen gegenüber. Vor allem hohe Aufwände zur Modellbildung und Simulation sind momentan noch ein Hemmnis. Aufgrund dessen ist der Einsatz der mechatronischen Simulation meist auf die späten Phasen des Entwicklungsprozesses beschränkt, wodurch für die Konzeption und Programmierung von Bewegungssteuerungen keine Interaktivität des Modells durch den Nutzer ermöglicht wird.

Zur besseren Unterstützung des Softwareentwicklungsprozesses in den frühen Phasen der Entwicklung eines Produktionssystems wird ein neuer Ansatz zur geometriebasierten, interaktiven Programmierung vorgestellt. Einen wesentlichen Bestandteil stellt dabei ein erweitertes physikbasiertes Modell dar, das innerhalb einer Vorabsimulation Zustandsänderungen der Verpackungsanlage detektiert. Basierend darauf kann sowohl die Entwicklung von Motion-Programmen, als auch die verknüpfende Anlagenlogik geometriebasiert erstellt werden können. Darüber hinaus können Simulationsergebnisse wie Massenträgheitsmomente direkt in die Steuerungskonzeption zurückgespiegelt werden, wodurch der Reifegrad der virtuell entwickelten Bewegungsabläufe gesteigert werden kann

## **2 Stand der Wissenschaft und Technik**

### **2.1 Mechatronische Simulation in der Produktionstechnik**

Die digitale Absicherung der Produkt- und Prozessentwicklung hat sich in vielen Bereichen der Produktionstechnik etabliert, wobei die Automobilindustrie mit Ansätzen der digitalen Fabrik eine Vorreiterrolle einnimmt [WAC09]. Entlang des Entwicklungsprozesses kommen dabei verschiedene Simulationsverfahren zum Einsatz [KUE06, BWG09], die sich gemäß der Granularität ihres jeweiligen Betrachtungsraums klassifizieren lassen. Der Detaillierungsgrad der Simulation produktionstechnischer Systeme nimmt, ausgehend von einer fabrikübergreifenden Simulation [BS10], in den unterlagerten Fertigungslinien und -zellen [EHR10] sowie auf Prozessebene sukzessive zu [KUE06].

Eine wirtschaftliche Simulation ist jedoch nur durch eine Abstraktion des Betrachtungsraumes möglich. Zudem stellen die Synchronisation der kontextspezifischen Simulationsansätze und der Ergebnistransfer weiterhin eine große Herausforderung innerhalb des Entwicklungsprozesses dar. Die große Anzahl und Verschiedenartigkeit der

Simulationsmethoden und der zugehörigen Werkzeuge führt heute oftmals dazu, dass in den am Planungs- und Entwicklungsprozess beteiligten Fachabteilungen Einzelsysteme als Insellösungen eingesetzt werden [SCH09]. Aus der heterogenen Systemlandschaft resultieren hohe Aufwände für die problemspezifische Modellierung und eine eingeschränkte Datendurchgängigkeit und -konsistenz [, SBM10].

Vor dem Hintergrund eines steigenden Softwareanteils [MM12o] innerhalb der Produktionstechnik werden die Ansätze der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) zunehmend auf den gesamten Entwicklungsprozess ausgedehnt, um Qualitätssteigerungen der Automatisierungssysteme zu erzielen [RW06, ZWH+06, Weg09]. Die daraus resultierende mechatronische Simulation ist somit die computergestützte, disziplinübergreifende Absicherung von Entwicklungsergebnissen über den gesamten Verlauf der Produkt- und Prozessentwicklung [RS11a]. Dazu ist es notwendig, die steuerungsbezogenen Absicherungsmethoden der VIBN durch die Verwendung mechatronischer Simulationsmodelle auf den gesamten Entwicklungsprozess auszuweiten [KIE07, RS11a] und die eingesetzten Methoden im Verlauf der Entwicklung auf den benötigten Detaillierungsgrad zu skalieren [RW07].

Durch die Verwendung von Baukastensystemen, bestehend aus mechatronischen Lösungselementen [GL00, KIE07, WW08] lassen in der mechatronischen Simulation weitere Potenziale zur aufwandsarmen Modellerstellung erzielen. Gerade disziplinübergreifende Funktionsbeschreibungen [WEG10] bieten einen idealen Ausgangspunkt, um Informations- und Simulationsmodelle für unterschiedliche Problemstellungen systematisch zu erzeugen [LIT11]. Nach der simulativen Absicherung lassen sich daraus zusätzlich weitere Entwicklungsdokumente, wie Konstruktionszeichnungen, Schaltpläne oder Softwarefragmente systematisch ableiten [HEN11, LIN11]. Bestehende Ansätze dienen jedoch nur für einzelne Schritte im mechatronischen Entwicklungsprozess und sind bezüglich ihrer Beschreibungsmöglichkeiten erheblich eingeschränkt [WEG10, LIN11].

## **2.2 Ansätze der physikbasierten mechatronischen Simulation**

Ein neuer Lösungsansatz zur aufwandsarmen Abbildung produktionstechnischer Systeme ist die Integration von physikbasierten Modellen aus dem Bereich der Computergraphik in die Virtuelle Inbetriebnahme bzw. mechatronische Simulation [RJ08, SPI09]. Der Ansatz der physikbasierten Simulation ermöglicht es, Transportport- und Anlagenprozesse mit physikalischen Parametern zu hinterlegen, um das dynamische Verhalten der Anlage anhand physikalischer Effekte, wie beispielsweise Gravitation, Reibung, kontaktbedingte Kollisionsantwort oder andere kinematische Ketten von Materialflussobjekten und Transportsystemen, abbilden zu können [WIS07]. So kann das Transportverhalten der Simulationsobjekte über physikalische Gesetzmäßigkeiten [ERL05, MIL07] und optimierte Berechnungsverfahren [ERI05] echtzeitfähig simuliert werden, ohne es explizit zu definieren. Durch die Ableitung des Materialflussverhaltens aus der 3D-Geometrie entfällt der Programmieraufwand für die Simulation im 3D-Bereich weitgehend [WUE10]. Der Ansatz

einer physikbasierten mechatronischen Simulation reduziert daher den Modellierungsaufwand zur Simulation auf eine Parametrierung der physikalischen Eigenschaften und eine Kinematisierung der Modelle.

