

MODELLIERUNG UND VERTEILTE SIMULATION EINES AUTONOMEN MOBILBAGGERS

Juhasz, T.; Schmidt, D.; Kiekbusch, L.; Schmucker, U.; Berns, K.

1 Einführung

Für die Nutzfahrzeugindustrie ist die Automatisierung von Baumaschinen ein zentrales Thema um die Prozesse auf Baustellen beschleunigen zu können und Arbeiten präzise und ohne Gefahr für den Maschinenführer ausführen zu können.

Bei der Entwicklung komplexer Steuerungssysteme für autonom agierende Fahrzeuge ist die Modellbildung und Simulation zwingend notwendig, um neue Funktionen zeit- und kostengünstig virtuell überprüfen zu können. Das Modell soll dabei die Realität möglichst genau widerspiegeln, so dass die Steuerungs- und Regelalgorithmen später ohne größere Anpassungen auf die echte Maschine übertragen werden können.

Das vorliegende Paper beschreibt am Beispiel eines mobilen Baggers die Erweiterung einer vorhandenen Simulation durch die Modellierung komplexer mechatronischer Elemente. Durch die Bearbeitung vorhandener CAD-Daten wird das Mechanik-Modell des Nutzfahrzeuges in eine Modelica Umgebung überführt. Unter Berücksichtigung der Modell-Echtzeitfähigkeit werden die hydraulischen Komponenten des Baggerarmes auch in Modelica erstellt. Der Signaldatenaustausch zwischen Teilsystemen findet über Netzwerkkommunikation statt. Für diese Kopplung wird das im Fraunhofer IFF entwickelte Real-Time-Interface verwendet.

2 Ausgangssituation

Als Forschungsplattform für die Entwicklung von Konzepten zur Modellbildung und Simulation komplexer Systeme dient ein radgetriebener 18 Tonnen Mobilbagger VOLVO EW-180B. Die in der AG Robotersysteme der TU Kaiserslautern entwickelten Konzepte im Bereich der mobilen Robotik dienen als Grundlage für die Entwicklung einer Steuerung, die dem Bagger das autonome Ausführen verschiedener Tätigkeiten erlaubt.

Die Simulation des Fahrzeugs wurde bisher auf Basis von zwei miteinander gekoppelten Programmen realisiert. Im Simulationsframework SimVis3D [4] werden Sensoren wie Laser-Scanner oder Time-Of-Flight (TOF) Kameras nachgebildet und die Visualisierung implementiert. Das dynamische Modell des Fahrzeugsystems wurde auf Basis der Spiele-Physik-Engine Newton [16] umgesetzt. Dieses Programm ermöglicht die allgemeine Simulation von Punktmassen, statischen Objektinteraktionen und daraus resultierenden Bewegungen [5]. Sie ist jedoch nicht für

Elemente, wie die Hydraulik des Mobilbaggers oder die Löffel-Boden-Interaktion geeignet.

In den folgenden Abschnitten werden Einzelheiten des Mobilbaggers sowie die vorhandenen Simulationsmöglichkeiten im Detail beschrieben.

2.1 Forschungsplattform Mobilbagger

Im Rahmen des Projekts AMoBA (Autonomer Mobiler Bagger)¹ wurde der Bagger elektrifiziert und mit unterschiedlichen Sensoren und Aktoren (z.B. Winkelenkoder, Drucksensoren, DSPs, etc.) bestückt [1]. Diese liefern dem Steuerungssystem die nötigen Informationen, um Aussagen über den internen Zustand des Baggers zu erhalten. Die Steuerung basiert auf der in der AG Robotersysteme entwickelten, verhaltensbasierten Steuerungsarchitektur IB2C² [2] und dem Modular Controller Framework MCA2 - Branch Kaiserslautern [17]. Weitere Informationen zum Aufbau der Steuerung befinden sich in [1] und [6].



Abbildung 1: Der reale Volvo EW180B bei der autonomen Ausführung eines Grabvorgangs

Bei der Entwicklung komplexer Steuerungssysteme für autonom agierende Fahrzeuge ist eine entsprechende Simulation notwendig, um neue Funktionen zeit- und kostengünstig überprüfen zu können und Gefährdungen von Mensch und Maschine in frühen Stadien auszuschließen.

Berechnete Bewegungen, Kräfte, etc. des simulierten Systems sollten dabei der Realität möglichst nahe kommen, um die verwendeten Steuerungs- und Regelalgo-

¹ Gefördert durch die Stiftung Innovation Rheinland-Pfalz.

