

# 5. Fachtagung Baumaschinentechnik 2012

Energie, Mechatronik, Simulation

---

## Plattform- und Softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion

Günter Kunze  
André Katterfeld  
Christian Richter  
Hendrik Otto  
Christian Schubert



Jun.-Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld  
Dipl.-Ing. Christian Richter  
Dipl.-Ing. Hendrik Otto  
Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg



Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze  
Dipl.-Ing. Christian Schubert  
Technische Universität Dresden  
Institut für Verarbeitungsmaschinen und  
Mobile Arbeitsmaschinen  
Professur für Baumaschinen- und Fördertechnik  
01062 Dresden

# Plattform- und Softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion

*Gewinnungsmaschinen und viele Baumaschinen weisen in ihrem Arbeitsprozess eine komplexe Wechselwirkung zwischen Schüttgut bzw. Erdstoff und Maschine auf. Zur Analyse der Bauteilbelastung und der Bauteilinteraktion solcher Maschinen hat sich die Mehrkörper- und Finite Elemente Simulation etabliert. Seit wenigen Jahren wird auch die Diskrete Elemente Methode (DEM) eingesetzt, um das Verhalten des Erdstoffs abzubilden. Aus den DEM-Simulationen lassen sich mit kalibrierten Parametern realistische Lastannahmen gewinnen, wenn die dynamische Reaktion der Maschine berücksichtigt werden kann. Dazu ist die Kopplung der DEM-Simulation mit der Mehrkörpersimulation (MKS) unbedingt notwendig.*

## 1 Einleitung

Im heutigen Entwicklungsprozess moderner Maschinen und Anlagen hat sich die Computersimulation von Bauteilen fest etabliert. Neben den bekannten Finite Elemente Methode (FEM) Simulationen wird immer häufiger die gesamte Maschine Gegenstand der Untersuchungen. Dabei muss nicht nur untersucht werden, wie die einzelnen Bauteile miteinander interagieren, sondern ebenso, wie die Unterbaugruppen der Hydraulik, der Antriebstechnik und der Elektronik zueinander in Verbindung stehen. Zukünftig können und sollen auch äußere Einflüsse, beispielsweise Kräfte die aus dem Arbeitsprozess der Maschine herrühren, in die Berechnungen einbezogen werden.

Aufbauend auf den Erfahrungen vorangegangener Projekte [1],[2] wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt, mit dem auf Basis quelloffener Software und Schnittstellen eine gekoppelte Maschine-Erdstoff-Simulation durchgeführt werden kann.

Die Maschinensimulation verwendet dabei die Methode der Mehrkörpersimulation, welche um Funktionsbausteine der Hydraulik, Antriebstechnik und Elektronik/Regelungstechnik erweitert ist. Die Erstellung des Mehrkörpermodells erfolgt in der werkzeugunabhängigen Modellierungssprache Modelica [3].

Die Erdstoffsimulation wird auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) durchgeführt, um realistische Lastannahmen für die Gesamtsimulation zu erhalten. Das OpenSource DEM – Programm LIGGGHTS [4] wird als Simulationsumgebung verwendet.

Die Kopplung erfolgt über den offenen FMI Standard, der von immer mehr Simulationswerkzeugen zum Modellaustausch genutzt wird.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Simulationsmethoden sowie das Vorgehen zur Erstellung einer gekoppelten Simulation näher erläutert.

## 2 Mehrkörpersimulation von Baumaschinen

Die Mehrkörpersimulation ist eine numerische Lösungsmethode für Bewegungsgleichungen interagierender, massebehafteter Körper.

Die einfachste Art eines Mehrkörpersystems besteht aus starren Körpern. Diese Körper können durch Gelenke verbunden werden, die mathematisch als Zwangsgleichungen auf Positionsebene realisiert werden. Diese Methodik wird in der Regel nur bei langsam laufenden Maschinen eingesetzt. Wenn angenommen werden kann, dass die zu erwartenden Verformungen sehr klein sind und die höchste Erregerfrequenz unterhalb der niedrigsten Eigenfrequenz liegt, können die Fehler aufgrund von elastischen Verformungen vernachlässigt werden [5].