Für die industrielle Anwendung der physikbasierten Simulation umfasst die Systemlandschaft eine Reihe geschlossener Software-Lösungen, wie beispielsweise der Mechatronic Concept Designer der Siemens AG [FRI12]. Die Simulation von Verarbeitungsprozessen, speziell der Transportprozesse, ist mittels dieser Systeme lediglich für wenige, meist einfache, Kollisionsgeometrien der Prozessgüter möglich und fokussiert Anwendungsgebiete aus der Produktionslogistik. Aufgrund einer oftmals unzureichenden Einbettung in die bestehenden Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse der Anlagenbauer sowie begrenzter Funktionalitäten bei der Integration formlabiler Bauteile finden diese nur zögerlich Einsatz in der industriellen Anwendung.

Die Simulation formlabiler Objekte hat in Wissenschaft und Technik eine lange Tradition. Erste Ansätze im Bereich der Animationstechnik fanden in den vergangenen Jahren sukzessive Einzug in der Medizintechnik [KKD95] und im Anwendungsgebiet der Virtual Reality [KC02].

Die aktuell vorliegenden Ansätze zur Abbildung formlabiler Objektverhaltens können im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden. Diese sind nicht-physikalische Modelle, physikbasierte Modelle der Computergrafik und Informatik sowie Lösungsansätze der Ingenieurwissenschaften (wie etwa die FEM-Simulation).

Nicht-physikalische Modelle bilden die Elemente über Splines bzw. Patches ab, die beispielsweise über Bézierkurven oder B-Splines repräsentiert werden. Durch eine Verschiebung der jeweiligen Kontrollpunkte kann so recheneffizient eine Darstellung formlabiler Objektverhaltens erreicht werden. Dies ist jedoch nur aufgrund der abstrahierten Beschreibung möglich, woraus eingeschränkt präzise Modelle resultieren. [BBB87]

Physik-Engines aus dem Bereich der Computergrafik bieten prinzipiell zwei Möglichkeiten, um formlabile Objekte in der Physiksimulation abzubilden: sogenannte Soft- und Cloth-Bodies. Die Berechnungsansätze basieren dabei zumeist auf Masse-Feder-Dämpfer-Systemen. In den letzten Jahren wurde im Bereich der Computergrafik eine Vielzahl von weiteren Berechnungsmethoden, wie zum Beispiel „Position-based-Dynamics“ [MHT+05], „Primo“ [BPG+06] oder „Elastons“ [MKB+10], entwickelt, die die Genauigkeit der physikbasierten Simulation verbessern und die Anzahl der abbildbaren Effekte, wie beispielsweise plastische Verformung, erhöhen sollen. Der Reifegrad dieser Methoden ist derzeit jedoch noch zu gering, um einen qualifizierten Einsatz in der Produktionstechnik zu gewährleisten.

In den Ingenieurwissenschaften sind die Mehrkörpersimulation [SCH99] sowie die Finite-Elemente-Methode (FEM) schon seit langem probate Werkzeuge, um das dynamische Systemverhalten, aber auch die Verformung von Objekten abzubilden [SCH91]. Obwohl es sich auch bei diesem Verfahren um eine Näherung handelt, kann die Qualität der Lösung auf

Kosten der Rechenzeit erhöht werden. Im Allgemeinen sind aufgrund der aktuellen Computerleistungen jedoch nur sehr eingeschränkt interaktive Simulationen mit FEM möglich. Neben der Verbesserung der Recheneffizienz der FEM-Simulation fokussieren aktuelle Forschungsvorhaben auch eine Reihe weiterer Simulationsverfahren, wie die Cosseratstäbe [ST09]. Diese finden jedoch nur bei niederdimensionalen, formlabilen Objekten oder spezifischen Problemstellungen Einsatz.

### **2.3 Modell- und simulationsgestützte Entwicklung von Anlagen**

Durch die Verwendung von Baukastensystemen, bestehend aus mechatronischen Lösungselementen [KIE07; LPK+04] lassen sich große Potenziale zur aufwandsarmen Modellerstellung erzielen. Gerade die disziplinübergreifende, mechatronische Funktionsbeschreibung [WEG10] bietet einen idealen Ausgangspunkt, um Informations- und Simulationsmodelle für unterschiedliche Problemstellungen systematisch zu erzeugen [WW08]. Nach der simulativen Absicherung lassen sich daraus zusätzlich weitere Entwicklungsdokumente, wie Konstruktionszeichnungen, Schaltpläne oder Softwarefragmente systematisch ableiten [LIN11]. Bestehende Ansätze dienen jedoch nur für einzelne Schritte im mechatronischen Entwicklungsprozess und sind bezüglich ihrer mechatronischen Beschreibungsmöglichkeiten erheblich eingeschränkt [GER10].

### **2.4 Entwicklung von Bewegungssteuerungen**

Die im Bereich der automatischen SPS-Programmierung vorhandenen Ansätze, beispielsweise durch den Einsatz von UML- oder SYSML-Diagrammen [FV02] oder VR-Technologien [OSM98], lassen sich nur schwer auf die Erstellung von Bewegungssteuerungen übertragen. Auch im Zuge der modellbasierten, simulationsgestützten Entwicklung von Automatisierungsprojekten [SPI09] müssen die komplexen Verfahrenskennlinien über die Definition von Stützpunkten und zugehörigen Master-Slave-Beziehungen der Antriebsachsen vorab im Modell definiert werden. Weiterführende Ansätze eines grafisch-interaktiven Bewegungsdesigns im Bereich von Motion-Control-Systemen [KKH11; HB12] stellen lediglich eine Erweiterung der klassischen Bewegungsgestaltung über Kurvenscheibeneditoren durch freie Manipulationsmöglichkeiten der Stützpunkte einer Verfahrenskennlinie dar. Hierbei sind jedoch die geometrischen Abhängigkeiten der einzelnen Module im Anlagenverbund nicht ersichtlich.