² IB2C – integrated Behaviour-based Control

rithmen später ohne größere Anpassungen auf die echte Maschine übertragen zu können.

2.2 Bisherige Simulationsmöglichkeiten

Wie schon beschrieben, ist die gekoppelte Simulationsumgebung nicht geeignet um die Löffel-Boden-Interaktion zu simulieren. Zur Erweiterung wurde daher eine Erdsimulation integriert. Dieser Ansatz erlaubt einerseits, die Bearbeitung der Erdoberfläche in der Simulation sowie das Erfassen der Änderungen durch die simulierten Sensoren. Andererseits kann während des Grabens eine physikalische Kraft auf den simulierten Bagger berechnet werden.



Abbildung 2: Visualisierung des virtuellen Baggers

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Einhaltung der Simulationszeitschranken ($< 100\text{ms}$ Zykluszeit) innerhalb derer ein neuer Bodenzustand ermittelt werden muss. Dies ergibt sich aus dem Anspruch, das System in Echtzeit zu simulieren. Damit können die Ergebnisse der Kontrollalgorithmen, welche in komplexen parallelen Threads laufen auf die reale Maschine übertragen werden. Als Grundlage zur Bodensimulation wurde die "Diskrete Element Methode" (DEM) verwendet. Diese wurde mittels der OpenCL Schnittstelle auf einer Grafikkarte als Partikelsimulation umgesetzt.

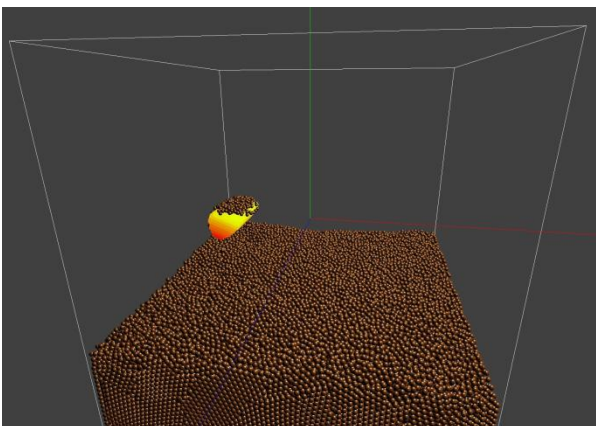


Abbildung 3: Partikelsimulation

Die einzelnen Bodenpartikel werden als kleine elastische Kugeln modelliert. Diese üben mittels Feder-Dämpfer Systemen Abstoßungs- und Anziehungskräfte aufeinander aus:

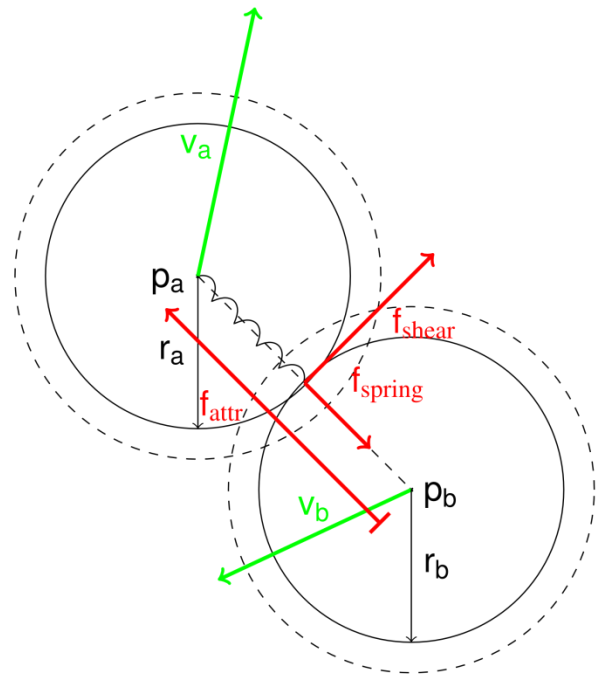


Abbildung 4: Simulierte Kräfte zwischen Erdpartikeln

Der virtuelle Löffel ist ebenfalls aus kugelförmigen Partikeln aufgebaut. Auf diese Art kann er die Kräfte, die auf ihn durch Erdpartikel wirken, akkumulieren. Dabei werden die Löffelpartikel nur extern und gemeinsam bewegt. Diese Herangehensweise bildet die Grundlage zur Berechnung der resultierenden Gesamtkräfte, die durch die Bodeninteraktionen auf den Bagger wirken.

