

Virtuelle Produktentwicklung und virtueller Test von komplexen Systemen

Dipl.-Ing. Jens Schindler, Dipl.-Ing. Tobias Nähring, ITI GmbH Dresden

Vorwort

Die Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess sind gekennzeichnet durch kürzere Entwicklungszeiten bei größerer Variantenvielfalt. Der Einsatz von CAD-/CAE-Werkzeugen bietet den Herstellern in allen Phasen der Produktentwicklung die Möglichkeit, Entwicklungsfehler zu vermeiden, Investitionsrisiken zu senken und auch den Wünschen der Kunden gezielt nachzukommen. Im bisherigen Produktentstehungsablauf vom Entwurf bis zum realen Prototypenbau sind aufwändige und kostenintensive Arbeitsstufen notwendig. Dennoch kann bei modernen und komplexen mechatronischen Systemen das optimale Ergebnis häufig nicht erreicht werden.

Die Vision der kompletten virtuellen Produktentwicklung bzw. des virtuellen Tests neuer Erzeugnisse soll Realität werden. Auf der Basis von Computersimulationen werden die Systemeigenschaften eines Gerätes, einer Anlage oder Maschine frühzeitig erkannt und bewertet. Steigende Rechnerkapazitäten ermöglichen immer umfangreichere Simulationsmodelle. Die Anforderungen an die Aussagequalität und -quantität der numerischen Berechnungen steigen seit den letzten Jahren überproportional.

Die prozessorientierte Einführung von CAE-Tools für die virtuelle Produktentwicklung wird heute immer noch hinausgeschoben. Der Aufwand für Modellerstellung, Parametrierung und Modellmanagement wird im Verhältnis zu dem erwarteten Ergebnis sehr hoch eingeschätzt. Dabei gibt es hinreichend erfolgreiche Projektverläufe, die ein weiteres Abwarten nicht rechtfertigen.

Im Beitrag wird eine CAE-Komplettlösung vorgestellt, die als Entwurfs-, Modellierungs-, Analyse- und Optimierungs-Plattform in der virtuellen Produktentwicklung und für den virtuellen Test komplexer Systeme geeignet ist. Ein komplexes System bedeutet in diesem Zusammenhang ein Produkt, das Komponenten der Mechanik, Elektrik oder Elektronik, Hydraulik oder Pneumatik einschließt. Bei der Simulation sollen insbesondere die dynamisch nichtlinearen und verhaltensrelevanten Eigenschaften aller Teilsysteme ganzheitlich bewertet werden. Anhand eines Applikationsbeispiels werden die Einsatzmöglichkeiten und der Nutzen der Systemsimulation aufgezeigt.

1. Einführung

Oft haben erste Erfahrungen beim Einsatz von kommerziellen CAE-Tools (FEM, CFD, MKS, Netzwerksimulation) den Erwartungen nicht Rechnung getragen. Dabei sind Anfangsschwierigkeiten bei Methodenverständnis, Softwarebedienung und Parameterdefinition kurzfristig zu überwinden, wenn bei der Auswahl von CAE-Lösungen Voraussetzungen und Zielstellungen abgestimmt wurden.

Mit einer Entscheidung zur virtuellen Produktentwicklung bieten sich Chancen, deren Vorteile nicht unmittelbar erkennbar sind, aber letztendlich bedeutende Mehrwerte in den Produktentwicklungsphasen erzeugen werden:

- Schnelle Untersuchung und Beurteilung von verschiedenen Produktvarianten
- Auswahl von physikalischen Wirkprinzipien nach ausgewählten Kriterien (Lastenheft)
- Anordnung und Systemintegration der Teilsysteme (Mechanik/Antrieb, Regler)
- Berücksichtigung und Optimierung der Wechselwirkungen bei unterschiedlichen Teilsystemen und Verhalten (Mechanik, Elektronik, Magnetik, Thermik)
- Berechnung von Zuständen und physikalischen Größen, die nicht oder nur mit hohem Aufwand messbar sind

- Gezielte, simulationsgestützte Vorbereitung von experimentellen Tests
- Umfassendes Systemverständnis bei zunehmender Komplexität

Bei komplexen Aufgabenstellungen wie z. B. Kopplung von Mechanik, Hydraulik, Elektronik und Magnetik ist der Einsatz von Simulationen bereits heute unverzichtbar und ohne Alternative.

2. CAE-Komplettlösung für die Systemmodellierung

Die Forderung zur Erarbeitung virtueller Prototypen, die in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses von Entwurf und Konstruktion bis zum Test zu verwenden sind, stellt hohe Anforderungen an die CAE-Softwareentwickler. Um das komplexe Systemverhalten modellieren zu können, ist eine Zusammenführung von Komponenten mit verschiedenen physikalischen Wirkprinzipien in einem Simulationsmodell unerlässlich. Es ist sinnvoll, Modellierungskonzepte zu nutzen, die in möglichst vielen Domänen in gleicher Weise anwendbar sind. Ein solches Konzept liefern Netzwerkmodelle, die aufgrund physikalischer Analogien eine gleichartige Behandlung der einzelnen Domänen erlauben [1]. Dieses Vorgehen wird auch als physikalische Modellierung bezeichnet.

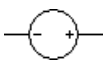

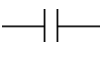

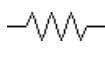

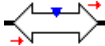






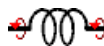




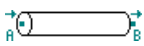





	Quellen		Grundelemente		
	Differenzgröße	Flussgröße	Flussgrößen-speicher	Differenzgrößen-speicher	Verbraucher
Elektrotechnik	Spannung U 	Strom I 	Kondensator  $I = C \cdot \dot{U}$	Spule  $I = \frac{1}{L} \cdot \int U dt$	Widerstand  $I = \frac{U}{R}$
Mechanik (transl.)	Geschwindigkeit v 	Kraft F 	Masse  $F = m \cdot \dot{v}$	Feder  $F = c \cdot \int v dt$	Dämpfer  $F = d \cdot v$
Mechanik (rot.)	Drehzahl ω 	Drehmoment T 	Trägheit  $T = J \cdot \dot{\omega}$	Drehfeder  $T = c \cdot \int \omega dt$	Dämpfer  $T = d \cdot \omega$
Hydraulik	Druck p 	Volumenstrom Q 	Volumen  $Q = V \cdot \dot{p}$	Verlustfreies Rohr  $Q = \frac{1}{L_H} \cdot \int p dt$	Ventil, Blende  $Q = \frac{p}{R_H}$
Thermik	Temperatur T 	Wärmestrom P 	Wärmekapazität  $P = C \cdot \dot{T}$	-	Wärmeleitung  $P = \frac{R_{th}}{T}$

Bild 1: Beispiele für Netzwerkanalogien in einigen physikalischen Domänen

Die Netzwerkanalogien in Bild 1 sind nicht auf die gezeigten physikalischen Domänen beschränkt. Netzwerkmodelle finden ebenso in der Simulation von Mehrkörpersystemen, der Pneumatik und magnetischer Kreise Anwendung. Die Einführung von Bilanzgleichungen erlaubt es, die Handhabung der einzelnen physikalischen Teilgebiete in der Simulation zu vereinheitlichen. Der Netzwerkansatz orientiert sich an den in der Realität vorhandenen funktionellen Komponenten und erlaubt damit auch die Bündelung von Funktionen, Parametern und Ergebnisgrößen im jeweiligen Modellelement, was leicht verständliche und auswertefreundliche Modelle zur Folge hat. Für Steuerung, Regler oder Algorithmen (zumeist Nicht-Streckenmodelle) ist die signalflossorientierte oder gleichungsbasierte Methode das geeignete Mittel für die Modellbildung.

3. Physikalische Modellierung mit SimulationX und Modelica

Mit SimulationX besitzt der Anwender eine leistungsfähige Modellierungsplattform, um alle physikalisch-technischen Zusammenhänge abzubilden [2]. Es stehen validierte Modellbibliotheken für den durchgängigen Entwurfsprozess sowie eine Vielzahl von Applikationen (Modellen) zur Verfügung.