Im Bereich der Robotik hingegen repräsentiert die grafisch-interaktive Programmierung einen simulationsgestützten Prozess auf der Basis der geometrischen Daten [VOG08]. Innerhalb des vorliegenden Beitrages soll dieser etablierte Ansatz auf die Systemauslegung, speziell auf die Entwicklung von Bewegungssteuerungen, des Maschinen und Anlagenbaus transferiert werden. Die diesbezüglichen Kernpunkte des Konzeptes werden im Folgenden näher dargestellt.

### 3 Erweiterung der physikbasierte Simulation zur Abbildung formlabiler Objekte

#### 3.1 Physikbasierte Modelle mit diskretisierten Volumenelementen

Neben der Definition übergreifender Vorgehensweisen zur Entwicklung mechatronischer Systeme stellt die Eigenschaftsabsicherung der Systemtechnik eine wesentliche technische Problemstellung dar. Eine bisher nur unzureichend betrachtete Herausforderung ist in diesem Zusammenhang die Beherrschung formlabilen Objektverhaltens. Die maßgebliche Problemstellung ist dabei die Definition und Auslegung der Verarbeitungs- und Handhabungsfunktionen zur Sicherstellung definierter Zustände des Verarbeitungsgutes. Um weiterhin die Vorteile der effizienten Berechnungsalgorithmen der Physik-Engines zu nutzen und die Qualität der Simulationsergebnisse zu steigern, wurde ein Konzept zur Hybridisierung der vorhandenen Objekttypen entwickelt (siehe Abbildung 1) und in einen Simulationsprototypen umgesetzt. Dadurch können weitere Anwendungsfelder für die physikbasierte Simulation erschlossen werden.

Die hybriden Modelle sind vergleichbar mit einem echtzeitfähigen Ansatz, der zwischen Mehrkörper- und Finite-Elemente-Simulation einzuordnen ist. Die Geometrie des Objektes wird durch diskrete Volumenelemente von gleichem (mono) oder unterschiedlichem (multi) Objekttyp einer Physik-Engine repräsentiert. Die Parametrisierung des physikalischen Verhaltens der Objekte wird über die Art der Diskretisierung sowie die Parameter der Verbindungselemente, so genannte Joints, definiert. Im Vergleich zu konventionellen Modellen der Physik-Engines, die eher als Black-Box-Modelle anzusehen sind, hat dies den Vorteil, dass die Simulationsparameter für unterschiedliche Bauteilregionen spezifisch eingestellt werden können. Dadurch lässt sich die Simulation kontextspezifisch parametrieren, um ein für den gewählten Abstraktionsgrad hinreichendes Modell zu erhalten. Die einzelnen Volumenelemente werden durch Starrkörper repräsentiert und über die Physik-Engine simuliert.

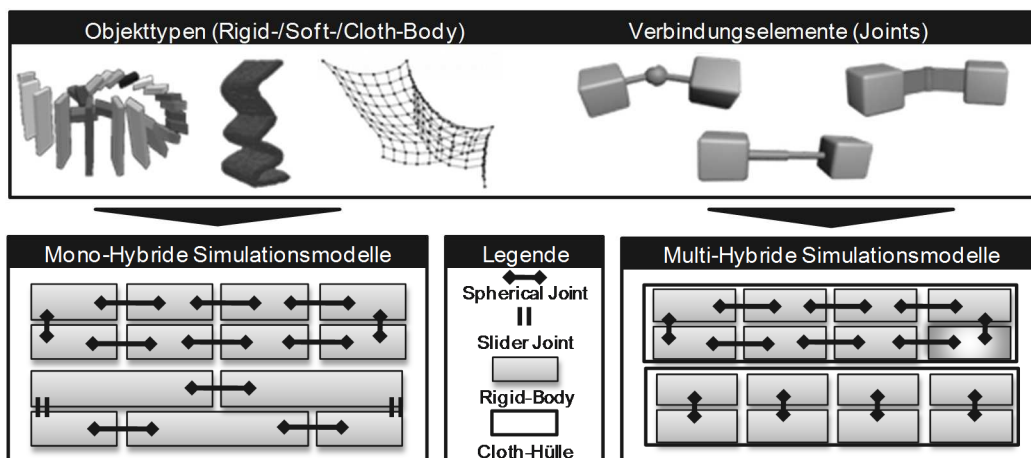


Abbildung 1: Hybride Simulationsmodelle für deformierbare Objekte (nach [RS11b])

### 3.2 Umsetzung mit partikelbasierten Modellen

Die Simulation mittels diskretisierten Volumenelementen stellt einen Ansatz dar, der die Vorteile der Engines aus dem Bereich der Computergraphik mit den Ansätzen der Ingenieurwissenschaften synchronisiert. Jedoch ist auch hier die Größe und Komplexität der abbildbaren Modelle eingeschränkt. Dies hängt vor allem von der Art der gewählten Diskretisierung ab.

Um die Recheneffizienz der Simulation weiter zu steigern, wurde die Art der Diskretisierung auf geometrische Primitive eingeschränkt. Eine Abbildung mittels Quadern oder Partikeln findet aktuell bereits Einsatz zur Abbildung von Starrkörpern [BYM05]. Dieser Ansatz wurde nun um die Simulation formlabiler Objekte erweitert und in die Produktionstechnik transferiert. Partikelsimulationen bieten vor allem bei der Kollisionsdetektion einen wesentlichen Vorteil, da sich die diesbezügliche Berechnung lediglich auf einen Abgleich des Abstandes der Partikel mit der Summe der spezifischen Radien beschränkt. Das Gesamtverhalten des Körpers resultiert dann aus dem Verhalten der einzelnen Partikel, die über geometrische Constraints gekoppelt sind.