Die räumliche Bewegung eines ungebundenen starren Körpers wird durch die Newton-Euler-Gleichung [6] beschrieben. Die Gleichung gilt für einen Körper, der alle sechs Freiheitsgrade besitzt und dessen Drehachsen den Körperschwerpunkt schneiden.

$$\begin{bmatrix} m\mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_t \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{eF} \\ \mathbf{h}_{eM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{h}_{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{h}_e \quad (2)$$

Um ein System mehrerer Körper zu beschreiben, werden die Bewegungsgleichungen aus Gleichung (2) zu einem unabhängigen System (3) angeordnet.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^{j-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^j & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}^{j+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}^{j-1} \\ \dot{\mathbf{v}}^j \\ \dot{\mathbf{v}}^{j+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{\boldsymbol{\omega}}^{j-1} \\ \mathbf{h}_{\boldsymbol{\omega}}^j \\ \mathbf{h}_{\boldsymbol{\omega}}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_e^{j-1} \\ \mathbf{h}_e^j \\ \mathbf{h}_e^{j+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Zwangsgleichung lassen sich aus einem Satz algebraischer Randbedingungen herleiten, wodurch das Differenzialgleichungssystem (DGL) zweiter Ordnung in ein System differenzial-algebraischer Gleichung (DAE) überführt wird. Viele Lösungsalgorithmen sind jedoch weder in der Lage ein System DAEs zu verarbeiten, noch ein DGL-System zweiter Ordnung zu lösen. Aus diesem Grund ist es üblich, das DAE-System zweiter Ordnung in eine Differenzialgleichung erster Ordnung zu überführen. Dieses lässt sich anschließend mit standardisierten Integratoren lösen. Wie von Featherstone [6] dargestellt, lassen sich die Zwangsbedingungen implizit formulieren und in das Gleichungssystem einfügen. Die Zwangsgleichungen werden in impliziter Form formuliert und mit  $\mathbf{s}$  benannt.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(\mathbf{q}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{S}\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{S}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{S}}\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4)$$

Das System wird um eine Zwangskraft erweitert, die sich nach Gleichung (5) berechnet.  $\boldsymbol{\lambda}$  beschreibt hier einen Vektor von Lagrange-Multiplikatoren.  $\mathbf{S}$  stellt mit allen partiellen Ableitungen von  $\mathbf{s}$  nach den generalisierten Ortskoordinaten  $\mathbf{q}$  die Jacobimatrix der Zwangsgleichungen dar.

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{S}^T \lambda \quad (5)$$

Das Gleichungssystem kann damit auf die Form (6) überführt werden.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{S}^T \\ \mathbf{S} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_t \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_e - \mathbf{h}_\omega \\ -\dot{\mathbf{S}}\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Der Vektor  $\mathbf{h}_e$  beschreibt die Summe aller externen Kräfte, der internen Dämpfungskraft und der elastischen Kräfte.  $\mathbf{h}_\omega$  enthält alle gyroskopischen Kräfte.

Die Kopplungen der Gleichung liegen nicht mehr auf Positionsebene, sondern auf Beschleunigungsebene vor, wodurch sich bei der zweifachen Integration ein sich aufsummierender Fehler ergibt. Dieser Fehler kann jedoch mit Stabilisierungsverfahren unterdrückt werden [7].

Simulationsmodelle mit nur einem realen Freiheitsgrad werden als zwangsläufig bezeichnet. Sollen dynamische Freiheitsgrade berücksichtigt werden, um beispielsweise dynamische Verformungen eines Bauteils einer Kinematik abzubilden, können Federsteifigkeiten zwischen den Massen angenommen werden. Werden Bauteile durch mehrere Feder-Masse Systeme abgebildet, spricht man von einem Lumped-Mass Modell. Es ist aber auch möglich Finite Element Modelle in die Mehrkörpersimulation zu importieren.

Die Mehrkörpersimulation kann mit vielen kommerziellen Werkzeugen wie SimulationX<sup>1</sup>, Dymola<sup>2</sup>, SimPack<sup>3</sup> oder freien Programmen wie OpenModelica<sup>4</sup> durchgeführt werden. Es ist auch möglich, die Bewegungsgleichungen per Hand abzuleiten, sie in einer beliebigen Programmiersprache zu formulieren und zu lösen.

Um einen Austausch der Simulationsmodelle zwischen verschiedenen Simulationsprogrammen zu erreichen, wurde das Functional Mock-up Interface<sup>5</sup> (FMI) entwickelt. Es ermöglicht den Export eines Modells in eine Functional Mock-up Unit (FMU). Die Modelle werden damit in eine standardisierte, softwareunabhängige Form überführt. Verschiedene FMUs können außerhalb der Entwicklungsumgebung gekoppelt werden, um zusammen Systemsimulationen durchzuführen. Eine FMU kann vom Anwender als Black-Box betrachtet werden. Somit können Modelle weitergegeben werden, ohne die Berechnungsalgorithmen offenzulegen. Die Integration kann in der FMU stattfinden, sodass keine weiteren Programme an der Simulationsrechnung beteiligt sind.