SimulationX unterstützt einen hierarchischen Modellaufbau. Abhängig von den Untersuchungsaufgaben können die zu berücksichtigenden Funktionalitäten vereinfacht oder detailliert abgebildet werden. Zur Modellbeschreibung wird die Sprache Modelica verwendet [3]. Die Stärke von Modelica ist die einfache Formulierung und effiziente Behandlung von mathematischen Gleichungen, insbesondere Differentialgleichungen, algebraischen und diskreten Gleichungen, die bei der Modellierung komplexer, technischer Systeme entstehen [4]. Alle Bilanzgleichungen wie beispielsweise der „Energieerhaltungssatz“, „Drehimpulssatz“ oder die „Kirchhoffschen Gesetze“ werden erfüllt. Damit unterscheidet sich dieser Ansatz ganz wesentlich von anderen, mathematischen Beschreibungsarten, bei denen zum Beispiel auf die Signal- oder Leistungsflussrichtung geachtet werden muss (kausale Modellierung bzw. Bondgraphen-Modellierung).

Die Sprachelemente von Modelica sind in einer freien Spezifikation definiert. Sie ermöglichen eine, vom eigentlichen numerischen Lösungsverfahren weitgehend unabhängige, Verhaltensbeschreibung physikalischer Systeme. Die Sprache wird mittlerweile von verschiedenen Softwareanbietern unterstützt. Für den Anwender heißt das qualitativ höherwertige Simulationssoftware und Vorteile bei der Ergebnisvalidierung. Umgekehrt fließen auch die Erfahrungen der Softwarehersteller wieder in den Sprachstandard ein.

Modelica erlaubt gemischte signal-, netzwerk- und verhaltensorientierte Modellierungen. Die resultierenden Gleichungen werden durch eine symbolische Analyse automatisch so umgestellt, dass in der Regel nur für wenige der vom Anwender definierten Variablen die Werte numerisch iterativ ermittelt werden müssen. Zur Berechnung der anderen Variablen generiert die symbolische Analyse einfache Zuweisungsgleichungen, die in jedem Lösungspunkt nur einmal ausgewertet werden müssen. Falls gewünscht, hat der Anwender über Attribute der Variablen auch Einflussmöglichkeiten auf die symbolische Analyse; jedoch braucht er sich damit in der Regel nicht zu beschäftigen.

Über Attribute kann der Nutzer auch Variablen, Typen und Elemente mit Kommentaren versehen. Das fördert eine gut strukturierte Modelldokumentation. Verschiedene physikalische Domänen können über das Klassenkonzept von Modelica gegeneinander abgegrenzt werden. Diesen Domänen sind physikalische Einheiten zugeordnet, die nach Wunsch des Nutzers gewählt werden können.

Der objektorientierte, interdisziplinäre (multi-domain) Modellaufbau steht im Einklang mit den Zielstellungen zur ganzheitlichen Systemmodellierung.

3.1 Objektorientierter Modellaufbau

So ähnlich wie bei der Modellierung selbst, erweisen sich objektorientierte Ansätze bei Aufbau, Strukturierung und Verwaltung von Modellelementbibliotheken als vorteilhaft [5].

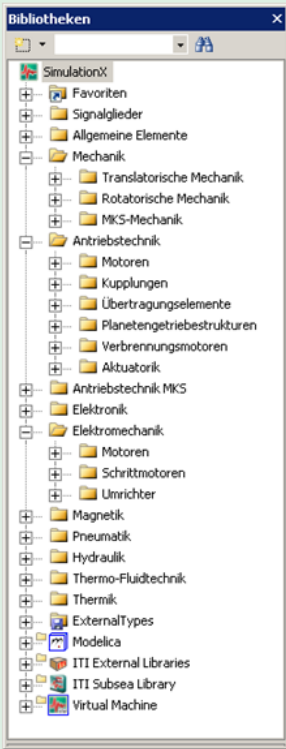
Objektorientierung, wie sie auch aus der Programmierung bekannt ist, erlaubt:

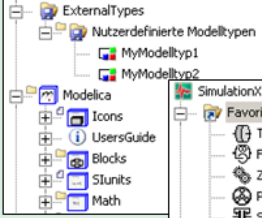
- die Zusammenfassung gleichartiger Objekte zu Objekttypen,
- eine lokale Beschreibung aller Eigenschaften (Parameter, Ergebnisgrößen, Anschlussbeschreibung und Funktion),
- die Abbildung funktionaler und logischer Zusammenhänge zwischen den Objekten durch Typhierarchien,
- Unterobjekte als Bestandteil von Objekten (Zusammenfassung von Teilmodellen oder Ansammlungen von Objekten zu neuen Typen; Hinzufügen von zusätzlichen Parametern oder zusätzlicher Funktionalität in Form von Algorithmen und Gleichungen zu Typen),
- die Ableitung von neuen Typen aus Existierenden unter Vererbung aller Eigenschaften des Ursprungstyps und entsprechender Erweiterung der Funktionalität (Bild 2),
- einen eindeutigen Zugriff auf alle Objekte und Größen an beliebiger Stelle der Hierarchie (objektorientiertes Namensraumkonzept).

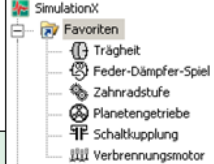
Modellierung mit Bibliotheken


- Hierarchische Ordnung der Elemente
- Einfache Grundelemente (z.B. Mechanik)
- Spezielle Koppellemente für domänenübergreifende Modellierung (z.B. Elektromotor, Hydraulikzylinder)
- Komplexe technische Komponenten (Planetengetriebe, Hydropumpe)
- Favoriten definierbar
- Beliebig erweiterbar

Page 4










www.iti.de



www.simulationx.com

© Copyright ITI GmbH Dresden

Bild 2: SimulationX Modellierungsmöglichkeiten

Ein objektorientiertes Konzept bringt zudem wesentliche Vorteile in der Verwaltung und Pflege von Modellelementen und -bibliotheken. So lassen sich alle Änderungen an einem Objekttyp automatisch an Typen propagieren, die das betreffende Objekt enthalten bzw. von diesem abgeleitet sind. Dies gilt für alle Komponenten in Simulationsmodellen, die auf einem bestimmten Typ basieren. Gleichzeitig erleichtert die Objektorientierung auch die Implementierung zueinander, in bestimmten Eigenschaften, kompatibler Typen und macht diese im Simulationsmodell einfach austauschbar. Damit sind sowohl Wechsel in der Hierarchietiefe

und die Detaillierung eines Modellelements (z. B. Motor als Drehzahlvorgabe, Momentenquelle mit Drehzahlregelung, elektrisches Modell usw.), als auch der Wechsel zwischen verschiedenen konstruktiven Lösungen für eine Modellkomponente (z. B. Antrieb per Gleichstrommotor, Wechselstrommotor etc.) einfach zu vollziehen: Das geschieht entweder durch den Austausch der Komponente im Simulationsmodell oder durch die Nutzung von Basistypen, die alle gewünschten Implementierungen bündeln.

3.2 CAD/CAE-Integration und Schnittstellen

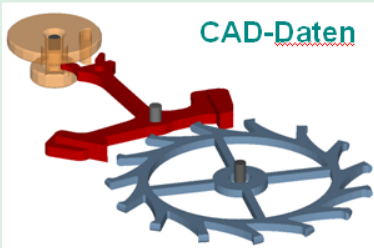
Für die komplette virtuelle Produktentwicklung sollte sich das CAE-Werkzeug nahtlos in den Gesamtentwurfsprozess einfügen und auch mit anderen Werkzeugen interagieren können. Simulationsmodelle laufen heute zunehmend mit automatisch importierten CAD-Geometrien. Diese CAD-Daten werden entsprechend der Mehrkörpermechanik den Körpern, Gelenken, Kräftelementen und Zwangsbedingungen zugeordnet. Beim Import werden Schwerpunkt, Masse und Trägheitstensor berechnet. Da der CAD-Import in SimulationX auch über COM-Schnittstellen gesteuert werden kann, sind Skripte zur Aktualisierung der CAD-Daten anwendbar. Das ermöglicht dem Anwender einen komfortablen und produktiven Umgang mit CAD-Daten, denn Import, Speichern und Verwenden der Informationen werden beschleunigt.

In der SimulationX Modellstrukturansicht werden die Verbindungen zwischen den 3D-Mechanikelementen und weiteren Domänen (Regelung, Elektrik) aufgebaut. Dabei sind Modellstrukturansicht und 3D-Ansicht äquivalent (Bild 3). Daten und Informationen, die nicht in den CAD-Tools verfügbar sind, können in Datenbanken verwaltet werden. Die Verknüpfung zwischen weiteren, sehr verschiedenen Komponenten (z.B. CAD, Dokumentation, Steuerungsprogrammierung, Projektmanagement) kann ebenso berücksichtigt werden.