Gängige Physik-Engines sind auf die Berechnung beliebiger geometrischer Körper optimiert, wodurch sich die Anzahl der abbildbaren Partikel limitiert. Aus diesem Grund wird aktuell eine eigene Partikel-Engine entwickelt, die neben gängigen Koppellementen bestehender Physik-Engines auch die Definition von Verbindungen zwischen den Partikeln ermöglicht, die eine direkte Angabe von physikalischen Parametern ermöglichen. Durch adaptierte Verkettungselemente, die eine Lookup-Table von Spannungs-Dehnungs-Zuständen darstellen, kann so recheneffizient der spezifische Systemzustand ermittelt werden.

### 3.3 Modellbildungsprozess und systemspezifische Parametrierung

Die Abbildung formlabilen Objektverhaltens erfordert eine Adaption der bestehenden Modellbildungsprozesse zur physikbasierten Simulation [LAC11]. Die CAD-Daten werden dazu, wie in Abbildung 2 dargestellt, in einem dreistufigen Prozess aufbereitet.

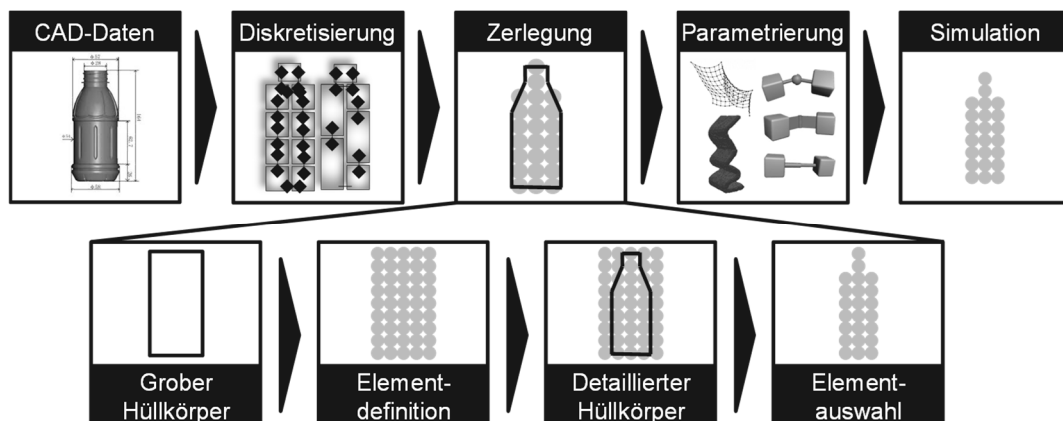


Abbildung 2: Aufbereitung geometrischer Daten zur Abbildung formlabiler Objekte

In einem ersten Schritt wird die Diskretisierung der Elemente festgelegt, nach deren Muster in der Phase der Zerlegung die diskreten Volumenelemente erzeugt werden. Der letzte Schritt besteht aus der Definition von Verbindungselementen sowie der diesbezüglichen Parametrisierung.

Die Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Simulation ist einer der größten Zeit- und damit Kostenanteile bei Simulationsstudien. Um den diesbezüglichen Aufwand, vor allem bei der Zerlegung der Modelle in geometrische Primitive, zu reduzieren, wurde ein vierstufiges Vorgehen unter Verwendung der Kollisionsberechnung klassischer Physik-Engines verwendet. In einem ersten Schritt wird dazu ein Hüllkörper um die abzubildende Geometrie gelegt, wobei hier eine Bounding Box in vielen Fällen die beste Lösung darstellt. In diesem Hüllkörper werden im Anschluss die geometrischen Primitive oder Partikel gemäß der definierten Diskretisierung verteilt. Zur nachfolgenden Auswahl der Elemente, die das abzubildende Objekt repräsentieren, wird zunächst ein exakter Hüllkörper definiert und gemeinsam mit den geometrischen Primitiven in die Kollisionsengine geladen. Über die Kontaktauflösung können dann die relevanten Elemente ausgewählt werden.

## **4 Geometriebasierte, interaktive Programmierung**

### **4.1 Überblick des Konzeptes**

Der Entwurf systembestimmender Anlagenmodule und die disziplinübergreifende Synchronisation der Entwicklungsergebnisse ist heute eine große Herausforderung, vor allem bei der Programmierung komplexer Kinematiken, wie sie in vielen Verarbeitungsmaschinen vorhanden sind. Im Vergleich zu anderen Entwicklungsprozessen existieren nur eingeschränkte Möglichkeiten, die Qualität der Bewegungsabläufe bereits im Vorfeld sicherzustellen. Zusätzlich entstehen im meist mechanisch geprägten Entwicklungsprozess durch die späte Einbindung der weiteren Disziplinen sowie die unterschiedlichen Sichtweisen Missverständnisse und zeitliche Engpässe.

Ein Ansatz, den Herausforderungen im Entwicklungsprozess zu begegnen, ist die simulative Unterstützung der Softwareentwicklung. In der geometriebasierten, interaktiven Programmierung werden dabei mehrere Ansätze und Ziele verfolgt und miteinander kombiniert:

- Auf Grundlage der Physiksimulation werden geometriebasierte Kollisionsinformationen zur Auswertung von Systemzuständen erweitert. Somit können Interaktionen, beispielsweise zwischen Werkstücke und Systemtechnik der Anlage, als Ereignisse interpretiert werden. Diese Ereignisse deuten auf eine Änderung der Systemzustände und somit auf einen Entscheidungspunkt der Steuerungslogik hin.
- Interaktive Teach-In-Verfahren, bei denen Stützpunkte des Bewegungsablaufes im laufenden Betrieb eingelernt werden, sind vor allem aus dem Bereich der Robotik bekannt. Darüber hinaus hat sich auch die Offline-Programmierung von



Bewegungsabläufen in unterstützenden Simulationsumgebungen bewährt. Diese Grundprinzipien werden zur interaktiven Erstellung von komplexen und gekoppelten Bewegungsabläufen adaptiert.