---

<sup>1</sup> <http://www.iti.de/simulationx>

<sup>2</sup> <http://www.3ds.com/products/catia/portfolio/dymola>

<sup>3</sup> <http://www.simpack.com>

<sup>4</sup> <https://www.openmodelica.org>

<sup>5</sup> <http://www.modelisar.org>

### 3 DEM-Simulation von Erd- und Baustoffen

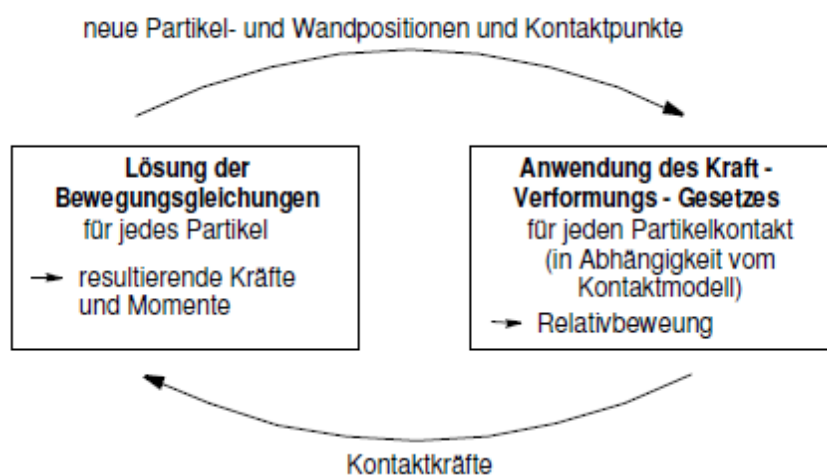
Die Diskrete Elemente Methode ist eine im Jahr 1979 von Cundall und Strack [8] vorgestellte Methode zur Berechnung der Bewegungen einer großen Menge von Partikeln.

Grundlage des Verfahrens ist die Berechnung der wirkenden Kräfte zwischen den Partikeln bzw. zwischen einem Partikel und einer angrenzenden Fläche. Alle Partikel werden während der Initialisierung auf eine Startposition gesetzt und mit einer Anfangsgeschwindigkeit versehen. Danach werden die wirkenden Kräfte (z.B. Gravitationskraft, Kontaktkräfte) für jedes Partikel bestimmt. Diese Kräfte werden addiert und die daraus resultierende Beschleunigung berechnet. Durch zweifache Integration ergibt sich die neue Position (7),(8) und Geschwindigkeit jedes Partikels. Diese Schleife wird solange wiederholt, bis eine vorgegebene Anzahl Iterationen erreicht ist.

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_i \Rightarrow \int \ddot{\mathbf{x}}_i dt = \dot{\mathbf{x}}_i \Rightarrow \int \dot{\mathbf{x}}_i dt = \mathbf{x}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{M}_i \Rightarrow \int \dot{\boldsymbol{\omega}}_i dt = \boldsymbol{\omega}_i \Rightarrow \int \boldsymbol{\omega}_i dt = \boldsymbol{\varphi}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

Die folgende Abbildung zeigt den Berechnungszyklus, der für jedes Partikel durchlaufen wird.

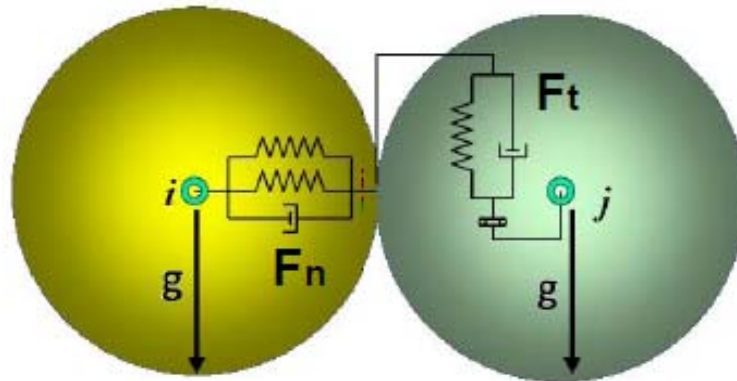


**Bild 1:** DEM Berechnungszyklus

Die Rechenzeit steigt mit größer werdender Partikelanzahl aufgrund der zu detektierenden Kontakte extrem an. Üblich sind Simulationslaufzeiten von wenigen Stunden bis mehreren Wochen für die Simulation großer Partikelsysteme.

Zur Berechnung der Wechselwirkung zwischen zwei Partikeln werden Kontaktkräfte benötigt, die das Verhalten der Partikel beschreiben. In der DEM wird ein Kontakt, d.h. eine geringfügige Überlappung zwischen den Körpern, als Feder-Dämpfer System dargestellt. Erweiterte Kontaktmodelle beziehen weitere physikalische Größen, die z.B. durch Flüssigkeitsbrücken oder elektrostatische Vorgänge hervorgerufen werden können, mit ein.

