

# Schlussbericht

des im Rahmen der Fördermaßnahme KMU-innovativ: IKT  
geförderten Verbundprojekts

## SimBa

Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung  
und -beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen  
(Projektlaufzeit: 01.09.2013 – 31.08.2015)

des

**Institut für Baumaschinen, Antriebs- und  
Fördertechnik GmbH (IBAF)**

Förderkennzeichen: 01 IS 13 006 B  
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. J. Scholten  
Telefon: 0234-36979-16  
E-Mail: J.Scholten@ibaf-bochum.de

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des  
Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem  
Förderkennzeichen 01 IS 13 006 B gefördert. Die Verantwortung für den  
Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers oder Dritter oder aus  
anderen sachlichen Gesichtspunkten aus dem Bericht vertraulich zu behandelnde  
Einzelheiten sind (z.B. zur Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen) mit  
ausdrücklichen Hinweisen gekennzeichnet.

Änderungshistorie:	Kommentar: Dieser Schlussbericht wird vom Zuwendungsgeber und der Technischen Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover veröffentlicht.
<b>Version:</b> 1 <b>Datum:</b> 11.02.2016	

## **Inhalt:**

<b>1. Kurze Darstellung</b>	<b>3</b>
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	11
1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	13
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
<b>2. Eingehende Darstellung</b>	<b>14</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	14
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	86
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	88
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	93
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	95
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses aller Projektpartner	96
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>97</b>

# 1. Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Im heutigen Entwicklungsprozess moderner Maschinen und Anlagen der Baumaschinen- und Fördertechnik hat sich die Computersimulation von Bauteilen fest etabliert. Mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) können Bauteilbeanspruchungen bereits simuliert werden, bevor überhaupt ein Prototyp hergestellt wird. Dazu sind jedoch detaillierte Lastannahmen als Eingangsgrößen erforderlich. Die dynamischen Lasten bei Abbau- und Förderprozessen hängen jedoch in großem Maße vom Erdstoff bzw. Fördergut ab [9], [7]. Diese Lasten können mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM) zuverlässig durch moderne Rechentechnik simuliert werden [8]. Bei vielen Maschinen und Anlagen ist dabei zusätzlich die Berücksichtigung der häufig komplexen Kinematik notwendig, um das reale Bewegungsverhalten der relevanten Bauteile und ggf. auftretende dynamische Effekte zu erfassen. Dazu wird bereits heute auf Basis aktueller Forschungsarbeiten eine Mehrkörpersimulation (MKS) des kinematischen Systems mit der Diskrete Elemente Methode gekoppelt [6].

Vor Durchführung des Projektes war es noch nicht möglich, eine kombinierte Analyse des Schüttgutverhaltens aus der DEM (ggf. inkl. der Bauteilkinematik durch gekoppelte DEM-MKS-Analyse) und der Bauteilbeanspruchung aus der FEM durchzuführen. In der industriellen Praxis werden aber solche komplexen Analysen durch die Kopplung unterschiedlicher Simulationsmethoden zunehmend interessant, weil durch sie eine ganzheitliche Betrachtung des Problems möglich ist.

Mit der entwickelten DEM-MKS-FEM-Schnittstelle ist es beispielsweise erstmals möglich, die Bauteilbelastungen und -beanspruchungen auf Struktur-Ebene für Baumaschinen (bspw. Schaufeln, Fräsen) und Förderanlagen (bspw. Übergabestellen an Bandanlagen) mit realistischen, dynamischen Lastannahmen zu simulieren.

Es werden drei allgemeine Anwendungsszenarien für eine solche gekoppelte DEM-MKS-FEM-Analyse unterschieden:

1. Die Belastungs- und Beanspruchungsanalyse von Bauteilen, die einer dynamischen Beanspruchung durch Schüttgut ausgesetzt sind. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Interaktion zwischen Schüttgut und Bauteil die Lage und Geschwindigkeit des Bauteils nicht verändert. Außerdem wird angenommen, dass die Verformungen des beanspruchten Bauteils klein sind und das Schüttgutverhalten nicht beeinflussen. D.h., eine bi-direktionale Kopplung zwischen FEM und DEM ist

nicht zwingend notwendig. Entsprechend liefert die Simulation des Schüttgutverhaltens die für die FEM-gestützte Analyse der Beanspruchungssituation relevanten Lastannahmen, die über eine geeignete Schnittstelle auf das FEM-Modell übertragen werden.

**Beispiele:** Belastungs- und beanspruchungsgerechte Konstruktion von: Prallwänden in Übergabestellen, Zwischenlagern in Schneckenförderern, Schlagleisten in Prallbrechern

**Anwendung:** sehr häufig, Förder- & Verfahrenstechnik, allgemeiner Maschinenbau

2. Die Belastungs- und Beanspruchungsanalyse von Bauteilen, deren Lage, Geschwindigkeit und Beanspruchung stark von der Interaktion mit dem Schüttgut abhängt. Dabei muss i.d.R. nicht nur die Kinematik eines Bauteils, sondern auch der Antrieb und ggf. die Hydraulik einer kompletten Maschine modelliert werden, um die Lage und Geschwindigkeit des mit dem Schüttgut interagierenden Bauteils korrekt abzubilden. Die Verformung des interagierenden Bauteils ist im Vergleich zur durch die Kinematik der Maschine realisierten Verschiebung des Bauteils vernachlässigbar, so dass keine verformungsbedingten Rückwirkungen auf den Prozess zu berücksichtigen sind. Die FEM-basierte Analyse des Bauteils greift wiederum über die entwickelte Schnittstelle auf die aus dem Schüttgutverhalten resultierenden Lasten zurück und liefert eine detaillierte und wenig abstrahierte Analyse der Bauteilbeanspruchungen, um den Einfluss von Konstruktionsdetails (Schweißnähte etc.) untersuchen zu können.

**Beispiele:** Optimierung der Schaufelgeometrie von Radladern, Optimierung der Konstruktion von Schöpfbechern in Becherwerken

**Anwendung:** häufig, v.a. Förder- und Baumaschinentechnik

3. Die Simulation des Verhaltens von Geräten, bei denen die Verformung eines Haupt-Bauteils nicht vernachlässigt werden kann und ggf. aufgrund des Werkstoffverhaltens so groß ist, dass sie i.d.R. mit linearen Modellgesetzen in der FEM-Simulation nicht mehr abgebildet werden kann. Bei diesen komplexen Fragestellungen beeinflussen das Schüttgut und das Steifigkeitsverhalten weiterer Bauteile (Anschlusssteifigkeiten) das Verformungsverhalten des betrachteten Haupt-Bauteils. Die Verformung des flexiblen Haupt-Bauteils wiederum beeinflusst das Verhalten des Gesamtsystems und kann Rückwirkungen auf die Spannungszustände und das Fließverhalten des Schüttgutes haben. In diesem Fall dient die Schnittstelle zwischen Prozessmodell

(DEM-MKS) und Strukturmodell (FEM) nicht allein der Übertragung möglichst realitätsnaher Lastannahmen. Vielmehr schafft diese Schnittstelle eine Möglichkeit, die Rückkopplung der Bauteilverformungen auf den Prozess zu berücksichtigen.

**Beispiele:** Simulation des Gurtschleiflaufs (elastischer, mit Schüttgut beladener Fördergurt (Haupt-Bauteil), der auf gelenkig miteinander verbundenen Tragrollen (Girlanden = Mehrkörpersystem) läuft)

**Anwendung:** häufig, v.a. Förder- und Verfahrenstechnik

Die Entwicklungen der unterschiedlichen Simulationsmethoden, die miteinander gekoppelt werden sollen, zeigen mehrere Gemeinsamkeiten. Neben der zunehmenden Anwendung infolge gesteigerter Rechnerleistung ist es vor allem die Validierung der Simulationsergebnisse mit realen experimentellen Untersuchungen, die das Vertrauen in die numerischen Ergebnisse signifikant erhöht. Ohne den Nachweis des Realitätsgrades von FEM-, MKS- oder DEM-Simulationen würde heute keine der Simulationsmethoden im selben Umfang in der Industrie eingesetzt werden. Der Vergleich zwischen realem Experiment und numerischem Simulationsergebnis erlaubt außerdem einen Lernprozess, der wichtig ist, um die Grenzen der Simulationsmethodik zu erkennen und die Simulationsergebnisse richtig zu interpretieren.

Zur Interpretation von gekoppelten Simulationen ist wiederum die Darstellung bzw. das Postprocessing aller Simulationsergebnisse mit Hilfe eines einzigen Softwaretools eine wesentliche Bedingung. Während für die eigentliche Kopplung der Simulationsmethoden die Entwicklung eines Kommunikationsprotokolls für die unterschiedlichen Softwaresysteme notwendig ist, muss eine Postprocessing-Software alle Ergebnisformate der unterschiedlichen Solver im dreidimensionalen sowie zeitabhängigen Kontext einlesen und visualisieren können.

#### **Auflistung der erkannten Defizite, aus denen sich die einzelnen Projektzielstellungen ableiten**

- Es existierte keine Schnittstelle zwischen den drei im Maschinenbau, speziell in der Baumaschinen- und Fördertechnikindustrie, am häufigsten eingesetzten Simulationsmethoden FEM, MKS und DEM
- Im Kontext der DEM-Simulationen existierten keine Validierungsversuche im Industriemaßstab zur Charakterisierung der zu simulierenden Schüttgüter in Interaktion mit einem bekannten Bauteil unter dynamischen Bedingungen

- Es war keine Visualisierung der Simulationsergebnisse verfügbar, in der alle Elemente (Maschine, Falschfarbendarstellung eines Maschinenelementes und Schüttgut) der gekoppelten Simulation dargestellt werden können, da jedes Simulationsprogramm über eine eigene grafische Benutzeroberfläche verfügt, aber keine Ergebnisse aus anderen Simulationssystemen importiert werden können (bspw. Import von Partikelpositionen in ANSYS® Classic oder Export von Falschfarbendarstellungen als 3D-Modell aus ANSYS® Classic).

### **Wissenschaftliche, technologische und technische Gegebenheiten und Gelegenheiten**

Im Rahmen der IAMT-Gruppe ist die IBAF GmbH hauptsächlich auf den Gebieten der Baumaschinen-, Antriebs- und Fördertechnik sowie der Anlagentechnik tätig. Als Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik verfügt die IBAF GmbH über eine umfassende Kompetenz in der Entwicklung, Konstruktion und Berechnung von Baugruppen und Systemen für die Baumaschinenindustrie, in vielen Bereichen der Antriebs- sowie der breit gefächerten Branche der Fördertechnik, einschließlich ihrer zahlreichen Anwendungen in der Anlagentechnik.

Die IBAF GmbH arbeitet in Ergänzung zu ihrem Kerngeschäftsbereich auch auf benachbarten Gebieten und Industriezweigen, wie z.B. der Land- und Forstmaschinenindustrie, dem Bergbau und der Bergbautechnik, der Hydraulik und ihren Anwendungen, der Entwicklung und Konstruktion von Sonderfahrzeugen, partiell der Eisenbahntechnik, des Stahl- und Apparatebaues und in Erweiterung ihrer fördertechnischen Kompetenzen auch auf den Gebieten der Lagertechnik und Logistik, der Hub- und Aufzugstechnik sowie der Förder- und Handhabetechnik für Werkzeugmaschinen. Außerdem gibt es Aktivitäten in der Entwicklung und Konstruktion von Baustoff- und Recyclingmaschinen. Damit sind die Aktivitäten der IBAF GmbH als Dienstleistungsunternehmen sehr breit gefächert.

Für viele der genannten Industriezweige wird zunehmend die Betrachtung von partikeltechnischen Problemen interessant, die meistens integraler Kern des eigentlichen Arbeitsprozesses sind (z.B. die Gewinnung von Rohstoffen durch Bergbaumaschinen oder das Verhalten von Körnern im Mähdrescher usw.).

Ziel ist es daher, in den nächsten zwei Jahren Marktführer auf dem Gebiet der DEM-Simulationen als Dienstleistung für Industrieunternehmen zu werden.

## **FuE-Aktivitäten der letzten Jahre, wesentliche FuE-Ergebnisse und deren wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung**

Die IBAF GmbH hat sich in den zurückliegenden 14 Jahren einen Namen als Entwicklungsdienstleister im Bereich der Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik sowie der Anlagentechnik erarbeitet. Die Marke IBAF steht für in der Praxis direkt verwertbare Entwicklungsergebnisse auf Basis neuester ingenieurtechnischer und ingenieurwissenschaftlicher Methoden. IBAF arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung und Optimierung der Entwicklungsmethoden und -prozesse, wobei dies im Regelfall im Rahmen der bearbeiteten Industrieprojekte erfolgt.

Das Unternehmen blickt auf über 1200 erfolgreich abgeschlossene Industrieprojekte zurück. Ein eindeutiger Schwerpunkt liegt dabei auf Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Festigkeitsbewertung sowie der Analyse und Optimierung des dynamischen Verhaltens von Maschinen und Anlagen sowie deren Komponenten. Finite-Elemente-Analysen und Mehrkörpersimulationen gehören damit zum ständig genutzten Handwerkszeug, wobei zunehmend anwendungsspezifische Routinen und Makros zur Steigerung der Effizienz geschaffen werden.

Die im Rahmen dieses Projektes als Basis dienende Entwicklungskompetenz gründet sich auf umfangreiche Projekterfahrung in den Bereichen:

- **Maschinen- und Anlagenstrukturen:**  
Stabstatik, FEM, Verformungsanalysen, statische und dynamische Festigkeitsnachweise, Schädigungsrechnung, Bewertung geschweißter Strukturen, Auslegung schwingfähiger Systeme
- **Fahrwerke:**  
Konzeptentwicklung, Fahrsimulation, Ketten- und Gummifahrwerke, Betriebsfestigkeitsrechnung und -prüfung, Verschleißreduzierung
- **Arbeitsausrüstungen:**  
Kinematiksimulation, Schwingungsreduzierung, Festigkeitsoptimierung, Leichtbau
- **Schneid- und Wechselhaltersysteme:**  
Konzeptentwicklung, geometrische Gestaltung, Verschleißreduzierung, Festigkeit und Lebensdauer
- **Antriebsstrang:**  
Hydraulik, dynamische Simulation, Betriebsfestigkeitsnachweise, Verformungsanalysen, Geräusch- und Schwingungsreduzierung

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Es war aus wissenschaftlich-technischer Sicht notwendig, die drei bekannten Simulationenmethoden der Diskrete Elemente Methode (DEM), der Finite Elemente Methode (FEM) und der Maschinendynamik (MKS) zu koppeln, um neue innovative Erkenntnisse im Bereich der Baumaschinen und Förderanlagen zu erlangen.

### **Vorarbeiten, die zu diesem Projekt geführt haben**

Seitens der IBAF wurden keine Vorarbeiten, die zu diesem Projekt geführt haben, durchgeführt.

### **Besondere Aspekte, die die Durchführung des Vorhabens ermöglicht haben**

Auf Seiten der IBAF GmbH konnten die jahrelange Erfahrung und das entwickelte Know-how im Bereich der FEM-gestützten Analysen und Simulationen maßgebend zur Durchführung des Vorhabens beitragen. Das betrifft insbesondere den Einsatz von nichtlinearen Analysen für die Berechnung großer Verformungen, die dazu notwendige Parameterauswahl und natürlich den allgemeinen Umgang mit der FEM-Software ANSYS® Classic.

### **Ergänzende Kompetenzen, die in das Projekt eingebracht wurden**

Die Realisierung einer Kopplung mit der FEM-Software ANSYS® Classic erforderte Expertenwissen im Umgang mit der programminternen Makro-Programmiersprache APDL (Ansys Parametric Design Language). Diese Kompetenz konnte sich die IBAF GmbH durch jahrelange Erfahrungen, insbesondere im Bereich der FEM-Analyse hochkomplexer Berechnungsmodelle, erarbeiten und in das Projekt mit einbringen.






### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Bearbeitung des Vorhabens wurde eine Laufzeit von 24 Monaten veranschlagt. Die einzelnen Arbeitspakete des Gesamtprojekts wurden in zeitlicher Hinsicht, wie in folgender Tabelle dargestellt, gegliedert:

**Tabelle 1:** geplanter Projektverlauf

	2013				2014												2015							
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1. Erstellung Anforderungskatalog</b>																								
1.1.1 IST-Analyse DEM Software	0.5																							
1.2.1 IST-Analyse FEM Software	0.5																							
1.3 Definition von Soll- und Wunschanforderungen an die Schnittstelle	0.5																							
<b>2. Schnittstellenentwicklung</b>																								
2.1.1 Entwicklung einer Exportschnittstelle von Kräften und Momenten in LIGGGHTS																								
2.1.2 Entwicklung einer Importschnittstelle für FE-Netze																								
2.1.3 Zusammenführung der Schnittstellen																								
2.2.1 Entwicklung eines FEM-Software-Makros zum Export von FE-Netzen																								
2.2.2 Entwicklung eines FEM-Software Makros zum Import von Lastdaten aus Dateien aus 2.1.1																								
<b>MS1: Kopplungsstrategie ist festgelegt, Import- und Exportfunktionen implementiert</b>																								
2.3 Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen																								
<b>MS2: Fertigstellung Software-Bibliothek</b>																								
<b>3. Validierung</b>																								
3.1.1 Fertigung eines Validierungsversuchsstands																								
3.1.2 Durchführung von Kalibrierungsuntersuchungen																								
3.2.1 Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstands																								
3.2.2 Durchführung von Simulationen mit Parametervariationen																								
3.1.3 Durchführung praktischer Experimente an einem Validierungsversuchsstand																								
3.2.3 DEM-MKS-FEM Simulation des Validierungsversuchsstandes																								
3.3 Vergleich der Messwerte mit den Simulationen, ggf. Parametervariation der Simulation																								
<b>MS3: Softwareprototyp für eine validierte Kopplung ist fertig gestellt</b>																								
<b>4. Programmierung einer gemeinsamen Visualisierung der Simulationsergebnisse</b>																								
<b>5. Publikationen, Mitarbeiterschulungen, Tagungen</b>																								

	gemeinsames Arbeitspaket
	Arbeitspaket für ILM
	Arbeitspaket für IBAF

Seitens der IBAF GmbH wurden alle geplanten Arbeiten, wie in Tabelle 1 dargestellt, durchgeführt. Es wurden dabei alle Meilensteine termingerecht erreicht. Für die durchgeführten Arbeiten in AP2 Punkt 2.3 *Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen* mussten entgegen der ursprünglichen Planung insgesamt zwei Monate mehr aufgewendet werden. Im Gegensatz dazu konnten in AP3 Punkt 3.2.1 *Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes* insgesamt zwei Monate eingespart werden. Damit entsprechen die insgesamt geleisteten Arbeiten in Summe wieder der im Antrag dargestellten Arbeitsplanung.

Nach einer Anforderungsanalyse zusammen mit den involvierten Geschäftsbereichen und einer anschließenden Bewertung hinsichtlich der Realisierungsmöglichkeiten mit den zur Verfügung stehenden Softwarepaketen folgte die Realisierungsphase, in der die Software-schnittstelle entwickelt und die Schnittstellenstrategien und -algorithmen verifiziert wurden. Diese Phase umfasste ein Arbeitspaket mit einer zeitlichen Dauer von ca. einem Jahr. An die Realisierungsphase schloss sich die Validierungs- und Testphase an.

Die Entwicklung und Konstruktion des Validierungsversuchsstands wurde durch die IBAF GmbH in enger Absprache mit dem ILM durchgeführt. Die Fertigung des Validierungsversuchsstands erfolgte durch die Fertigungswerkstatt des ILM. Aufgrund der großen Erfahrung der Projektpartner in der Planung und Durchführung von Versuchsreihen konnte die dritte Projektphase zur Validierung der Simulationsergebnisse in einem mit der Realisierungsphase vergleichbaren Zeitabschnitt durchgeführt werden. In den Versuchen konnte die Verformung eines Bauteils unter dynamischer Interaktion mit Schüttgut gemessen werden. Diese Messwerte konnten anschließend mit den Ergebnissen der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation verglichen werden und zeigten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Somit konnte die Güte der Simulation qualitativ und quantitativ bestimmt werden. Nach der erfolgreichen Testphase wurde die Schnittstelle anhand einer Beispielanwendung des assoziierten Partners TAKRAF GmbH auf ein Gesamtsystem angewendet. Die gewonnenen Ergebnisse wurden bzw. werden auf Fachtagungen (Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, TU Clausthal 2016, Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2016) und Messen (BauMa 2016) veröffentlicht und dienen zusätzlich als Nachweis der praktischen Nutzbarkeit gegenüber Auftraggebern aus der Industrie.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### 1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

#### Stand der Wissenschaft und Technik - Themenfeld Diskrete Elemente Methode (DEM)

Die Diskrete Elemente Methode wurde erstmals 1979 von *Cundall* und *Strack* [2] zur Lösung von geomechanischen Problemstellungen beschrieben. In der Verfahrenstechnik hielt die DEM Anfang der 1990er Jahre Einzug, bis sie schließlich 1998 von *Gröger* [3] erstmals auf Problemstellungen der Fördertechnik und Logistik angewendet wurde.

Es existieren diverse kommerzielle und Open Source Programme zur Lösung von partikelmechanischen Fragestellungen (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2:** DEM Programme

Software	Organisation	Lizenz
BALL & TRUBAL	P. Cundall	-
Bulk Flow Analyst	Applied DEM	proprietär
Chute Maven	Hustrulid Technologies	proprietär
DEMPack	CIMNE	proprietär
EDEM	DEM Solutions	proprietär
ELFEN	Rockfield Software	proprietär
ESyS-Particle	-	Open Source
GROMOS	ETH Zürich	proprietär
LIGGGHTS®/CFDDDEM®	DCS Computing / JKU Linz	Open Source
LMGC90	CNRS	Open Source
MIMES	Sandia/MIT	-
Newton	AC-Tek	proprietär
PASSAGE/DEM	Techanalysis	proprietär
Pasimodo	Universität Stuttgart	kooperativ
PFC2D/PFC3D	ITASCA	proprietär
ROCKY	Conveyor Dynamics	proprietär
SimPARTIX	Fraunhofer IWM	nur Intern
STAR-CCM+	CD-adapco	proprietär
Yade	-	Open Source

Es ist bekannt, dass mit der Software EDEM von DEM-Solutions eine Kopplung zu einem MKS-Programm oder zu einem FEM-Programm (1-Wege-Kopplung) möglich ist. Eine komplexe Analyse von DEM-MKS-FEM-Problemstellungen ist jedoch nicht möglich. Eine Anpassung an die Anforderungen der IBAF GmbH war nach Kenntnisstand der Projektpartner nicht möglich. Die Software ELFEN von Rockfield Software ist ein FEM-Programm, das ebenfalls Diskrete Elemente Simulationen unterstützt. Eine Berechnung von Mehrkörper-Problemen ist damit jedoch nicht möglich.

## **Stand der Wissenschaft und Technik - Themenfeld Finite Elemente Methode (FEM)**

Die Methode der Finiten Elemente wurde erstmals 1956 von *Turner, Clough, Martin* und *Topp* (nach [10], S. 4) als ein die gesamte Kontinuumsmechanik umfassendes Verfahren vorgestellt. In den vergangenen 60 Jahren nahm die Entwicklung der Algorithmen und der Hardware einen rasanten Lauf, sodass Bauteil- und Baugruppenberechnungen heute direkt am Arbeitsplatz-PC des Ingenieurs durchgeführt werden können. Simulationen von komplexen Maschinen und Anlagen werden jedoch nach wie vor auf Parallelrechnern und Supercomputern durchgeführt, da die Anzahl der zu lösenden Gleichungssysteme die Kapazitäten einfacher Workstations übersteigt [10].

## **Stand der Wissenschaft und Technik - Themenfeld Mehrkörpersimulation (MKS)**

Die Kopplung zwischen der FEM und der Mehrkörpersimulation ist bereits durch *Wallrapp* [12] in den 1990er Jahren vorgestellt worden. Weiterentwicklungen, bspw. die DLR-Flexible-Bodies Bibliothek, ermöglichen die Kopplung mit Standard-MKS-Programmen, beispielsweise Dymola, SimulationX oder OpenModelica [4]. Diese Kopplung wurde entwickelt, um den Einfluss der Bauteil-Verformungen auf die Kinematik von bewegten Maschinensystemen zu analysieren. D.h., dass die mit Hilfe der DLR-Flexible-Bodies Bibliothek berücksichtigten elastischen Körper das MKS-Modell genauer machen, indem ihre Nachgiebigkeit berücksichtigt wird. Dies spielt vor allem bei der Schwingungsanalyse eine große Rolle. Vorausgesetzt wird i.d.R. ein lineares Materialverhalten und eine kleine Bauteilverformung. Um die Rechenzeit zu verringern wird das FEM-Modell in der DLR-Flexible-Bodies Bibliothek stark vereinfacht, sodass eine detaillierte Konstruktionsoptimierung nur schwierig möglich ist. Eine Rückwirkung der Prozesslasten direkt auf die verformte FEM-Struktur und umgekehrt, ist mit der DLR-Flexible-Bodies Bibliothek jedoch noch nicht realisiert.

Die genannten Eigenschaften der DLR-Flexible-Bodies Bibliothek passen zu keiner der drei in Abschnitt 1 beschriebenen Anwendungsszenarien, die den Schwerpunkt der späteren industriellen Anwendung definieren. Daher wurde eine direkte Kopplung zwischen der bereits entwickelten DEM-MK-Simulation und dem in der Industrie standardmäßig verwendeten FEM-Programm ANSYS® Classic angestrebt. Dies hatte außerdem den Vorteil, dass die langjährige Erfahrung der IBAF GmbH im Umgang mit diesen Programmen direkt für die Entwicklung einer Software-Schnittstelle genutzt werden konnte.

#### **1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Für den Umgang mit der FEM-Software ANSYS® Classic wurde auf die Buchreihe von Müller/Groth [10], [11] und auf das Benutzerhandbuch [1] zurückgegriffen. Das gilt insbesondere für die Programmierung der notwendigen Makros in der programminternen Sprache APDL. Als weitere Informationsquelle wurde das CADFEM-Forum [5] genutzt.

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) zeichnete sich durch eine hervorragende Verzahnung der Teilarbeitspakete und eine sehr gute Kommunikation der am Projekt beteiligten Mitarbeiter aus.

Der assoziierte Partner TAKRAF GmbH wurde frühzeitig in die Projektbearbeitung einbezogen. Bei den regelmäßigen Meilenstein-Meetings wurden Zwischenergebnisse präsentiert und mit beiden Partnern sowie dem Projektträger umfangreich diskutiert. Bereits in der ersten Projektphase konnten mit der TAKRAF GmbH Anwendungsszenarien definiert werden, welche zum Ende des Projektes erfolgreich umgesetzt und verifiziert wurden.