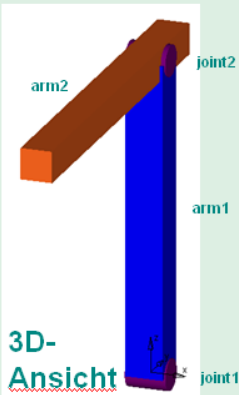
CAD-Schnittstelle und Modellansichten

Page 6

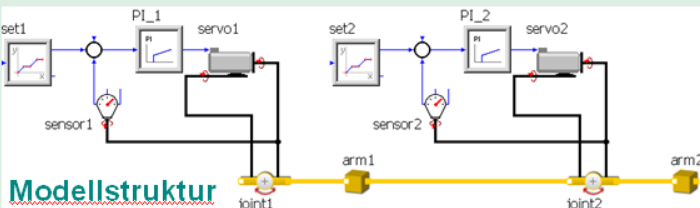
- Import von STL-Daten
- Modellstruktur-Ansicht (Topologie, Verbindungen zwischen verschiedenen Domänen)
- 3D-Ansicht (Form, Größe, Farbe, Lage, Animation/Bewegung)
- Modellstruktur- und 3D-Ansicht sind äquivalent




CAD-Daten




3D-Ansicht



Modellstruktur



www.iti.de



www.simulationx.com

© Copyright ITI GmbH Dresden

Bild 3: SimulationX CAD-Schnittstelle und Einbindung in den Systemsimulator

3.3 FEM, CFD-Integration und Schnittstellen

Bei der dynamischen Simulation mechatronischer Systeme kann auch eine gekoppelte Simulation unterschiedlicher Berechnungsmethoden zum Einsatz kommen. Damit ist an dieser Stelle die Kopplung von FEM (Finite Elemente Methode) oder CFD (Computational Fluid Dynamics) mit der Netzwerksimulation gemeint. Bei der Systemsimulation werden diskrete Modelle mit konzentrierten Parametern beschrieben, was sehr viel weniger Freiheitsgrade im Vergleich zu FEM- oder CFD-Berechnungsmethoden zur Folge hat [6, 7].

Mechanische Eigenschaften können aus den FEM-Ergebnissen durch modale Ersatzparameter abgebildet werden. Damit können beispielsweise Biegeeigenschaften von Wellen und Verformungen von Gehäusen in die Gesamtberechnung einbezogen werden. SimulationX bietet solch eine modale FEM-Schnittstelle zur Erfassung des statischen und dynamischen Verhaltens schwach gedämpfter linearelastischer Strukturen an [6].

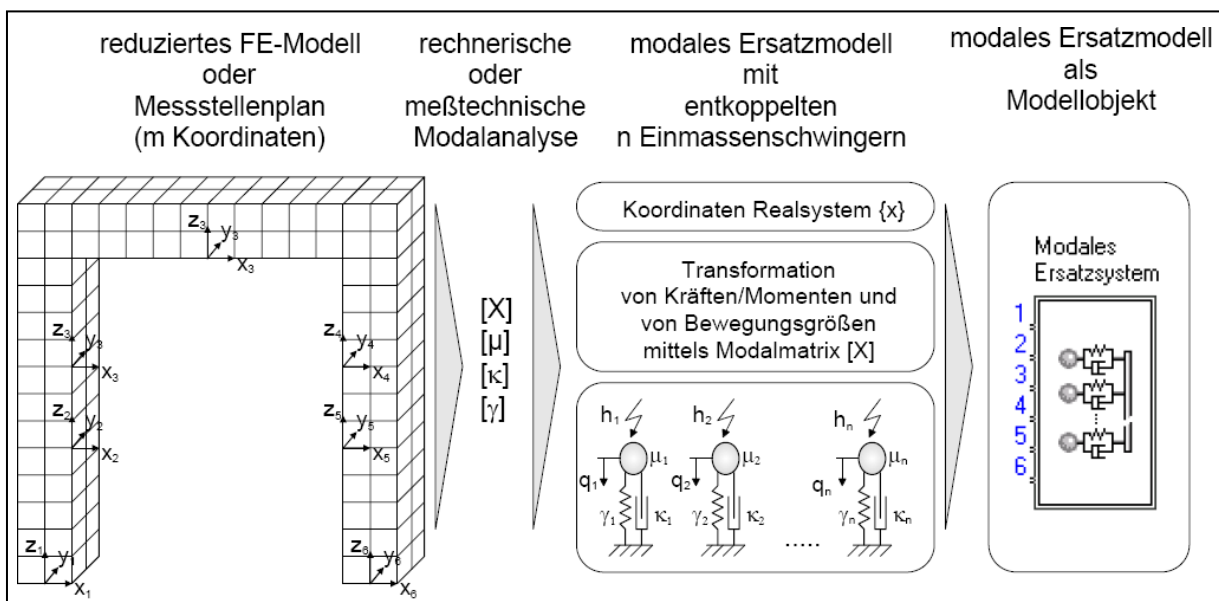


Bild 4: Prinzip der Schnittstelle FEM und Systemsimulation

Auf dem Gebiet der Entwicklung hydraulischer und pneumatischer Komponenten kommt die numerische Strömungssimulation (CFD) zum Einsatz. CFD-Lösungen eignen sich besonders für strömungstechnische und thermische Analysen von einzelnen Komponenten. Da gerade bei der Untersuchung des instationären Verhaltens einer Komponente auch deren umfangreiche Umgebung mit berücksichtigt werden muss, sind die Grenzen von derzeitigen CFD-Programmen hinsichtlich Rechenzeit und Modellierungsaufwand recht schnell erreicht. Allein mit der Kopplung an einen Netzwerksimulator können diese Einschränkungen überwunden werden: Bauteile, bei denen die Wechselwirkung des zu untersuchenden Details mit dem Gesamtsystem (u.a. Leitungen, Ventile oder Pumpen für die lokale Strömung) eine Rolle spielt, werden zunächst im CFD-Programm abgebildet. Die Verbindung zum SimulationX-Netzwerkmodell des Gesamtsystems erfolgt dann über ein Kopplungsmodul. Diese Vorgehensweise ermöglicht schließlich ganzheitliche Auswertungen sowie eine genauere Bestimmung von Wirkungsgrad, Strömungskräften oder Kavitationsneigung [7].

4. SimulationX Modellparametrierungen

In der Modellbildung begegnet der Anwender einer Vielzahl, in ihrer Grundfunktion gleichartiger, Objekte. Diese unterscheiden sich jedoch in ihrem Verhalten deutlich voneinander (z.B. Federn linear, nichtlinear, mit/ohne Spiel, einseitig wirkend). Ein möglicher Lösungsansatz wäre die Bereitstellung eines Bibliothekelements für jeden möglichen Anwendungsfall. Das würde allerdings schnell zu extrem umfangreichen Bibliotheken führen

und trotzdem keine vollständige Abdeckung aller denkbaren Fälle erlauben. Somit ist es wesentlich sinnvoller, die Variabilität im Verhalten der Modellobjekte durch ein flexibles Parameterkonzept zu unterstützen und damit die Zahl der Modellobjekte auf eine überschaubare Menge zu begrenzen.

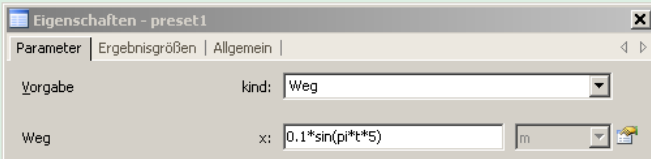
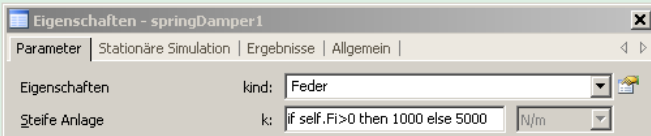
Das SimulationX Parametrierungskonzept berücksichtigt folgende Möglichkeiten:

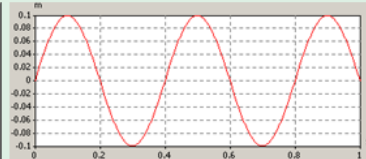
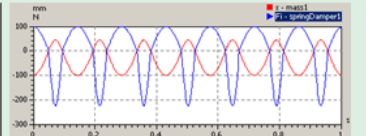
- Auswahl von unterschiedlichen Modellansätzen über Toolboxen,
- Parametrierung mit Zahlenwerten,
- Parametrierung mit Funktionsausdrücken, die mathematische Funktionen und zustands- und/oder zeitabhängige Variablen enthalten können,
- Parametrierung mit Kennlinien, Kurvenscharen und Kennfeldern sowie
- Verwendung logischer Ausdrücke.