Die folgende Abbildung zeigt ein einfaches Kontaktmodell, wie es in vielen DEM-Programmen verwendet wird.



**Bild 2:** Typisches DEM Kontaktmodell [4]

Das Erkennen einer Partikel-Partikel Kollision erfolgt durch die Überprüfung, ob die Strecke zwischen den Mittelpunkten kleiner als die Summe der Radien beider Partikel ist. In der DEM werden geringe Überlappungen der Körper zugelassen. Diese bewirken eine Rückstellkraft aufgrund des modellierten Feder – Dämpfer Systems zwischen den Partikeln. Für weitere Informationen über die Grundlagen der DEM-Simulation sei auf [11] verwiesen.

#### 4 Gekoppelte Simulation des maschinellen Erdbauprozesses

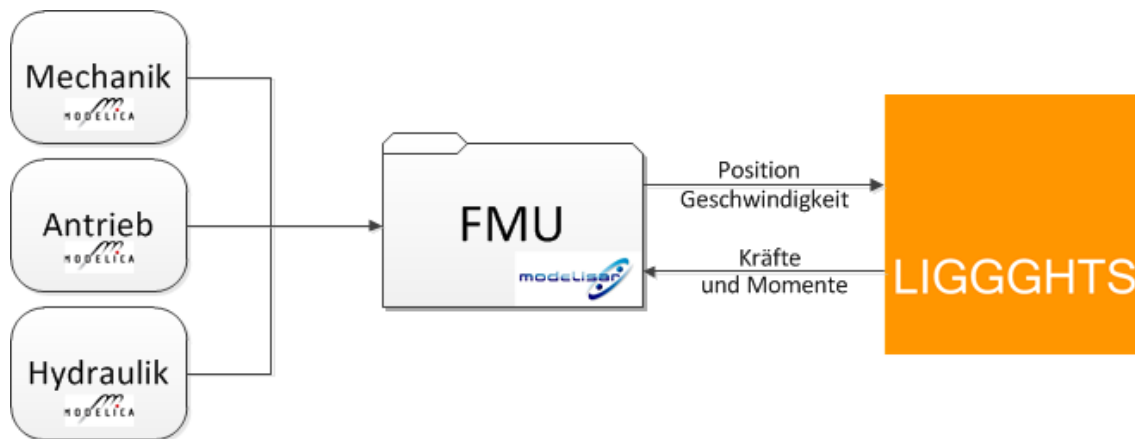
In Anbetracht dessen, dass der maschinelle Erdbauprozess weder allein durch das Modell der Maschine noch allein mit der Methode der Diskrete Elemente beschrieben werden kann, bedarf es eines anderen Ansatzes. Schon in [2] wurde erläutert, welche Vorteile die Kopplung der DEM mit der MKS hat. Dabei wurde vornehmlich die Mechanik der Maschine in Betracht gezogen. Die vom Arbeitswerkzeug aufgebrachte Kraft auf den Erdstoff zum Beispiel wird jedoch unter anderem vom hydraulischen Subsystem der Maschine bestimmt, welches somit bei der Prozesssimulation nicht vernachlässigt werden darf.

Der hier vorgeschlagene Ansatz beinhaltet daher die Kopplung der DEM mit der oben beschriebenen, um die Hydraulik, Antriebs-, Steuerungs- und Regelungstechnik erweiterten Methode der Mehrkörpersysteme.

Im einfachsten Fall, bei dem von einer quasistatischen Belastung durch den Erdstoff auf das Werkzeug ausgegangen werden kann, ist ein einmaliger Export der Lastdaten aus der DEM und ein Import in die nachgeschaltete Simulationemethode ausreichend. Dies findet z.B. bei strukturmechanischen FEM-Simulationen Anwendung [9]. Bei dynamischen Prozessen, in denen von starken Verformungen oder kinematischen Veränderungen des Maschinenverhaltens ausgegangen werden kann, ist ein fortwährender iterativer Austausch der unterschiedlichen Ergebnisse beider Simulationemethoden notwendig. Auf

diese Weise kann die Maschinendynamik bzw. das Bauteilverhalten unter den aus der DEM resultierenden, realitätsnahen Lastannahmen untersucht werden.

Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit der Universität Magdeburg und der Technischen Universität Dresden eine gekoppelte Simulation entwickelt, bei der das OpenSource-DEM-Programm LIGGGHTS [4] über die standardisierte FMI Schnittstelle mit dem Mehrkörpersystem kommuniziert. Bild 3 verdeutlicht das Prinzip schematisch.