Es wurden keine Unteraufträge in diesem Projekt ausgelöst und es fand keine Zusammenarbeit mit anderen Projekten oder Partnern im Rahmen des Projektes statt.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

- **IST-Analyse DEM-Software**

Arbeitsinhalte:

1. Analyse der vorhandenen Eingangs-Schnittstellen für Geometrie-Daten (CAD-Dateien, verformte Finite-Elemente-Netze),
2. Analyse der vorhandenen Ausgangs-Schnittstellen (bspw. Ausgabemöglichkeiten von Bauteilbelastungen (Kräfte und Momente)).

Arbeitsergebnis:

Die Open Source DEM-Software LIGGGHTS<sup>®</sup> bietet die folgenden, vordefinierte Ein- und Ausgabeformate:

- STL-Dateien für Bauteilgeometrien ohne Zusatzinformationen,
- VTK-Dateien (Visualization Toolkit) für Bauteilgeometrien mit Zusatzinformationen (Kräfte, Geschwindigkeiten, Verschleiß); es werden jedoch nur Dreiecksflächen unterstützt,
- DUMP-Dateien für Partikelpositionen mit Zusatzinformationen (Geschwindigkeit, Kräfte, Momente, Radius, Masse) im Text- oder Binärformat,
- DUMP-Dateien für Partikel- und Wandkontakte im Textformat.

Für die zu entwickelnde DEM-MKS-FEM-Kopplung sind die oben genannten, in LIGGGHTS<sup>®</sup> standardmäßig implementierten Dateiformate, ungeeignet. Lediglich das VTK-Format enthält die notwendigen Zusatzinformationen der Wandkontaktkräfte (Partikel-Wand-Kontakt). Allerdings ist die Verarbeitung dieses Dateiformats auf Grund der vorgegebenen Dateistruktur im FEM-Programm umständlich. Daher wurde festgelegt, einen neuen DUMP-Typ auf Basis des CSV-Formats (Comma-Separated-Values) zu entwickeln, der alle notwendigen Kopplungsinformationen enthält. Grundlegendes Ziel ist die korrekte Übertragung und Zuordnung der in der DEM-Simulation ermittelten Kontaktkräfte pro Dreieckfläche bzw. Dreieckflächenpaarung in Bezug auf die in der FEM-Analyse verwendeten korrespondierenden Dreieck- bzw. Viereckflächenelemente. Dieses Prinzip muss auch auf gemischte FEM-Netze (Dreieck- und Viereckflächenelemente) anwendbar sein. Gleiches gilt für die

zukünftige Verwendung von Tetraeder- bzw. Hexaederelemente eines vernetzten Volumenmodells.

- ⇒ Das Ziel 1 „*Aufstellen einer Input/Output Matrix zur Übersicht und weiteren Verwendung im Projektverlauf*“ wurde erreicht und konnte um einen Lösungsansatz für die dateibasierten Kopplung erweitert werden.

- **Definition von Soll- und Wunschanforderungen**

Arbeitsinhalte:

Aufstellen eines Lastenhefts, welches die Soll- und Wunschforderungen enthält. Dabei wurde die TAKRAF GmbH als Anforderungsgeber (z.B. welche physikalischen Größen sind von besonderem Interesse?) direkt involviert.

Arbeitsergebnis:

In mehreren Treffen aller beteiligten Simulationsingenieure wurde der folgende Anforderungskatalog für die dateibasierte DEM-FEM-MKS-Kopplung festgelegt:

**Tabelle 3:** Anforderungskatalog dateibasierte DEM-FEM-MKS-Kopplung

<b>Anforderung</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>(S)oll / (W)unsch</b>	<b>Verantwortlich</b>
Initialdatei erzeugen	Für den ersten Kopplungsschritt muss eine „erweiterte“ STL-Datei, die neben den Punktkoordinaten der Dreiecksflächen ebenso deren korrespondierende Element-ID und Face-ID aus der FEM-Simulation beinhaltet, erzeugt werden.	S	IBAF
Initialdatei einlesen	Eine „erweiterte“ STL-Datei, die neben den Punktkoordinaten auch die Element-ID und die Face-ID der korrespondierenden finiten Elemente enthält, muss vor dem ersten Kopplungsschritt eingelesen werden.	S	ILM
Exportdatei für Lastvektoren	Für jeden Kopplungsschritt soll eine Textdatei mit den Informationen: - Element-ID - Face-ID - Lastvektor automatisch generiert werden	S	IBAF, ILM
Importdatei für Lastvektoren	Für jeden Kopplungsschritt soll eine Textdatei mit den Informationen: - Element-ID - Face-ID - Lastvektor eingelesen werden	S	IBAF, ILM
Dateinamenkonvention Exportdatei DEM	BAUTEILBEZEICHNUNG_XXXXXX.fem, XXXXXX=den fortlaufenden Nummern sind Nullen voran zu stellen	W	ILM
Dateinamenkonvention Exportdatei FEM	BAUTEILBEZEICHNUNG_XXXXXX.csv XXXXXX=den fortlaufenden Nummern sind Nullen voran zu stellen	W	IBAF
Dateinamenkonvention Initialdatei	BAUTEILBEZEICHNUNG.stl	W	IBAF, ILM
Dateinamenkonvention Dumpdatei	BAUTEILBEZEICHNUNG_X.vtk, diese Dateien dienen dem Postprocessing	W	ILM

⇒ Das Ziel 2 „Erstellung eines Lastenheftes“ wurde erreicht und das Lastenheft im Projektverlauf umgesetzt.



- **Entwicklung eines FEM-Software-Makros zum Export von FEM-Netzen**

Arbeitsinhalte:

Erstellen von Programmierskripten zur automatischen Vernetzung und schrittweisen Lastaufbringung (unter Berücksichtigung evtl. separater Lastfälle) in der dem FEM-Programm eigenen Makroprogrammiersprache.

Arbeitsergebnis:

Als Schnittstelle für den initialen Austausch von FEM-Netzen (im verformten oder unverformten Zustand) bietet sich das STL-Dateiformat an, da dieses standardmäßig von LIGGGHTS<sup>®</sup> unterstützt wird.

Die Triangulierung, oder auch Tesselierung, eines beliebigen CAD-Modells erfolgt in der Regel für die Oberfläche des Modells. Dabei können beliebig komplexe Oberflächenkonturen je nach gewünschter Genauigkeit über eine endliche Anzahl von Dreiecksflächen beschrieben werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Punkte eines Dreiecks immer eine planare Fläche aufspannen und somit die theoretischen Randbedingungen der implementierten Kontaktgesetze der DEM, die ausschließlich die Verwendung planarer Flächen zulassen, erfüllen.

Der Aufbau einer Standard-STL-Datei (vgl. Abb. 1) beginnt mit der Startmarkierung „*solid*“ und endet mit „*endsolid*“. Dazwischen befinden sich in Bereichen von jeweils 7 Zeilen alle Informationen für eine Dreiecksfläche. Die Zahlenwerte nach „*facet normal*“ beschreiben den Einheitsnormalenvektor der Fläche. Zwischen „*outer loop*“ und „*endloop*“ sind jeweils nach „*vertex*“ die Informationen der x-, y- und z-Koordinaten der einzelnen Punkte gespeichert. Die Beschreibung einer Dreiecksfläche wird mit „*endfacet*“ abgeschlossen.

```
solid name
  facet normal n1 n2 n3
    outer loop
      vertex p1x p1y p1z
      vertex p2x p2y p2z
      vertex p3x p3y p3z
    endloop
  endfacet
endsolid name
```

**Abb. 1:** Aufbau einer Standard-STL-Datei in Textformat

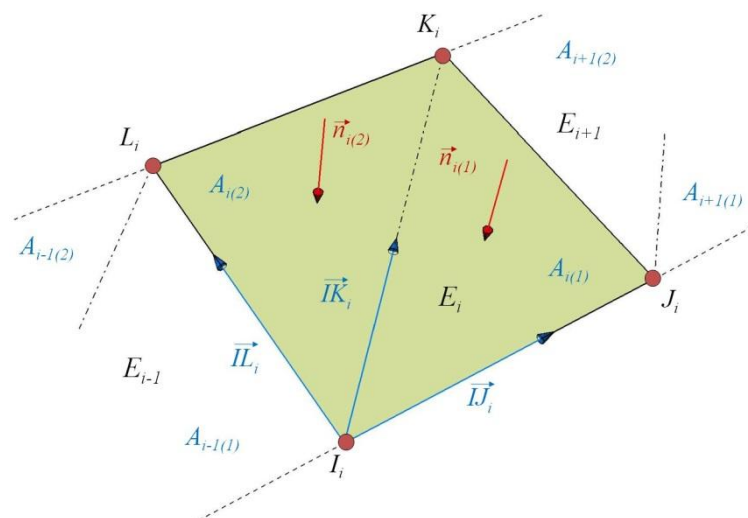
Die Modellierung des Berechnungsgebiets erfolgt im Allgemeinen über den Import einer CAD-Geometrie, kann bei einfachen Regelgeometrien aber auch direkt im FEM-

Programm erzeugt werden. Die Vernetzung dieses Gebiets mit finiten Elementen dient im Folgenden nicht nur der FEM-Analyse, sondern bildet auch die geometrische Grundstruktur des STL-Modells. Das Schreiben der STL-Daten kann nach Bedarf im unverformten (vor der FEM-Analyse) oder im verformten Zustand (nach der FEM-Analyse) erfolgen. Den Prozess der Ableitung übernimmt ein in APDL geschriebener Algorithmus.

Auf Grund der höheren Genauigkeit werden vorrangig 8-Knoten Viereckflächenelemente verwendet. Da für STL-Dateien jedoch nur Dreiecksflächen berücksichtigt werden können, muss während der Ableitung eine Teilung der Elementflächen in zwei Dreiecksflächen erfolgen. Die Ableitung lässt sich in die folgenden einzelnen Schritte unterteilen:

1. Auslesen und Speichern der Knotenkoordinaten
2. Aufstellen von Spannvektoren aus den Knotenkoordinaten (pro Dreiecksfläche)
3. Berechnen des Normaleneinheitsvektors (Kreuzprodukt der Spannvektoren)
4. Schreiben der Daten in eine STL-Datei auf Basis deren allgemeinen Aufbaus

Die Abb. 2 verdeutlicht die notwendigen Schritte der STL-Ableitung grafisch. Bei den nachfolgenden Erläuterungen wird auf die elementinterne Nummerierung der Knoten Bezug genommen.



**Abb. 2:** STL-Ableitung am  $i$ -ten finiten Element (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Die Auswahl des  $i$ -ten finiten Elements erfolgt über eine globale Schleife deren Laufvariable  $i$  alle selektierten Elemente des Berechnungsgebiets aufsteigend durchläuft. Als Start- und Endwert dient die gebietsbezogene, globale Elementnummer des ersten und letzten finiten Elements. Die Selektion lokal

begrenzter Berechnungsgebiete, die global aus mehreren Baugruppen und somit aus mehreren FEM-Netzen bestehen können, wird durch vorher definierte Teilkomponenten oder z.B. durch die Verwendung des Elementnamens vereinfacht. Das Speichern der Knotenkoordinaten erfolgt über eine lokale, elementinterne Schleife mit Bezug auf die festgelegte Knotennummerierungsvorschrift. Die Nummerierung läuft entgegen dem Uhrzeigersinn, wobei als erstes die Eckknoten ( $I, J, K, L$ ) und dann die Mittelknoten ( $M, N, O, P$ ) durchgezählt werden. Für die STL-Ableitung sind lediglich die Koordinaten der Eckknoten ( $I, J, K, L$ ) von Interesse. Das heißt, dass für die interne Elementschleife nur vier Variablen benötigt werden. Bei Anwahl des ersten Knotens  $I$  des  $i$ ten Elements wird dessen globale Knotennummer auf die erste Variable geschrieben. Dieser Vorgang wiederholt sich für die folgenden drei Eckknoten. Danach kann mit Hilfe der globalen Knotennummern die jeweilige x-, y- und z-Koordinate ausgelesen und in ein Array gespeichert werden. Als nächstes erfolgt die Ermittlung der Spannvektoren über einfache Vektoroperationen. Der Einheitsvektor einer Dreiecksfläche wird über das Kreuzprodukt der dazugehörigen Spannvektoren bestimmt. Aus der Division des Einheitsvektors mit dessen Betrag ergibt sich der noch benötigte Normaleneinheitsvektor. Abschließend werden alle Informationen des  $i$ ten Elements pro globalem Schleifendurchlauf in eine STL-Datei geschrieben. Der Aufbau der Datei orientiert sich an einer Standard-STL-Datei, wie sie mit kommerziellen CAD-Programmen erstellt werden können. Sobald die Laufvariable  $i$  der globalen Schleife das letzte Element des Berechnungsgebietes erreicht hat, wird der Vorgang beendet und die STL-Datei geschlossen. Bei der Ableitung verformter Netzstrukturen ist darauf zu achten, dass die verformten Geometrien temporär auf Basis der berechneten Knotenverschiebungen aktualisiert werden. Die entstandenen STL-Geometrien können auf diese Weise mit jedem konventionellen CAD-Programm, das über eine STL-Schnittstelle verfügt, eingelesen werden.

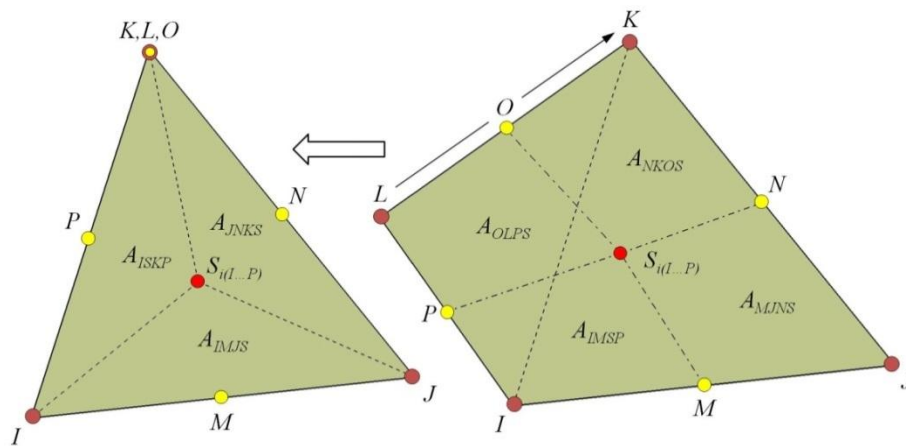
### **STL-Ableitung gemischter FEM-Netze**

Im vorhergehenden Abschnitt wurde davon ausgegangen, dass FEM-Netze vorerst aus regelmäßig angeordneten 8-Knoten Vierecksflächenelementen bestehen. „Ausgleichende“ 6-Knoten Dreiecksflächenelemente blieben unberücksichtigt.

Netzgeneratoren in FEM-Programmen sind bei der Vernetzung von Flächen bestrebt Vierecksflächenelemente mit Verschiebungsansätzen höherer Ordnung auf Grund der höheren Genauigkeit zu bevorzugen. Dennoch können bei der Vernetzung komplexer Geometrien Berechnungsgebiete entstehen, die zusätzlich „ausgleichende“

Dreieckflächenelemente enthalten. Dies trifft vor allem auf lokale Netzverfeinerungen zu. Die STL-Ableitung derartiger gemischter FEM-Netze beruht aber weiterhin auf dem bereits erläuterten Grundprinzip.

Wird das  $i$ te finite Element während des globalen Schleifendurchlaufs über das gesamte Berechnungsgebiet angewählt, muss überprüft werden, ob es sich um ein Dreieck- oder Viereckflächenelement handelt. Dreieckflächenelemente mit drei Knoten entstehen aus degenerierten 4-Knoten Viereckflächenelementen. Dabei fallen die Koordinaten der Knoten  $K$  und  $L$  zusammen. Die Degeneration eines 8-Knoten Viereckflächenelementes ergibt ein 6-Knoten Dreieckflächenelement. Hierbei fallen die Koordinaten der drei Knoten  $K$ ,  $L$  und  $O$  zusammen (vgl. Abb. 3).

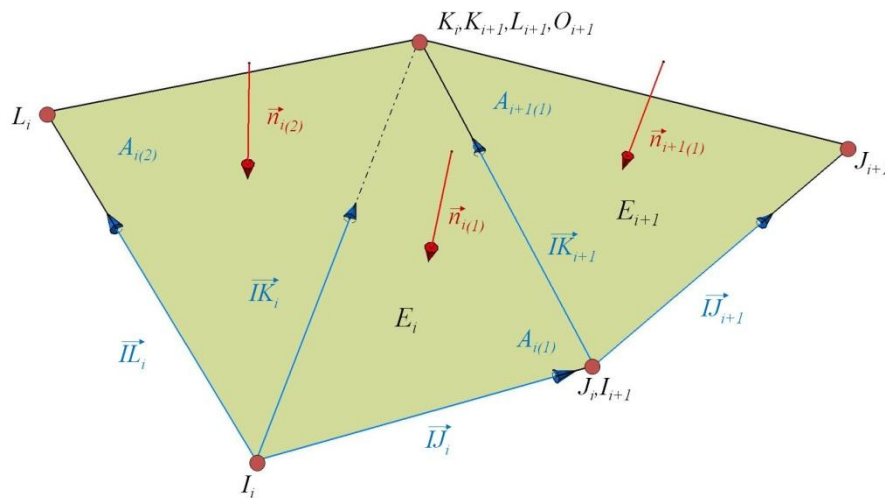


**Abb. 3:** Degeneration eines 8-Knoten Viereckflächenelements zu einem 6-Knoten Dreieckflächenelement mit zusammenfallenden Knoten  $K$ ,  $L$  und  $O$ . (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Das Zusammenfallen der Koordinaten wird als Bedingung für die Detektion vorhandener 6-Knoten Dreieckflächenelemente genutzt. Bei der Auswahl des  $i$ ten Elements überprüft die elementinterne Schleife, ob die globale Knotennummer von  $K$  mit der von  $L$  und  $O$  übereinstimmt. Im Vergleich zur Ableitung eines 8-Knoten Viereckflächenelements ist keine Teilung in eine Dreieckflächenpaarung notwendig. Die Koordinaten der drei Eckknoten können direkt als Punkte einer STL-Dreiecksfläche übernommen und abgespeichert werden. Um die Grundstruktur der STL-Datei zu vervollständigen und die Ableitung CAD-importfähig zu machen, wird abschließend mit den Spannvektoren der Normaleneinheitsvektor der Dreiecksfläche berechnet.

Die Abb. 4 zeigt das Vorgehen graphisch an einem einfachen gemischten Netz. Das  $i$ te finite Element wird über die Bedingung als 8-Knoten Viereckflächenelement erkannt, da für die Knoten  $K$ ,  $L$  und  $O$  unterschiedliche globale Knotennummern

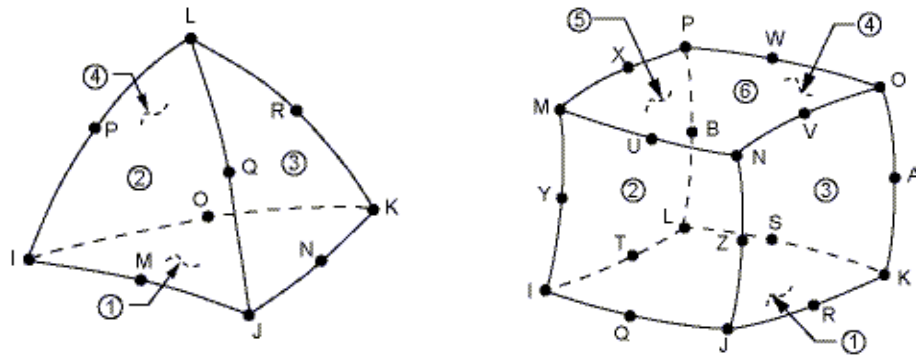
vorliegen. Das  $i+1$ 'te Element liegt durch die zusammenfallenden Knoten  $K$ ,  $L$  und  $O$  als 6-Knoten Dreieckflächenelement vor, und geht als einzelne Dreieckfläche in die STL-Ableitung ein. Die Information, welche Flächen in der STL-Datei zu einem 6-Knoten Dreieck- oder 8-Knoten Viereckflächenelement gehören, ist für die nachfolgende Erzeugung der Lastdatei aus der DEM-Simulation notwendig. Für die korrekte Zuordnung der Lastvektoren ist es erforderlich zu wissen, welche Dreieckflächenpaarung zu welchem korrespondierenden 8-Knoten Viereckflächenelement gehört, und welche einzelnen Dreieckflächen einem 6-Knoten Dreieckflächenelement zuzuordnen sind.



**Abb. 4:** STL-Ableitung am  $i$ 'ten und  $i+1$ 'ten finiten Element aus einem gemischten FEM-Netz  
(© M. Dratt, IBAF GmbH)

### Erweiterung der STL-Ableitung auf gemischte FEM-Netze mit Volumenelementen

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die STL-Ableitung auf vernetzte Berechnungsgebiete mit Flächenelementen angewendet. In der Regel kommen hierfür die Elementtypen SHELL63, SHELL93, SHELL181 und SHELL281 zum Einsatz. Wird das Berechnungsgebiet auf ein Volumenmodell erweitert, werden standardmäßig die Elemente SOLID92, SOLID95, SOLI186 und SOLID187 verwendet. In diesem Fall ist nicht das gesamte Berechnungsgebiet, sondern nur die Kontaktfläche, mit der die Partikel in der DEM-Simulation interagieren, abzuleiten und an die DEM-Simulation zu übertragen. Das Ableitungsprinzip bleibt dasselbe. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Volumenelemente nicht mehr nur zwei Elementflächen (oben und unten), sondern 4 (Tetraeder) bzw. 6 Flächen (Hexaeder) besitzen.



**Abb. 5:** Links: 10-Knoten Tetraederelement (SOLID92); Rechts: 20-Knoten Hexaederelement mit Nummerierung der Elementflächen (Quelle: ANSYS® Classic Benutzerhandbuch)

Wird ein Berechnungsgebiet mit ein und demselben Elementtyp vernetzt, besteht auf Grund der Komplexität des Modells die Möglichkeit, dass die abzuleitende Kontaktfläche aus unterschiedlichen Elementflächen besteht. Mit Hilfe der Selektionslogik von ANSYS® Classic ist es möglich die Kontaktfläche zu extrahieren. Ein erweiterter APDL-Algorithmus überprüft in der elementinternen Schleife für jedes finite Element, welche Elementflächen bzw. Knoten auf der extrahierten Kontaktfläche liegen. Um eine korrekte Zuordnung der abgeleiteten Dreieckflächen in Bezug auf die korrespondierenden finiten Elemente und deren Elementflächen bei der Rückführung der Lastdaten zu gewährleisten, ist es notwendig, die Elementflächennummer pro Dreieckfläche in der STL-Datei mitzuführen. Entsprechend wird bei der Ableitung neben der Elementnummer (FEM-Element-ID) auch die Elementflächennummer (FEM-FACE-ID) in der „erweiterten“ STL-Datei gespeichert.

⇒ Das Ziel 3 „*automatische Ausgabe der Berechnungsergebnisse aus der FEM-Simulation*“ wurde erreicht.

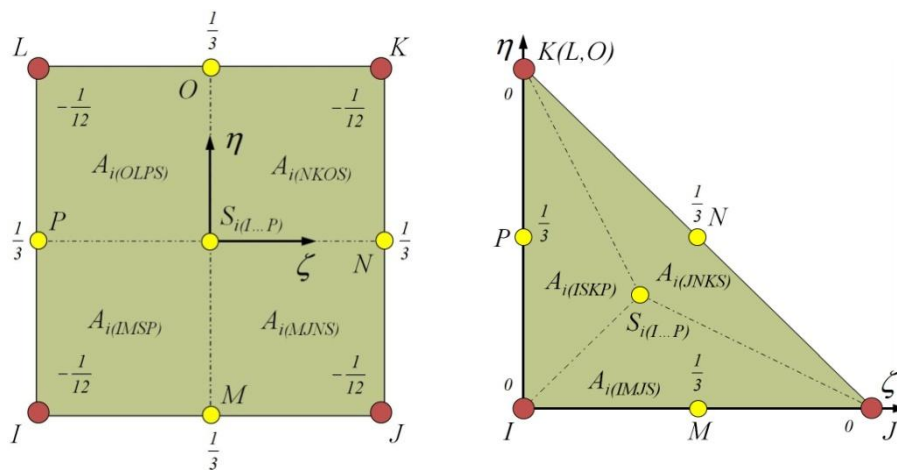
- **Entwicklung eines FEM-Makros zum Import von Lastdaten**

Arbeitsinhalte:

Erstellen von Programmierskripten zum Import von Lastdateien aus der DEM in der dem FEM-Programm eigenen Makroprogrammiersprache APDL.

Arbeitsergebnis:

Für die Makro-Entwicklung zum Import von Lastdateien aus der DEM und deren Weiterverarbeitung in der FEM-Simulation muss zwischen den für die Vernetzung verwendeten finiten Elementen unterschieden werden. Bei der Vernetzung dünnwandiger Strukturen liegen im FEM-Netz Flächenelemente vor (vgl. Abb. 6), bei denen für die Zuordnung der Lastvektoren lediglich die Elementnummern (FEM-Element-ID) notwendig sind. Entsprechend sind in den Lastdateien auch nur die Elementnummern als Zusatzinformation hinterlegt.

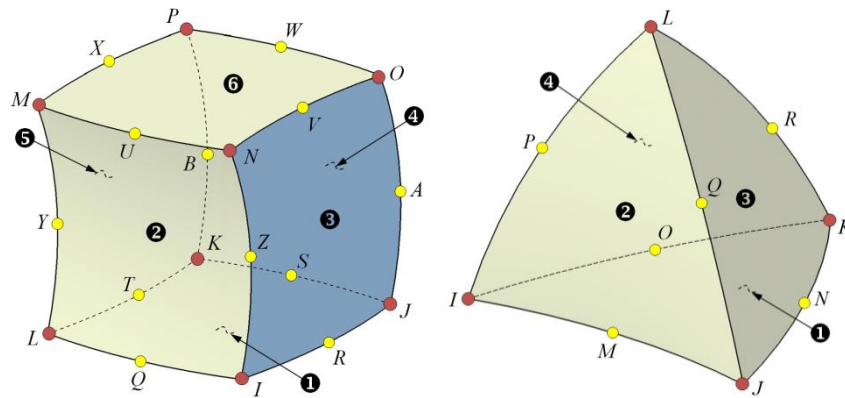


**Abb. 6:** 8-Knoten Viereck- (links) und 6-Knoten Dreieckselement (rechts) für die Vernetzung dünnwandiger Strukturen (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Besteht das FEM-Netz aus Volumenelementen wird für die korrekte Zuordnung der Lastvektoren zu den korrespondierenden finiten Elementen zusätzlich die Elementflächennummer (FEM-FACE-ID) benötigt, auf die der jeweilige Lastvektor wirkt. Hierfür werden in der Lastdatei neben den Elementnummern auch die Elementflächennummern hinterlegt.

Für die Vernetzung einfacher Volumenmodelle können 20-Knoten Hexaederelemente (6 Elementflächen) und, wenn notwendig, deren Reduzierungen (Prisma-, Pyramiden- bzw. Tetraederelemente) verwendet werden. Allerdings erfolgt die Vernetzung mit derartigen Elementen mit dem in ANSYS® Classic implementierten

Netzgenerator in den meisten Fällen nur halbautomatisch. Aus diesem Grund werden in der Praxis für komplexe Volumenmodelle in der Regel 10-Knoten Tetraederelemente (4 Elementflächen) verwendet, da mit diesem Elementtyp problemlos automatisch vernetzt werden kann.