- Darüber hinaus wird der aktuelle Prozess zur digitalen Auslegung von gekoppelten Bewegungsabläufen in Anlagen untersucht und an ein Phasenmodell angepasst. Somit wird ein phasenspezifischer Ablauf zur Auslegung digitaler Kurvenscheiben gegeben, welcher zur einer Vereinfachung der interdisziplinären Entwicklungsprozesse führt.

## 4.2 Phasenspezifisches Vorgehen

Angelehnt an die VDI-Norm Auslegung ebener Kurvengetriebe [VDI2142] kann der Prozess zur Auslegung von Bewegungsabläufen in unterschiedliche Phasen unterteilt werden. Während die Phasen in der VDI 2142 jedoch lediglich der Auslegung einer funktionstüchtigen Kurvenscheibe dient, kann im vorgestellten Entwicklungsprozess die Funktionalität in unterschiedlichen Reifegraden simulativ und später real überprüft werden. Die Phasen sind (vgl. Abbildung 3):

- **Entwurf:** In der Phase der Dimensionierung werden die grundsätzlichen Verfahrenswege definiert. Dabei stehen noch keine Maße oder Abmessungen im Fokus, stattdessen werden die prinzipiellen Abläufe und Ereignisse zum Teil noch im Klartext angegeben. Der Prozessschritt dient somit eher dem Aufbau eines gemeinsamen Aufgabenverständnisses zwischen den einzelnen Ingenieurdisziplinen und ist Vergleichbar mit den Prozessschritten des Aufstellen des Bewegungsplans und -diagramms der VDI 2142.
- **Dimensionierung:** Angelehnt an die Prozessschritte Ermittlung der Abmessungen und Auswahl des Getriebetyps der VDI 2142 erfolgt der Feinentwurf der Bewegungsabläufe. Dabei müssen zum einen sowohl die mechanischen als auch die zeitlichen Randbedingungen betrachtet werden, zum anderen werden prozessual notwendige Zwischenpunkte beschrieben. Zur frühen Absicherung der Funktionalität erfolgen bereits hier erste simulativ abgesicherte Testläufe.
- **Qualifizierung:** Da in der Realität Beschränkungen zum Beispiel durch Maximalkräfte, -momente oder -geschwindigkeiten gegeben sind, werden die dimensionierten Bewegungsabläufe weiter verfeinert. Zum einen erfolgt bereits in dieser Phase die Auslegung des Antriebssystems, zum anderen müssen wirkende Kräfte wie Stöße, Reibung oder Schwingungen berücksichtigt werden. Qualifizierte Bewegungsabläufe können dabei sowohl simulativ als auch an der realen Anlage getestet werden.
- **Abschluss:** Die erstellten Bewegungsabläufe werden abschließend auf der realen SPS an der realen Anlage getestet. Auf dieser Basis können der Abschluss und die finale Inbetriebnahme der Achse erfolgen.

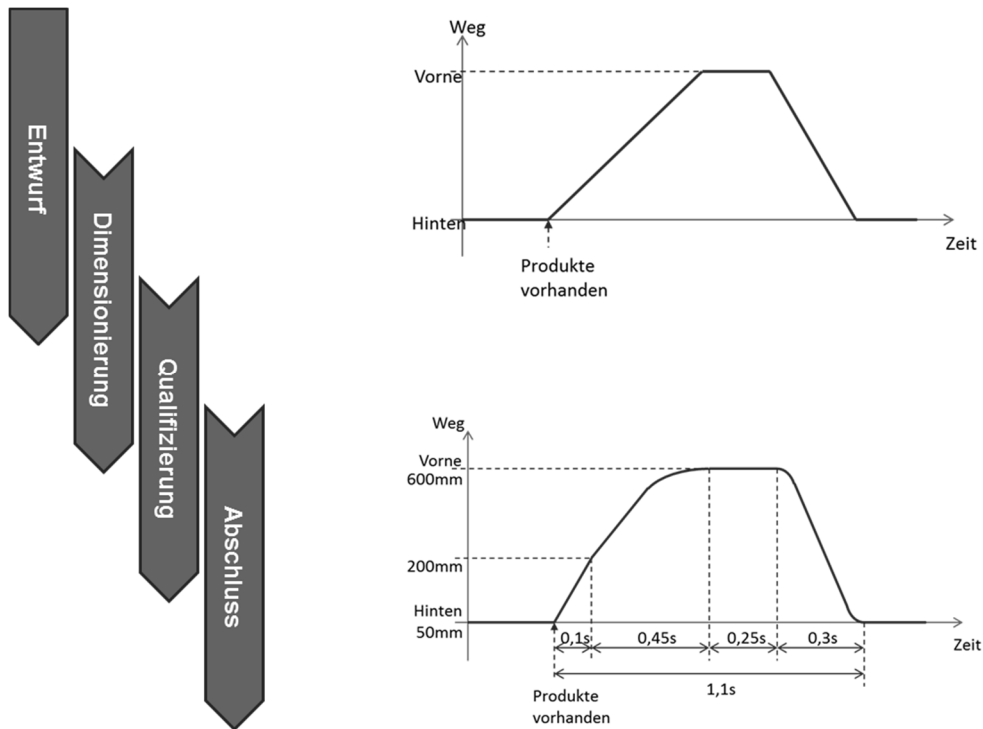


Abbildung 3: Prozessmodell zur interaktiven Kurvenscheibenauslegung

Die interaktive Programmierung bietet darüber hinaus noch den Vorteil, dass der Reifegradfortschritt der einzelnen Achsen im Entwicklungsprozess divergent sein kann, das heißt beispielsweise Achse 1 ist fertig dimensioniert und alle Kräfte und Rückwirkungen werden bereits berücksichtigt, im Gegensatz dazu ist Achse 2 bisher nur konzeptionell dimensioniert. Darüber hinaus kann eine hybride Absicherung erfolgen, das heißt während bestimmte Achsen nur rein simulativ zur Verfügung stehen, können andere Anlagenabläufe bereits an der realen Anlage abgesichert werden.