3 Modellierung der Mechanik

Die Modellierung der Mechanik bildet die Grundlage für die Interaktionen während des Baggerprozesses. Unter der Annahme, dass der Bagger während des Baggerprozesses auf seinen Stützen abgestellt ist und das Fahren nicht mit untersucht wird, vereinfacht sich die Modellbeschreibung. Die Gummireifen werden nicht mit modelliert. Das Chassis hat deshalb keine Freiheitsgrade und ist mit dem Boden fest verankert.

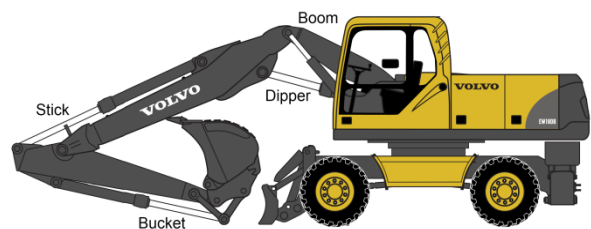


Abbildung 5: Schematische Abbildung des Baggers

In Abbildung 5 ist der zu modellierende Bagger mit seinen Anbauteilen schematisch dargestellt. Der Bagger besitzt ein drehbar gelagertes Chassis und vier Hydraulikzylinder. Der Baggerarm ist auch mit zahlreichen passiven Gelenken ausgestattet, die insgesamt eine komplexe Kinematik ergeben.

3.1 Workflow zur Modellbildung

Im Fraunhofer IFF wurde ein neuer VE Workflow entwickelt, welcher die teilautomatisierte Übersetzung von CAD Daten in ein Modelica-Modell ermöglicht. Das Werkzeug VINCENT [7] ist ein auf Java 3D-basierendes Framework, in dem aus der Konstruktionszeichnung die Hierarchie und das Kinematikmodell des Systems erstellt werden. Über das Austauschformat STEP wird die Geometrie aus beliebigen CAD Systemen übernommen. In der Strukturansicht wird den individuellen beweglichen Teilen der Maschine, Geometrie manuell zugeordnet. Durch verschaltete Gelenk- und Körperblöcke lassen sich in VINCENT alle kinematischen Anordnungsformen, einschließlich geschlossener und verzweigter Ketten, intuitiv und schnell definieren. Letztlich wird die kinematische Struktur inkl. physikalischer Parameter und Geometrie in XML bzw. VRML Format abgespeichert. Aus diesen Dateien kann mithilfe des Fraunhofer IFF - CAD2SIM Lösungsansatzes [8] ein Modelica Mehrkörpersystem Modell vollautomatisiert erzeugt werden. Die Struktur und die Geometrie der Bauteile und ihre physikalischen Parameter (Masse, Trägheit, usw.) werden dabei in eine Modelica Beschreibung umgewandelt. Dabei werden ideale starre Körper mit Gelenken verbunden, die so ein Mehrkörpersystem aufbauen.

3.2 Modelica Beschreibung

Fahrzeugsysteme sind immer kurzen Entwicklungszyklen unterworfen. Folglich besteht ein Bedarf an Methoden und Werkzeugen, die dieser Situation gerecht werden können. So hat sich in der jüngeren Vergangenheit die Vorgehensweise der objektorientierten Modellierung mit der Sprache Modelica [9] zur Simulation mechatronischer Systeme etabliert. Modelica ist besonders geeignet zur Erstellung multiphysikalischer Systemmodelle [10], was der sowohl mechanischen, hydraulischen als auch informationstechnischen Natur von Nutzfahrzeugsystemen in wesentlich höherem Maße entgegenkommt, als dies bei vielen fachgebietsspezifischen Simulationspaketen der Fall ist. Durch die Modellierungssprache Modelica können multidisziplinäre Modelle komfortabel definiert und mithilfe eines geeigneten Übersetzers und einer unterstützenden Simulationsumgebung - wie z.B. Dymola [11] - effizient simuliert werden. Auf Basis der CAD-Daten des Volvo EW180B Mobilbaggers wurde mithilfe des oben genannten Workflows das mechanische Modell in Modelica Version 3.2 erzeugt. In

Abbildung 6 ist ein wichtiger Ausschnitt des generierten Modells zu sehen.