**Abb. 7:** 20-Knoten Hexaederelement (links) und 10-Knoten Tetraederelement (rechts) mit Elementflächennummerierung (©M. Dratt, IBAF GmbH).

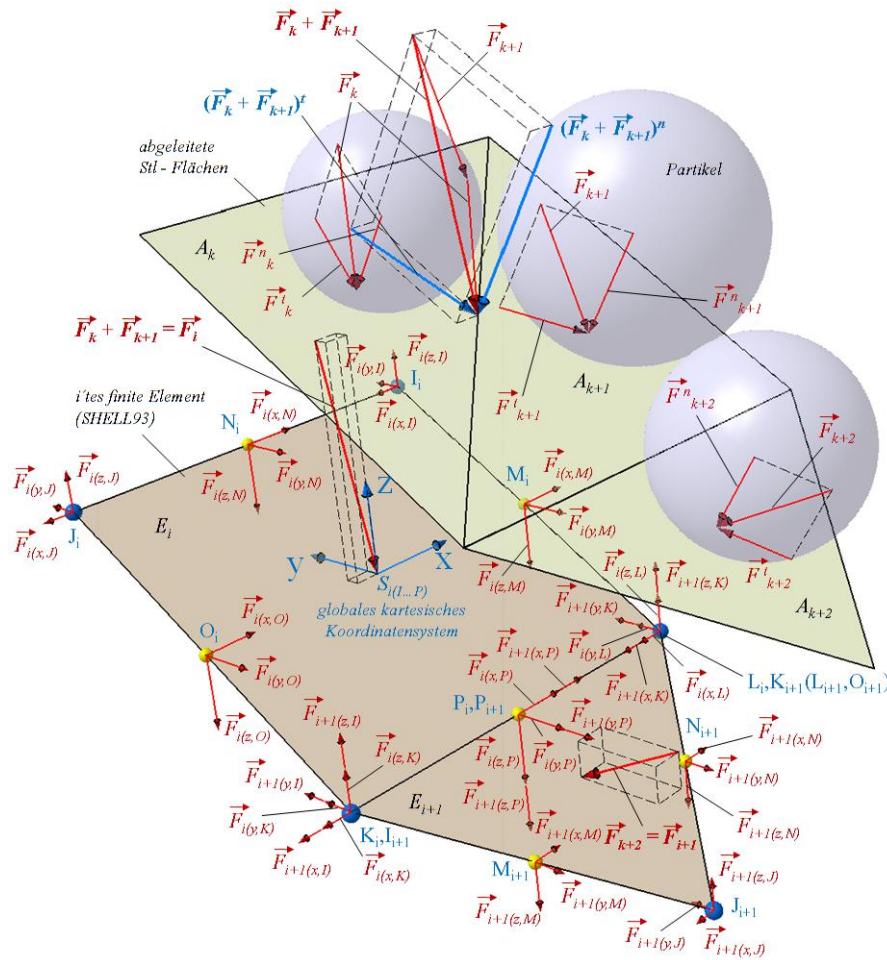
Das grundsätzliche Vorgehen bei der Übertragung der Lastvektoren aus der DEM auf das vernetzte FEM-Modell gilt sowohl für Flächen- als auch für Volumenelemente. Bei Volumenelementen ist lediglich wie oben beschrieben die Elementfläche, auf die der Lastvektor wirkt, zusätzlich zu berücksichtigen. Die abzuarbeitenden Arbeitsschritte für die Entwicklung eines allgemeingültigen Makros lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Einlesen der Lastvektoren aus der Lastdatei
2. Zuordnen der Lastvektoren zu den korrespondierenden finiten Elementen
3. Berechnung der Wichtungsfaktoren pro finites Element (konstante Wichtungsfaktoren bzw. Einzelteillächenverhältnisse)
4. Wichtung der Lastvektorkomponenten
5. Zuweisung gewichteter (äquivalenter) Knotenkräfte pro Knoten

Die Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte wird im Folgenden an einem Muster-Berechnungsgebiet erklärt (vgl. Abb. 8). Das Berechnungsgebiet besteht aus zwei finiten Elementen. Einem 8-Knoten Viereck- und einem 6-Knoten Dreieckflächenelement. Aus der STL-Ableitung des Berechnungsgebietes ergeben sich eine Dreieckflächenpaarung und eine einzelne Dreieckfläche. In der DEM-Simulation wird das Berechnungsgebiet mit Partikeln beaufschlagt. Die aus dem Kontakt mit den Dreieckflächen resultierenden Kontaktkraftvektoren  $\vec{F}_k$  und  $\vec{F}_{k+1}$  werden für die Dreieckflächenpaarung (korrespondierend zum 8-Knoten Viereckflächenelement),



bestehend aus  $A_k$  und  $A_{k+1}$ , zum Lastkraftvektor  $\vec{F}_i$  summiert. Für die einzelne Dreieckfläche  $A_{k+2}$ , abgeleitet vom 6-Knoten Dreieckflächenelement, ist die Kontaktkraft  $\vec{F}_{k+2}$  gleich dem Lastvektor  $\vec{F}_{i+1}$ . Nach dem Einlesen der Lastvektoren aus der Lastdatei werden diese den korrespondierenden finiten Elementen über deren jeweilige Elementnummer zugeordnet. Besteht das Berechnungsgebiet aus Volumenelementen, werden für die Zuordnung zusätzlich die Elementflächennummern (vgl. Abb. 7), auf denen die Lastvektoren wirken, benötigt. Diese Informationen können neben den Werten der Lastvektoren ebenfalls Bestandteil der Lastdatei sein.



**Abb. 8:** Muster-Berechnungsgebiet mit einem 8-Knoten Viereck- und einem 6-Knoten Dreieckflächenelement, deren STL-Ableitung und der grafischen Darstellung der Übertragung der Lasten (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Die Lastvektoren werden pro finites Element auf die Elementflächenschwerpunkte  $S_{i(l...p)}$  bezogen. Das wird insoweit als legitim angesehen, da sich bei ingenieurstechnisch sinnvoll konditionierten FEM-Netzen (Diskretisierung) die Elementgröße, beschrieben durch die Elementkantenlänge  $KL_{ELEM}$ , an dem kleinsten Partikeldurchmesser  $D_{part}$  orientiert.

Im nächsten Schritt werden die Lastvektoren, bezogen auf das globale Koordinatensystem, in Lastvektorkomponenten zerlegt und den Knoten des jeweiligen finiten Elements gewichtet zugeordnet. Für die Übertragung des Lastvektors auf die einzelnen Knoten wird das Verfahren der äquivalenten Knotenkräfte verwendet. Das heißt der Betrag der Kraft eines Lastkraftvektors muss anteilig auf die im finiten Element vorhandenen Knoten aufgeteilt werden. Die anteilige Aufteilung erfolgt mit sogenannten Wichtungsfaktoren  $W_{i(j,k)}$ . Beispielsweise ergeben sich die Wichtungsfaktoren in einem 4-Knoten Viereckflächenelement zu jeweils  $1/4$  und in einem 3-Knoten Dreieckflächenelement zu  $1/3$ . Diese triviale Aufteilung gilt aber nicht für Elemente höherer Ordnung, wie die hier verwendeten 8-Knoten Viereck- bzw. 6-Knoten Dreieckflächenelemente. An dieser Stelle muss auf die Finite Elemente-Theorie zurückgegriffen werden.

### **Regelmäßige Berechnungsgebiete**

Als regelmäßige Berechnungsgebiete werden vernetzte Strukturen bezeichnet, deren finite Elemente regelmäßige Formen aufweisen. Weiterhin müssen die Elementflächen planar sein und die Mittelknoten müssen in der Mitte auf den direkten Verbindungslinien der Eckknoten liegen. Das gilt für 8-Knoten Viereckflächenelemente, die in der Form von Quadraten, Rechtecken und Parallelogrammen vorliegen. Aus der Finite-Elemente-Theorie lassen sich für derartige Elementformen die Wichtungsfaktoren der Eckknoten ( $I, J, K, L$ ) zu  $-1/12$  und die der Mittelknoten ( $M, N, O, P$ ) zu  $1/3$  ableiten. Diese konstanten Wichtungsfaktoren gelten, da die Masseverteilung, bezogen auf den Elementflächenschwerpunkt  $S_{i(I...P)}$ , der Einzelteilflächen  $A_{i(k)}$  derartiger Elemente (vgl. Abb. 6 links) immer gleich ist. Das gilt entsprechend bei konstanter, imaginärer Elementdicke  $t_{Elem}$  auch für die Flächeninhalte der Einzelteilflächen.

Bei 6-Knoten Dreieckflächenelementen sind die Einzelteilflächen  $A_{i(k)}$ , bezogen auf den Elementflächenschwerpunkt  $S_{i(I...P)}$ , immer gleich. Aus der Theorie ergeben sich für derartige Elemente die Wichtungsfaktoren der Eckknoten zu  $0$  und die der Mittelknoten zu  $1/3$  (vgl. Abb. 6 rechts).

Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei zu analysierenden Strukturen immer regelmäßige Berechnungsgebiete vorliegen. Aufbauend auf den vorhandenen Erkenntnissen muss die Ermittlung der Wichtungsfaktoren auf allgemeine Berechnungsgebiete erweitert werden.

## Allgemeine Berechnungsgebiete

Als allgemeine Berechnungsgebiete werden Strukturen definiert, deren finite Elemente nach der Vernetzung planar aber zusätzlich verzerrt vorliegen. Für 8-Knoten Viereckflächenelemente gelten folgende Randbedingungen:

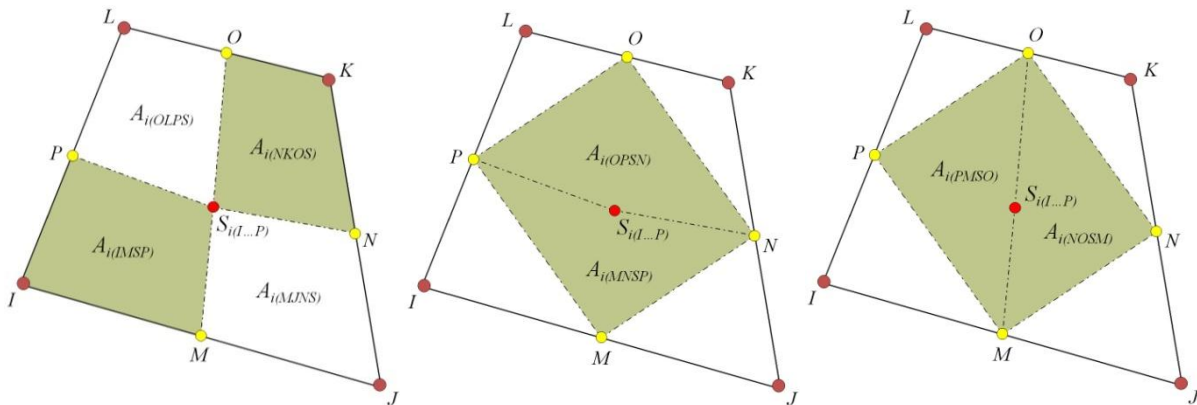
- Alle Knoten  $I \dots P$  liegen in der  $xy$ -Ebene (planare Elementfläche)
- Die Mittelknoten  $M, N, O$  und  $P$  liegen in der Mitte auf den direkten Verbindungs-  
linien der Eckknoten  $I, J, K$  und  $L$
- Die imaginäre Elementdicke  $t_{Elem}$  über die gesamte Elementfläche ist konstant
- Die Materialdichte  $\rho_{Elem}$  über das imaginäre Elementvolumen ist konstant

Bei derartigen Elementen liegen die Elementflächenschwerpunkte  $S_{i(I \dots P)}$  nicht wie bei 8-Knoten Viereckflächenelementen mit regelmäßigen Formen im Schnittpunkt zwischen den Diagonalen der Eckknoten  $I \dots L$ . Das bedeutet auch, dass die Flächeninhalte der Einzelteilflächen  $A_{i(k)}$  ungleich sind (vgl. Abb. 9). Dennoch muss ein solches Element bei „Aufhängung“ im Elementflächenschwerpunkt im Gleichgewicht stehen. Die Gleichgewichtsbedingung ergibt sich aus den oben definierten Randbedingungen und den daraus resultierenden geometrischen Zusammenhängen:

$$A_{i(IMSP)} + A_{i(NKOS)} = A_{i(MJNS)} + A_{i(OLPS)} = \frac{1}{2} A_i \quad (1)$$

$$A_{i(MNSP)} + A_{i(OPNS)} = A_{i(PMSO)} + A_{i(NOSM)} = \frac{1}{2} A_i. \quad (2)$$

Die Beziehungen (1) bzw. (2) können mathematisch bewiesen werden.



**Abb. 9:** Lage der Einzelteilflächen in einem planaren, verzerrten 8-Knoten-Viereckflächenelement  
(© M. Dratt, IBAF GmbH)

Wenn die Summe der jeweils gegenüberliegenden Einzelteilflächen  $A_{i(k)}$  die Hälfte der Gesamtfläche  $A_i$  eines planaren, verzerrten 8-Knoten Viereckflächenelements ergibt, muss die Summe der dazugehörigen Wichtungsfaktoren in Analogie zu einem regelmäßig geformten Element (in der Regel als Masterquadrat bezeichnet)  $-2/12$  an den Eckknoten ( $I...L$ ) und  $2/3$  an den Mittelknoten ( $M...P$ ) betragen, um ein Gleichgewicht zu gewährleisten. Das bedeutet, das Verhältnis der gegenüberliegenden Einzelteilflächen  $A_{i(k)}$  verhält sich umgekehrt proportional dem Verhältnis der dazugehörigen Wichtungsfaktoren  $W_{i(j,k)}$ . Als Analogie kann das Hebelgesetz im Raum angesetzt werden. Beispielhaft werden nachfolgend die Verhältnisse für den Eckknoten  $I$  und den Mittelknoten  $M$  näher betrachtet.

$$W_{i(j,I)} \cdot A_{i(IMSP)} = W_{i(j,K)} \cdot A_{i(NKOS)} \quad \text{mit} \quad W_{i(j,I)} + W_{i(j,K)} = -\frac{2}{12} \quad (3)$$

$$W_{i(j,M)} \cdot A_{i(MNSP)} = W_{i(j,O)} \cdot A_{i(OPSN)} \quad \text{mit} \quad W_{i(j,M)} + W_{i(j,O)} = \frac{2}{3} \quad (4)$$

Die Wichtungsfaktoren ergeben sich zu:

$$W_{i(j,I)} = -\frac{1}{6} \left( \frac{A_{i(NKOS)}}{A_{i(IMSP)} + A_{i(NKOS)}} \right) = -\frac{1}{6} \left( \frac{A_{i(NKOS)}}{A_i} \right) \quad (5)$$

$$W_{i(j,M)} = \frac{2}{3} \left( \frac{A_{i(OPSN)}}{A_{i(MNSP)} + A_{i(OPSN)}} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{A_{i(OPSN)}}{A_i} \right). \quad (6)$$

Die Berechnung der Wichtungsfaktoren für derartige Elemente über den Ansatz der Einzelteilflächenverhältnisse stimmt im Vergleich mit der Finite-Elemente-Theorie überein. Der dafür notwendige mathematische Beweis wurde erbracht.

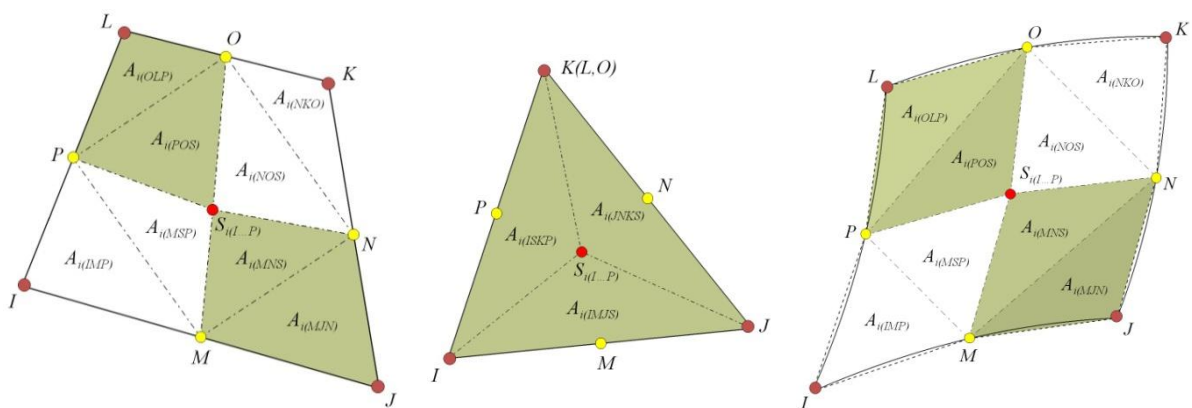
$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_I \cdot \sum_{k=I}^P N_k \cdot p_K \det \mathbf{J} \, d\xi \, d\eta \cdot \left\{ \sum_{k=I}^P \left[ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_k \cdot \sum_{k=I}^P N_k \cdot p_K \det \mathbf{J} \, d\xi \, d\eta \right] \right\}^{-1} = W_{i(j,I)} = -\frac{1}{6} \left( \frac{A_{i(NKOS)}}{A_{i(IMSP)} + A_{i(NKOS)}} \right) \quad (7)$$

$$\underbrace{\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_M \cdot \sum_{k=I}^P N_k \cdot p_K \det \mathbf{J} \, d\xi \, d\eta \cdot \left\{ \sum_{k=I}^P \left[ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_k \cdot \sum_{k=I}^P N_k \cdot p_K \det \mathbf{J} \, d\xi \, d\eta \right] \right\}^{-1}}_{\text{finite Elemente Theorie}} = W_{i(j,M)} = \underbrace{\frac{2}{3} \left( \frac{A_{i(OPSN)}}{A_{i(MNSP)} + A_{i(OPSN)}} \right)}_{\text{Verfahren der Einzelteilflächenverhältnisse}} \quad (8)$$

Der hier verwendete Ansatz auf Basis der Finite-Elemente-Theorie gilt nur für Elemente in der  $x$ - $y$ -Ebene. Im Gegensatz dazu kann die Adaption über das Verfahren der Einzelteilflächenverhältnisse problemlos im Raum angewandt werden.

Das Verfahren der Einzelteilflächenverhältnisse wurde an einfachen Beispielen verifiziert.

Die Verwendung des beschriebenen Verfahrens wird als legitim angesehen, da gutstromkontaktierende Bauteile in der Regel aus fertigungstechnischen Gründen auf planare Einzelflächen reduziert werden können. Liegen dennoch krummrandige und/oder gewölbte Elementflächen vor (z.B. Gurtoberfläche), fungieren die Einzelteilflächenverhältnisse automatisch als Approximationsansatz (vgl. Abb. 10 rechts). Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass der Fehler bei gut konditionierten FEM-Netzen deutlich unter 1% liegt. Die Wichtungsfaktoren bei planaren, verzerrten 6-Knoten Dreiecksflächenelementen (vgl. Abb. 10 Mitte) bleiben erhalten, da der Inhalt der Einzelteilflächen immer  $1/3$  der Gesamtfläche  $A_i$  beträgt.



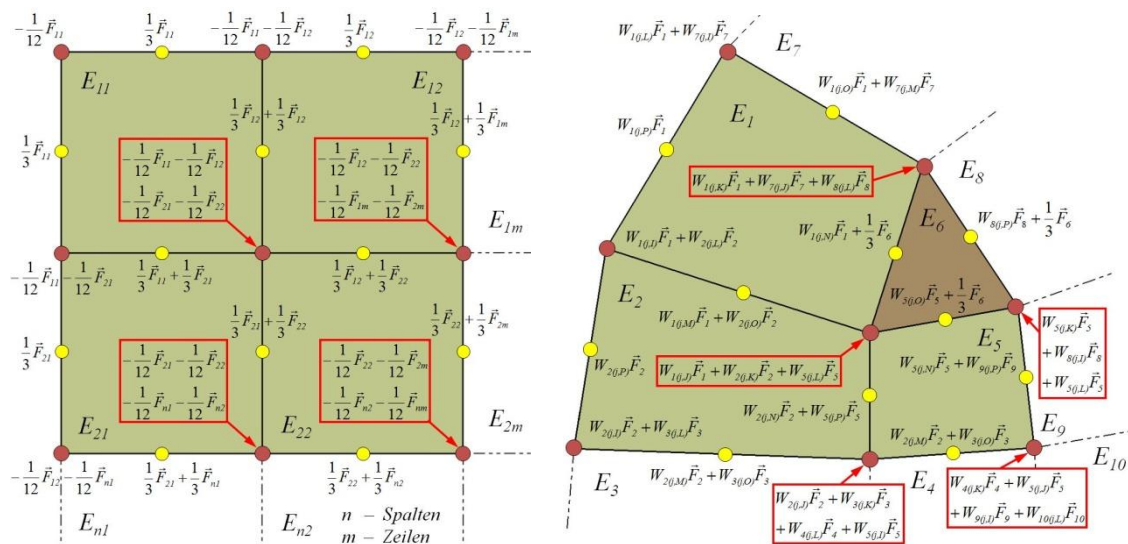
**Abb. 10:** Links: Einzelteilflächen eines planaren, verzerrten 8-Knoten-Vierecksflächenelements. Mitte: Einzelteilflächen eines planaren, verzerrten 6-Knoten-Dreiecksflächenelements. Rechts: Grafische Darstellung des Approximationsansatzes für ein krummrandiges und/oder gewölbtes 8-Knoten-Vierecksflächenelement (© M. Dratt, IBAF GmbH)

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass das Verfahren zur Berechnung der Wichtungsfaktoren auch problemlos für Volumenelemente angewendet werden kann. Hierfür sind lediglich die Kontaktflächen, auf denen die Lastvektoren wirken, zusätzlich zu berücksichtigen. Die für die Auswahl notwendige Zusatzinformation, die Elementflächennummer, ist in der Lastdatei hinterlegt.

Abschließend erfolgt die Zuordnung der gewichteten Lastvektorkomponenten zu den jeweiligen Knoten im Berechnungsgebiet (vgl. Abb. 8). Dabei sind die Nachbarschaftsverhältnisse angrenzender finiter Elemente zu berücksichtigen. Mehrere Elemente können über gemeinsame Knoten verfügen. Das in Abb. 8 dargestellte Muster-Berechnungsgebiet zeigt, dass beide Elemente über drei gemeinsame Knoten verfügen. An diesen Knoten müssen die jeweils gewichteten Lastvektorkomponenten

(äquivalente Knotenkräfte) zu resultierenden, äquivalenten Knotenkräften addiert werden.

In Abb. 11 ist noch einmal beispielhaft die Zuordnungsvorschrift für ein regelmäßiges (links) und ein allgemeines Berechnungsgebiet (rechts) dargestellt. Ist die Zuordnung abgeschlossen, kann die eigentliche FEM-Simulation (Lastschritt) gestartet werden. Nach Abschluss eines jeweiligen FEM-Lastschrittes wird die verformte Geometrie des Berechnungsgebietes für die Weiterverarbeitung im Kopplungszyklus (DEM-Simulation) ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt im ersten Schritt als „erweiterte“ STL-Datei und in allen folgenden Berechnungsschritten über ein eigens dafür entwickeltes Datenaustauschformat (Text-Datei).



**Abb. 11:** Zuordnungsvorschrift im regelmäßigen (links) bzw. allgemeinen Berechnungsgebiet (rechts) (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Das FEM-Software-Makro zum Import von Lastdaten aus der DEM-Simulation bzw. zur Weiterverarbeitung der Informationen in der FEM-Simulation für Flächenelemente wurde erfolgreich implementiert.

⇒ Das Ziel 4 „Automatisierter Import von Kraft- und Momentdaten aus der DEM-Simulation“ wurde erreicht.

- **Verifizierungen der Schnittstellen-Algorithmen**

Arbeitsinhalte:

Anhand von einfach analytisch berechenbaren Problemstellungen wird das Ergebnis der numerischen Berechnung mit der analytischen Lösung verglichen.

Falls notwendig: Optimierung der Schnittstellen-Programmierung.

Arbeitsergebnis:

Zur Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen wurde ein einfaches analytisches Beispiel, die Berechnung des Durchhangs eines doppelseitig eingespannten Balkens unter konstanter Linienlast, aus der technischen Mechanik herangezogen. Werden kleine Verformungen vorausgesetzt, kann der Durchhang mit:

$$v_{max,analyt} = \frac{q \cdot l}{384 \cdot EI_{xx}} \quad (9)$$

berechnet werden. Der Parameter  $q$  beschreibt die konstante Linienlast,  $l$  die Länge des Balkens,  $E$  den Elastizitätsmodul des Balkenmaterials und  $I_{xx}$  das Flächenträgheitsmoment bezogen auf den Balkenquerschnitt. Wird die Gleichung für den dreidimensionalen Raum erweitert, ist die Linienlast  $q$  in eine Flächenlast  $p$  umzurechnen. Daraus folgt:

$$v_{max,analyt} = \frac{p \cdot l^4}{32E \cdot h^3} \quad \text{mit} \quad q = \frac{F}{l} = \frac{p \cdot A}{l} \quad \text{und} \quad I_{xx} = \frac{b \cdot h^3}{12}. \quad (10)$$

Mit einer Balkenlänge von  $l = 1000 \text{ mm}$ , einer Breite  $b = 100 \text{ mm}$  und einer Querschnittshöhe von  $h = 10 \text{ mm}$ , einem Elastizitätsmodul von Stahl  $E_{Stahl} = 210.000 \text{ N/mm}^2$  und einer Flächenlast von  $p = 0,005 \text{ N/mm}^2$  ergibt sich die analytische Lösung zu  $v_{max,analyt} = 0,744 \text{ mm}$ . Das Ergebnis der analytischen Rechnung dient als Referenzergebnis.