Die geometriebasierter, interaktive Programmierung bietet viele Vorteile im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise. So können die unterschiedlichen Disziplinen wie beispielsweise der Konstrukteur und Steuerungsprogrammierer auf einer sehr abstrakten Ebene prinzipielle Abläufe schnell, einfach und intuitiv skizzieren. Dabei muss nicht die gesamte Anlage im Fokus liegen, stattdessen ist eine modulare Vorgehensweise möglich. In den weiteren Phasen können die Abläufe iterativ und in gleichmäßig zum modulspezifischen Reifegrad der Anlage weiterentwickelt werden. Darüber hinaus werden in der Methode Verfahren wie die virtuelle Inbetriebnahme explizit berücksichtigt, wodurch zusammen mit der mechanischen und elektrischen Fertigstellung der Anlage direkt eine schnelle Inbetriebnahme erfolgen kann.

## 5 Umsetzung anhand exemplarischer Beispiele

### 5.1 Validierung der physikbasierten Simulationsmodelle

Die dargestellten Ansätze zur Simulation formlabiler Objekte wurden innerhalb eines industriellen Anwendungsbeispiels umgesetzt. Dabei wurden mit den Ansätze der diskretisierten Volumenelemente (Abbildung 4, oben) und der partikelbasierten Modelle (Abbildung 4, unten) die Handhabung großflächiger zweidimensionaler Bauteile sowie die Absicherung von Zuführleitungen bei dynamischen Systemelementen untersucht.

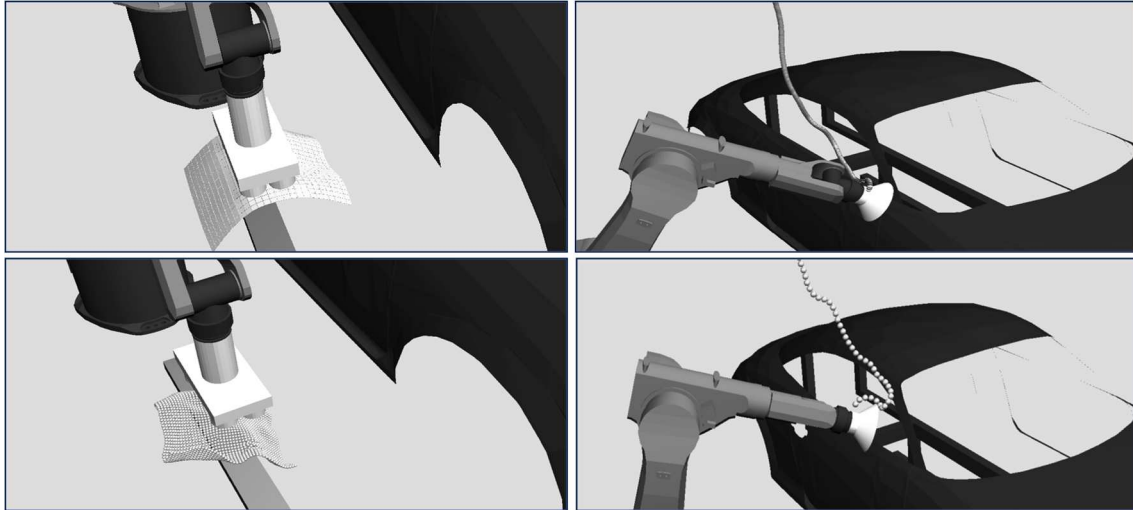
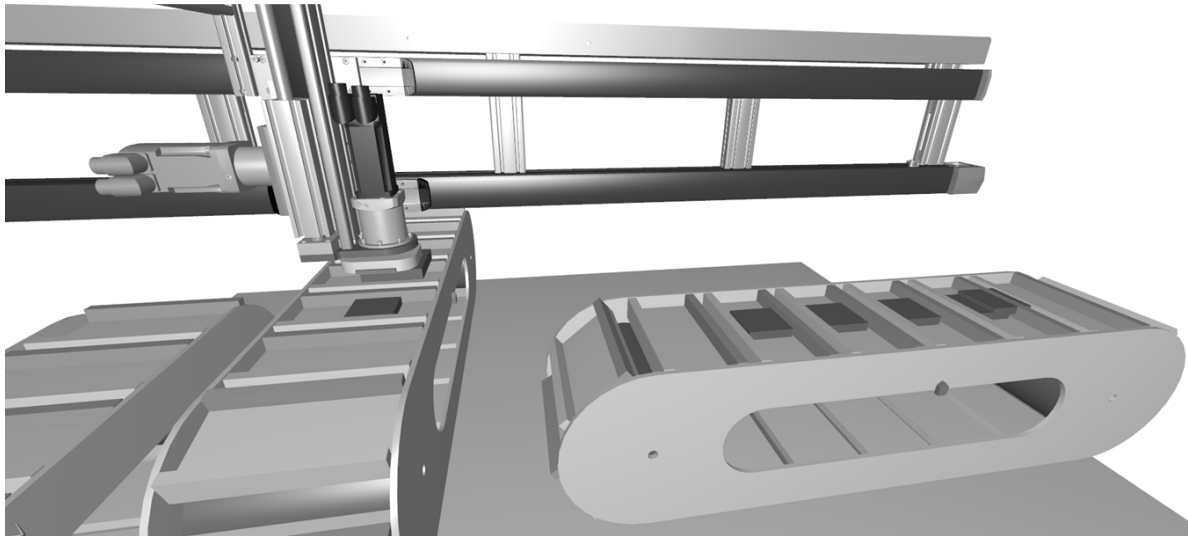


Abbildung 4: Exemplarische Umsetzung der vorgestellten Lösungsansätze

Die abgebildeten Szenarien, hier die exemplarische Verlegung von Verbundwerkstoffen und die Auslegung des Versorgungsschlauches eines Lackierroboters, stellen verkettete produktionstechnische Szenarien dar. Diese wurden jeweils auf eigenen Rechnern und unter Verwendung unterschiedlicher Engines untersucht. Die Schnittstelle zwischen den Modellen stellte dabei der Transportprozess der Karosserie dar.