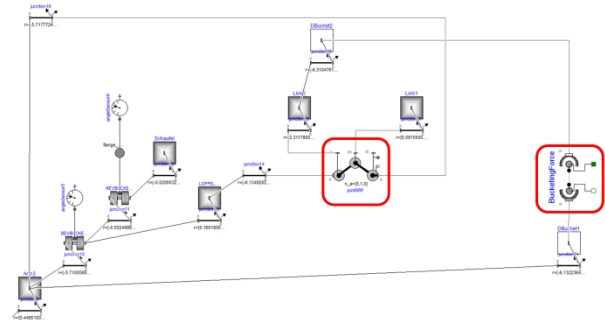


Abbildung 6: Ausschnitt des generierten mechanischen Modells

Der in der Mitte markierte Gelenk-Block entsteht im neuen CAD2SIM Workflow automatisch. Dieser unterstützt eine effektive Simulation der am Löffel entstehenden kinematischen Schleife. Ohne diesen Block wären die nichtlinearen Gleichungen, die in solchen Teilen entstehen, nur numerisch lösbar und dadurch die Simulation weniger leistungsstark. Die rote Markierung in Abbildung 6 rechts ist eine Schnittstelle zum vierten Hydraulikzylinder des Baggers. Hier findet die mechanische Kraftübertragung durch die Bewegung des sog. "Bucket" Zylinderkolbens statt. An dieser Stelle schließt sich auch eine kinematische Schleife an, die aber zusammen mit noch drei weiteren Instanzen in Dymola ohne Probleme verarbeitet werden kann.

Das mechanische Modell wird für zwei verschiedene Zwecke benutzt. Außer seiner herkömmlichen Verwendung - als dynamisches Fahrzeugmodell - wird im Baggerarm auch das inverse mechanische Modell benötigt. Die Referenzposition eines jeden Zylinders wird dadurch abgeleitet, weil die Steuerung immer nur die Drehwinkel zwischen benachbarten Armsegmenten vorgibt. Aufgrund der Merkmale von den hinterlegten Modelica Gleichungen, lassen sich solche Abhängigkeiten bidirektional und robust lösen.

4 Hydraulikmodellierung

Die hydraulischen Komponenten des Baggers wurden mithilfe der Hydraulik Modelica-Bibliothek von Modelon [12] modelliert. Diese Bibliothek ist ein leistungsfähiges und dennoch einfaches Werkzeug für die Modellierung von ölbasierten Hydrauliksystemen. Zu den Anwendungen zählen Werkzeugmaschinen, Automatikktriebe und Antriebssysteme mit offenem/geschlossenem Kreislauf, wie sie beispielsweise bei Baggern oder Gabelstaplern eingesetzt werden. Die Hydraulikbibliothek liefert Modelle zur Modellierung von Pumpen, Motoren, Zylindern, Restriktionsventilen, Hydraulikleitungen, Summenvolumina und Sensoren.

4.1 Modelica Modell eines geregelten Zylinders

Dieses Modell ist stark hierarchisch aufgebaut worden, und weist interdisziplinäre Zusammenhänge zwischen Mechanik, Hydraulik und Regelung auf. Abbildung 7 zeigt die Verschaltung der Einzelkomponenten und das Symbol des Modelica Blocks:

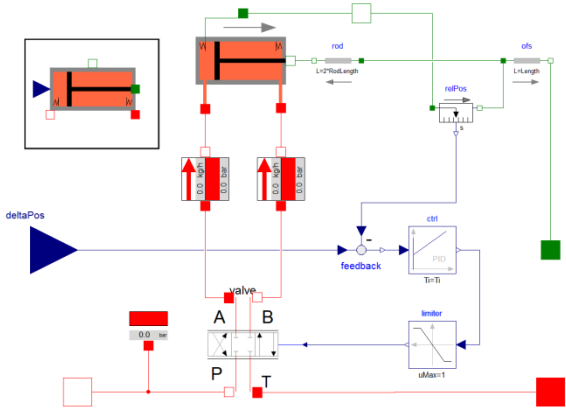


Abbildung 7: Modelica Modell eines positionsgeregelten Hydraulikzylinders

Die Positionsregelung des doppelbetätigten Hydraulikzylinders wird mithilfe eines Proportionalventils realisiert. In der Servobetätigung des Proportionalventils können auch Hysterese-Effekte und Spulendynamik zweiter Ordnung berücksichtigt werden.

Das Zylindermodell besteht aus zwei volumenveränderlichen Kammern, deren Druckunterschiede eine Bewegung des Kolbens verursachen. In den Kammern wird auch die druckabhängige Kompressibilität der Hydraulikflüssigkeit über Gleichungen mit berücksichtigt [13]. Wenn es die Komplexität erfordert, kann die Beschreibung von internen (zwischen beiden Kammern) und externen (zwischen einer Kammer und dem Kolben) Leckagen ausgeschaltet werden.