Parametrierungsmöglichkeiten

Page 7

- **Auswahl unterschiedlicher Modellansätze**
- **Freie Einheitenauswahl, -umschaltung und -umrechnung**
- **Parametrierung mit Werten, Variablen, Ausdrücken oder Kennlinien**
 - vordefinierte Konstanten (π , e), Variablen (t), Funktionen (\sin)
 - mathematische Funktionen, logischen Bedingungen und Abhängigkeiten

© Copyright ITI GmbH Dresden

Bild 5: SimulationX Parametrierungsmöglichkeiten

Durch die Bereitstellung von Maßeinheitensystemen erleichtert die Parametrierung in SimulationX die Nutzbarkeit physikalischer Maßeinheiten sowie die nutzerdefinierte Abfrage von Konvertierungsmechanismen. Auf diesem Weg kann der Anwender z.B. beliebige (auch nichtmetrische) Einheiten für Parameter nutzen oder mit zugeschnittenen Größengleichungen parametrieren.

5. Berechnungen und Analysen für den virtuellen Test

Die vorgenannten Schwerpunkte haben die Aspekte der Modellierung beschrieben. Sind die Modelle erstellt, stehen eine Vielzahl von Berechnungen und Analysearten zur Verfügung:

- Transiente Simulation im Zeitbereich zur Ermittlung von Zuständen und physikalischen Größen,

- Systemanalyse (Eigenfrequenzen, Zeitkonstanten, Schwingformen, Energieverteilung in den einzelnen Zuständen) zur Beurteilung von Stabilität, Resonanzen und deren Ursachen,
- Systemidentifikation (Ableitung von Übertragungsfunktionen, Zustandsraumrepräsentationen, Frequenzganganalyse) zur Beurteilung des Verhaltens von Teilsystemen und dem Einfluss von Regelstrecken,
- Lineare Systemanalyse zur Ermittlung von Arbeitspunkten (statische oder stationäre Gleichgewichte) und Verhaltensanalyse in Arbeitspunkten (stationäre Simulation, Rechnung im Frequenzbereich),
- Stationäre Simulation zur Berechnung des sinusförmig eingeschwungenen Zustandes eines dynamischen Systems mit Hilfe der nichtlinearen harmonischen Balance oder mit einem linearen Verfahren für kleine periodische Schwankungen um eine gleichförmige Bewegung,
- Variantenrechnung und Parameterstudien zur Beurteilung von Entwurfsalternativen und Identifikation von Änderungspotentialen,
- Optimierung am Gesamtsystem nach nutzerdefinierten Zielfunktionen (SimulationX Schnittstelle zu OptiY [8]),
- Kommunikation mit anderen Entwurfswerkzeugen (Co-Simulation, Code-Export, Datenbankbindung, externe Steuerbarkeit z. B. über Scripting),
- Virtuelle Inbetriebnahme durch Anbindung an SPS.

6. Applikation Zusammentragmaschine

Im Folgenden werden einige der in den Abschnitten 2 und 3 vorgestellten Modellierungstechniken anhand eines SimulationX-Modells einer Zusammentragmaschine diskutiert. Für das Modell stehen keine fertigen Modellelemente zur Verfügung, so dass das Beispiel gleichzeitig zur Demonstration der (mathematischen) Modellfindung und des grundlegenden Modellaufbaus mit SimulationX dient. Industrieanwender können bei der Anwendung von SimulationX auf solche bereits integrierten Teilmodelle unmittelbar zugreifen.

Für das Stapeln von Kleinteilen in gewünschter Reihenfolge im industriellen Maßstab werden Zusammentragmaschinen genutzt (Bild 6). Solche Maschinen kommen zum Beispiel beim Sammeln der Seiten klebegebundener Bücher und für das Stapeln von CDs für eine Verpackungsmaschine zum Einsatz. Um ein schnelles und präzises Binden bzw. Verpacken zu gewährleisten, muss der Transport möglichst schwingungsfrei erfolgen.



Bild 6: Zusammentragmaschine als ein Anwendungsbeispiel für die Simulation

In enger Zusammenarbeit zwischen ITI und Kolbus wurden mit Hilfe von Simulationen die Schwingungen in einer Zusammentragmaschine analysiert. Die anhand von Simulationsmodellen getesteten konstruktiven Maßnahmen reduzierten im praktischen Aufbau die Schwingungen wesentlich und gestatteten so eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit mit stabilem Lauf [9].

6.1 Mathematische Modellfindung

6.1.1 Ausgangsbetrachtung

Das Modell umfasst Blöcke auf Signalebene sowie Systemteile aus der rotatorischen und der translatorischen Mechanik. Als Differenzgrößen kommen Verrückungs- und Verdrehungsdifferenzen bezüglich der entspannten Anfangslage zum Einsatz. Bei der Kette wird die Länge des Kettenabschnittes gemessen, der einen festen Anlagenpunkt passiert hat.

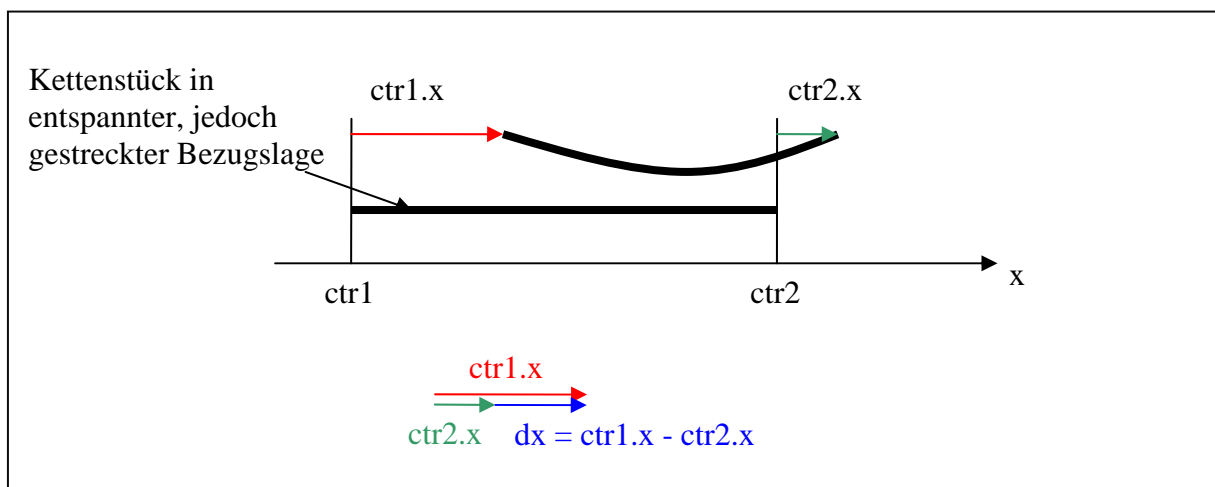


Bild 7: Kettenstück in entspannter, jedoch gestreckter Bezugslage (unterer fester Strich) und in verrückter Lage (obere fette Linie)

Die Flussgröße eines Elements (Bild 8) ist als, auf der Seite von Anschluss 1 einzuprägende, Schnittkraft definiert, wenn das Element an den Anschlüssen aus seiner Umgebung freigeschnitten wird. Die Kraftgröße wird dabei in der gleichen Richtung wie die zugehörige Ortskoordinate gemessen. Die in Bild 8 eingezeichnete Schnittkraft F_i hat also beispielsweise einen negativen Wert.