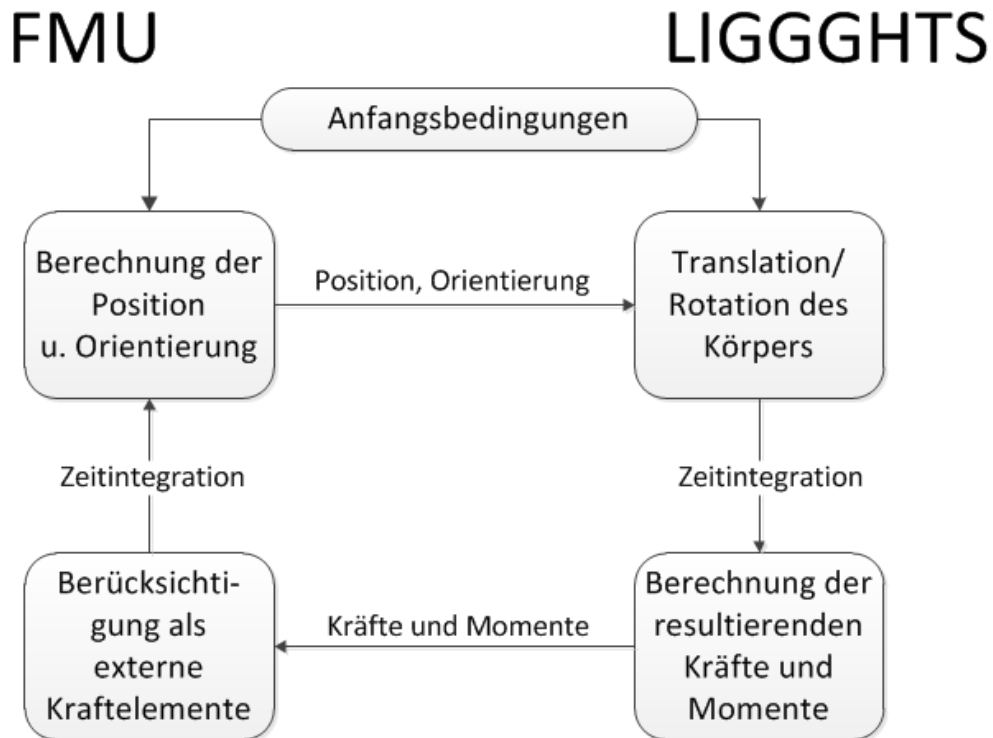


**Bild 3:** Gekoppelte DEM-MKS-Simulation

Möglich war dies aufgrund des quelloffenen Simulationsprogramms LIGGGHTS, welches sich einfach um eine FMI-Schnittstelle erweitern ließ sowie der Möglichkeit, Functional Mock-up Units (FMUs) aus einer Vielzahl an freien und kommerziellen Simulationsprogrammen zu exportieren. Eine gekoppelte Simulation dieser Art kann somit auch auf andere partikeltechnische Anwendungen übertragen werden, bei denen ebenfalls das dynamische Maschinenverhalten berücksichtigt werden muss, z.B. bei Brechern, Elevatoren oder Siebmaschinen.

Umgesetzt wurde dafür eine programm-basierte Kopplung auf Integrierebene [10]. Das bedeutet, dass beide Simulationseinheiten ihren eigenen Integrationsalgorithmus anwenden und in bestimmten Intervallen Zustände miteinander austauschen. Die FMU wird dazu dynamisch als Bibliothek in LIGGGHTS geladen und anschließend von der Partikelsimulation durch Aufruf der FMI-Methoden gesteuert.

Durch die standardisierte FMI Schnittstelle wird eine Kommunikation der Mehrkörpersimulation mit der DEM-Software LIGGGHTS ermöglicht. Die Gleichungssysteme werden damit jedoch nicht mehr in der MKS Software berechnet, sondern in der exportierten FMU. Die Bibliothek enthält aber nicht nur die Gleichungssysteme, sondern auch einen Lösungsalgorithmus. Sie verhält sich damit wie ein eigenes Programm, das für einen Anfangswert und einen Zeitschritt eine Lösung ausgibt. Die Simulation ist somit unabhängig von der verwendeten MKS-Software, die lediglich für die Erzeugung der Gleichungssysteme in der FMU notwendig ist.



**Bild 4:** Prinzip der programm-basierten Kopplung

Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die Kommunikation über XMLRPC – basierte Netzwerkprotokolle durchzuführen [2], hat die Verwendung von dynamisch zur Laufzeit geladenen Bibliotheken einen erheblichen Vorteil in Bezug auf die Kommunikationsgeschwindigkeit zwischen Partikel- und Mehrkörpersystem. Es ist somit auch möglich, verschiedene MKS in eine Partikel-Simulation zu laden und die Interaktion beispielsweise eines Radladers beim Beladen eines Muldenkippers zu untersuchen. Ein weiterer erheblicher Vorteil ist, dass aufgrund der genormten Schnittstelle bestehende Modelle verwendet werden können, ohne dass der Modellaufbau offenbart wird.