### 5.2 Umsetzung der Interaktiven Programmierung

Darüber hinaus wurde die Methode zur interaktiven Programmierung an einem weiteren Anwendungsbeispiel umgesetzt (vgl. Abbildung 5). Das Szenario umfasst das Umstapeln von Elementen von einem Förderband auf eines oder mehrere. Dabei werden mehrerer Faktoren untersucht: Zum einen ist eine Synchronisation der Greiferbewegungen als auch der Linearachsen notwendig, zum anderen ist der globale Takt sowie die notwendige Anzahl der Förderbänder zu prüfen.



*Abbildung 5: Beispielhafte Anlage zum Absortieren von Bauteilen*

Dabei wurden zuerst mit Hilfe eines Motioneditors prinzipielle Verfahrenswege entwickelt und schrittweise an die Anforderungen angepasst. Darüber hinaus konnte die Synchronisation der unterschiedlichen Achsbewegung erst als nächsten Schritt beachtet werden. Zudem konnten die entwickelten Bewegungen auf eine SPS übertragen werden. Die Funktionalität wurde abschließend durch eine Hardware-in-the-Loop Inbetriebnahme überprüft.

## **6 Resümee und Ausblick**

Ein verstärkter Einsatz der mechatronischen Simulation, vor allem in kleinen und mittelständischen Unternehmen, wird nur durch eine weitere Reduktion des Modellierungsaufwands und einer Ausweitung der Simulationstechnik auf weitere Anwendungsgebiete realisierbar sein. Trotz des hohen Nutzens in Bezug auf die frühe Absicherung von Entwicklungsergebnissen und der damit reduzierten Zeit bei der Entwicklung und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen werden sich die bestehenden Methoden nur bei einer größeren Wirtschaftlichkeit in der Industrie durchsetzen. Aus diesem Grund stellt der Beitrag neben einem Überblick der aktuellen Entwicklungen aus Wissenschaft und Industrie ein Verfahren zur Abbildung formlabiler Objektverhaltens im Kontext der mechatronischen Simulation dar.

Auf dem Weg hin zu einem intelligenten mechatronischen Engineering sind noch viele weitere Potenziale vorhanden. Repräsentativ ist hier die Informationstechnik zu nennen, in der sich bereits Methoden zur agilen Entwicklung etabliert haben und Trends zu lösungsorientierten, flexibel vernetzbaren und offenen Modulen bestehen. Diese Ansätze sind sowohl in den Entwicklungsmodellen, als auch in den Entwicklungswerkzeugen anzustreben. In der Simulationstechnik stellt die Integration weiterer physikalischer Effekte, beispielsweise die Abbildung von Fluiden, die konsequente Weiterentwicklung aktueller

Ansätze dar. Denn nur so können zusätzliche Einsatzszenarien und damit auch Nutzenpotenziale im Entwicklungsprozess erschlossen werden.

Die in diesem Artikel beschriebenen Ergebnisse entstanden im Rahmen der Forschungsprojekte „Transportprozesse in der Mechatronischen Simulation“ (TRAMES) und „Geometriebasierte, interaktive Programmierung von Bewegungssteuerungen“ (GriP) erarbeitet, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. für die wohlwollende Förderung und die Unterstützung bei der Beantragung und Durchführung der Projekte.

## Literatur

- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Hanser, München, 2011.
- [BBB87] BARTELS, R.; BEATTY, J.; BARSKY, B.: An Introduction to Splines for use in Computer Graphics and Geometric Modeling. Morgan Kaufmann, Los Altos, 1987.
- [BPG+06] BOTSCH, M.; PAULY, M.; GROSS, M.; KOBBELT, L.: PriMo: Coupled Prisms for Intuitive Surface Modeling. Cagliari/ Italien, 26.-28.Juni 2006.
- [BS10] BRACHT, U.; SCHLANGE, C.: VR-gestützte Struktur- und Layoutplanung auf Grundlage erweiterter virtueller Fabrikmodelle. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010.
- [BWG09] BRACHT, U.; WENZEL, S.; GECKLER, D.: Digitale Fabrik. Berlin: Springer, Berlin, 2009.
- [BYM05] BELL, N., YU, Y.; MUCHA P. J.: Particle-Based Simulation of Granular Materials. Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2005.
- [EHR10] EHRENSTRASSER, M.: Konfigurieren statt Konstruieren – mechatronisches Engineering im Entstehungsprozess von Karosseriebauanlagen. In: Mantwill, F., et al. (Hrsg.): 6. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion – Zwei Welten wachsen zusammen, Fulda, 2010.
- [ERI05] ERICSON, C.: Real-time collision detection. Elsevier, Amsterdam/ Boston, 2005.
- [ERL05] ERLEBEN, K.: Physics-based animation. 1st Aufl.. Charles River Media, Hingham, 2005.
- [FRI12] FRIELINGS DORF, H.: Mechatronics Concept Designer – ein neuer Ansatz zur Konzeptvalidierung von komplexen, mechatronischen Systemen. VVD 2012, Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik. Dresden, 2012.
- [FV02] FISCHER, K.; VOGEL-HEUSER, B.: UML in der automatisierungstechnischen Anwendung - Stärken und Schwächen. atp - Automatisierungstechnische Praxis 44 (2002) 10, S. 63-69.
- [GER10] GERHARDT, F.: "Supporting Virtual Product Engineering Processes by Integrating a Neutra, Lightweight and CAD-Derived Data Formate", Dissertation, in: Eigner, M. (Hrsg.): "Technische Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe VPE", Band 8, Kaiserslautern, 2010.
- [GL00] GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik. HNI, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, 2000.