Das Stribeck Modell [14] beschreibt die mechanischen Verluste, die durch die Reibung zwischen dem Zylindergehäuse und dem Kolben entstehen. Die Trägheit des Kolbens und zwei elastische Anschläge werden im Kolbenmodell berücksichtigt.

Ein Positionsregler wirkt über die gemessene Kolbenposition auf den Steuereingang des Piezoventils.

4.2 Gesamtmodell des Baggers

Die oberste Hierarchiestufe des Baggermodells ist in Abbildung 8 dargestellt. Von der verhaltensbasierten Steuerung werden die Gelenkwinkel des Baggerarmes vorgegeben. Diese werden mithilfe des Inversen-Kinematik-Blocks in Kolbenwege umgerechnet. Eine zentrale geregelte Pumpe versorgt die hydraulischen Zylinder mit ausreichenden Mengen von Hydraulikflüssigkeit. Die Parameter des Öls sind zentral für alle Komponenten definiert.

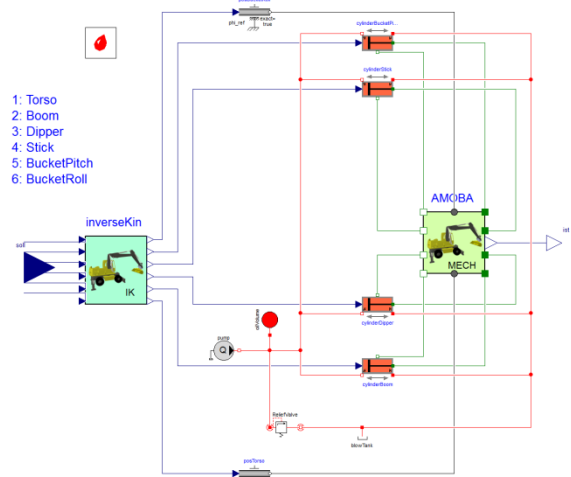


Abbildung 8: Modelica Modell des Baggers mit vier Hydraulikzylindern und einer Pumpe

Um die Initialisierung der Zylinderkammer vorzunehmen, wurden die benötigten Kräfte mit der statischen Anfangsbelastung im Initialzustand des Baggers berechnet. Tabelle 1 zeigt die berechneten Kräfte und die dazugehörigen Drücke.

ZYLINDER	Fstatic [kN]	pStatic [bar]
Boom	330	134
Dipper	199	88
Stick	-58	73
Bucket	-25	49

Tabelle 1: Initialwerte der vier Hydraulikzylinder

Mit dem Vorzeichen der Kraft wird zwischen einem gedrückten (+) und einem gezogenen (-) Zylinder unterschieden. Die Bezeichnungen der einzelnen Zylinder sind in der Abbildung 5 dargestellt.

5 Ergebnisse und Ausblick

Das dynamische Fahrzeugmodell in Dymola, die verhaltensbasierte Steuerung, die Löffel-Partikelsimulation und die Visualisierung sind bereits einzeln auf die gewünschte Funktionalität geprüft worden. Die Kopplung von diesen Softwaremodulen soll mithilfe einer möglichst einheitlichen Schnittstelle erfolgen. Diese Aufgabe wird vom sogenannten Real-Time-Interface (RTI) übernommen. Diese Datenaustausch-Schnittstelle wurde im Fraunhofer IFF entwickelt [15].

Das RTI setzt das Konzept des gemeinsamen virtuellen Speichers („shared memory“) um, wobei ein virtueller Speicherbereich zwischen allen Kommunikationspartnern gespiegelt wird. Mehrere Kommunikationspartner können Signale und Informationen durch RTI transparent austauschen. Es ist über Netzwerkmodule auch möglich Daten zwischen unterschiedlichen Windows und Linux Anwendungen auszutauschen.

Die Sollwerte für die Winkel des Baggerarmes werden von der verhaltensbasierten Steuerung im verteilten RTI Speicher abgelegt. Die externe Kraft, die durch die Löffelboden-Interaktion in der GPU-basierten Erdsimulation berechnet wird, wird gemeinsam mit diesen Winkelwerten vom Modelica Modell in jedem Zyklus ausgelesen. Anhand dieser Information wird das dynamische Modell unter Einfluss der Hydraulik in Dymola periodisch aktualisiert. Dieser Simulator ermittelt dabei die Bewegung des Baggerarmes unter dynamischer Last. Die Ergebnisse davon werden wiederum im RTI Speicher abgelegt, damit die anderen Simulatoren ihre Zustände aktualisieren können. Somit kann der virtuelle Bagger mit der simulierten Umgebung realistischer interagieren.