Vergleichsweise wurden eigenständige FEM-Simulationen des Balkensystems mit Netzen unterschiedlicher Größe durchgeführt. Die Netzgröße wurde über die Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$  gesteuert. Um die Ergebnisse mit der analytischen Lösung vergleichen zu können, erfolgten die eigenständigen FEM-Simulationen ebenfalls unter Berücksichtigung der Theorie I. Ordnung (kleine Verformungen wer-

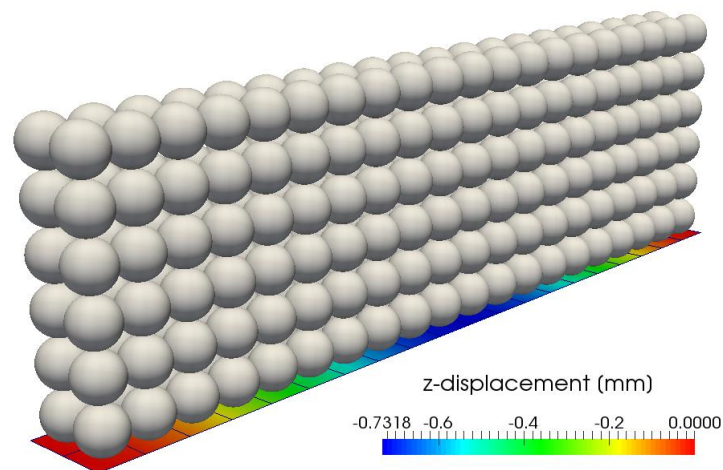


den vorausgesetzt). Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4:** Ergebnisse der eigenständigen FEM-Simulationen eines doppelseitig eingespannten Balkens unter konstanter Flächenlast (Theorie I. Ordnung)

$KL_{Elem}$ [mm]	100	50	25	20	12,5
$v_{max,FEM}$ [mm]	0,732527	0,731604	0,731815	0,731915	0,732015

Zur Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen müssen die Ergebnisse der eigenständigen FEM-Simulationen des Balkensystems mit den Ergebnissen analoger gekoppelter Simulationen verglichen werden. Um den Einfluss von Element- und Partikelgröße auf die Ergebnisgenauigkeit zu untersuchen, wurden neben der Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$  auch der Partikeldurchmesser  $D_{Part}$  variiert. Die Ergebnisse der eigenständigen FEM-Simulationen (vgl. Tabelle 4) dienen als Referenz für die jeweiligen gekoppelten Simulationen mit spezifischer Durchmesser-Kanten-Paarung. Um eine gleichmäßige Lastverteilung, analog der konstanten Flächenlast  $p$ , zu garantieren, wurden geordnete Partikelpakete generiert (vgl. Abb. 12). Die Gesamtmasse wurde entsprechend der Flächenlast  $p$  über die Partikeldichte  $\rho_{Part}$  definiert. Die gleichmäßige Verteilung verhindert zufallsbedingte Masseverschiebungen im abgerieselten Partikelbett. In der Realität kommen derartige Partikelverteilungen nicht vor, sind aber für den Vergleich und eine Fehlerabschätzung unabdingbar.



**Abb. 12:** Geordnetes Partikelpaket in der gekoppelten Simulation mit der Paarung  $KL_{Elem} = 50$  mm und  $D_{Part} = 50$  mm

Als Abgrenzung des Berechnungsgebietes dienten senkrecht stehende, reibungsfreie Wände, die das Partikelpaket auf Position halten. Um die reine Gewichtskraft der Partikel auf den Balken wirken zu lassen, wurde die Kontaktfläche des Balkens als



reibungsfrei  $\mu_W = 0$  definiert. Gleiches gilt für die Coulombsche Reibung  $\mu_P = 0$  und die Rollreibung  $\mu_R = 0$  der Partikel, die ebenfalls zu null definiert wurden. Die Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$  variiert entsprechend der Partikeldurchmesser  $D_{Part}$ , zwischen 100, 50, 25, 20 und 12,5 mm. Die Wahl der Werte resultiert aus der ganzzahligen Teilung der Balkenlänge und -breite. Daraus ergaben sich Paarungen mit sehr großen Partikeln  $D_{Part} = 100\text{ mm}$  und relativ kleinen Elementkantenlängen  $KL_{Elem} = 12,5\text{ mm}$  bis hin zu relativ kleinen Partikeln  $D_{Part} = 12,5\text{ mm}$  und sehr großen Elementkantenlängen  $KL_{Elem} = 100\text{ mm}$ . Aus den Durchmesser-Kanten-Paarungen ergaben sich pro Versuchsreihe jeweils 25 einzelne, gekoppelte Simulationen.

Um einen direkten Vergleich mit den eigenständigen FEM-Simulationen gewährleisten zu können, wurde für die 1. Versuchsreihe der Export der Verformungen unterbunden. D.h. die perfekte Anordnung der Partikelpakete blieb in den DEM-Simulationen über die gesamte Simulationszeit erhalten. Im Gegensatz dazu wurde in den Versuchsreihen 2-5 der Export zugelassen. Hier beeinflusst die jetzt in den DEM-Simulationen zusätzlich berücksichtigte Verformung der Balkenoberfläche (2-Wege-Kopplung) maßgeblich die Partikelpakete. Die perfekte Anordnung der Pakete bleibt auf Grund der Verformung nicht mehr erhalten. Insgesamt wurden 6 Versuchsreihen á 25 Einzelsimulationen durchgeführt. In den ersten drei Versuchsreihen wurden kleine Verformungen vorausgesetzt. Für die Versuchsreihen 4-6 wurden große Verformungen angenommen (Theorie III. Ordnung). In der nachfolgenden Tabelle werden die Spezifikationen der einzelnen Versuchsreihen zusammengefasst und näher erläutert.

**Tabelle 5:** Zusammenfassung der Spezifikationen aller durchgeführten Versuchsreihen am Beispiel eines doppelseitig eingespannten Balkens unter Beaufschlagung eines Partikelbetts äquivalent einer konstanten Flächenlast

Spezifikation/Versuchsreihe	1	2	3	4	5	6
Verformung <sup>(1)</sup>	kleine	kleine	kleine	große	große	große
Massenträgheitseffekte (aus/an) <sup>(2)</sup>	aus	aus	an	an	an	aus
Export der Verformung (aus/an) <sup>(3)</sup>	aus	an	an	an	an	aus
äquivalente Flächenlast $p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,005	0,005	0,005	0,05	0,05	0,05
äquivalente Partikelmasse $m_{Part}$ [kg]	50	50	50	500	500	500
Materialdämpfung $D_{Mat}$ [-]	aus	aus	0,5	0,5	0,1	aus

- (1) **kleine** Verformungen (Theorie I. Ordnung); **große** Verformungen entsprechen geometrischer Nichtlinearität (Theorie III. Ordnung)
- (2) Massenträgheitseffekte **aus** entspricht einer statischen Analyse („steady state“); Massenträgheitseffekte **an** entspricht einer transienten dynamischen Analyse
- (3) Export der Verformungen **aus** entspricht einer unidirektionalen Kopplung - es werden nur Lastdaten an die FEM-Simulation geliefert; Export der Verformungen **an** entspricht einer bidirektionalen Kopplung - es werden Lastdaten an die FEM-Simulation und Verformungsdaten an die DEM-Simulation geliefert

Der direkte Vergleich mit den Ergebnissen eigenständiger FEM-Simulationen erfolgte in der 6. Versuchsreihe auch für die Annahme großer Verformungen (Theorie III. Ordnung). Wie in der 1. Versuchsreihe wurde auch hier der Export der Verformungen unterbunden, um geordnete Partikelpakete beizubehalten und somit „gleichmäßig verteilte Flächenlasten“ über die gesamte Simulationszeit zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Referenzsimulationen (eigenständige FEM-Simulationen) sind für alle Elementkantenlängen in der Tabelle 6 zusammengefasst.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der eigenständigen FEM-Simulationen eines doppelseitig eingespannten Balkens unter konstanter Flächenlast (Theorie III. Ordnung). Belastung mit  $p = 0,05 \text{ N/mm}^2$  verzehnfacht

$KL_{Elem} [\text{mm}]$	100	50	25	20	12,5
$v_{max,FEM} [\text{mm}]$	5,871	5,875	5,877	5,878	5,878

Für die Versuchsreihen 4-6 wurde die Partikeldichte  $\rho_{Part}$  analog der Flächenlast  $p$  verzehnfacht. Die Ergebnisse aller Versuchsreihen sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengefasst. Des Weiteren sind in Abb. 18 - Abb. 23 die Ergebnisse aller Versuche pro Versuchsreihe graphisch dargestellt.

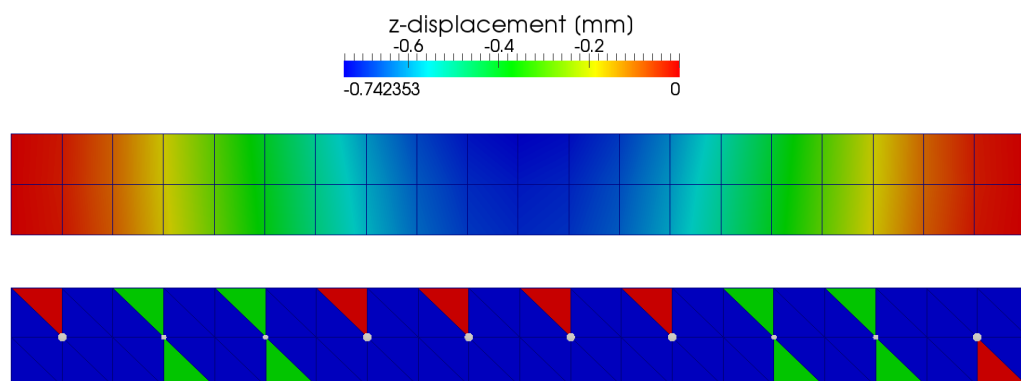
In den Diagrammen (vgl. Abb. 14 - Abb. 17) sind die direkt mit den eigenständigen FEM-Simulationen vergleichbaren Versuchsreihen 1 und 6 graphisch dargestellt. Neben den absoluten maximalen Durchhängen der jeweiligen Durchmesser-Kanten-Paarungen werden auch die prozentualen Abweichungen dargestellt.

Die Ergebnisse der 1. Versuchsreihe ergeben eine maximale Abweichung von ca. 2,3 % bei der Paarung 100/25 ( $D_{Part}/KL_{Elem}$ ). Die nächstgrößeren Abweichungen ergeben sich mit ca. 1,5 % für die Paarungen 100/50 bzw. 50/25. Gleiches gilt für die Ergebnisse der 6. Versuchsreihe. Auch hier ergibt sich die maximale Abweichung mit wiederum ca. 2,3 % bei der Paarung 100/25. Auch die nächstgrößeren Abweichungen sind wieder bei den Paarungen 100/50 bzw. 50/25 mit ca. 2,2 % bzw. 0,8 %

zu finden. Die Abweichungen aller anderen Paarungen beider Versuchsreihen liegen deutlich unter 1 % und sind auf Rundungsfehler beim Datenexport zurückzuführen. Die größeren Abweichungen, die reproduzierbar bestimmten Paarungen zugeordnet werden können, resultieren aber letztendlich nicht aus einem scheinbar ungünstigen Verhältnis zwischen Partikeldurchmesser  $D_{Part}$  und Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$ , sondern aus der programminternen Zuordnung (DEM-Programm) der Lasten bezüglich der kontaktierenden Dreieckflächen. Untersuchungen haben gezeigt, dass es bei den Kontaktarten:

1. **Linienkontakt:** Partikel liegt auf einer Kante, die gleichzeitig zwei Dreieckflächen angehört
2. und **Punktkontakt:** Partikel liegt auf einem Punkt, der gleichzeitig mehreren angrenzenden Dreieckflächen angehört

keine eindeutige Zuordnung der Kontaktkräfte pro Dreieckfläche gibt. Der Wert der Kontaktkraft wird zwar korrekt ausgegeben, aber nicht auf alle angrenzende Dreieckflächen aufgeteilt, wenn durch die Kontaktart (Linien- oder Punktkontakt) keine eindeutige Fläche selektiert werden kann. Eine eindeutige Zuordnung zu einer Dreieckfläche liegt nur bei einem Flächenkontakt vor. In Abb. 13 ist diese Problematik für die Paarung 100/50 der 1. Versuchsreihe dargestellt.



**Abb. 13:** Graphische Ergebnisse für die Durchmesser-Kanten-Paarung 100/50: Oben: unsymmetrische Verschiebung der Balkenoberfläche. Unten: ungleichmäßige Zuordnung der Kontaktkräfte pro Kontaktfläche (©M.Dratt, IBAF GmbH)

Abb. 13 oben zeigt das Ergebnis des maximalen Durchhangs mit einer Abweichung von ca. 2,3 % im Vergleich zu einer eigenständigen FEM-Simulation für die Durchmesser-Kanten-Paarung 100/50. D. h., in diesem Fall deckt ein Partikel vier quadratische finite Elemente bzw. acht Dreieckflächen gleichzeitig ab. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass eine unsymmetrische Verteilung der Knotenverschiebungen nach der FEM-Simulation vorliegt. Der Grund hierfür liegt in der Zuordnung der

Kontaktkräfte pro Dreiecksfläche. Abb. 13 unten zeigt die zu den finiten Elementen korrespondierenden Dreiecksflächenpaarungen mit farblicher Kennzeichnung der Kontaktkräfte pro Dreiecksfläche (bzw. der daraus resultierenden Drücke) in der DEM-Simulation. Den Dreiecksflächen die blau eingefärbt sind, wird **keine** Kontaktkraft zugeordnet. Die rote Einfärbung gibt an, dass die gesamte Kontaktkraft eines Partikels **einer** angrenzenden Dreiecksfläche zugeordnet wird und die grüne, dass die Kontaktkraft zumindest auf **zwei** angrenzende Dreiecksflächen aufgeteilt wird. Bei dieser Durchmesser-Kanten-Paarung liegen Punktkontakte vor. D. h., es müssten eigentlich alle angrenzenden Dreiecksflächen (in diesem Fall jeweils 6 Flächen) anteilig belastet werden. Die ungleichmäßige Zuordnung der Kontaktkräfte pro Kontaktfläche erzeugt respektive eine ungleichmäßige Verteilung der äquivalenten Knotenkräfte (FEM-Simulation), was letztendlich zu der unsymmetrischen Verteilung der Knotenverschiebungen (vgl. Abb. 13 oben) und der prozentualen Abweichung im Vergleich zur eigenständigen FEM-Simulation führt.

Bei den im Rahmen der Verifizierungs-Simulationen untersuchten Paarungen ergaben sich durch die Anordnung der Partikelpakete zwangsweise Linien- und Punktkontakte mit der kontaktierenden Balkengeometrie. Diese „konstruierten“ Bedingungen liegen in der Regel bei normalen Partikelsimulationen nicht vor.

Inwiefern diese Zuordnungsproblematik gelöst werden kann, ist direkt mit den Entwicklern des DEM-Programms LIGGGHTS® zu klären. Gegebenenfalls sind eigene Lösungen zu erarbeiten. Allerdings ist nochmals darauf hinzuweisen, dass es sich bei Punkt- und Linienkontakten um Sonderfälle des Partikel-Wand-Kontaktes handelt. Die Wahrscheinlichkeit, dass derartiger Kontakte in DEM-Simulationen (häufig) auftreten, ist sehr gering und würde letztendlich das Gesamtergebnis einer gekoppelten Simulation auf Grund der Dynamik auch nicht maßgebend beeinflussen.

Zusammenfassend haben die Verifizierungs-Untersuchungen gezeigt, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen 1 bzw. 6 im Vergleich zu den eigenständigen FEM-Simulationen mit maximalen Abweichungen von 2,3 % sehr gute Endresultate liefern. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Maximalabweichungen in erster Linie auf programminterne (DEM-Programm) Ungenauigkeiten zurückzuführen sind. In der Regel sind Abweichungen deutlich unter 1 % zu erwarten und auf Rundungsfehler bei der Datenübertragung zurückzuführen. Um der erläuterten Zuordnungsproblematik entgegenzuwirken, kann konstatiert werden, dass:

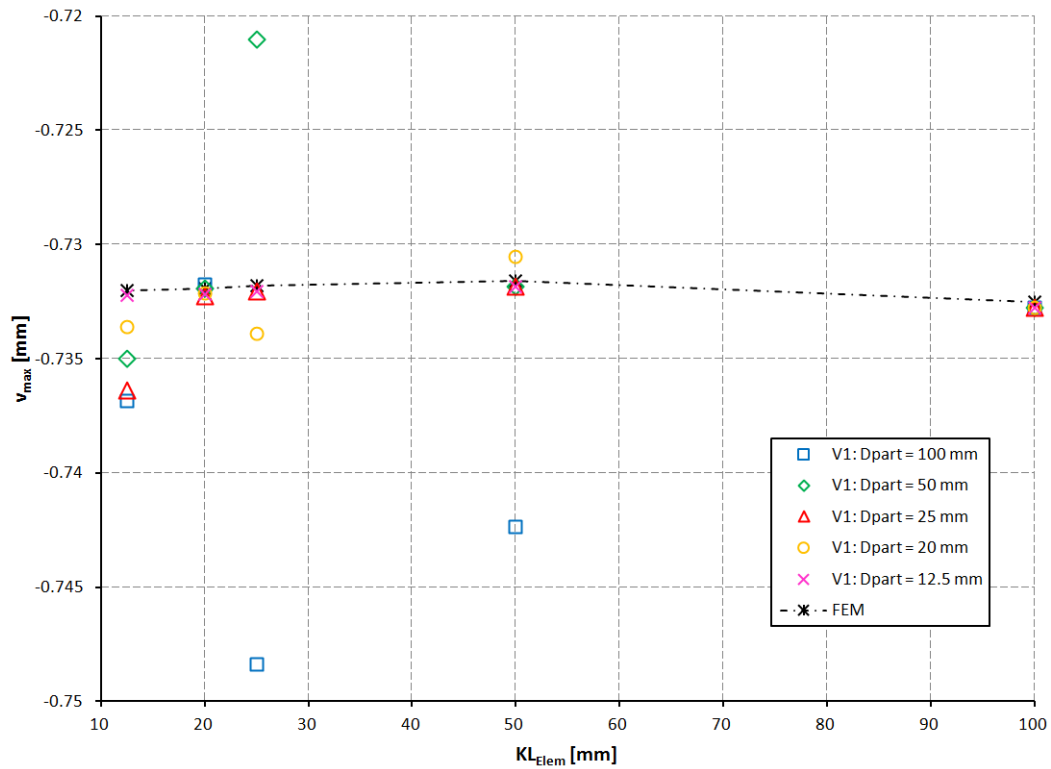
1. die größten Abweichungen bei Durchmesser-Kanten-Verhältnissen von  $D_{Part} / KL_{Elem} > 2$  auftauchen und zu vermeiden sind (vgl. Tabelle 8).
2. von vornherein **ungerade** Durchmesser-Kanten-Verhältnisse gewählt werden sollten, die die Wahrscheinlichkeit von Linien- und Punktkontakte deutlich minimieren.

Allerdings ist abschließend zu bemerken, dass der Einfluss der Zuordnungsproblematik nicht **überbewertet** werden sollte, da:

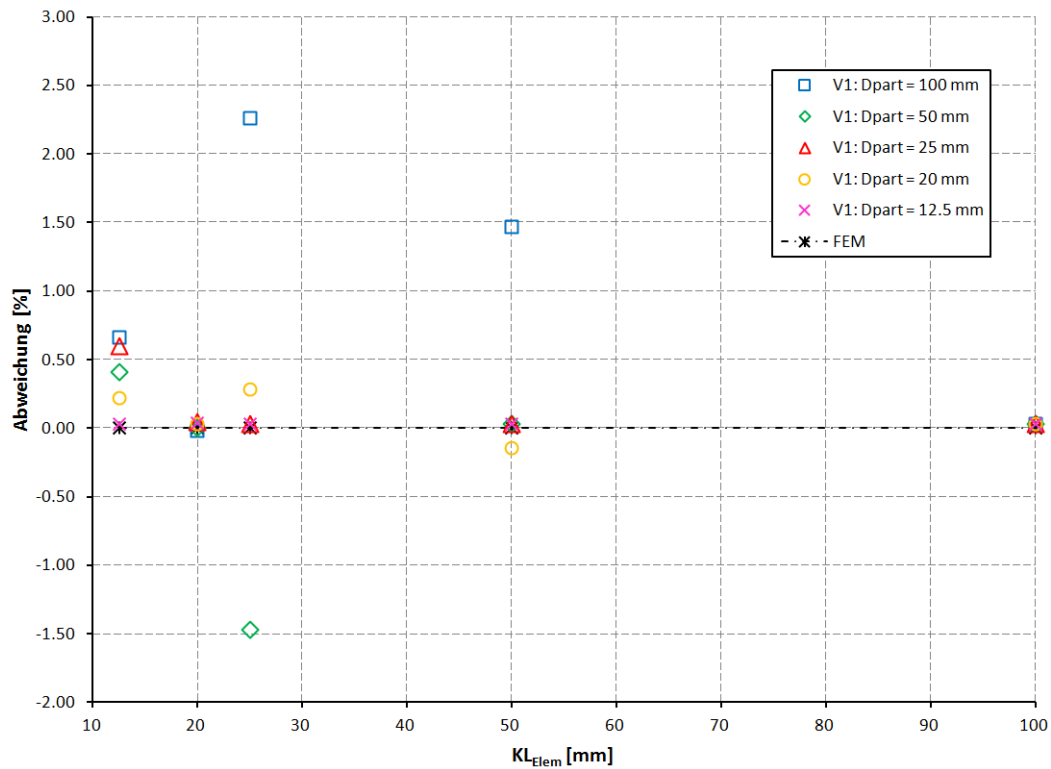
1. Partikelsimulationen in der Regel hoch dynamisch ablaufen und sich dadurch die Kontakte und Kontaktkräfte über die gesamte Simulationszeit stetig verändern. Statische Partikelsimulationen, wie sie für die Verifizierungssimulationen verwendet wurden, sind die Ausnahme.
2. die Vernetzung des Berechnungsgebietes (zu analysierendes Bauteil) in der Regel **nicht** zu regelmäßigen FEM-Netzen (ideal quadratische Form der finiten Elemente) führt, wie sie für die Verifizierungssimulationen erzeugt wurden. Vielmehr werden FEM-Netze mit unregelmäßig angeordneten finiten Elementen entstehen.

Gerade für die Abbildung dynamischer Prozesse mit Hilfe gekoppelter Simulationen ist der Einfluss der **Zuordnungsproblematik** letztendlich als deutlich **unkritisch** einzuschätzen.

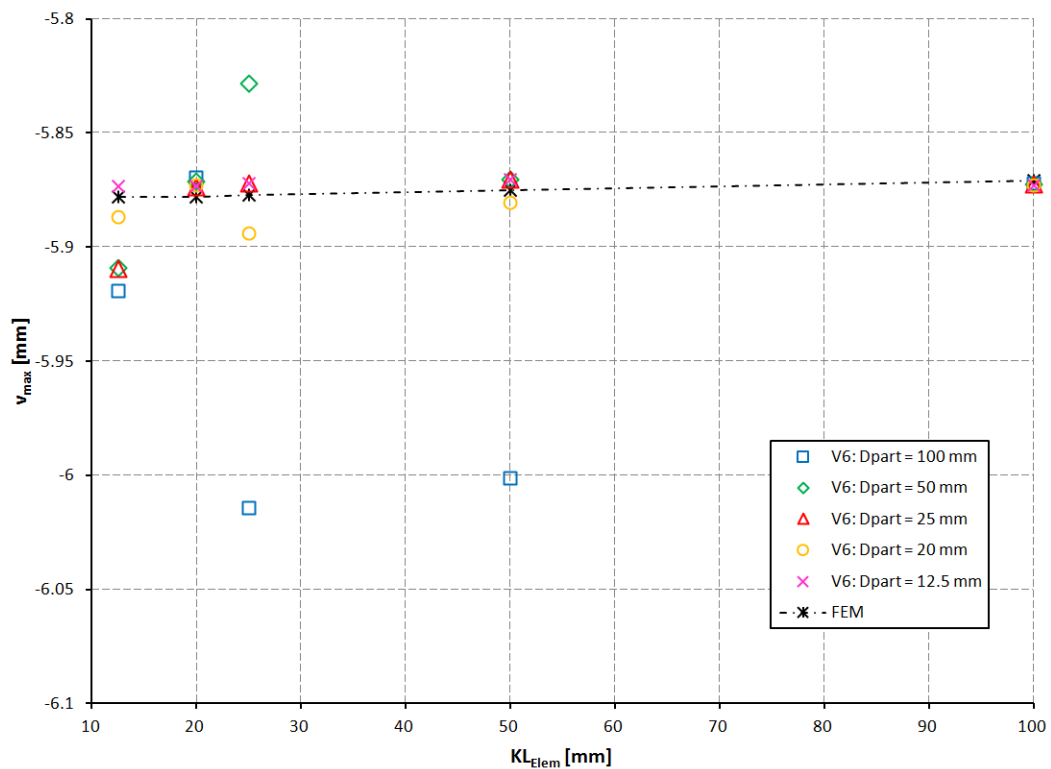
Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen stellen die Ergebnisse der durchgeführten Verifizierungssimulationen detailliert gegenüber.