- [HB12] HEINLE, A.; BERGER, M.: Grafisch-interaktives Bewegungsdesign als effizientes Hilfsmittel zum Vergleich von Kurvengetrieben und Motion-Control-Systemen. Tagungsband VVD 2012: Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik.
- [HEN11] HENSEL, T.: Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen. Dissertation: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. München, 2011.
- [KC02] KANG, Y.-M.; CHO, H.-G.: Complex deformable objects in virtual reality. Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology (2002).
- [KIE07] KIEFER, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik. (Schriftenreihe Produktionstechnik 43). Saarbrücken, 2007.
- [KKD95] KUHN, C.; KÜHNAPFEL, U.; DEUSSEN, O.: Echtzeitsimulation deformierbarer Objekte zur Ausbildungsunterstützung in der Minimal-Invasiven Chirurgie. Modeling - Virtual Worlds - Distributed Graphics, Bad Honnef /Bonn, 1995.
- [KKH11] KÜHNE, L.; KÜHN, J. B.; HAASE, P.: Von Koppelgetrieben bis zur Robotik – Vereinheitlichung der Bewegungsprogrammierung. SPS/IPC/DRIVES Kongress. Nürnberg, November 2011.
- [KUE06] KÜHN, W.: Digitale Fabrik. Hanser, München [u.a.], 2006.
- [LAC11] LACOUR, F.-F.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. Dissertation: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. München, 2011.
- [LIN11] LINDWORSKY, A.: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest. Dissertation: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. München, 2011.
- [LIT11] LITTO, M.: AQUIMO, Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineeringprozesse. <<http://www.aquimo.org/>> - 30.03.2011.
- [LPK+04] Lerche, M.; Pesch, D.; Klemm, P.; Koraida, I.: Baukastenbasiertes Engineering mit Föderal. Frankfurt am Main: VDMA Verl. 2004.
- [MHT+05] MÜLLER, M.; HEIDELBERGER, B.; TESCHNER, M.; GROSS, M.: Meshless deformations based on shape matching. Proceedings of ACM SIGGRAPH 24 (2005).
- [MIL07] MILLINGTON, I.: Game Physics Engine Development. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2007.
- [MKB+10] MARTIN, S.; KAUFMANN, P.; BOTSCH, M.; GRINSPUN, E.; GROSS, M.: Elastons: Implementation Notes: Computer Graphics Laboratory. ETH Zürich, Zürich 2010.
- [MM12o] Mensch & Mechatronik: Entwicklungen in der Mechatronik. Unter: <http://www.mensch-mechatronik.de/index.html>, 11.10.2012.
- [OSM98] OSMERS, U.: Projektieren speicherprogrammierbarer Steuerungen mit virtual Reality. Diss. Universität Karlsruhe (1998).
- [RJ08] ROßMANN, J.; JUNG, T.: Dynamiksimulation für Virtuelle Welten: Erfahrungen, Anwendungen, Methoden. (Hrsg.): Gausemeier, Grafe (Hg.)– 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 2008.
- [RS11a] REINHART, G.; STICH, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn, 2011.

- [RS11b] REINHART, G.; STICH, P.: Simulation of deformable Objects for physically based Virtual Commissioning. In: Mital A. (Hg.): 16th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice (IJIE). Stuttgart, 2011.
- [RW06] REINHART, G.; WÜNSCH, G.: Wann lohnt sich eine Virtuelle Inbetriebnahme? In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? Utz Verlag, München, 2006.
- [RW07] REINHART, G.; WÜNSCH, G.: Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. Production Engineering 1 (2007) 4, S. 371–379.
- [SBM10] STRAßBURGER, S.; BERGMANN, S.; MÜLLER-SOMMER, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010.
- [SCH91] SCHWARZ, H. R.: Methode der finiten Elemente. Teubner, Stuttgart, 1991.
- [SCH99] SCHWERTASSEK, R.: Dynamik flexibler Mehrkörpersysteme. Vieweg, Braunschweig, 1999.
- [SCH09] SCHENK, M.: Digitale Fabrik - Realisierungsstand und Chancen. Symposium des Innovationsforums Digitale Fabrik , Magdeburg 2009.
- [SPI09] SPITZWEG, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. Utz Verlag, München, 2009.
- [ST09] SPILLMANN, J.; TESCHNER, M.: Cosserat Nets. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 15 (2009).
- [VDI2142] VDI 2142: Auslegung ebener Kurvengetriebe, Berlin: Beuth Verlag GmbH 1996.[VDM11o] VDMA VEREIN DEUTSCHER MASCHINEN-UND ANLAGENBAU: Entwicklungsanteile mechatronischer Systeme, VDMA, Zukunftsprognose von ITQ auf Basis von Marktdaten. <[http://www.transmechatronic.de/fileadmin/Technologie-steckbrief/transmechatronic\\_2010\\_03\\_01\\_FINAL.indd.pdf](http://www.transmechatronic.de/fileadmin/Technologie-steckbrief/transmechatronic_2010_03_01_FINAL.indd.pdf)> - 30.03.2011.
- [VOG 08] VOGL, W.: Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern. Dissertation: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. München 2008.
- [WAC09] WACK, K.-J.: Digitale Produktionsabsicherung in einer vernetzten Digitalen Fabrik. Illmenau, 2009.
- [WEG09] WEGENER, F.: Mit Simulation Sparen. IEE 09/2009, S. 64–65.
- [WEG10] WEGMANN, D.: Methoden der Mechatronischen Modularisierung. In: ASQF (Hrsg.): Automation Day. Nürnberg, 2010.
- [WIS07] WISCHNEWSKI, R.: Transportsysteme mit Spurführung in der virtuellen Produktion. Als Ms. gedr. Aufl. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007. (Fortschritt-Berichte VDIReihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren 410).
- [WUE07] WÜNSCH, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Dissertation: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. München, 2007
- [WUE10] WÜNSCH, G.: Testen Testen Testen. Mechatronic & Engineering 5/2010, S. 46–47.
- [WW08] WÜRSLIN, R.; WASCHER, F.: Mechatronischer Baukasten: Vorgehensmodell und Modellierungsmethodik für ein mechatronisches Entwicklungswerkzeug. In: Kompetenznetzwerk Mechatronik BW e.V. (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik. Stuttgart, 2008, S. 330–343.
- [ZWH+06] ZÄH, M. F.; WÜNSCH, G.; HENSEL, T.; LINDWORSKY, A.: Feldstudie Virtuelle Inbetriebnahme. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 10, S. 767–771.