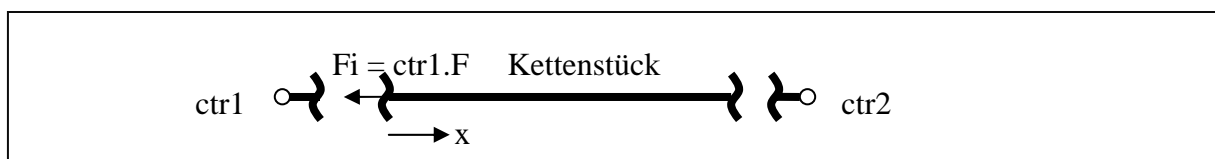


Bild 8: Definition der inneren Kraft am Beispiel eines Kettenstückes

Zwei Aspekte sind für die Schwingungsanalyse wesentlich:

- die Schwingungsanregung und
- das schwingungsfähige System.

Die Hauptquellen für Schwingungen in der Anlage sind zum einen Drehzahländerungen am Antrieb und zum anderen ein unruhiges Abrollen der Kette von den Kettenrädern, an denen die Kette angetrieben und am Ende der Transportstrecke umgelenkt wird. Das schwingungsfähige System setzt sich vor allem aus den Elastizitäten der Kette und der Kettenspanneinrichtung, der Kettenmasse und der Drehträgheiten der Kettenräder zusammen. Aus diesen Systemteilen besteht das mit SimulationX aufgebaute Modell der Zusammentragmaschine (siehe Bild 9).

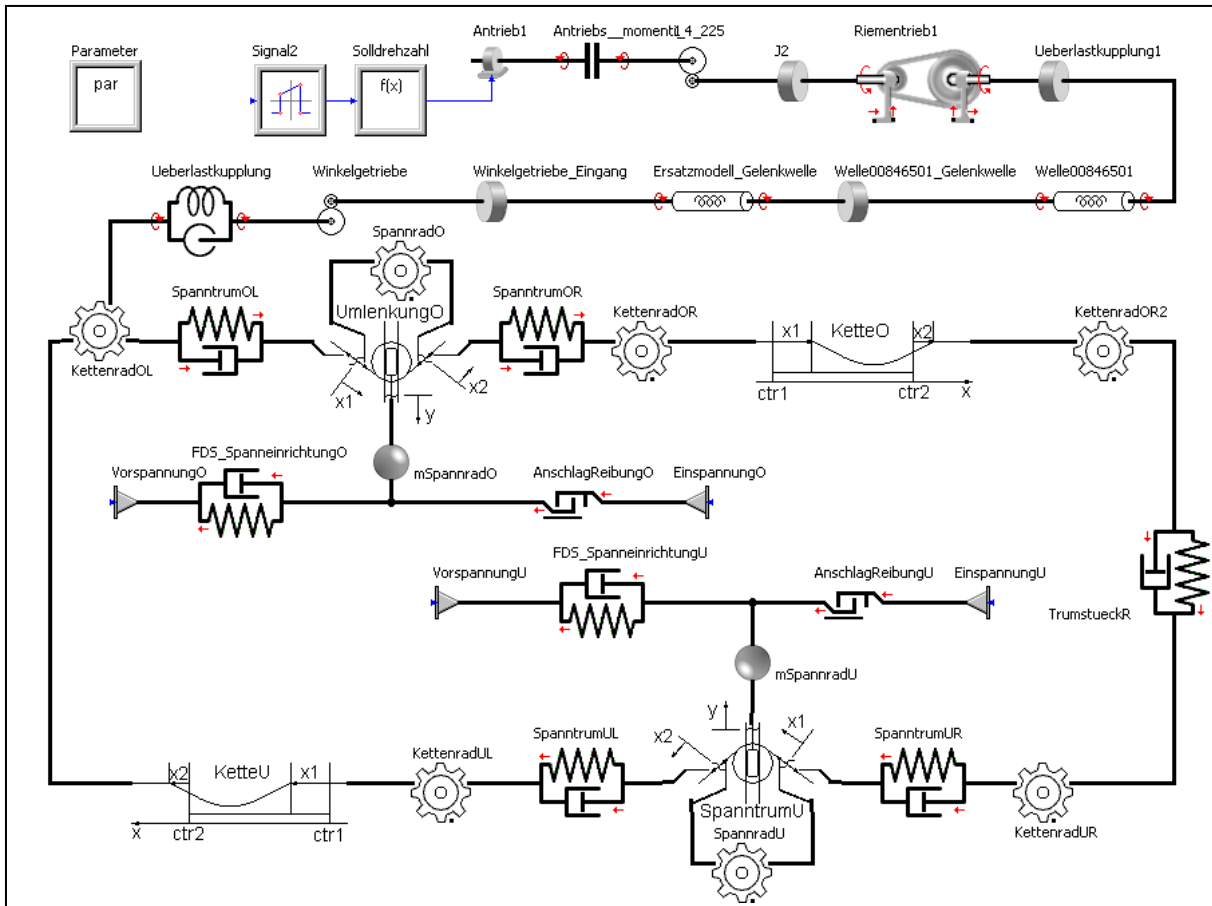


Bild 9: SimulationX-Modell des Kettensammlers

Für die Schwingungsanregung und die Schwingungsdämpfung wichtige nichtlineare Effekte werden ebenfalls im Modell erfasst. Das sind im Einzelnen:

- Ketten können keine Druckkräfte aufnehmen, sondern nur Zugkräfte.
- Bei den Kettenrädern ist der Zusammenhang zwischen der Winkelstellung und der Länge des abgerollten Kettenabschnittes nichtlinear.
- Haft- und Gleitreibung der Kette samt Transporteure.

6.1.2 Modellierung der Ketten

Im oberen Teil der Anlage tragen die an der Kette befestigten Transporteure die Kleinteile zusammen; im unteren Teil wird die Kette zurückgezogen. Beide Kettenstränge sind Systeme mit verteilten Parametern, die jeweils durch Zerlegung in zehn Kettenteile örtlich diskretisiert wurden. Zur Modellierung eines Kettenteils wurden ein Feder-Dämpfer, eine elastische Reibstelle und eine Masse zum Teilmodell „Kettenteil“ zusammengefasst (Bilder 10 und 11).

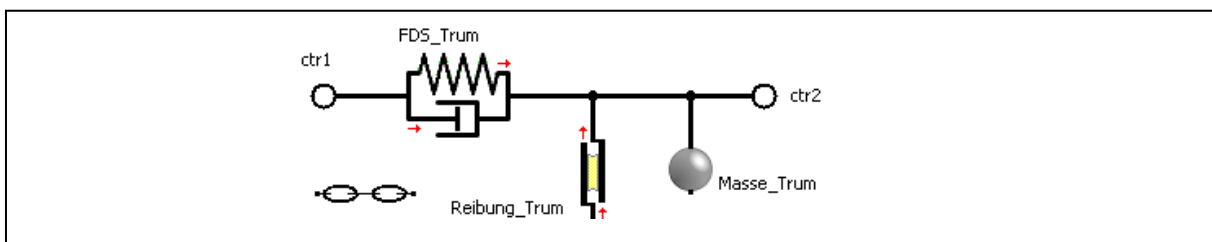


Bild 10: Elemente eines Kettenteils; links unten: Symbol des Kettenteils

Aus Bild 7 entnimmt man, dass die Kette für $dx < 0$ gedehnt wird und Kraft überträgt, während sie für $dx > 0$ entspannt ist. Mit Hilfe variabler Parameter (vgl. Abschnitt 4) ist diese Eigenschaft einfach über Terme mit if-then-else-Alternativen realisierbar (Bild 11).

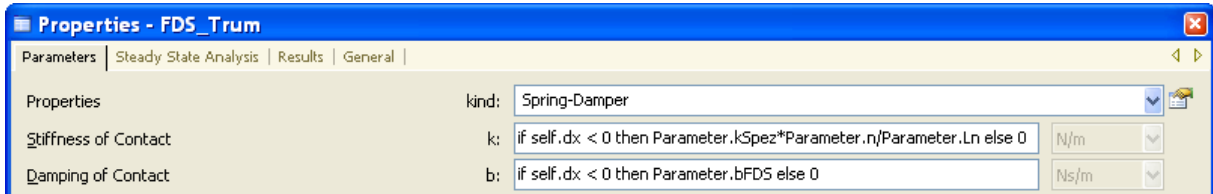


Bild 11: Flexible Parametereingabe durch if-then-else Angaben

Mit Hilfe der Kettenteile lässt sich dann eine Kettenhälfte einfach zusammensetzen (Bild 12).