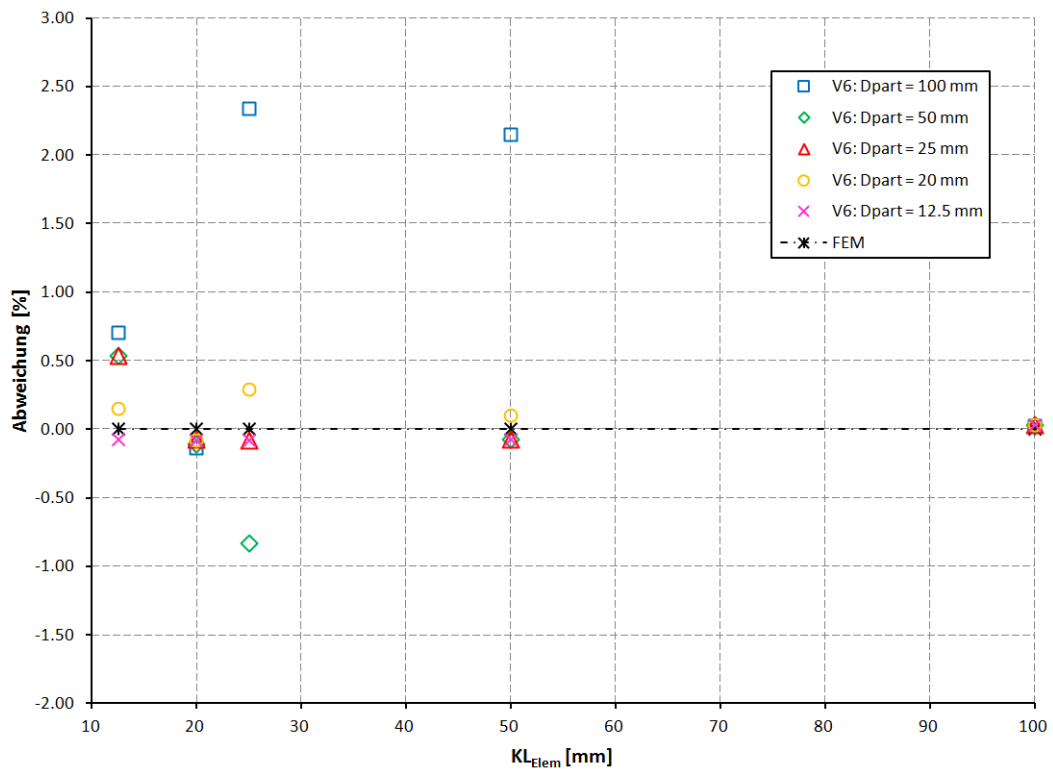
**Abb. 14:** Auswertung der Ergebnisse aller Durchmesser-Kanten-Paarungen für die 1. Versuchsreihe (kleine Verformungen) im Vergleich zu den äquivalenten, eigenständigen FEM-Simulationen (©M.Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 15:** Auswertung der prozentualen Abweichung aller Durchmesser-Kanten-Paarungen für die 1. Versuchsreihe (kleine Verformungen) im Vergleich zu den äquivalenten, eigenständigen FEM-Simulationen (©M.Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 16:** Auswertung der Ergebnisse aller Durchmesser-Kanten-Paarungen für die 6. Versuchsreihe (große Verformungen) im Vergleich zu den äquivalenten, eigenständigen FEM-Simulationen (©M.Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 17:** Auswertung der prozentualen Abweichung aller Durchmesser-Kanten-Paarungen für die 6. Versuchsreihe (große Verformungen) im Vergleich zu den äquivalenten, eigenständigen FEM-Simulationen (©M.Dratt, IBAF GmbH)

**Tabelle 7:** Zusammenfassung der Ergebnisse aller Versuchsreihen

Last:			m = 50 kg = 0.005 N/mm <sup>2</sup> (kleine Verformungen)			m = 500 kg = 0.05 N/mm <sup>2</sup> (große Verformungen)		
Materialdämpfung D <sub>mat</sub> [kg]			0		0.5	0.5	0.1	0
Export der Verformung			aus	an				
Versuchsreihe			1	2	3	4	5	6
Versuchsnr.	KL <sub>Elem</sub> [mm]	D <sub>Part</sub> [mm]	v <sub>1</sub> [mm]	v <sub>2</sub> [mm]	v <sub>3</sub> [mm]	v <sub>4</sub> [mm]	v <sub>5</sub> [mm]	v <sub>6</sub> [mm]
1	100	100	-0.732751	-0.732751	-0.732751	-5.87275	-5.87272	-5.87226
2	50	100	-0.742353	-0.717214	-0.717214	-6.2502	-5.78723	-6.00125
3	25	100	-0.748367	-0.715703	-0.715703	-6.07523	-6.07521	-6.01453
4	20	100	-0.731749	-0.731749	-0.731749	-5.87015	-5.87013	-5.86966
5	12.5	100	-0.736848	-0.724252	-0.724252	-5.97321	-5.97319	-5.91928
6	100	50	-0.732751	-0.735222	-0.735222	-5.86108	-5.86561	-5.87269
7	50	50	-0.731827	-0.689618	-0.689618	-5.89193	-5.91704	-5.87039
8	25	50	-0.721028	-0.700166	-0.700166	-6.15876	-5.9822	-5.82818
9	20	50	-0.731942	-0.732432	-0.732432	-6.01672	-6.09856	-5.87145
10	12.5	50	-0.73502	-0.700508	-0.700508	-6.01729	-6.17145	-5.90926
11	100	25	-0.732751	-0.741447	-0.741447	-5.93858	-5.95251	-5.87275
12	50	25	-0.731827	-0.732762	-0.732762	-5.8764	-5.92409	-5.87045
13	25	25	-0.732039	-0.72158	-0.722659	-5.96557	-5.93223	-5.8723
14	20	25	-0.732261	-0.729277	-0.729072	-6.01647	-5.91508	-5.87375
15	12.5	25	-0.736384	-0.751734	-0.751587	-6.03577	-5.96905	-5.90941
16	100	20	-0.732751	-0.741478	-0.741478	-5.84132	-5.93297	-5.87283
17	50	20	-0.730528	-0.751825	-0.751825	-5.91591	-5.9603	-5.88076
18	25	20	-0.733897	-0.747113	-0.747471	-5.89989	-5.89142	-5.8941
19	20	20	-0.732138	-0.742131	-0.742131	-5.92105	-5.9301	-5.87297
20	12.5	20	-0.733607	-0.738206	-0.738177	-5.88677	-5.9239	-5.8869
21	100	12.5	-0.732751	-0.919123	-0.919123	-5.70635	-5.73594	-5.87279
22	50	12.5	-0.731827	-0.736188	-0.736545	-5.84032	-5.84112	-5.87049
23	25	12.5	-0.732039	-0.73834	-0.73834	-5.90209	-5.89889	-5.87234
24	20	12.5	-0.732194	-0.73543	-0.735429	-5.87934	-5.88646	-5.87332
25	12.5	12.5	-0.732239	-0.730099	-0.731936	-5.89493	-5.91962	-5.87354

**Tabelle 8:** prozentuale Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf die Ergebnisse der eigenständigen FEM-Simulationen

Last:			m = 50 kg = 0.005 N/mm <sup>2</sup> (kleine Verformungen)			m = 500 kg = 0.05 N/mm <sup>2</sup> (große Verformungen)		
Materialdämpfung D <sub>mat</sub> [kg]			0		0.5	0.5	0.1	0
Export der Verformung			aus	an				
Versuchsreihe			1	2	3	4	5	6
Versuchsnr.	KL <sub>Elem</sub> [mm]	D <sub>Part</sub> [mm]	v <sub>1</sub> [%]	v <sub>2</sub> [%]	v <sub>3</sub> [%]	v <sub>4</sub> [%]	v <sub>5</sub> [%]	v <sub>6</sub> [%]
1	100	100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
2	50	100	1.47	-1.97	-1.97	6.39	-1.49	2.15
3	25	100	2.26	-2.20	-2.20	3.37	3.37	2.34
4	20	100	-0.02	-0.02	-0.02	-0.13	-0.13	-0.14
5	12.5	100	0.66	-1.06	-1.06	1.62	1.62	0.70
6	100	50	0.03	0.37	0.37	-0.17	-0.09	0.03
7	50	50	0.03	-5.74	-5.74	0.29	0.72	-0.08
8	25	50	-1.47	-4.32	-4.32	4.79	1.79	-0.83
9	20	50	0.00	0.07	0.07	2.36	3.75	-0.11
10	12.5	50	0.41	-4.30	-4.30	2.37	4.99	0.53
11	100	25	0.03	1.22	1.22	1.15	1.39	0.03
12	50	25	0.03	0.16	0.16	0.02	0.84	-0.08
13	25	25	0.03	-1.40	-1.25	1.51	0.94	-0.08
14	20	25	0.05	-0.36	-0.39	2.36	0.63	-0.07
15	12.5	25	0.60	2.69	2.67	2.68	1.55	0.53
16	100	20	0.03	1.22	1.22	-0.51	1.06	0.03
17	50	20	-0.15	2.76	2.76	0.70	1.45	0.10
18	25	20	0.28	2.09	2.14	0.39	0.25	0.29
19	20	20	0.03	1.40	1.40	0.73	0.89	-0.09
20	12.5	20	0.22	0.85	0.84	0.15	0.78	0.15
21	100	12.5	0.03	25.47	25.47	-2.80	-2.30	0.03
22	50	12.5	0.03	0.63	0.68	-0.59	-0.58	-0.08
23	25	12.5	0.03	0.89	0.89	0.43	0.37	-0.08
24	20	12.5	0.04	0.48	0.48	0.02	0.14	-0.08
25	12.5	12.5	0.03	-0.26	-0.01	0.29	0.71	-0.08



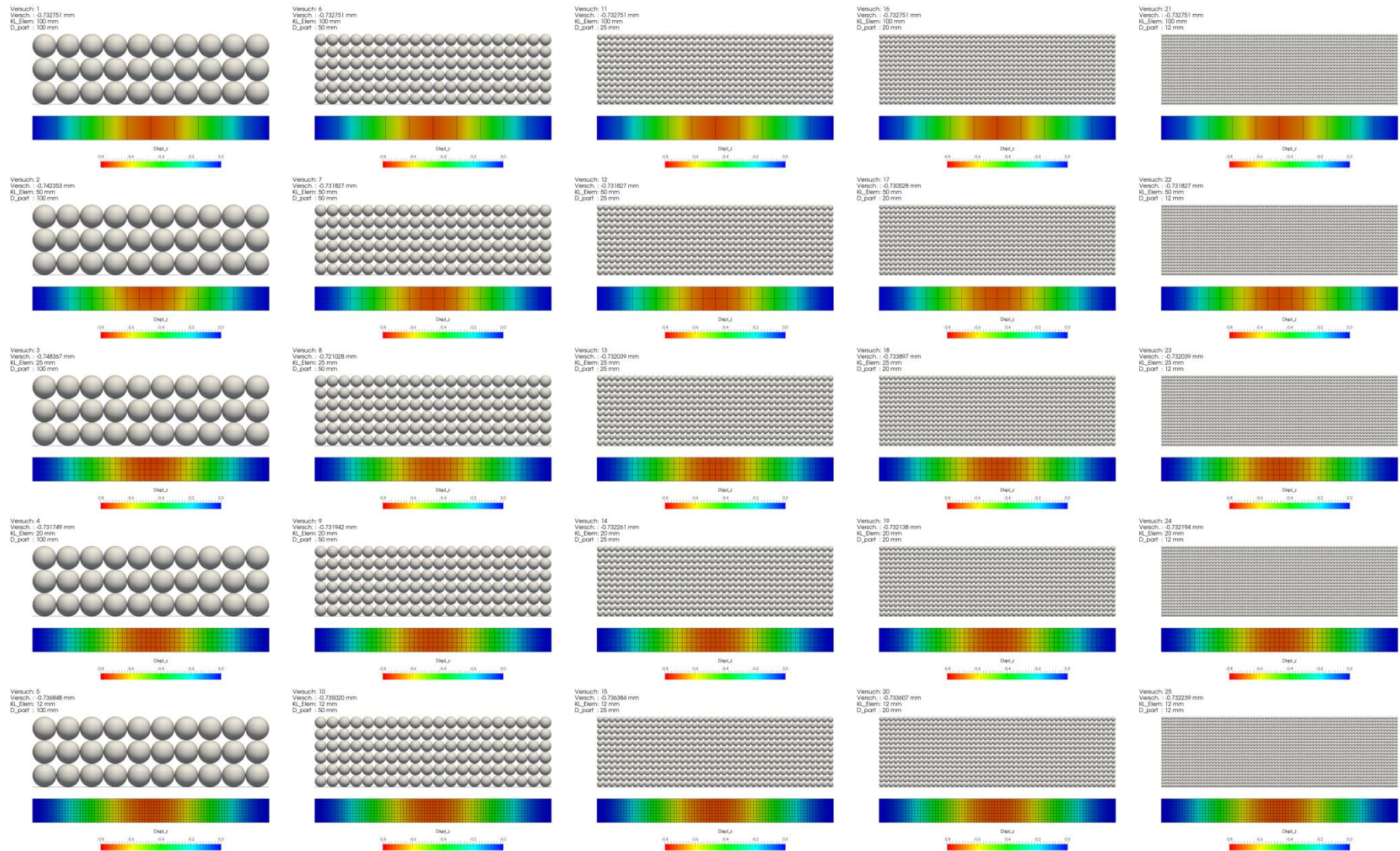


Abb. 18: Ergebnisse der 1.Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)



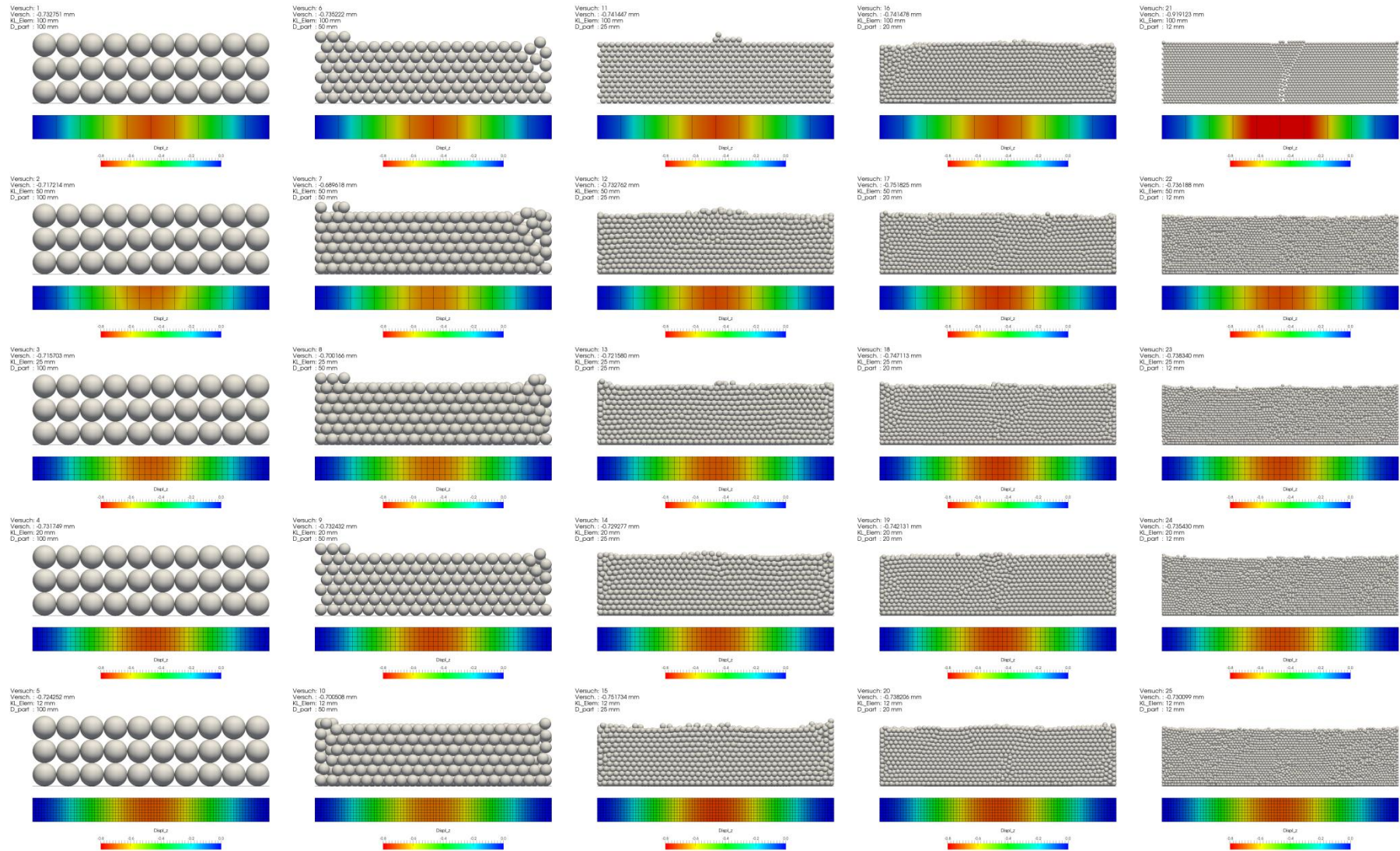


Abb. 19: Ergebnisse der 2.Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)



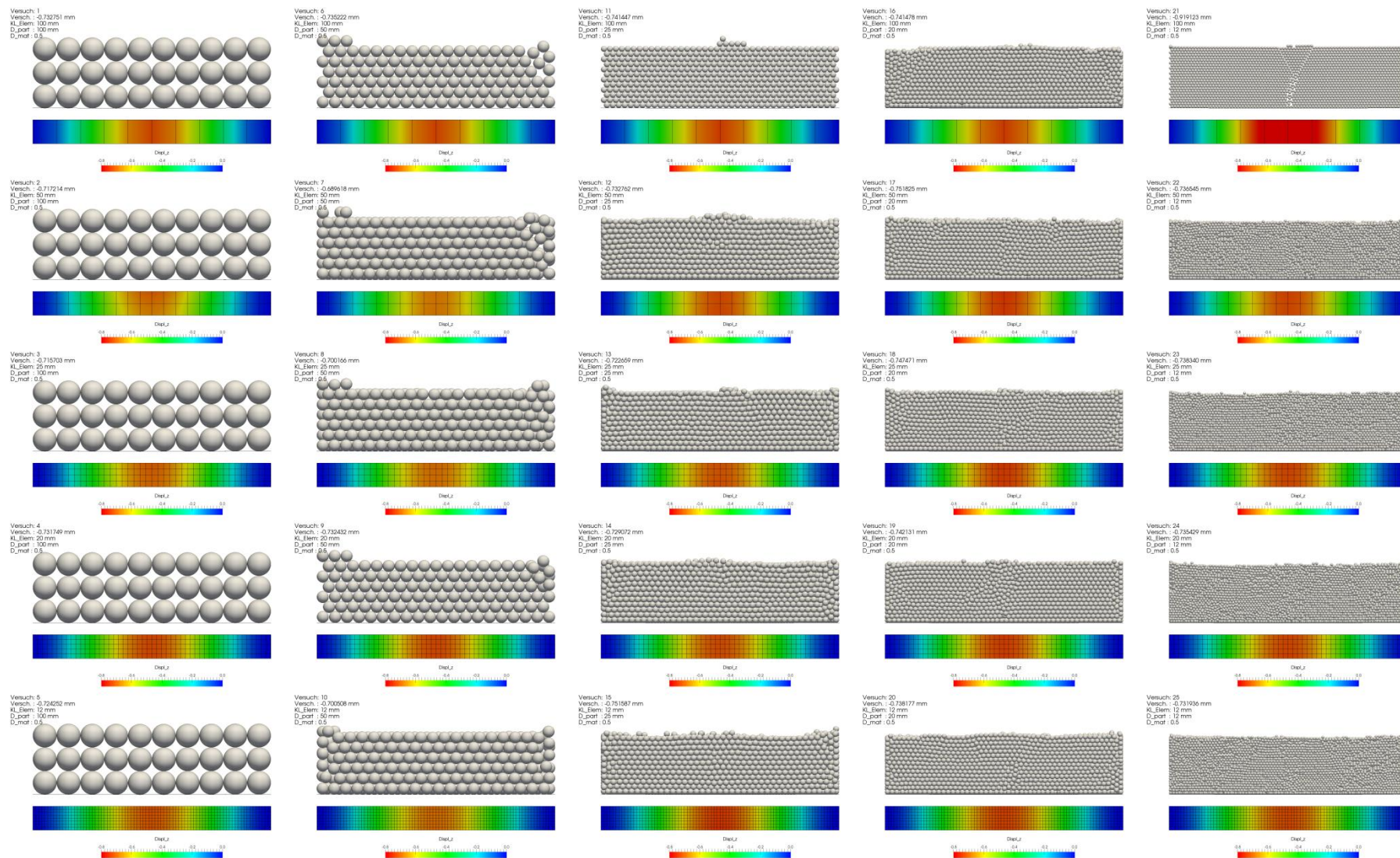


Abb. 20: Ergebnisse der 3.Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)



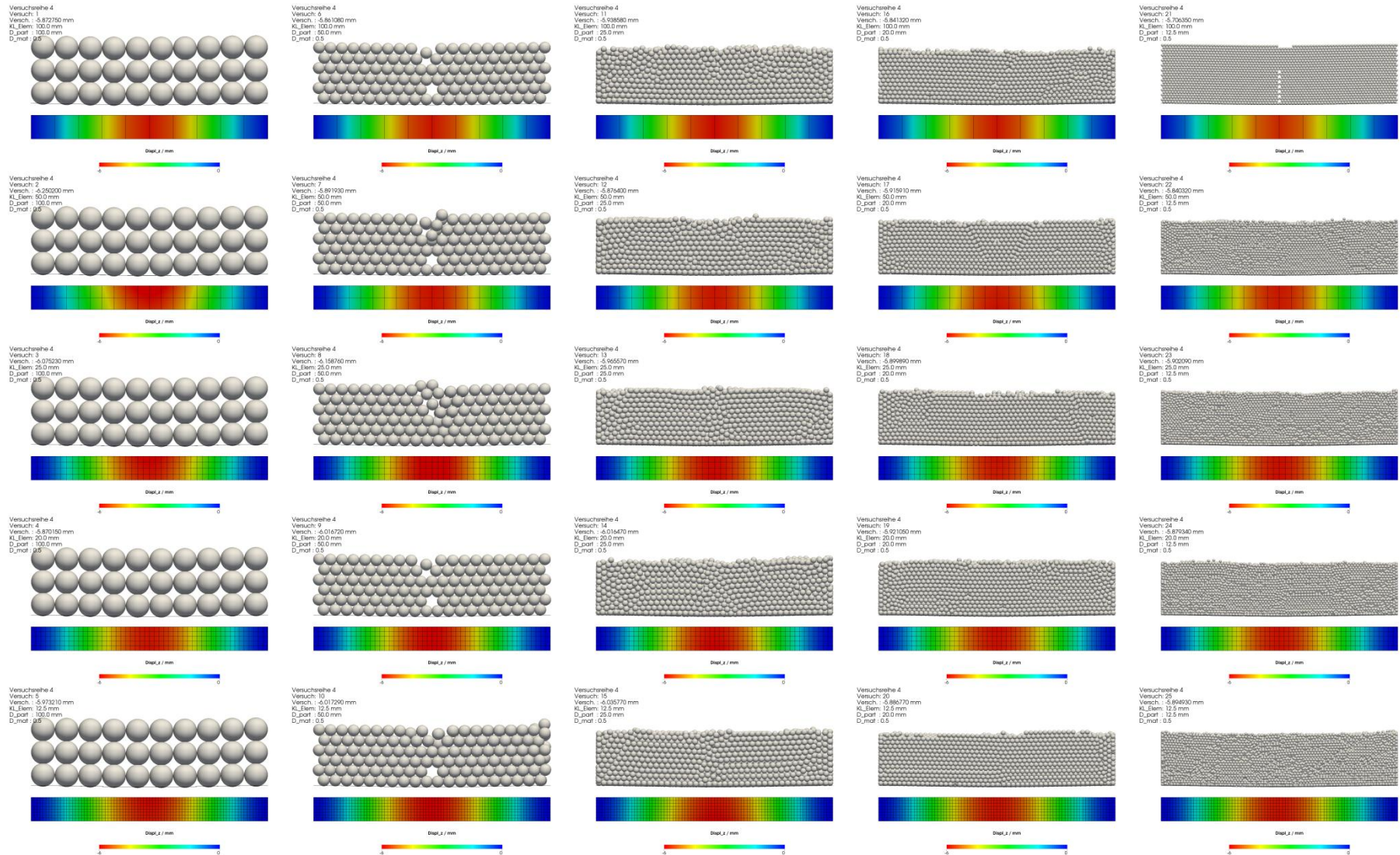


Abb. 21: Ergebnisse der 4.Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)



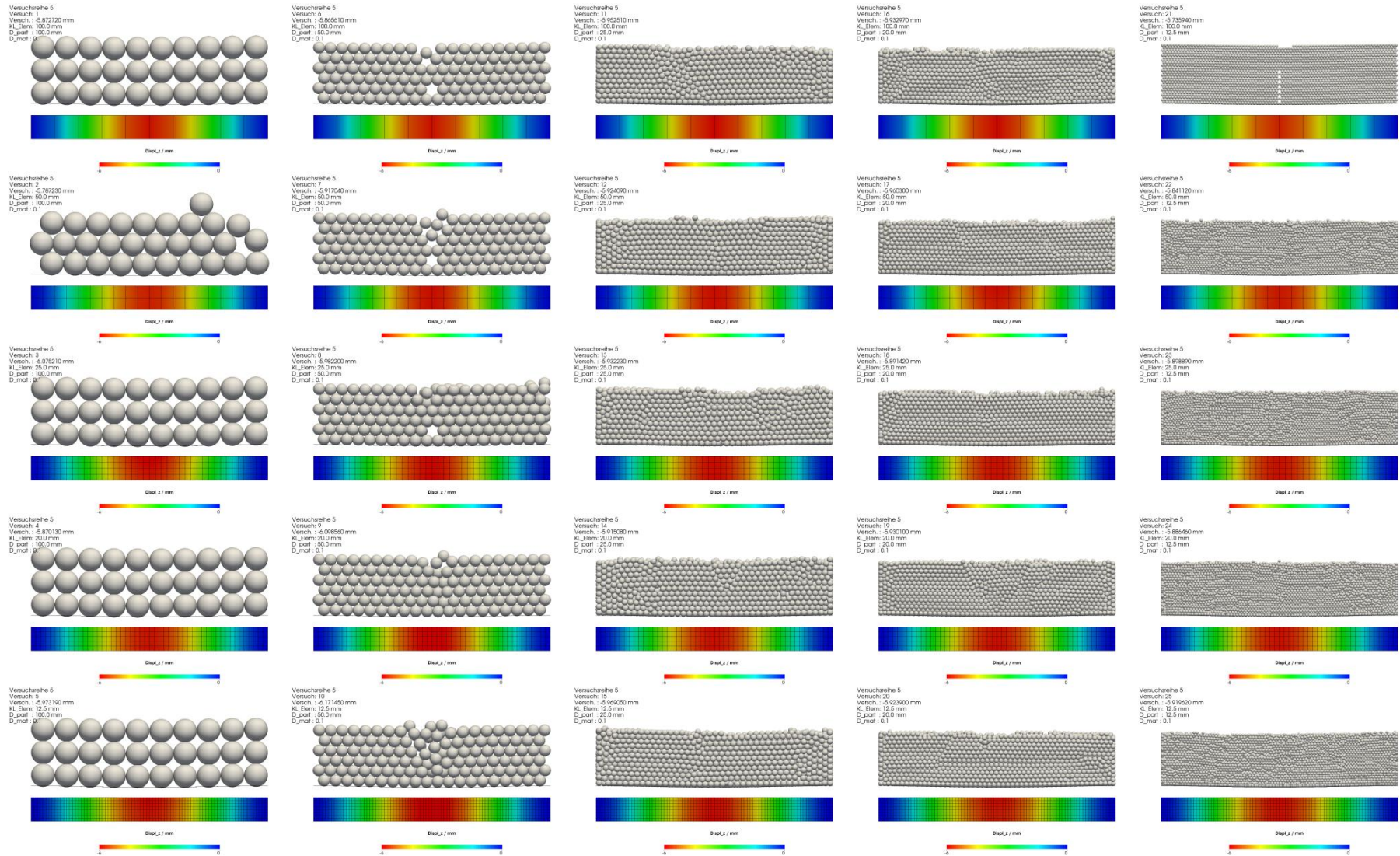


Abb. 22: Ergebnisse der 5.Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)