Für den Benutzer ist hierbei lediglich die Kenntnis der verfügbaren Ein- und Ausgabegrößen der FMU notwendig. In der LIGGGHTS eigenen Skriptsprache kann auf diese Variablen einmalig oder zyklisch zugegriffen werden.

Da LIGGGHTS auf einer Multiprozessor-Implementierung basiert, kann die Rechenleistung passend zur Problemstellung skaliert werden. Systeme mit mehreren Millionen Partikeln wurden mit LIGGGHTS bereits realisiert. Somit kann auch relativ feines Gut abgebildet werden.

## 5 Verifikation

Zur Verifikation der gekoppelten Simulation wurde das Modell eines Pendels in OpenModelica erstellt. Im ersten Schritt wird ein ebenes Pendel (Bewegung in der  $x,z$ -Ebene, mit  $\mathbf{q} = (x,y,z)^T$ ) benutzt, dessen Länge  $L = 1$  m beträgt. Der Ursprung des Pendels, um den die Bewegung ausgeführt wird, liegt in  $\mathbf{o} = (0,0,0)^T$ . Am Endpunkt des Pendels wird in

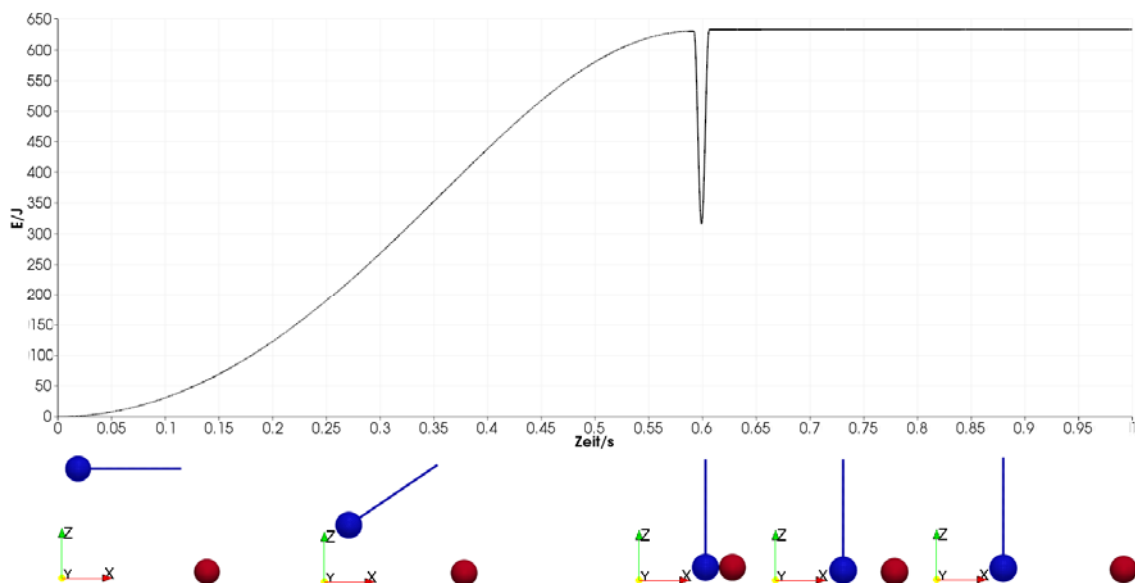


LIGGGHTS eine Kugel mit dem Radius  $r_k = 0,125$  m und der Dichte  $\rho_k = 7850$  kg/m<sup>3</sup> gesetzt. Es wirkt dadurch allein das oben beschriebene Kontaktgesetz zweier Partikel.

Die entstehende Masse von  $m_k = 64,23$  kg wird der FMU übergeben. Durch die Erdbeschleunigung von  $g = -9,81$  m/s wird die Kugel, deren Anfangszustand sich in  $\mathbf{q} = (-L, 0, 0)^T$  befindet, auf einer Kreisbahn um den Ursprung beschleunigt. Bei  $\mathbf{q} = (0, 0, -L)^T$  trifft sie auf eine zweite, ruhende Kugel mit der gleichen Masse, deren Mittelpunkt sich bei  $\mathbf{u} = (2r_k, 0, -L)^T$  befindet. Bei einem ideal elastischen Stoß wird eine komplette Energieübergabe der Pendelkugel auf die zweite Kugel erwartet. Zum Abgleich und zur Verifikation kann hier die kinetische Energie des Systems herangezogen werden, die vor und nach dem Stoß identische sein muss, wenn Dämpfungs- und Reibungsverluste modellseitig ausgeschlossen sind. Das Maximum der kinetischen Energie entspricht der potentiellen Lageenergie der Pendel zu Beginn der Simulation mit:

$$E_{kin} = m_k \cdot g \cdot L = 630,1 \text{ J} \quad (11)$$

In einer zweiten Simulation wurde die LIGGGHTS Kugel am Ende des Pendels durch einen Volumenkörper im STL-Format ersetzt. Mit diesem Format ist eine Simulation beliebig geformter Körper in LIGGGHTS möglich. Der Verlauf der kinetischen Energie sowie ausgewählte Bewegungszustände der zweiten Simulation sind in Bild 5 dargestellt.