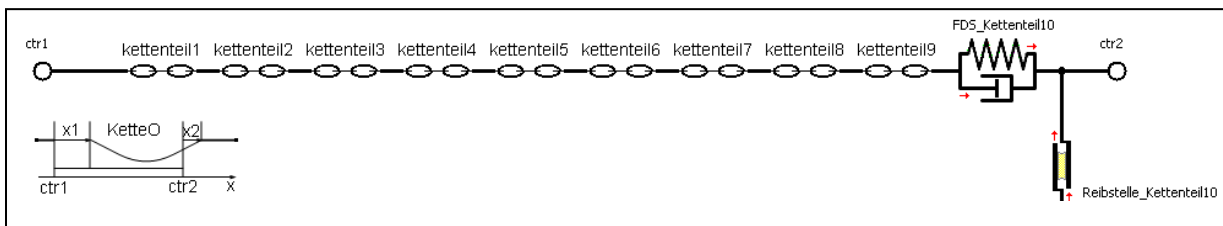


Bild 12: Modell einer Kettenhälfte mit zusammengefassten Kettenteilen; links unten: Symbol der Kette

6.1.3 Modellierung der Kettenräder

Eine Kette läuft bei einem Kettenrad nicht vom Rand einer Kreisscheibe ab, sondern von dem eines regelmäßigen Polygons mit den Flanken der Kettenraderzähne als Ecken. Für den einfachen Fall eines Kettenrades mit vier Zähnen ist der geometrische Zusammenhang zwischen der Verdrehung ϕ des Kettenrades gegenüber dem Ketteneinlauf und der Länge des aufgewickelten Kettensstückes X_K in Bild 12 veranschaulicht.

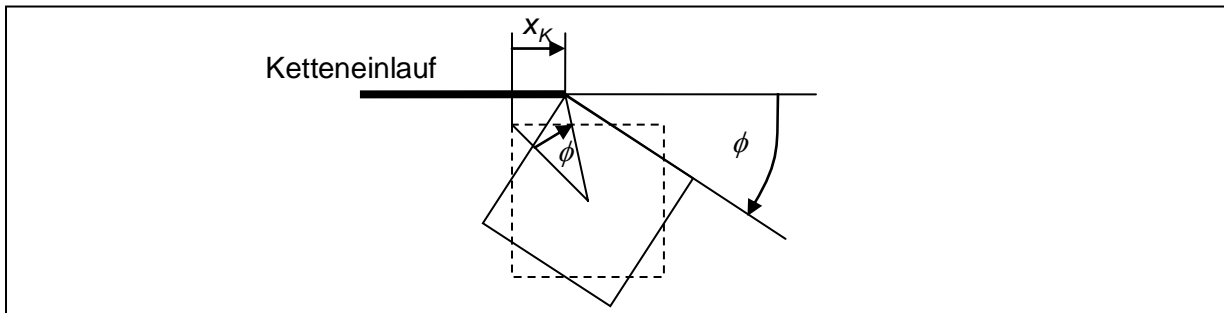


Bild 13: Aufgewickelte Kettenlänge X_K in Abhängigkeit des Drehwinkels ϕ eines Kettenrades mit vier Zähnen

Da es im allgemeinen Fall eines Kettenrades mit z Zähnen zur Bestimmung der Aufwickellänge nur auf die Position der Ecke ankommt, an der gerade die Kette aufgezogen wird, kann man aus diesem Bild auch die Formel für den allgemeinen Fall ablesen:

$$x_K(\phi) = \frac{d_0}{2} \sin\left(\text{mod}(\phi, \phi_T) - \frac{\phi_T}{2}\right) + l_T \cdot \text{floor}(\phi, \phi_T)$$

Dabei ist d_0 die Diagonale des Polygons, $\phi_T := 2\pi/z$ der Teilungswinkel und $l_T := d_0 \sin(\phi_T/2)$ die Kantenlänge des Polygons.

Mit Hilfe von X_K sind die Verrückungen X_E am Ketteneinlauf und X_A am Kettenauslauf in Abhängigkeit der Verdrehung φ des Kettenrades darstellbar:

$$x_E(\phi) = x_K(\phi) - x_K(0),$$

$$x_A(\phi) = x_K(\phi - \phi_U) - x_K(\phi_U).$$

Beim Auslauf wird der Umschlingungswinkel φ_U zwischen Ein- und Auslauf mit berücksichtigt. Im Modell ist die Zwangsbedingung für den Auslauf in einem Compound Kettenlauf implementiert.

Durchmesser d_0 , Zähnezahl z und Umschlingungswinkel φ_U sind als Parameter definiert. Durch Nullsetzen des Parameters φ_U kann man dieses Element problemlos auch als Ketteneinlauf nutzen.

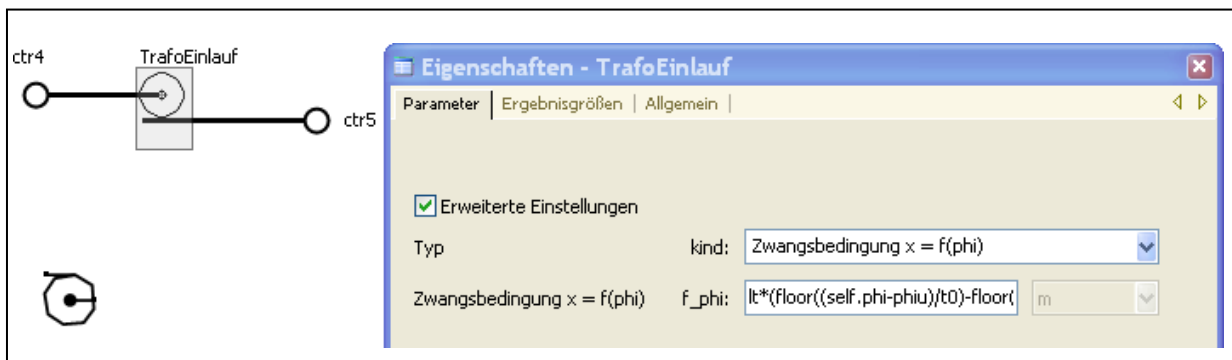


Bild 14: Struktur des Kettenlaufes; links unten: zugehöriges Symbol

Ein- und Auslauf sowie die Drehmasse des Kettenrades sind zum Kettenrad zusammengefasst (Bild 15), das dann mehrfach im Gesamtmodell zur Anwendung kommt (Bild 10).

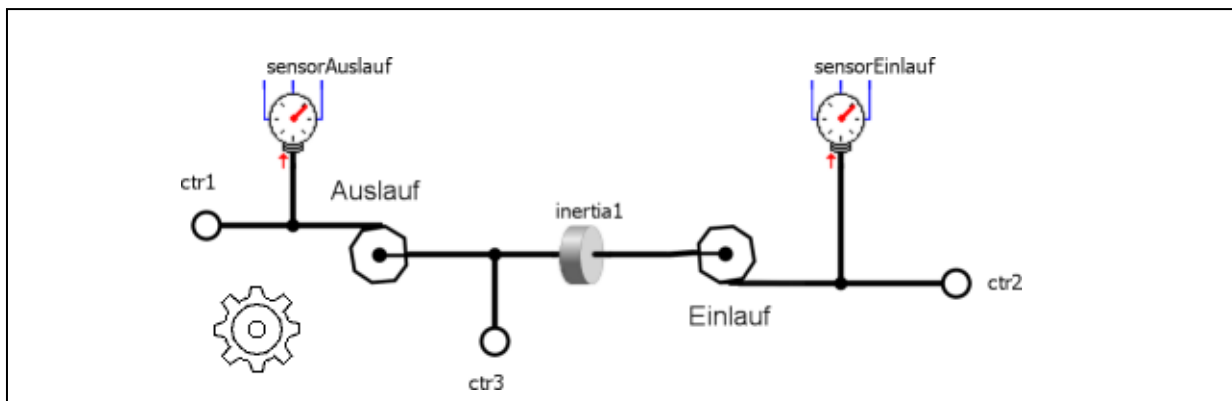


Bild 15: Modellstruktur des Kettenrades; links unten: zugehöriges Symbol

6.1.4 Modellierung der Kettenspaneinrichtung

Die Kette muss für einen spielfreien Lauf unter Vorspannung stehen. Zum Aufbringen dieser Vorspannung sind an den Enden der Anlage Kettenspaneinrichtungen angebracht. Aus der CAD-Ansicht (Bild 16) ist ersichtlich, dass der Arm, an dem das Spannrad befestigt ist (Rad unten in der Mitte), in seiner Referenzlage in Flucht zu den daneben platzierten Umlenkrädern liegt. Da die vertikale Verrückung y des Spannrades klein bleibt, brauchen die kinematischen Zwangsbedingungen in y nur bis zur ersten Ordnung berücksichtigt werden. In diesem Sinne ist der Spannmechanismus äquivalent mit einer Linearführung (Bild 17). Das vereinfacht die kinematische Analyse, da aufgrund der so entstehenden strukturellen Symmetrie in der Spanneinrichtung nur eine Art von Radpaarung zu untersuchen ist.