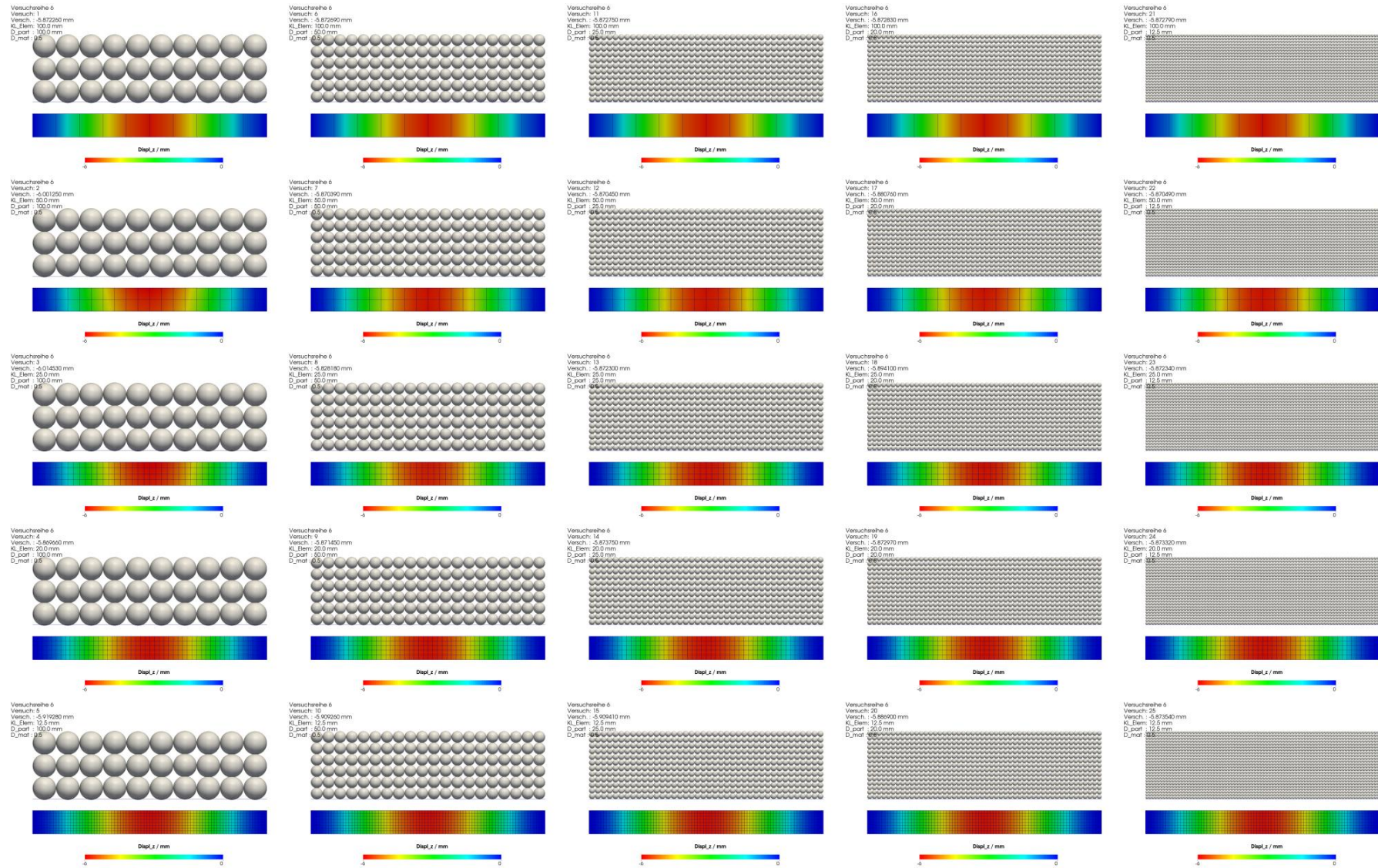


Abb. 23: Ergebnisse der 6. Versuchsreihe (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Nachfolgende Erkenntnisse konnten aus den Verifizierungs-Simulationen gewonnen werden:

### **Versuchsreihen 1-3**

1. Werden kleine Verformungen vorausgesetzt (Theorie I. Ordnung), erhöht die bidirektionale Kopplung lediglich den Rechenaufwand, nicht aber maßgebend die Ergebnisqualität. D.h., in solchen Fällen ist es ausreichend, die Kopplung unidirektional (kein Export der Verformungen) auszuführen.
2. Die FEM-Analyse kann sowohl statisch als auch transient dynamisch erfolgen. In der Regel ist es aber ausreichend, eine statische FEM-Analyse mit stationären Lastdaten aus der DEM-Simulation durchzuführen. Die FEM-Analyse kann zeitlich diskret („steady state“) über die gesamte Simulationszeit erfolgen.
3. Die Berücksichtigung einer Materialdämpfung kann bei aktivierten Massenträgheitseffekten notwendig werden. Für die vorrangig vorgeschlagene „steady state“ Analyse ist aber keine Materialdämpfung notwendig.
4. Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Verifizierungssimulationen ergaben folgende Abhängigkeiten zwischen Partikel- und Elementgröße:
  - Durchmesser-Kanten-Verhältnisse von  $D_{Part} / KL_{Elem} > 2$  sind zu vermeiden
  - grundsätzlich sind **ungerade** Durchmesser-Kanten-Verhältnisse zu wählen
5. In der Regel ist die Wahl eines optimalen Verhältnisses zwischen Partikeldurchmesser  $D_{Part}$  und Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$  bei **dynamischen** Partikelsimulationen aber **nicht** notwendig. Es wird auf die Erläuterungen zur bereits erwähnten programminternen Zuordnungsproblematik verwiesen.

### **Versuchsreihen 4-6**

1. Werden große Verformungen vorausgesetzt (Theorie III. Ordnung) ist eine bidirektionale Kopplung (Export der Verformungen) notwendig, um die Lastverlagerung der Partikel in Folge der Verformung realitätsnah abbilden zu können.
2. Die FEM-Analyse ist transient dynamisch unter Berücksichtigung von Massenträgheitseffekten auszuführen. Entsprechend ist eine Materialdämpfung zu definieren.
3. Die Materialdämpfung hat bei aktivierten Massenträgheitseffekten einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Wird keine, oder nur eine zu geringe Materialdämpfung berücksichtigt, kann sich das System aufschwingen und zu einem unrealistischen Verhalten in der Simulation führen. Die Untersuchungen

haben gezeigt, dass die Kopplungsschrittweite mit  $\Delta t_{FEM} \gg \Delta t_{DEM}$  eine im Vergleich zur Realität deutlich höhere Materialdämpfungen bedingt, um das System schneller zur Ruhe zu bringen. Dabei hat die Materialdämpfung keinen Einfluss auf das Endergebnis (maximaler Durchhang), sondern vielmehr auf den Verformungsablauf (Verformungsgeschwindigkeit).

4. In welchem Maße die Materialdämpfung im Vergleich zur Realität zu erhöhen ist, um auch den Verformungsablauf zeitlich realistisch abbilden zu können, ist mit den noch durchzuführenden Validierungsuntersuchungen und analogen Kopplungssimulationen darzulegen.
5. Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Verifizierungssimulationen ergaben folgende Abhängigkeiten zwischen Partikel- und Elementgröße:
  - Durchmesser-Kanten-Verhältnisse von  $D_{Part} / KL_{Elem} > 2$  sind zu vermeiden
  - grundsätzlich sind ungerade Durchmesser-Kanten-Verhältnisse zu wählen

In der Regel ist die Wahl eines optimalen Verhältnisses zwischen Partikeldurchmesser  $D_{Part}$  und Elementkantenlänge  $KL_{Elem}$  bei dynamischen Partikelsimulationen aber nicht notwendig.

Für die durchgeführten Arbeiten in **AP2 Punkt 2.3 Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen** mussten entgegen der Planung insgesamt zwei Monate mehr aufgewendet werden. Dies begründet sich durch den erhöhten Aufwand bezüglich der beschriebenen Zuordnungsproblematik (siehe oben) und der damit verbundenen zusätzlichen Auswertung von Simulationsergebnissen. Im Gegensatz dazu konnten in **AP3 Punkt 3.2.1 Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes** insgesamt zwei Monate eingespart werden. **Damit entsprechen die durchgeführten Arbeiten wieder der Planung und den eingesetzten Personenmonaten.**

⇒ Das Ziel 5 „*Verifizierung der Schnittstellen*“ wurde erreicht.



- **Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes**

Arbeitsinhalte:

Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes zum Nachweis des Realitätsgrades der gekoppelten Simulationsergebnisse.

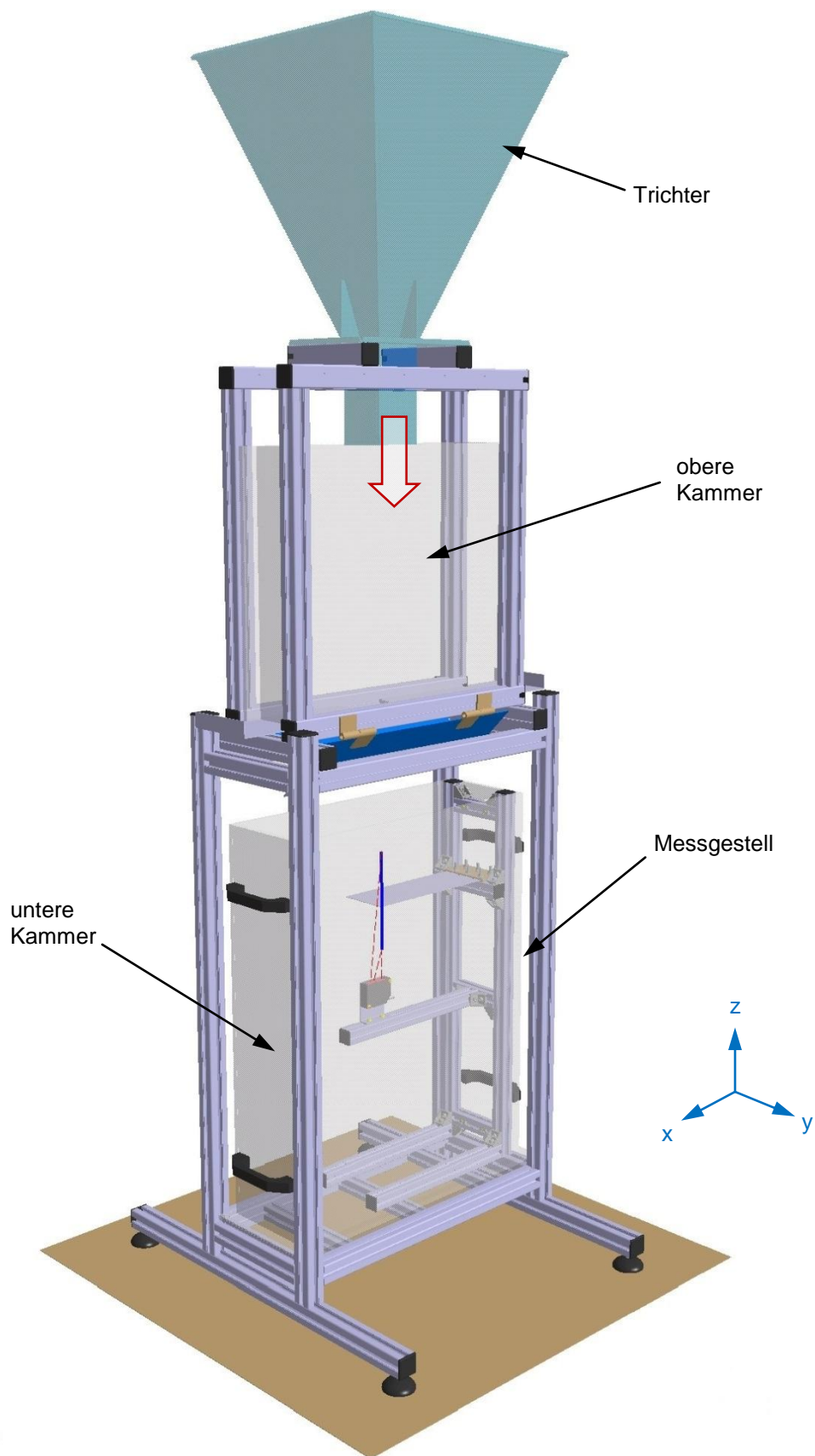
Arbeitsergebnis:

Für die Validierung von Simulationsergebnissen ist ein Versuchstand zur Durchführung experimenteller Untersuchungen vorgesehen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen direkt mit den Ergebnissen analoger, gekoppelter Simulationen verglichen werden.

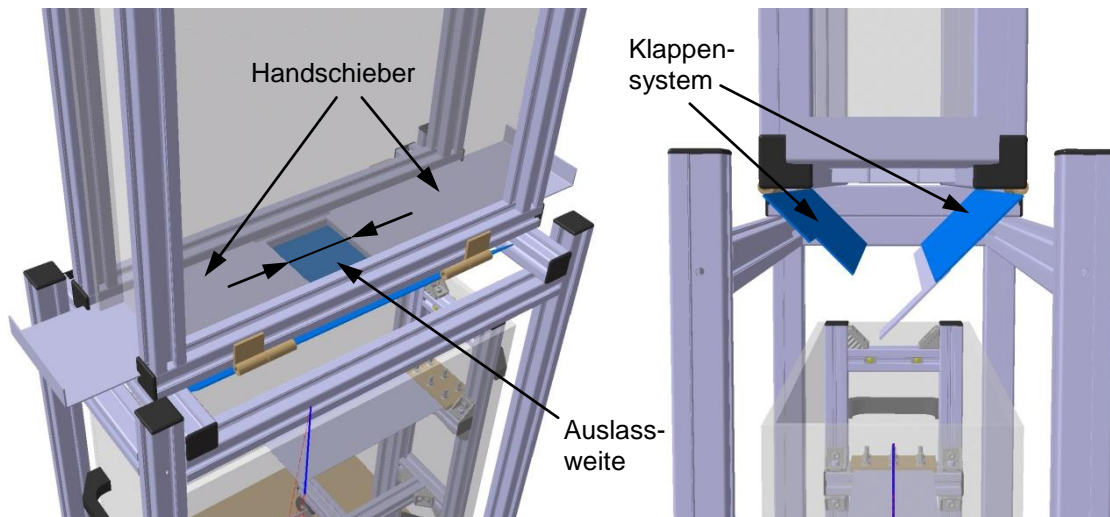
Hierfür wurde eine Kombination aus Durchfluss- und Verformungsversuchsstand im Labormaßstab konstruiert, mit dem die Verformung einer gutstromkontaktierenden, einseitig eingespannten Stahlblech-Probe gemessen werden kann. Die Auswertung der Verformung während des Versuches erfolgt mit Hilfe eines laseroptischen Wegsensors, der unterhalb der Probe angeordnet wird. Zusätzlich wird der jeweilige Versuch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Die optische Auswertung ermöglicht die Messung des sich einstellenden versetzten Böschungswinkels.

Abb. 24 zeigt eine dreidimensionale CAD-Ansicht des gesamten Versuchstands. Über den Trichter wird Versuchsgut mittig in die obere Kammer des Versuchstands eingefüllt. Mit zwei Handschiebern unter der oberen Kammer wird eine definierte Auslassöffnung erzeugt (vgl. Abb. 25 links). Die Breite der Öffnung ist durch die Abmessungen der oberen Kammer mit  $b_{Aus} = 100 \text{ mm}$  festgelegt. Die Länge der Öffnung (Auslassweite) ist durch die Handschieber variabel von  $l_{Aus} = 0 \dots 500 \text{ mm}$  einstellbar. Somit kann auch der Massenstrom  $I_M$  beeinflusst werden. Ist die Auslassweite eingestellt und der Einfüllvorgang abgeschlossen, wird ein Klappensystem (vgl. Abb. 25 rechts), das unter den Handschiebern angeordnet ist, geöffnet. Das Versuchsgut fließt jetzt über die definierte Ausflussöffnung in die untere Kammer ab.

In dieser Kammer, die komplett aus dem Versuchsstand herausgezogen werden kann, ist ein Messgestell (siehe Abb. 27) integriert. Das Gestell ist über Schraubverbindungen fest mit der unteren Kammer verbunden, kann aber problemlos und komplett aus der unteren Kammer demontiert werden.



**Abb. 24:** 3D CAD-Ansicht des gesamten Validierungsversuchsstandes im Labormaßstab zur Messung der Verformung eines gutstromkontaktierenden, einseitig eingespannten Balkens (© M. Dratt, IBAF GmbH)

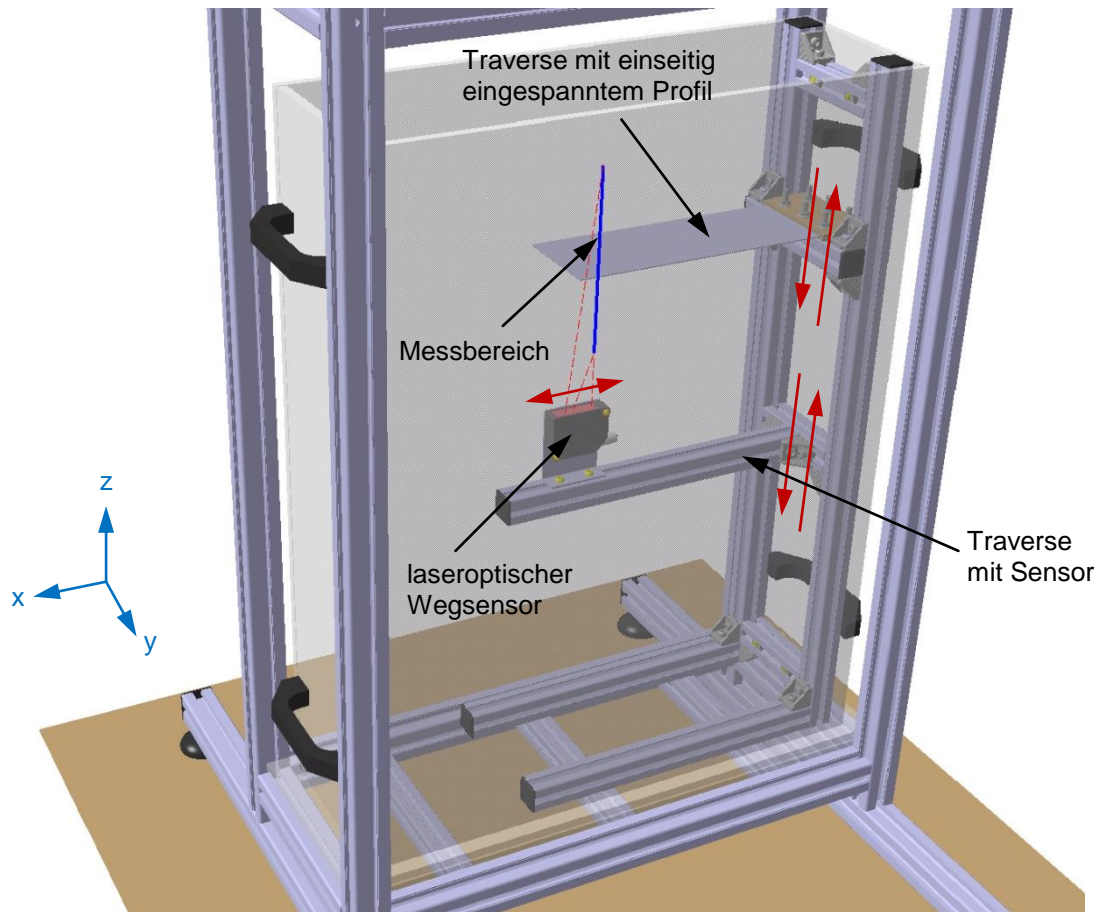


**Abb. 25:** 3D CAD-Detailansichten des Validierungsversuchsstandes. Links: Handschieber zur Einstellung einer definierten Ausflussöffnung. Rechts: Klappensystem unter den Handschiebern (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Das Messgestell besteht aus zwei in z-Richtung verschiebbaren Traversen. Die obere Traverse dient der Aufnahme der Stahlblech-Proben. Die Proben sind zwischen zwei Aufnahmeplatten über Schraubverbindungen mit dem Messgestell verbunden. Die Verbindung erzeugt ein einseitig eingespanntes Balkensystem. Auf der unteren Traverse, unter den Proben, ist ein laseroptischer Wegsensor montiert, der zusätzlich in x-Richtung verschiebbar ist. In Abb. 26 ist der Messbereich des Sensors als blaue Linie dargestellt. Der Messbereich beträgt  $MB = 200$  mm.

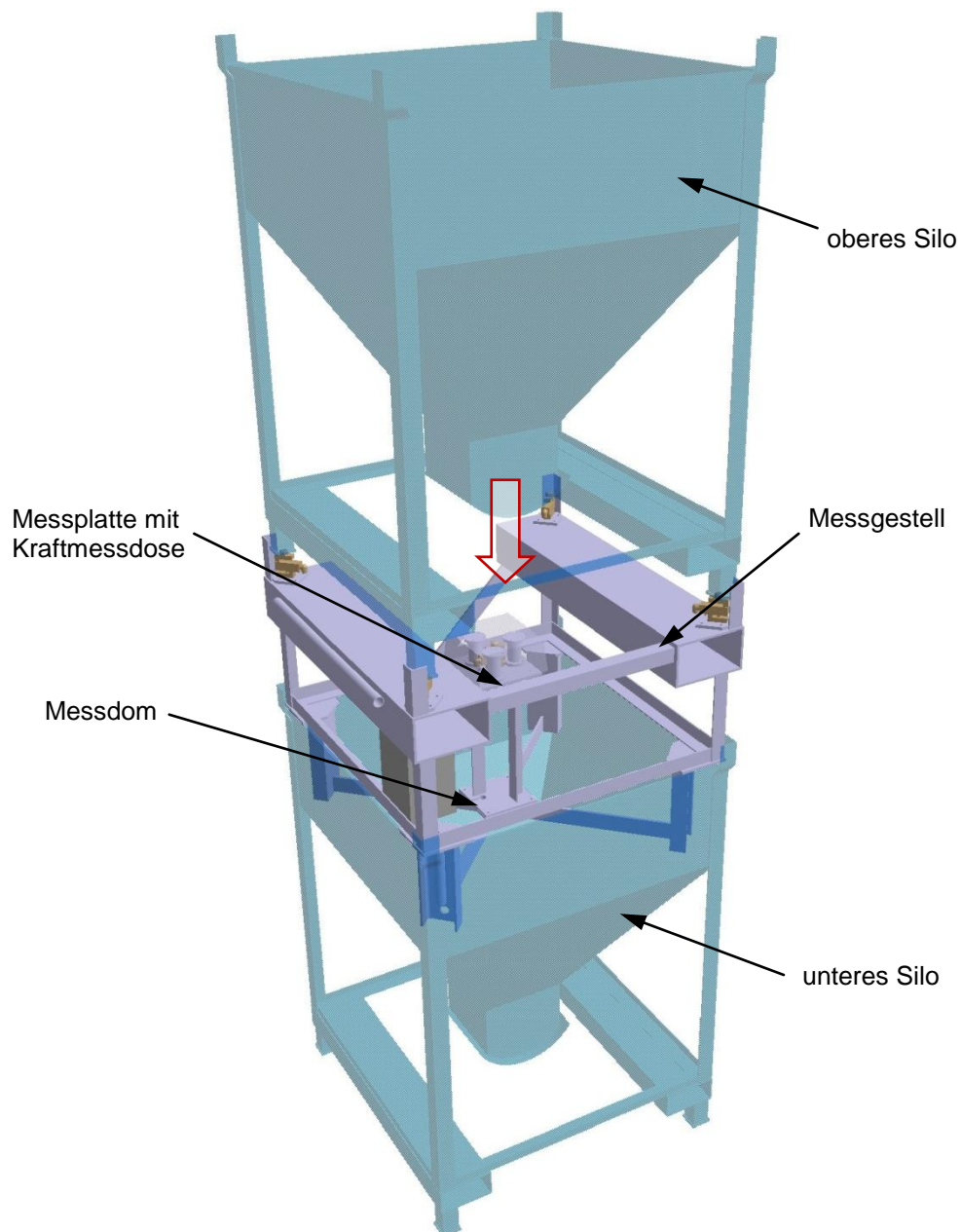
Trifft der Gutstrom auf die Stahlblech-Probe verformt sich diese infolge des Kontakts. Die Größe der Verformung ist abhängig von den Abmessungen der Probe, insbesondere der Blechdicke  $t_{Probe}$ , dem Elastizitätsmodul  $E$ , vom Massenstrom  $I_M$  und von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_{max}$ , die wiederum von der Abwurfhöhe  $h_{max}$  abhängig ist. Die Positionsänderung der Probe wird über die gesamte Dauer des Versuches mit Hilfe des laseroptischen Wegsensors aufgenommen. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit einem geeigneten Messwerterfassungsprogramm (z. B. DIAdem).

Für die experimentellen Versuche sind Proben mit unterschiedlichen Blechdicken  $t_{Probe}$  vorgesehen. Gleichzeitig ermöglicht der Aufbau des Messgestells eine Veränderung der Abwurfhöhe  $h_{max}$ . Zusätzlich kann die Position des Sensors unterhalb der Probe in x-Richtung verändert werden, gegebenenfalls auch der Massenstrom  $I_M$  über die Auslassweite  $I_{Aus}$ .



**Abb. 26:** 3D CAD-Detailansichten der unteren Kammer mit integriertem Messgestell (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Weiterhin wurde seitens der IBAF GmbH zusätzlich ein Messgestell für einen Großversuchsstand (vgl. Abb. 27) konstruiert. Das Konzept sieht vor, zwei stapelbare Kleinsilos mit Staplertaschen und Scherenhebelverschluss übereinander zu stellen, um eine größere Menge Schüttgut (ca.  $0,8 \text{ m}^3$ ) in das untere Silo fließen zu lassen. Die Silos sind beim Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) vorhanden. Zwischen beiden Silos wird das Messgestell angeordnet. Teil des Messgestells ist ein mittig platzierter Messdom, auf dem eine mit einer Kraftmessdose versehene Messplatte montiert ist. Messdom- bzw. -platte liegen direkt im Gutstrom. Ziel der Untersuchungen ist es, die realen Aufprallkräfte auf der Messplatte zu messen und die Ergebnisse anschließend mit den Ergebnissen analoger gekoppelter Simulationen zu vergleichen. Unterhalb der Füße des oberen Silos sind zusätzlich vier Kraftmessdosen vorgesehen, die während des experimentellen Versuchs den Masseverlust messen. Aus diesen Informationen kann auf den realen Massenstrom geschlossen werden.



**Abb. 27:** 3D CAD-Ansicht des Großversuchsstands mit zwei stapelbaren Kleinsilos und dazwischen liegendem Messgestell zur Messung der realen Aufprallkraft (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Für die durchgeführten Arbeiten in AP3 Punkt 3.2.1 zur *Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes* konnten entgegen der Planung insgesamt zwei Monate eingespart werden. Im Gegensatz dazu mussten für AP2 Punkt 2.3 *Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen* insgesamt zwei Monate mehr aufgewendet werden. **Damit entsprechen die durchgeführten Arbeiten und die dafür eingesetzten Personenmonate in Summe wieder der Planung.**

⇒ Das Ziel 6 „*Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes*“ wurde erreicht.