**Bild 5:** Kinetische Energie vor und nach dem Stoß

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Simulationszeit  $t$  die kinetische Energie des Systems zunimmt. Bei  $t = t_s = 0,6$  s kommt es zum Stoß. Die kinetische Energie vor dem Stoß entspricht der potentiellen Energie in Gleichung (11). Der Einbruch der kinetischen Energie bei  $t_s = 0,6$  s wird durch die Federelemente des Kontaktmodells verursacht. Nach dem Stoß hat die kinetische Energie im System wieder die gleiche Größe wie vor dem Stoß, wobei sich das Pendel in Ruhe befindet und sich die angestoßene Kugel mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.

## 6 Anwendungsbeispiel: Radlader

Nachdem die erforderlichen Grundeinstellungen ermittelt wurden, konnten anspruchsvollere Testszenarien betrachtet werden. Ein Radlader wurde nach der vorgestellten Methodik modelliert und als FMU aus der MKS-Software exportiert. Für die ersten Versuche wurde ein sehr einfaches DEM-Modell mit zehntausend kugelförmigen Partikeln und verhältnismäßig großem Radius verwendet. Dabei wurde die Kontaktsteifigkeit klein gewählt, um große Zeitschrittweiten zu ermöglichen und die Rechenzeit kurz zu halten. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

**Tabelle 1:** Simulationsparameter

Zeitschritt	0,0001 s
Partikeldämpfung	0,7
Elastizitätsmodul	1e7 N/m <sup>2</sup>
Partikeldurchmesser	40...50 mm
Partikeldichte	2500 kg/m <sup>3</sup>

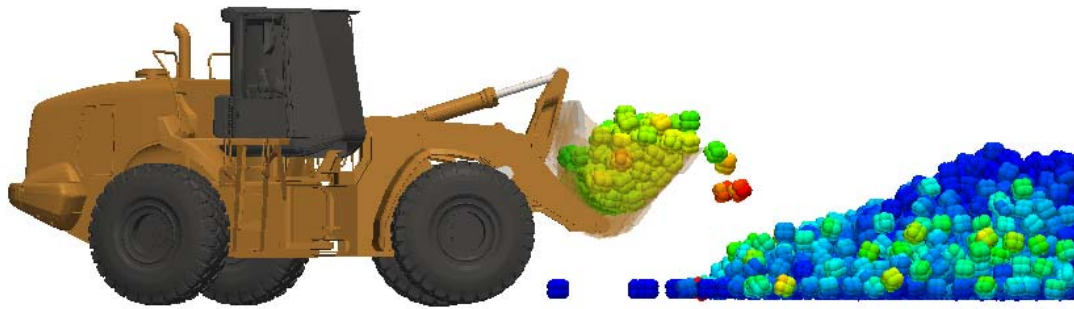
Für diesen großen Zeitschritt wurde der Datenaustausch zwischen Mehrkörper- und Partikelsystem vor jedem Integrationsschritt durchgeführt.

Der Radlader sollte in den Steinhaufen eindringen, die Schaufel füllen und anheben sowie anschließend einlenken und wieder zurückstoßen. Dieses Testszenario wurde mit der vorgestellten gekoppelten Simulation ausgeführt.

Analog zu den Erkenntnissen aus [1] konnte beobachtet werden, dass das Eindringverhalten der Radladerschaufel für reine Kugeln nicht realistisch ist. Daher wurden für eine zweite Simulation jeweils 8 Kugeln zu einem Quader unlösbar verbunden. Diese sogenannten 'Clumps' können sich realitätstreuer verkanten und stellen somit einen größeren Widerstand für die Schaufel dar.



**Bild 6:** Visualisierung der Simulationsergebnisse des Radladers beim Befüllen der Schaufel mit Quadern



**Bild 7:** Schaufelfüllung nach dem Anheben des Hubgerüsts

Das Modell des Radladers beinhaltet dabei Mechanik, Hydraulik sowie Antriebstechnik und wurde mit der hier vorgestellten gekoppelten Simulation gesteuert. Die Simulation produzierte auch in dieser umfangreicheren Anwendung plausible Ergebnisse für das Eindringverhalten des Radladers in den Steinhaufen und die Schaufelfüllung (siehe Bild 6 und 7).