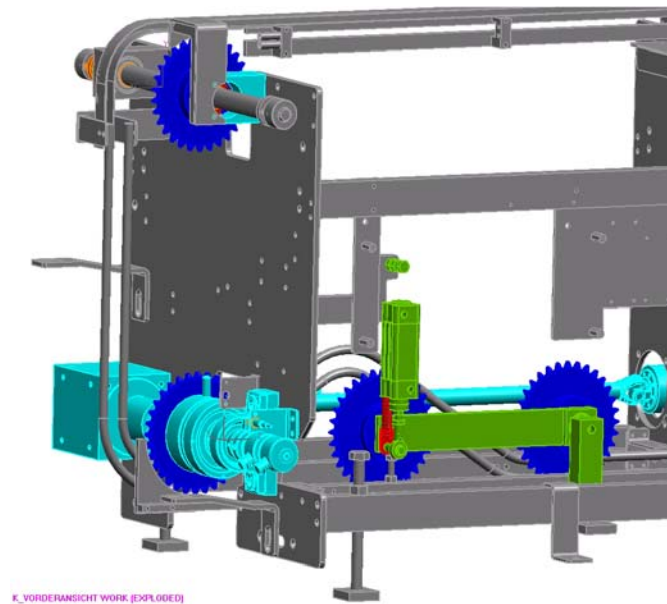


Bild 16: CAD-Darstellung der Spanneinrichtung

Beim Aufstellen der Gleichungen für die geometrische Zwangsbedingung am Spannrade wurde der im vorhergehenden Abschnitt diskutierte Polygoneffekt nicht berücksichtigt. An dieser Stelle wurde also angenommen, dass die Räder rund sind. Das ist gerechtfertigt, da die tangentialen Geschwindigkeitsschwankungen bereits durch das Teilmodell Kettenrad erfasst werden und die radialen Schwankungen aufgrund der hohen Zähnezahlen vernachlässigbar klein sind.

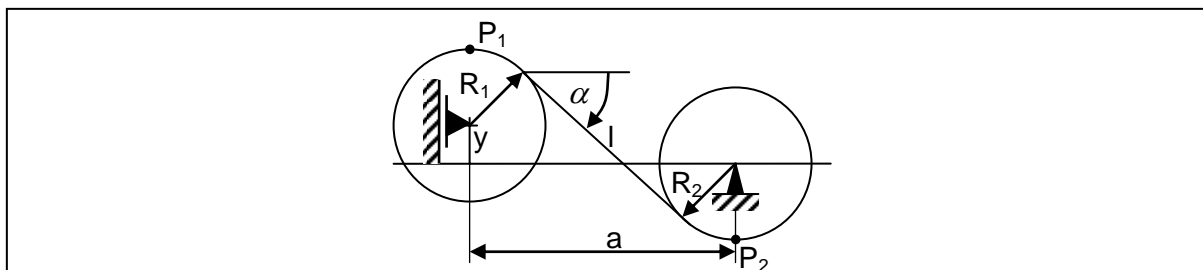


Bild 17: Kinematik einer Radpaarung am Spannrade

Aus Bild 17 liest man für die Länge der Verbindungsstrecke l zwischen den Auflagepunkten, die Neigung α und der Bogenlänge s der Kette von Punkt P_1 nach Punkt P_2 ab:

$$\begin{aligned} a &= (R_1 + R_2)\sin(\alpha) + l\cos(\alpha) \\ y &= -(R_1 + R_2)\cos(\alpha) + l\sin(\alpha) \\ s &= (R_1 + R_2)\alpha + l \end{aligned}$$

Differentiation liefert dann die folgenden Gleichungen für die Differentiale dy , $d\alpha$, dl und ds :

$$\begin{aligned} 0 &= ((R_1 + R_2)\cos(\alpha) - l\sin(\alpha))d\alpha + \cos(\alpha)dl \\ dy &= -((R_1 + R_2)\sin(\alpha) + l\cos(\alpha))d\alpha + \sin(\alpha)dl \\ ds &= (R_1 + R_2)d\alpha + dl \end{aligned}$$

Diese können als Approximationen erster Ordnung für die Verrückungen von y , α , l , s genutzt werden.

Aus dem Gleichungssystem gewinnt man die Formel

$$ds = \sin(\alpha)dy$$

für die, aus einer Verrückung des Spannrades in y-Richtung resultierende, Verlängerung ds der Kette zwischen den zwei Kettenrädern.

Unter Berücksichtigung der zusätzlich, durch die Verdrehung des Spannrades, entstehenden Verrückungsgrößen $ctrRad1.x$ und $ctrRad2.x$ ist diese Gleichung für beide Radpaarungen zusammen mit der zugehörigen Kräftebilanz in der Verhaltensrelation der Spanneinrichtung (Spanntrum) auf Gleichungsbasis implementiert (Bild 18).

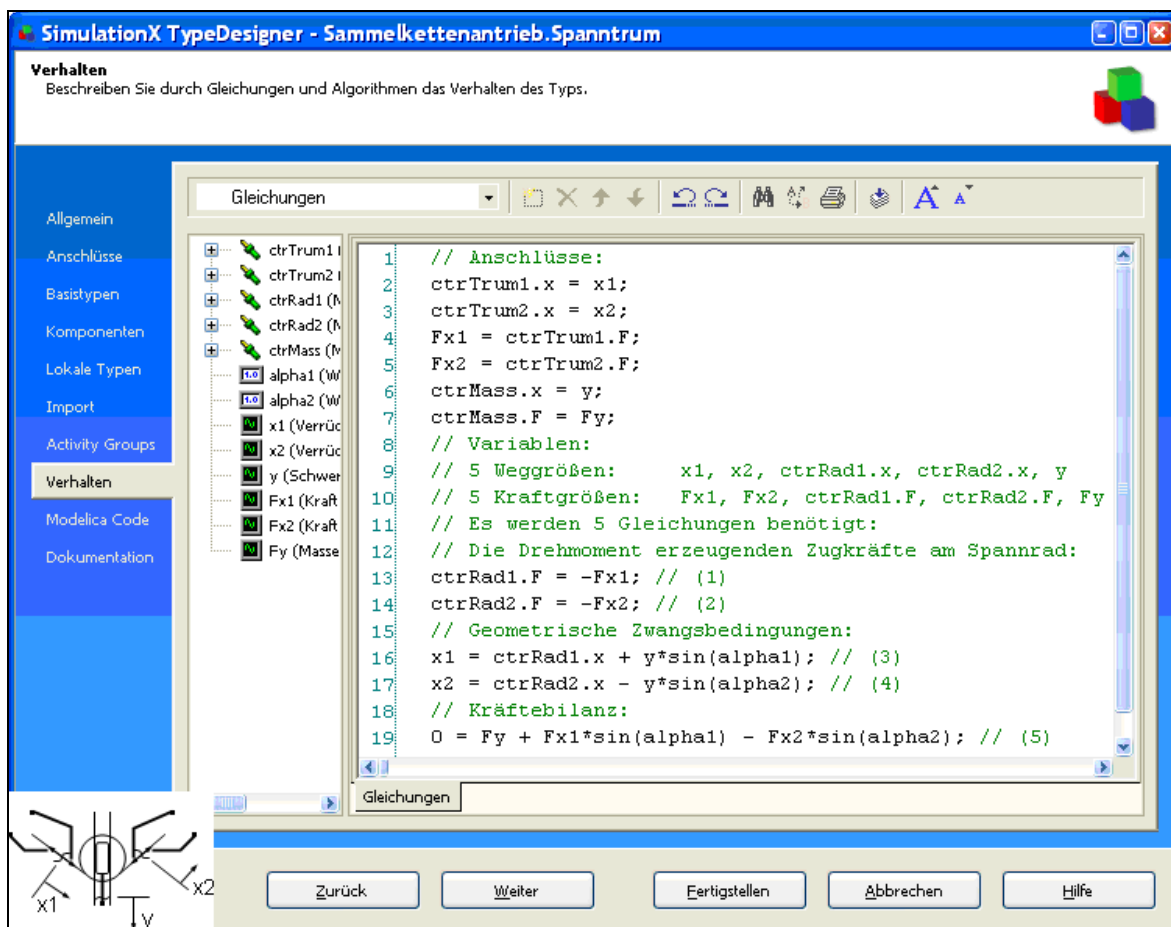


Bild 18: Verhaltensbeschreibung auf Gleichungsbasis für die Spanneinrichtung (Spanntrum), unten links ist das zugehörige Symbol eingblendet