5.1 Anmerkungen zur Modelica Simulation

Die Drücke in den hydraulischen Zylindern bauen sich sehr schnell auf, da die gedrückten Volumina relativ klein sind und das Öl quasi inkompressibel ist. Die Gleichungen der Hydraulikanalage haben deshalb Zeitkonstanten, die nur einen Bruchteil von Millisekunden betragen. Die Bewegungsvorgänge in einem Bagger dauern hingegen mehrere Sekunden, so dass die Schrittweite - aufgrund von Stabilitätsbetrachtungen des Integrationsverfahrens - zu sehr vielen Rechenschritten und zu einer teils zu langsamen Simulation führen kann. Das ist ein Problem, denn für deterministische Zeitabläufe und für Synchronisationszwecke mit der Steuerung muss man eine feste Schrittlänge festlegen. In Dymola hat sich der Wert von 500 μ sec ergeben bzw. wurde präferiert, womit die Simulation noch in Echtzeit durchgeführt werden kann.

5.2 Weitere Aufgaben

Um die physikalischen Parameter des Modelica Modells anpassen zu können, müssen noch reelle Messungen mit dem echten Bagger vorgenommen werden. Aufgrund kleiner Änderungen in der RTI Schnittstelle müssen sowohl in MCA2 als auch in Dymola die Kommunikationsblöcke noch angepasst bzw. neu implementiert werden. Erst dann wird die Integration und die Validierung des Gesamtsystems stattfinden können.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projekts ViERforES II gefördert.

7 Literatur

- [1] Schmidt D.; Proetzsch M.; Berns K.: Simulation and Control of an Autonomous Bucket Excavator for Landscaping Tasks, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) - 5108--5113, May 3-8, 2010
- [2] Proetzsch M.: Development Process for Complex Behavior-Based Robot Control Systems, Verlag Dr. Hut - [ISBN]: 978-3-86853-626-3, 2010
- [3] Armbrust C.; Proetzsch M.; Berns K.: Behaviour-Based Off-Road Robot Navigation, KI - Künstliche Intelligenz - Springer Berlin / Heidelberg - 155-160, May, 2011
- [4] Braun T.; Wettach J.; Berns K.: A Customizable, Multi-Host Simulation and Visualization Framework for Robot Applications, 13th International Conference on Advanced Robotics (ICAR07) - 1105-1110, August 21-24, 2007
- [5] Wettach J.; Schmidt D.; Berns K.: Simulating Vehicle Kinematics with SimVis3D and Newton, 2nd International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots, November 15-18, 201
- [6] Armbrust C.; Schmidt D.; Berns, K.: Generating Behaviour Networks from Finite-State Machines, Proceedings of the 7th German Conference on Robotics (Robotik 2012) - Accepted for publication
- [7] VINCENT - <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/virtual-engineering/vincent.html>
- [8] Juhasz, T.; Schmucker, U.: Automatic Model Conversion to Modelica for Dymola-based Mechatronic Simulation; Proc. of 6th International Modelica Conference, 3rd-4th March, 2008, Bielefeld, Germany, Vol. 2, pp. 719-726

[9] Modelica – <http://www.modelica.org>

[10] Fritzson, P.: Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica; Wiley-Blackwell, 2011, ISBN 978-1118010686

[11] Dymola – <http://www.dynasim.se>

[12] Modelon - <http://www.modelon.com>

[13] Beater, P.: Entwurf hydraulischer Maschinen: Modellbildung, Stabilitätsanalyse und Simulation hydrostatischer Antriebe und Steuerungen, Springer Verlag, ISBN 978-3540654445

[14] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, Z. Verein. Deut. Ing. Vol. 46 Seite 38ff. 1341-1348 (1902)

[15] Böhme, T.; Kennel, M.; Schumann, M.; Winge, A.: Automatisierte Erstellung domänenübergreifender Modelle und echtzeitfähige Kopplung von Simulation, Visualisierung und realen Steuerungen, in Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, 2009, Bd. 252, S. 155–170.

[16] Newton Physics Engine - <http://newtondynamics.com>

[17] MCA2-KL: <http://rrlib.cs.uni-kl.de/mca2-kl>