- **Durchführung von Kalibrierungssimulationen**

Arbeitsinhalte:

Durchführung von DEM-Simulationen mit Parametervariation (Partikel-, Roll- und Wandreibwert, ggf. Kohäsionsenergiedichte, Korngrößenverteilung)

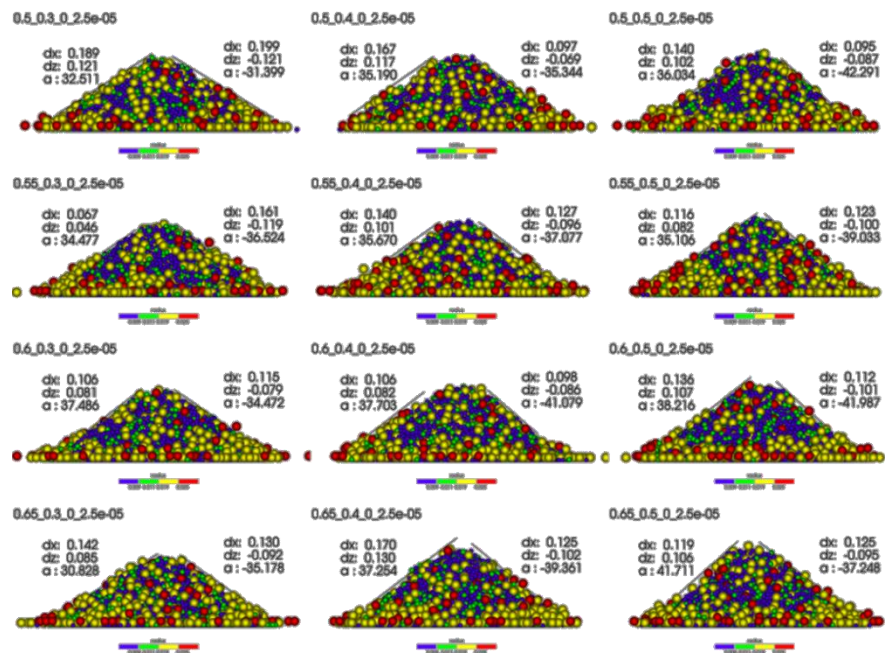
Arbeitsergebnis:

Die Ergebnisse der Kalibrierungssimulationen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) erarbeitet. Auf Grund der sehr engen Verknüpfung zwischen Kalibrierungsuntersuchungen (Schüttgutanalyse) und Kalibrierungssimulationen wurden die Arbeitsergebnisse im Abschlussbericht des ILM zusammengefasst.

Ziel der Kalibrierung ist die realitätsnahe Abbildung der Schüttguteigenschaften in der DEM-Simulation. Der erste Schritt umfasst die Durchführung experimenteller Böschungswinkel- und Durchflussversuche (ILM). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im zweiten Schritt mit den Ergebnissen analoger DEM-Simulationen verglichen (IBAF). Dazu werden die experimentellen Versuche unter Variation der Parameter Partikelreibwert  $\mu_P$  (COULOMB'sche Reibung) und Rollreibwert  $\mu_R$  exakt nachsimuliert. Der Vergleich der Ergebnisse bezieht sich in erster Linie auf die Auswertung des statischen Böschungswinkels  $\varphi_{b,stat}$ . Zusätzlich kann die Durchflusszeit als dynamischer Einflussfaktor herangezogen werden. Die Auswertung kann optisch durch Überlagerung der Versuchs- und Simulationsergebnisse erfolgen. Die Böschungswinkel pro Parameterpaarung können ebenfalls direkt aus den Simulationsdaten abgeleitet und in Höhenliniendiagrammen dargestellt werden (vgl. Abschlussbericht des ILM). Die Ergebnisse gelten für eine definierte Korngrößenverteilung. Aus den Höhenliniendiagrammen können für den gesuchten, experimentell ermittelten Böschungswinkel Parameterpaarungen abgelesen werden, die in den analogen DEM-Simulationen den gleichen Böschungswinkel ergaben. In der Regel gibt es mehrere Parameterpaarungen, die den gleichen Böschungswinkel beschreiben. In Kombination mit den Ergebnissen analoger Durchflusssimulationen kann die Anzahl möglicher Paarungen auf ein Minimum bzw. auf einen Parameterbereich reduziert werden, der letztendlich die Beschreibung eines realitätsnahen Verhaltens der Partikel in der Simulation im Vergleich zum realen Schüttgut gewährleistet.

Für die Abbildung von kohäsionslosem Schüttgut (Kunststoffgranulat) ist es ausreichend die Reibparameter Partikelreibung  $\mu_P$  (COULOMB'sche Reibung) und Rollreibung  $\mu_R$  zu variieren. Das zweite Versuchsgut Steinkohle weist kohäsives Verhalten auf. In diesem Fall muss in der Parametervariation ein zusätzlicher Kohäsions-Parameter  $CED$  (Cohesion-Energy-Density) berücksichtigt werden.

Die folgende Abb. 28 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Böschungswinkelsimulationen für das Schüttgut Steinkohle.



**Abb. 28:** Ergebnisse der Böschungswinkelsimulationen für Steinkohle

⇒ Das Ziel 7 „Bestimmung von Parameterpaarungen die ähnliche Ergebnisse wie die Laboruntersuchungen des ILM zeigen“ wurde erreicht.

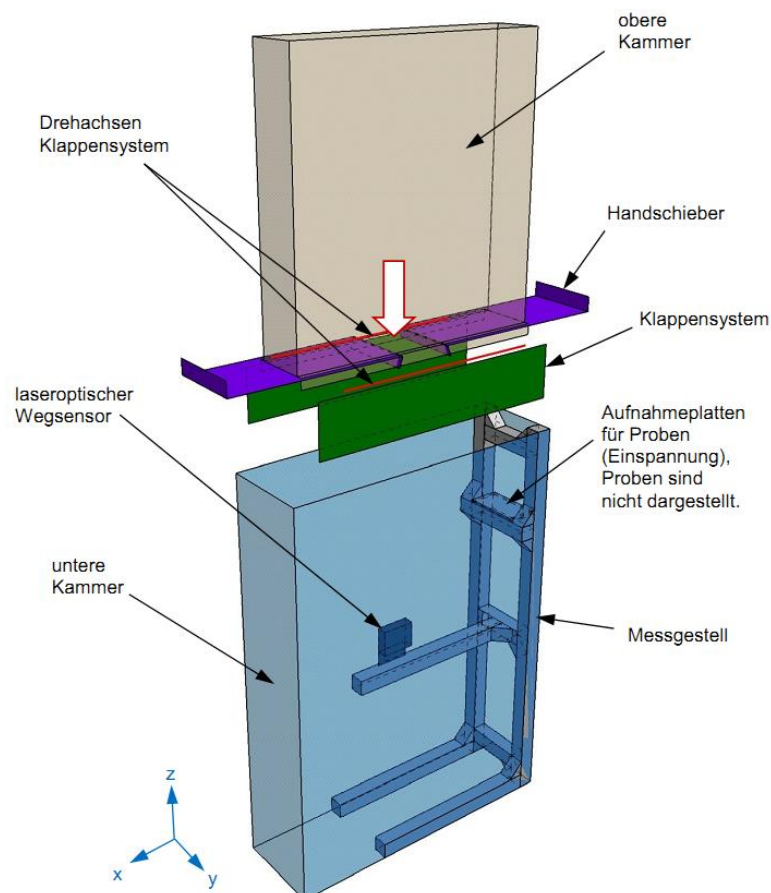
- **Durchführung von gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulationen**

Arbeitsinhalte:

Durchführung einer gekoppelten DEM-MKS-FEM Simulation mit dem in den vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelten Geometriemodell des Validierungsversuchsstandes und den kalibrierten Schüttgutparametern.

Arbeitsergebnis:

Für den Vergleich der Ergebnisse der in AP3 Punkt 3.1.3 durchgeführten experimentellen Versuche wurden analoge gekoppelte Simulationen des Validierungsversuchsstandes durchgeführt. Dazu wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das alle drei Simulationsmethoden miteinander verknüpft und somit die Validierung der entwickelten Kopplung ermöglicht. Beim Validierungsversuch strömt Schüttgut aus einem mittels Klappenverschluss schnell öffnenden oberen Vorratsbehälter über einen Biegebalken und verformt diesen. Das vereinfachte Geometrie-Modell des Validierungsversuchsstands ist in Abb. 29 dargestellt.

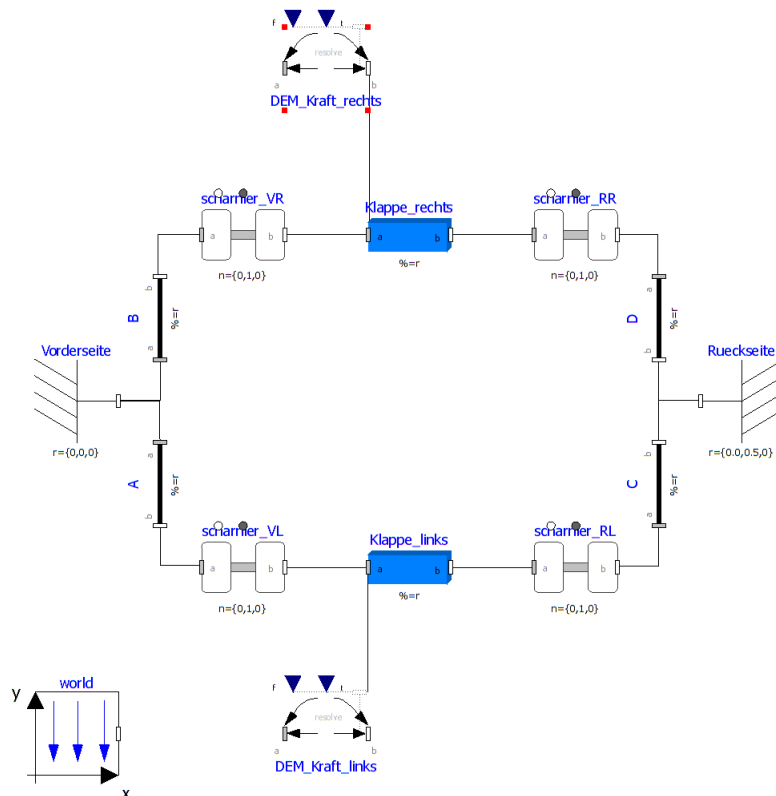


**Abb. 29:** Vereinfachtes 3D CAD-Geometriemodell des Validierungsversuchsstandes für die Ableitung der einzelnen Baugruppen als STL-Dateien. (© M. Dratt, IBAF GmbH)



Grundlage des DEM-Simulationsmodells ist die Ableitung der gutkontaktierenden Oberflächen (siehe Abb. 29). Dazu wurde das vorhandene 3D-CAD-Modell des Validierungsversuchsstandes vereinfacht und die notwendigen Baugruppen als STL-Dateien abgeleitet. In diesem vereinfachten Geometrie-Modell sind die Systemparameter Abwurfhöhe  $h_{max}$  und Auslassweite  $l_{Aus}$  bereits berücksichtigt. Neben den Baugruppen obere Kammer, Handschieber, Klappensystem und untere Kammer wurde auch eine vereinfachte Darstellung des Messgestells, mit dem Ziel das Fließverhalten realistisch abbilden zu können, in das Simulationsmodell übernommen.

Für die Klappenöffnung, deren zeitliche Charakteristik das Ausflussverhalten des Schüttgutes maßgeblich bestimmt, wurde ein einfaches Mehrkörpermodell entwickelt, das die Öffnung aufgrund des Eigengewichts der Klappen und des Schüttgutgewichts berücksichtigt. Das Mehrkörpermodell (siehe Abb. 30), das mit Hilfe der Software OpenModelica erstellt wurde und über den Export einer Functional Mockup Unit (FMU) mit der DEM-Simulation gekoppelt wird, steht jedoch nicht im Mittelpunkt der Untersuchungen.

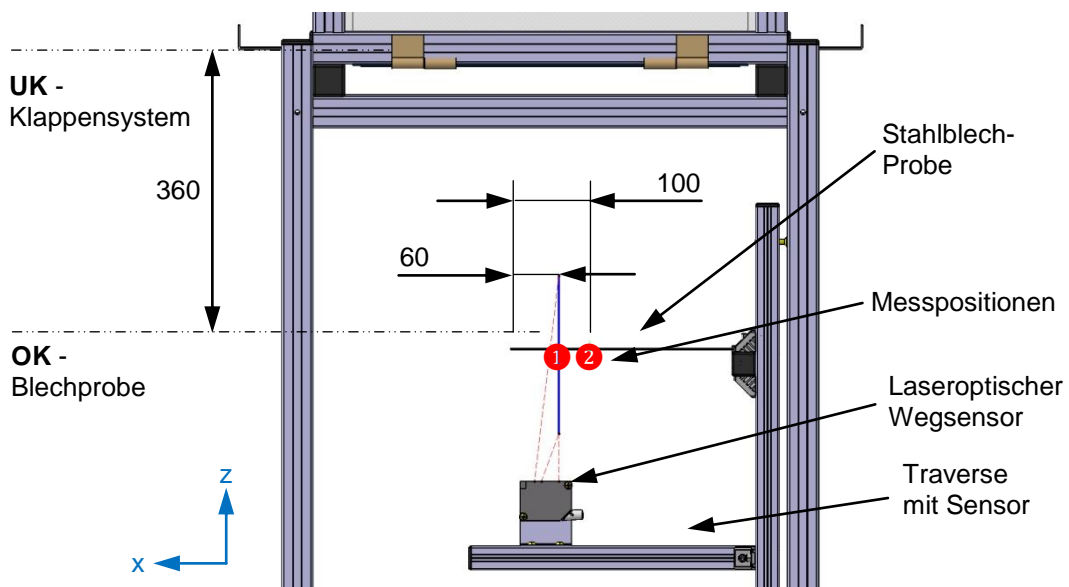


**Abb. 30:** Mehrkörpersimulationsmodell des Klappensystems erstellt mit OpenModelica

Stattdessen konzentrieren sich die Untersuchungen auf das Verformungsverhalten des Biegebalkens, dessen dynamische Verformung unter der Beanspruchung des Schüttgutes mit Hilfe der FEM-Simulation berechnet wird.

Alle notwendigen System- und Schüttgutparameter des experimentellen Versuchsaufbaus wurden für das Simulationsmodell übernommen. Neben dem Schüttgut Kunststoffgranulat LDPE wurden zusätzlich die Schüttgüter Weizen und granuliertes Kalisalz beprobt.

In den Simulationen erfolgt die Messung der Verformung für die zwei Messpositionen  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$  und  $100 \text{ mm}$  gleichzeitig (siehe Abb. 31).



**Abb. 31:** Detailansicht mit Definition der Abwurfhöhe  $h_{max}$  und der Mess-Positionen

Das bedeutet, dass für zwei experimentelle Versuche lediglich eine gekoppelte Simulation notwendig gewesen ist.

Für die Validierungsuntersuchungen wurden vier Proben unterschiedlicher Dicke mit:

- **Probe I:**  $t_{Probe} = 2 \text{ mm}$
- **Probe II:**  $t_{Probe} = 1,5 \text{ mm}$
- **Probe III:**  $t_{Probe} = 1 \text{ mm}$
- **Probe IV:**  $t_{Probe} = 0,75 \text{ mm}$

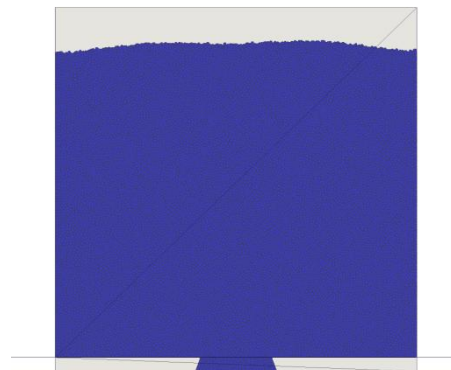
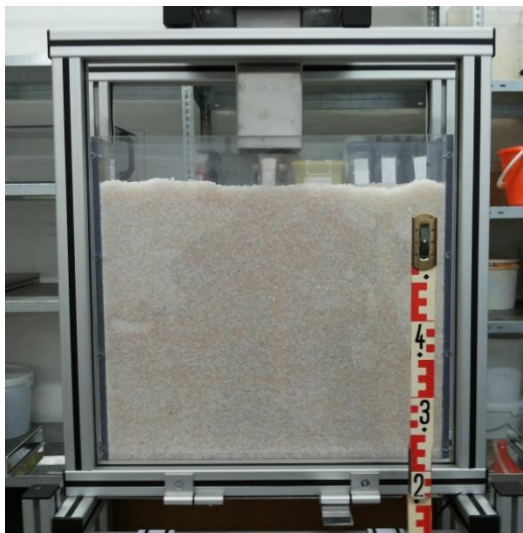
aus verzinktem Stahlblech berücksichtigt.

Daraus ergeben sich in der Übersicht (vgl. Tabelle 9) insgesamt vier Simulationsreihen (SR).

**Tabelle 9:** Zusammenfassung der durchgeführten Simulationsreihen (SR) im Vergleich zu den experimentellen Versuchsreihen (VR)

SR-Nr.:	VR-Nr.:	Probe	Schüttgut	$l_{Aus}$ [mm]	$l_{LMP}$ [mm]	$m_{Ges}$ [kg]
SR01	VR01	I...IV	Kunststoffgranulat	40	60	6
	VR02	I...IV	Kunststoffgranulat	40	100	6
SR02	VR03	I...IV	Weizen	40	60	6
	VR04	I...IV	Weizen	40	100	6
SR03	VR05	I...IV	granuliertes Kalisalz	40	60	10
	VR06	I...IV	granuliertes Kalisalz	40	100	10
SR04	VR07	III	Kunststoffgranulat	100	60	13
	VR08	III	Kunststoffgranulat	100	100	13

Der Trichter zur Befüllung des experimentellen Versuchsstandes ist in der Simulation nicht zwingend notwendig. Um ein gleichmäßiges Gutbett zu erzeugen, erfolgt die Generierung der Partikel direkt über der oberen Kammer. In den experimentellen Versuchen wurde dazu das Gutbett nach dem Befüllen durch den Trichter per Hand begradigt. Abb. 32 zeigt die Gegenüberstellung des abgerieselten Gutbetts im experimentellen Versuch sowie in der gekoppelten Simulation repräsentativ für das Schüttgut Kunststoffgranulat mit einer Gesamtmasse von  $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$  (VR07; VR08; SR04).



**Abb. 32:** Links: abgerieseltes Gutbett im experimentellen Versuch (VR07-VR08); Rechts: abgerieseltes Gutbett in der analogen, gekoppelten Simulation (SR04). (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Im FEM-Simulationsmodell muss lediglich die Geometrie der Stahlblech-Probe ( $L \times B$ :  $340 \times 100 \text{ mm}$ ) analog der Position im DEM-Simulationsmodell modelliert werden. Die jeweilige Dicke der Proben I-IV wird über die imaginäre Elementdicke der Schalenelemente eingestellt. Die Vernetzung erfolgt mit einer Elementkantenlänge von  $10 \text{ mm}$ . Als Randbedingung werden an einem Ende der Probe im Bereich von  $L \times B$ :

60x100 mm alle Freiheitsgrade der Knoten (translatorisch sowie rotatorisch) gesperrt. Das entspricht der geforderten Einspannung eines einseitig eingespannten Balkens und modelliert realitätsgetreu die Einspannungsfläche zwischen den Aufnahmeplatten im experimentellen Versuch.

Die Messung der Verformung erfolgt analog den markierten Messpositionen unterhalb der Proben (siehe Abb. 31) an definierten Messknoten. Die Bewegung der Messknoten in Bezug auf das globale Koordinatensystem während des Verformungsvorgangs in der Simulation wird im Vergleich zum experimentellen Versuch vektoriell gegengerechnet.

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind alle erforderlichen System- bzw. Partikel-Parameter für die Simulationen des Validierungsversuchsstandes zusammengefasst.

**Tabelle 10:** Zusammenfassung der Systemparameter des Validierungsversuchsstandes

Beschreibung	Wert
Abwurfhöhe, $h_{max}$ [mm]	360
Auslassweite, $l_{Aus}$ [mm]	40/100
Mess-Positionen, $l_{LMP}$ [mm]	60/100
Klappenöffnungszeit, $t_{flap}$ [s]	0,2
Dicke der Stahlblech-Proben (Probe I...IV), $t_{Probe}$ [mm]	2/1,5/1/0,75
Abmessung der Stahlblech-Proben, $LxB$ [mm]	340x100
Einspannungsfläche der Stahlblech-Proben, $LxB$ [mm]	60x100
Elastizitätsmodul, $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	185.000
Querkontraktionszahl, $\nu$ [-]	0,3
Materialdichte, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Elementkantenlänge, $KL_{ELEM}$ [mm]	10
FEM-Zeitschritt, $\Delta t_{FEM}$ [s]	0,001
DEM-Zeitschritt, $\Delta t_{DEM}$ [s]	2,5e-5/1,0e-5

**Tabelle 11:** Zusammenfassung der Partikel-Parameter für die gekoppelten Simulationen des Validierungsversuchsstandes

Eigenschaft/Schüttgut	Kunststoffgranulat	Weizen	granuliertes Kalisalz
Schüttdichte, $\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	577	743	971
Gesamtmasse, $m_{Ges}$ [kg]	6/13	6	10
Partikelgrößenverteilung, $d_k$ [mm]	3,15...4,0	3,0...5,0	2,5...6,0
Wandreibwert, $\mu_{W,Probe}$ [-] (Schüttgut vs. verz. Stahlblech)	0,148	0,215	0,208
Wandreibwert, $\mu_{W,Plexiglas}$ [-] (Schüttgut vs. Plexiglas)	0,22	0,26	0,183
Porosität, $\varepsilon$ [-]	0,385	0,402	0,487
Coulombsche Reibung, $\mu_P$ [-]	0,12	0,17	0,8
Rollreibung, $\mu_R$ [-]	0,3	0,18	0,5
Partikelsteifigkeit (E-Modul), $E_{Part}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10		
Querkontraktionszahl, $\nu$ [-]	0,3		

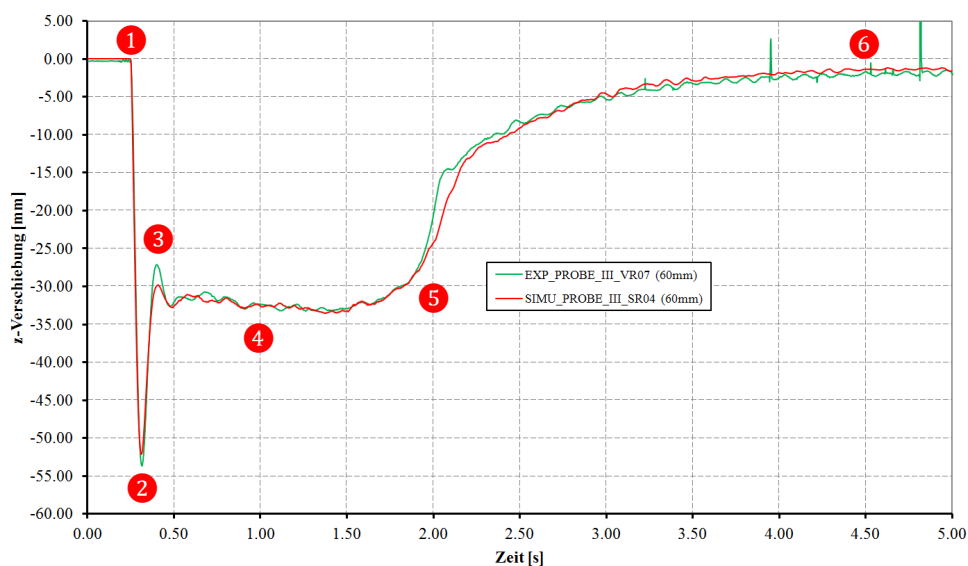
Im Folgenden wird zur besseren Übersicht der Simulationsablauf mit den 6 Punkten des experimentellen Versuchsablaufs verglichen. Als repräsentatives Beispiel dient die Versuchsreihe VR07 mit dem Schüttgut Kunststoffgranulat, einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$ , einer Gesamtmasse von  $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$ , an der Mess-Position  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$  und mit der Probe III ( $t_{Probe} = 1 \text{ mm}$ ). Diese Kombination entspricht der Simulationsreihe SR04 (siehe Tabelle 9).

Der Vergleich erfolgt zunächst anhand der Messwerte der Verformung des Biegebalkens (siehe Abb. 33) und der Gegenüberstellung von Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen und Simulationsbildern.

1. Nach 0,2 s ist das Klappensystem komplett geöffnet. Die ersten Partikel treffen bei ca. 0,25 s auf die eingespannte Probe (vgl. Punkt ① in Abb. 33 und Abb. 34a). Die Anfangsmasse ist, wie im experimentellen Versuch, nicht äquivalent des nachfolgenden Massestroms. Grund hierfür ist die zusätzliche Schüttgutmasse, die sich zwischen geöffneten Handschiebern und Klappensystem befindet.
2. Der aus der Anfangsmasse resultierende Impuls erzeugt mit ca.  $z_{max,Simu} = -52 \text{ mm}$  bei ca. 0,31 s die max. Verformung (bezüglich der Mess-Position bei  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$ ) während der gesamten Simulation (vgl. Punkt ② in Abb. 33 und Abb. 34b). Das entspricht annähernd der max. Verformung im experimentellen Versuch mit ca.  $z_{max,Exp} = -53,5 \text{ mm}$ .
3. Die abrupte Reduzierung der Masse durch den sich einstellenden konstanten Massenstrom erzeugt bei ca. 0,41 s auch in der Simulation ein Zurückschwingen

der Probe (vgl. Punkt ③ in Abb. 33 und Abb. 34c). An diesem Punkt stellt sich für kurze Zeit eine geringere Verformung als im nachfolgenden stationären Zustand (vgl. Punkt ④ in Abb. 33 und Abb. 34d) ein. Auch hier stimmen die Werte mit  $z_{Simu} = -30 \text{ mm}$  und  $z_{Exp} = -27 \text{ mm}$  annähernd überein.

4. Der konstante Massenstrom (stationärer Zustand) erzeugt von ca. 0,5-1,05 s eine konstante Verformung der Probe (vgl. Punkt ④ in Abb. 33 und Abb. 34d). Der Mittelwert liegt hier sowohl für den experimentellen Versuch als auch für die Simulation bei ca.  $\Delta z = -32,5 \text{ mm}$ .
5. Nach ca. 2 s ist der Großteil des Schüttgutes aus der oberen Kammer geflossen. Der Massenstrom und die daraus resultierende Verformung der Stahlblech-Probe reduziert sich (vgl. Punkt ⑤ in Abb. 33 und Abb. 34e) nichtlinear bis ca. 4 s. Die Graphen der Simulation und des Experiments verlaufen annähernd gleich.
6. Der End-Verformungszustand der Probe wird ab ca. 4 s nur noch durch das auf der Probe liegende Restgut beeinflusst (vgl. Punkt ⑥ in Abb. 33 und Abb. 34f). Auch hier ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erkennen.



**Abb. 33:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die Probe III mit Kunststoffgranulat ( $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

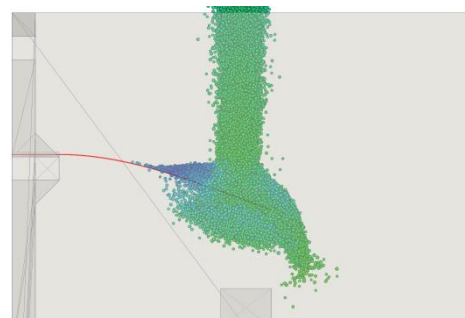
Neben den Verformungsverläufen in Abb. 33 zeigt die synchronisierte Bildabfolge ( $t_{Exp} = t_{Simu}$ ) in Abb. 34a-f auch optisch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Simulationsablauf. Damit die Verformung der Probe besser zu erkennen ist, wurden die Partikel bei der Erstellung der Einzelbilder in der Simulation leicht transparent dargestellt. Die Einfärbung der Partikel entspricht der Partikelgeschwindigkeit.