6.2 Konstruktive Maßnahmen zur Schwingungsvermeidung, Simulation und Auswertung

Mit Hilfe des vorgestellten Simulationsmodells der Zusammentragmaschine konnte im praktischen Anwendungsfall das Mitschwingen der Spanneinrichtung als der Hauptgrund für große Geschwindigkeitsschwankungen der Kette lokalisiert werden. Als konstruktive Maßnahme zur Dämpfung der Schwingungen wurde in die Spannvorrichtung eine zusätzliche trockene Reibung eingebracht. Diese hält das Spannrad im stationären Betrieb in einer vertikalen Position fest.

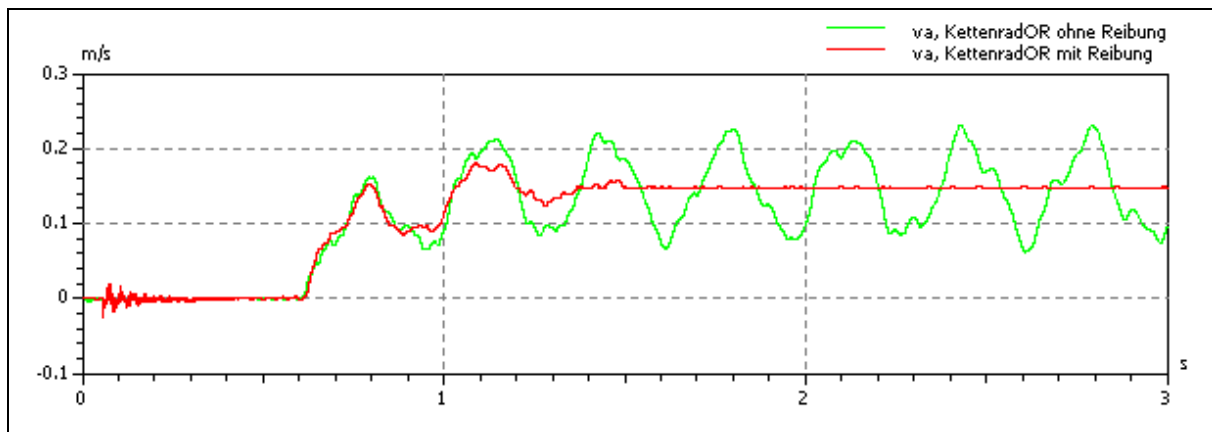


Bild 17: Kettengeschwindigkeit am Ausgang des Antriebs mit und ohne zusätzliche Reibung in der Spanneinrichtung

Vor den Umbaumaßnahmen an der Anlage wurden die Auswirkungen der trockenen Reibung am Simulationsmodell getestet. Dazu wurden in den Anschlägen „AnschlagReibungO“ und „AnschlagReibungU“ zuschaltbare Reibungen sowie in den Feder-Dämpfer-Spiel-Elementen „FDS_SpanneinrichtungO“ und „FDS_SpanneinrichtungU“ zuschaltbare Dämpfungen implementiert (siehe Bild 9).

Die Simulationsergebnisse für die Kettengeschwindigkeit am Ausgang der angetriebenen Spanneinrichtung mit und ohne Reibung sind in Bild 17 dargestellt. Durch die Reibung wird eine starke Schwingungsreduktion erreicht. Diese Ergebnisse haben sich in der Praxis hervorragend bestätigt (siehe [9]).

7. Zusammenfassung

Die Systemsimulation wird mehr und mehr zum Schlüsselwerkzeug im Entwurfsprozess bzw. bei der virtuellen Produktentwicklung. In diesem Beitrag wurde aus theoretischer und praktischer Sicht eine CAE-Komplettlösung vorgestellt, mit der alle Phasen der Produktentwicklung begleitet werden können. Die schnelle Untersuchung von Strukturvarianten und die effiziente Auswahl von physikalischen Wirkprinzipien sind wesentliche Vorteile bei der Anwendung der ganzheitlichen Systemmodellierung. SimulationX bietet eine Vielzahl von einsatzbereiten Modellbibliotheken, die zum Modellaufbau einfacher und komplexer Systeme eingesetzt werden können. Zur Abbildung spezieller Modellierungszusammenhänge kann die Modellbeschreibungssprache Modelica eingesetzt werden. Diese sorgt im „Hintergrund“ für eine effiziente Behandlung der dargestellten mathematischen Gleichungen.

Ein durchgängiges objektorientiertes Konzept und das vielfältige Angebot an Integrationschnittstellen unterstützt die Einbindung von SimulationX in den gesamten Produktentwicklungsprozess und gestattet die Kommunikation mit weiteren virtuellen Werkzeugen. In SimulationX integrierte und erweiterbare Berechnungen und Analyseverfahren, sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich, gewährleisten umfangreiche Auswertungen und die Durchführung produktiver Versuchsszenarien am virtuellen Prototyp. Damit können konstruktive Varianten zielgerichtet untersucht und die optimierte Lösung vorgeschlagen werden. Abhängig von der Aufgabenstellung werden Modellierungstiefe und Fallberechnungen bzw. Analysen vom Anwender bestimmt.

Das Applikationsbeispiel zeigt auch das Potenzial zur Abbildung komplexer Zusammenhänge auf. ITI verweist in diesem Zusammenhang auf neun unternehmenseigene Veranstaltungen im Zeitraum 2000 bis 2008 mit mehr als 100 Beiträgen zur virtuellen Produkt- bzw. Systementwicklung aus Industriebranchen wie Maschinen- und Fahrzeugbau, Antriebs-, Fluid-, Förder-, Energie- und Verfahrenstechnik.

8. Literaturreferenzen

[1] Blochwitz, Torsten; Uhlig, Andreas: Modellgenerierung für HiL-Simulationen auf der Basis physikalischer Ansätze. 8. Haus-der-Technik-Tagung "Hardware-in-the-Loop Simulation", Kassel, 16./17. September 2008

[2] Dokumentation/Bedienungshandbuch SimulationX 3.1, www.simulationx.com, Dresden 2008

[3] Modelica Association: Modelica, A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling. Language Specification, Version 3.0, September 5th 2007

[4] Otter, Martin: Modellierung von Fahrzeugsystemen mit Modelica, Automobiltechnologie in Bayern, media mind GmbH, September 2008

[5] Abel, Andreas; Schreiber, Uwe; Blochwitz, Torsten; Schindler, Jens: Innovative Werkzeuge zur Antriebskonstruktion, antriebstechnik 11/2004 und 02/2005

[6] Schreiber, Uwe: Systemsimulation geregelter Antriebe unter Berücksichtigung elastischer Maschinenkomponenten über modale Reduktion von ANSYS Modellen, 22. CAD-FEM Users' Meeting, November 2004, ICC Dresden

[7] Rüdiger, Frank; Klein, Andreas; Schütze, Jochen: Gekoppelte Simulation in der Hydraulik, Ölhydraulik und Pneumatik 47 (2003) Nr. 5

[8] Pham, T.Q.: "OptiY Software and Documentation Version 3.1", OptiY e. K., www.optiy.de, 2008

[9] Schreiber, Uwe; Egert, Holger: Modellierung und Simulation von Sammelkettenantrieben zwecks Optimierung dynamischer Eigenschaften unter Berücksichtigung der Spanneinrichtung, VDI-Berichte 1749, 341-360 (2003)