Für ein ungünstiges Fahrverhalten (abruptes Abbremsen bei eingeschlagener Lenkung und Rückwärtsfahrt) konnte ein erhebliches Aufschaukeln des Radladers beobachtet werden.

Als weitere Ergebnisse der Simulationen können unter anderem die Maschinenzustände (Druck in den Zylindern, Geschwindigkeiten, etc.) sowie die Interaktionskräfte, die auf das Anbauwerkzeug wirken, ausgegeben werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Paper stellt einen multiphysikalischen Ansatz zur Simulation maschinell gebundener Erdbauprozesse vor. Ziel der Arbeiten ist es, eine realistische Berechnung der Prozesslasten sowie der daraus resultierenden Maschinenzustände zu ermöglichen, um den virtuellen Entwicklungsprozess zukünftig effektiver und sicherer zu gestalten.

Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur ganzheitlichen Maschinensimulation, basierend auf der Modellierungssprache Modelica sowie die Potenziale der Diskrete Elemente Methode vorgestellt. Des Weiteren wurde auf die Grenzen beider Simulationsmethoden eingegangen, wenn sie ungekoppelt für die Simulation realistischer Arbeitsprozesse von Bau- und Gewinnungsmaschinen eingesetzt werden.

Eine Kopplung beider Simulationsmethoden wurde durch den Export des Mehrkörpersystems in eine FMU und dessen Einbindung in LIGGGHTS umgesetzt. Die Kopplung wurde anhand einfacher Testbeispiele verifiziert. Damit ist es möglich, ein realitätsnahes Erdstoff- bzw. Baustoffverhalten, basierend auf der DEM, und ein realitätsnahes Maschinenverhalten, basierend auf der MKS, unter Berücksichtigung ihrer bidirektionalen Wechselwirkungen zu simulieren. Nach der Implementierung und Verifikation der Kopplung kann

ten plausible, qualitative Ergebnisse für die Simulation realer Arbeitsprozesse von Baumaschinen erzielt werden.

Der einfache Modellaustausch über Functional Mock-up Units ermöglicht es, innerhalb kürzester Zeit eine gekoppelte Simulation zu erstellen und durchzuführen. Die Rechenzeit einer solchen gekoppelten Simulation kann durch die Nutzung paralleler Rechencluster oder leistungsstarker Workstations auf wenige Stunden verringert werden, sodass auch umfangreiche Parameterstudien – beispielsweise mit wechselnden Gutparametern oder Werkzeuggeometrien – schnell lösbar sind.

Zukünftige Fragestellungen sind die Optimierung hinsichtlich der Kommunikation (Anzahl der Parameter, Kommunikationsschrittweite) zwischen den Systemen, die Implementierung leistungsstarker, genauer Integrationsalgorithmen (Geschwindigkeit, Stabilität, Multi-core-Unterstützung) und die Validierung der Simulationsergebnisse an komplexeren Problemstellungen.

#### Quellenverzeichnis:

- [1] Katterfeld, A., Mothes, M., Deimel, T.: DEM-Simulation von Grabprozessen, In: Tagungsband, 4. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2009
- [2] Kunze, G., Katterfeld, A., Grüning T.: Simulation maschineller Erdbauprozesse In: Tagungsband, 15. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, München 2010
- [3] Schubert C., Frenkel J., Kunze, G.: Einsatz der Modellierungssprache MODELICA für die interaktive Simulation von Baumaschinen in virtuellen Umgebungen, WISSENSPORTAL [www.baumaschine.de](http://www.baumaschine.de), 01/2010
- [4] Kloss, C., Goniva, C.: LIGGGHTS – A New Open Source Discrete Element Simulation Software, In Proceedings of The Fifth International Conference on Discrete Element Methods, London, UK, 2010
- [5] Dresig, H., Holzweißig, F.: Maschinendynamik, 8. Auflage, 2007
- [6] Featherstone, R.: Rigid Body Dynamics Algorithms, Springer, New York 2008
- [7] Flores, P., Machado M., Seabra E., Tavares da Silva M.: A Parametric Study on the Baumgarte Stabilization Method for Forward Dynamics of Constrained Multi-body Systems, In: Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 6/2011
- [8] Cundall, P.A.; Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29 (1979) 1, 47-65
- [9] Katterfeld, A., Dratt, M., Haut, H., Donohue, T.: Gekoppelte Diskrete Elemente Simulation zur Berücksichtigung von Maschinendynamik, Bauteilverformung und Umgebungseinflüssen, 14. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, Magdeburg, 2009
- [10] Dronka, S.: Die Simulation gekoppelter Mehrkörpersysteme und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation, Dissertation, TU Dresden, 2004
- [11] Katterfeld, A., Gröger, T.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Grundlagen und Kalibrierung, Schüttgut, Vol. 12 (2006) Nr. 7