Die Gegenüberstellung in Abb. 34a-c zeigt keine signifikanten Unterschiede im Fließverhalten des Schüttgutes. Erst in Abb. 34d-e werden geringfügige Unterschiede im Fließverhalten sichtbar. Das betrifft insbesondere die Position des linken der drei Sekundärströme nach der Aufteilung des Primärstroms durch die Probe. Deutlich wird der Unterschied auch in der Positionierung des Restgutes auf der Probe (vgl. Abb. 34f). Der Hauptgrund hierfür liegt in der Verwendung von sphärischen Partikeln (Kugeln) in der Simulation, im Gegensatz zu den unregelmäßig geformten Schüttgutkörnern im experimentellen Versuch.



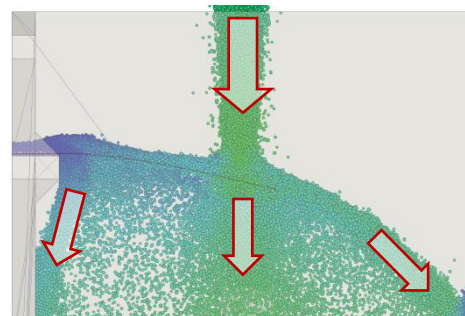
a)  $t_{Exp} = t_{Simu} = 0,25 \text{ s}$



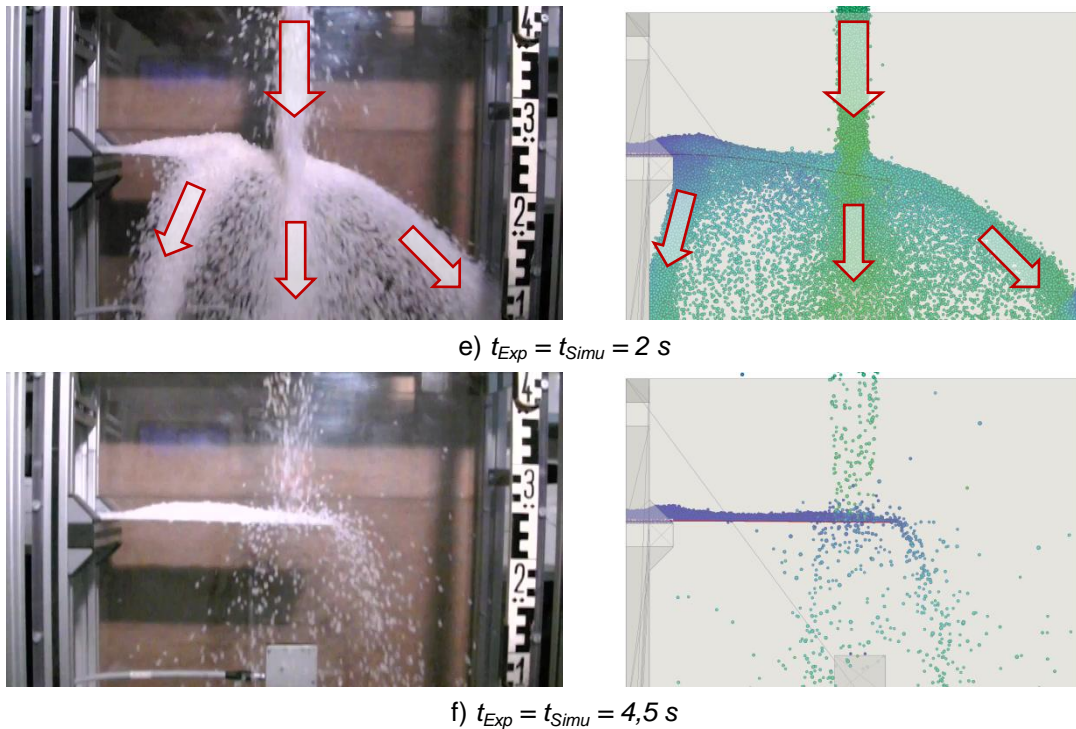
b)  $t_{Exp} = t_{Simu} = 0,31 \text{ s}$



c)  $t_{Exp} = t_{Simu} = 0,41 \text{ s}$



d)  $t_{Exp} = t_{Simu} = 1 \text{ s}$



**Abb. 34 a-f:** Optischer Vergleich zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die Probe III (1mm) mit Kunststoffgranulat ( $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Neben den Simulationen des Validierungsversuchsstandes im Labormaßstab wurden auch analoge Simulationen des Großversuchsstandes durchgeführt. Aus der Analyse des Schüttgutes Braunkohle ergaben sich die nachfolgenden Partikel-Parameter.

**Tabelle 12:** Zusammenfassung der Partikel-Parameter für die analoge Durchfluss-Simulation des Großversuchsstandes

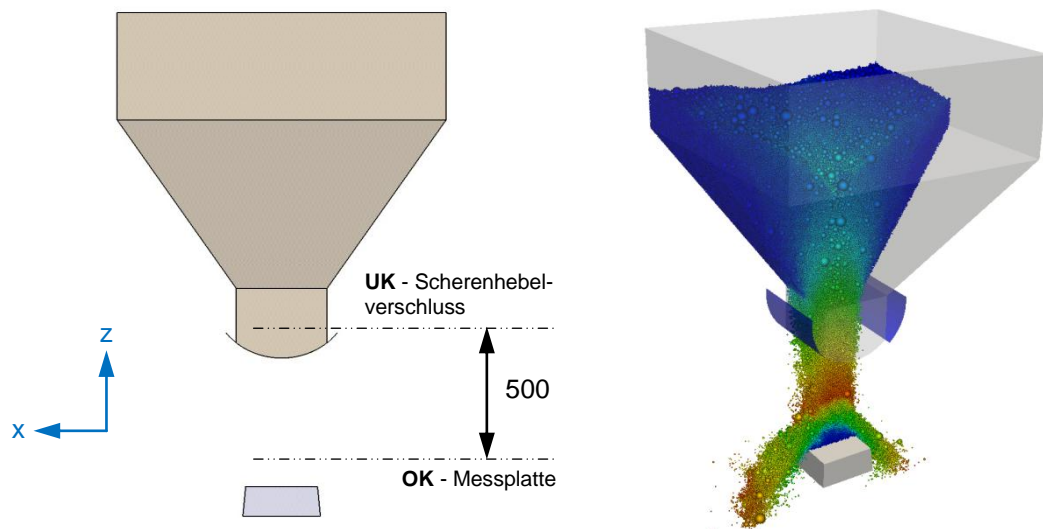
Eigenschaft/Schüttgut	Braunkohle
Schüttdichte, $\rho_b \text{ [kg/m}^3\text{]}$	670
Gesamtmasse, $m_{Ges} \text{ [kg]}$	470
Partikelgrößenverteilung, $d_k \text{ [mm]}$	50...6
Wandreibwert, $\mu_{W,Probe} \text{ [-]}$ (Schüttgut vs. Stahl)	0,59
Porosität, $\varepsilon \text{ [-]}$	0,5
Coulombsche Reibung, $\mu_P \text{ [-]}$	0,5
Rollreibung, $\mu_R \text{ [-]}$	0,2
Partikelsteifigkeit (E-Modul), $E_{Part} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	10
Querkontraktionszahl, $\nu \text{ [-]}$	0,3

Für die Simulation musste im Gegensatz zum experimentellen Versuch lediglich der obere Behälter ( $0,8 \text{ m}^3$ ) und die Messplatte berücksichtigt werden. Die Kontaktkraftmessung erfolgt als summierte Kontaktkraft aller Partikel auf der Messplatte. Die



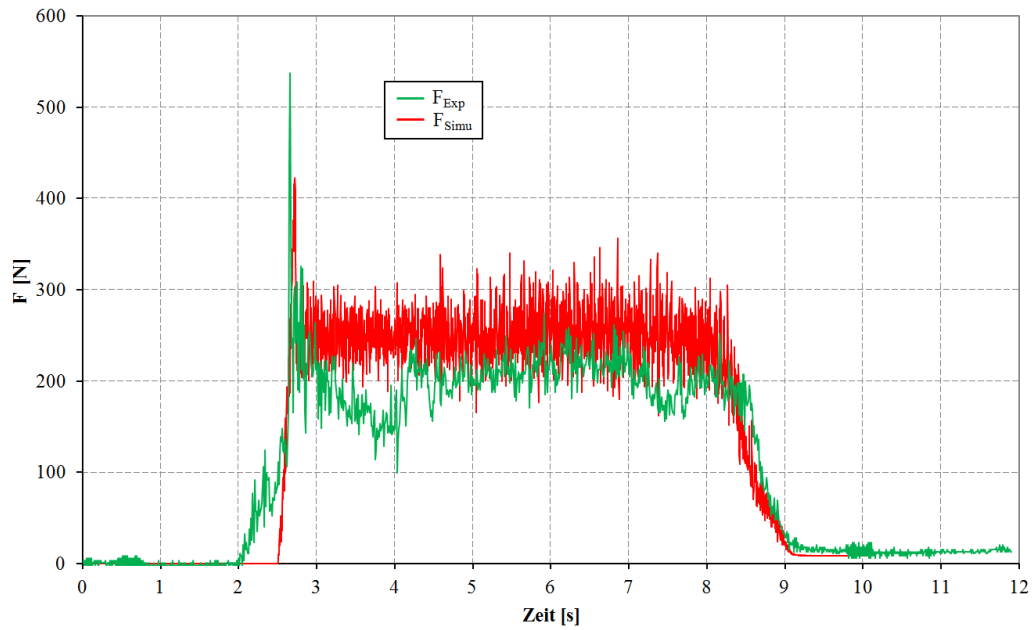
Abwurfhöhe zwischen Unterkante Scherenhebelverschluss und Oberkante Messplatte beträgt  $h_{max} = 0,5 \text{ m}$  (vgl. Abb. 35 links). Aufgrund der manuellen Öffnung des Muschelschiebers des Vorratsbehälters über einen Scherenhebelverschluss wurde die Öffnung durch bewegte Wände direkt in der DEM-Simulation realisiert. Eine Modellierung über eine Mehrkörpersimulation war dazu nicht sinnvoll.

In Abb. 35 rechts ist die Entleerung des oberen Silos in der Simulation dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Partikel zur Hälfte ausgeblendet.



**Abb. 35:** Links: Abwurfhöhe  $h_{max}$  am Großversuchsstand; Rechts: Entleerung des oberen Silos in der Simulation (Schnitt) (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Im nachfolgenden Diagramm (vgl. Abb. 36) sind die Ergebnisse der Kontaktkraftmessung für den experimentellen Versuch und für die analoge Simulation überlagert dargestellt. In der Simulation wird im stationären Zustand ( $t_{Simu} = 3...8 \text{ s}$ ) eine gemittelte Kontaktkraft von  $\Delta F_{Simu} = 250 \text{ N}$  erreicht. Das Simulationsergebnis zeigt im Vergleich zum experimentellen Versuch mit  $\Delta F_{Exp} = 220 \text{ N}$  eine sehr gute Übereinstimmung. Der Unterschied von ca. 12 % ist u.a. auf die Materialdämpfung des Großversuchsstands zurückzuführen. Weiterhin sind die Dämpfungseigenschaften des sich auf der Messplatte abstützenden Feingutes deutlich höher einzuschätzen. In der Simulation kann auf Grund der hohen Partikelanzahl Feingut mit  $d_k < 6 \text{ mm}$  nicht berücksichtigt werden.



**Abb. 36:** Vergleich der Kontaktkraftmessung zwischen experimentellem Großversuch und analoger Simulation (© M. Dratt, IBAF GmbH)

⇒ Das Ziel 8 „*Nachweis der physikalischen Korrektheit der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation*“ wurde erreicht.

- **Vergleich der Messwerte mit den Simulationen**

Arbeitsinhalte:

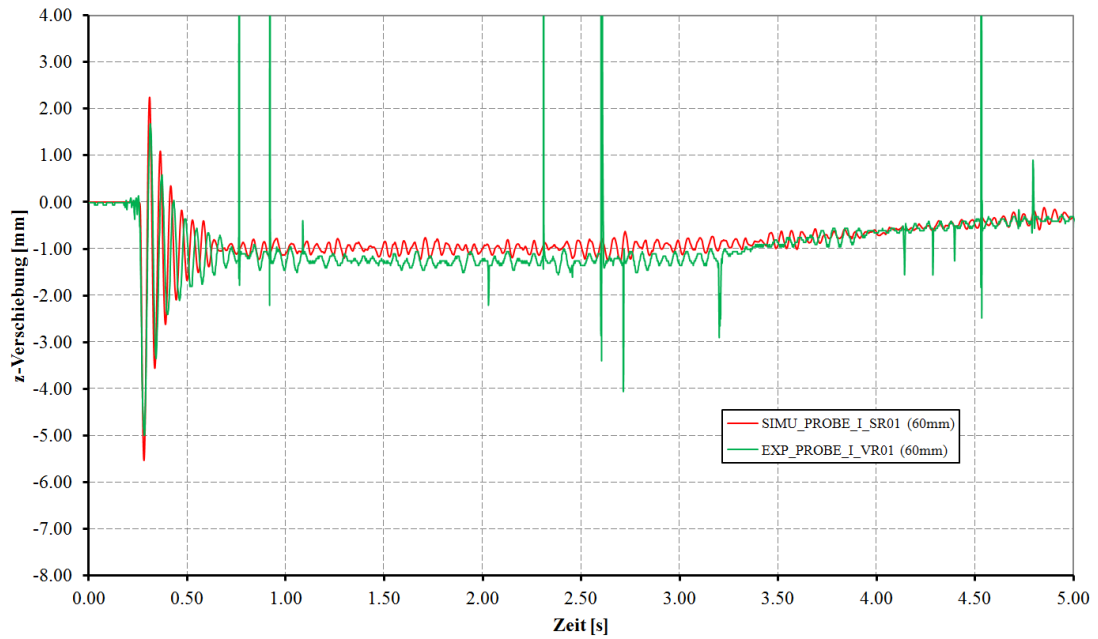
Vergleich und grafische Auswertung der Ergebnisse aus den Experimenten und den Simulationen, Erstellung von Videos für spätere Präsentationen, Erstellung von Diagrammen, Tabellen, Abbildungen u.a..

Arbeitsergebnis:

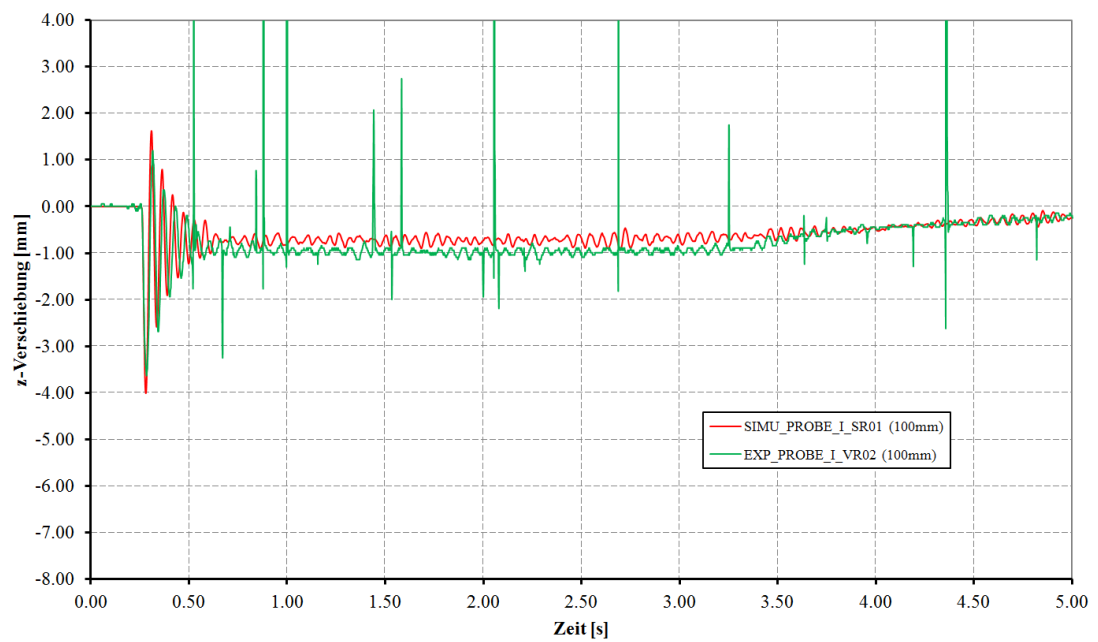
Das Arbeitspaket konzentriert sich auf den Vergleich des Verformungsverhaltens der unterschiedlichen Stahlblech-Proben in Abhängigkeit der verwendeten Versuchsparameter. Der Vergleich der realen Klappenöffnungszeit von  $0,2 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$  mit der simulierten Klappenöffnungszeit des Mehrkörpersimulationsmodells von  $0,2 \text{ s} \pm 0,0025$  zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Für die betrachteten, relativ leichten Schüttgüter kann von einer konstanten Klappenöffnungszeit ausgegangen werden.

Der Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen den experimentellen Versuchen und den analogen Simulationen des Validierungsversuchsstands im Labormaßstab erfolgt in erster Linie durch die Überlagerung der Graphen der Verformungsverläufe für alle Versuchsreihen bzw. Simulationsreihen. Diese erste direkte Auswertungsvariante wurde gewählt, um auch die dynamischen Schwankungen in der Verformung des Biegebalkens zu dokumentieren.

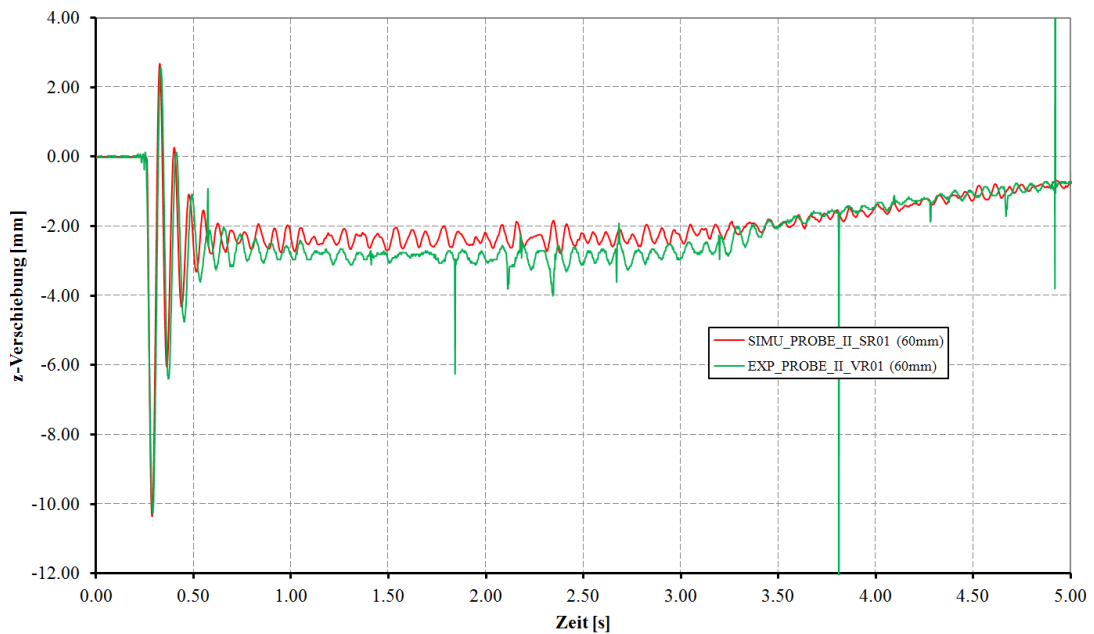
Die folgenden Diagramme in Abb. 37 - Abb. 44 stellen die Ergebnisse der Versuchsreihen VR01/VR02 und die Simulationsreihe SR01 für das Schüttgut Kunststoffgranulat gegenüber.



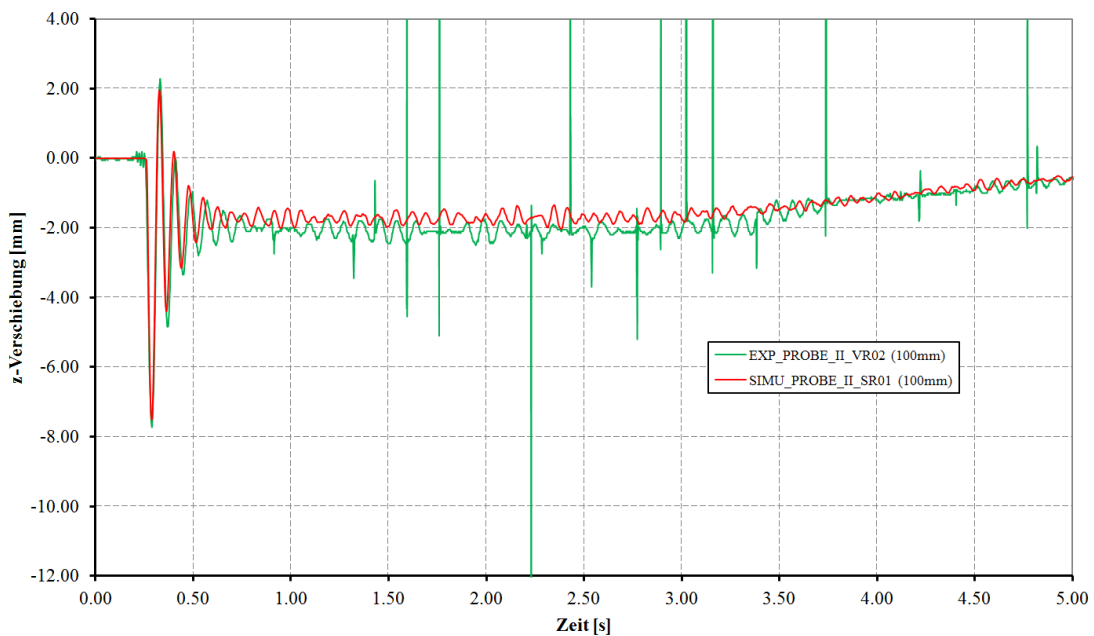
**Abb. 37:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{\text{Ges}} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{\text{Aus}} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{\text{LMP}} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



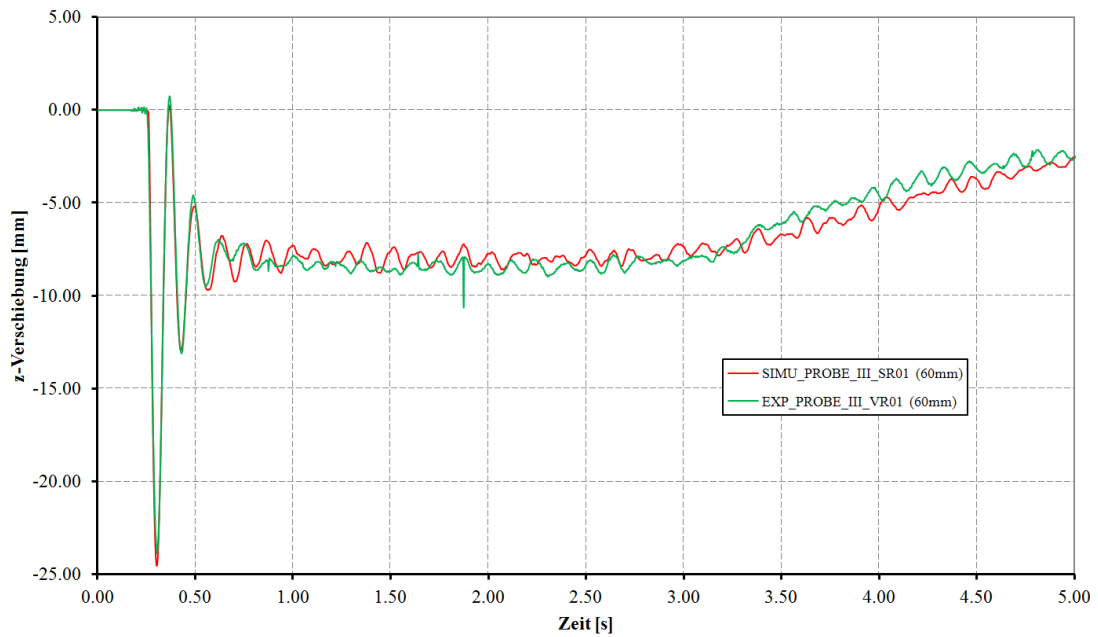
**Abb. 38:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{\text{Ges}} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{\text{Aus}} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{\text{LMP}} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



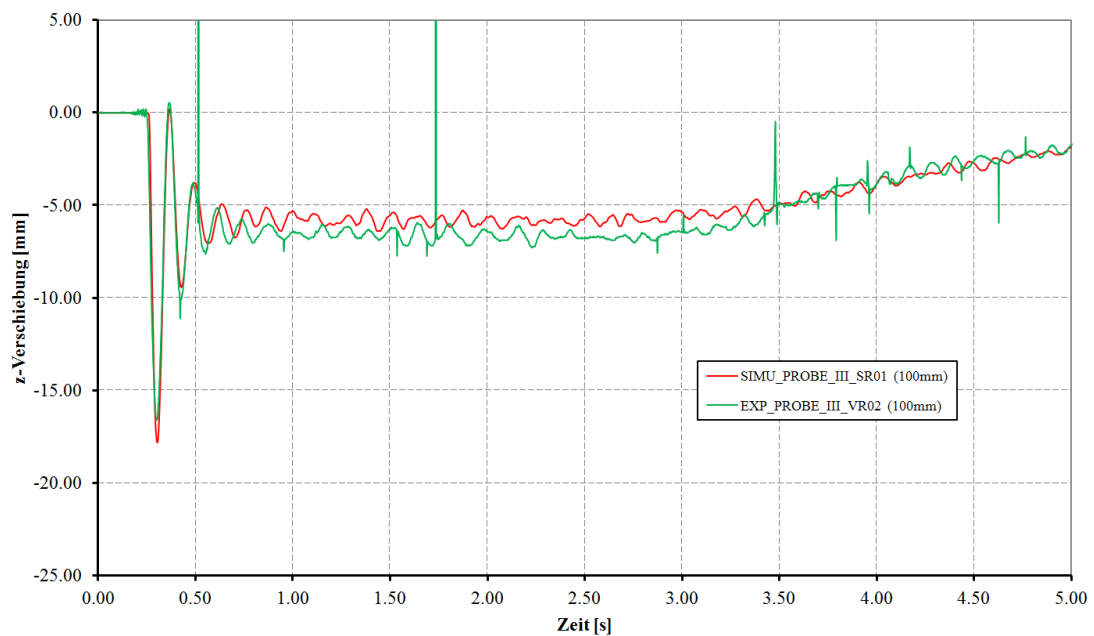
**Abb. 39:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$   
(© M. Dratt, IBAF GmbH)



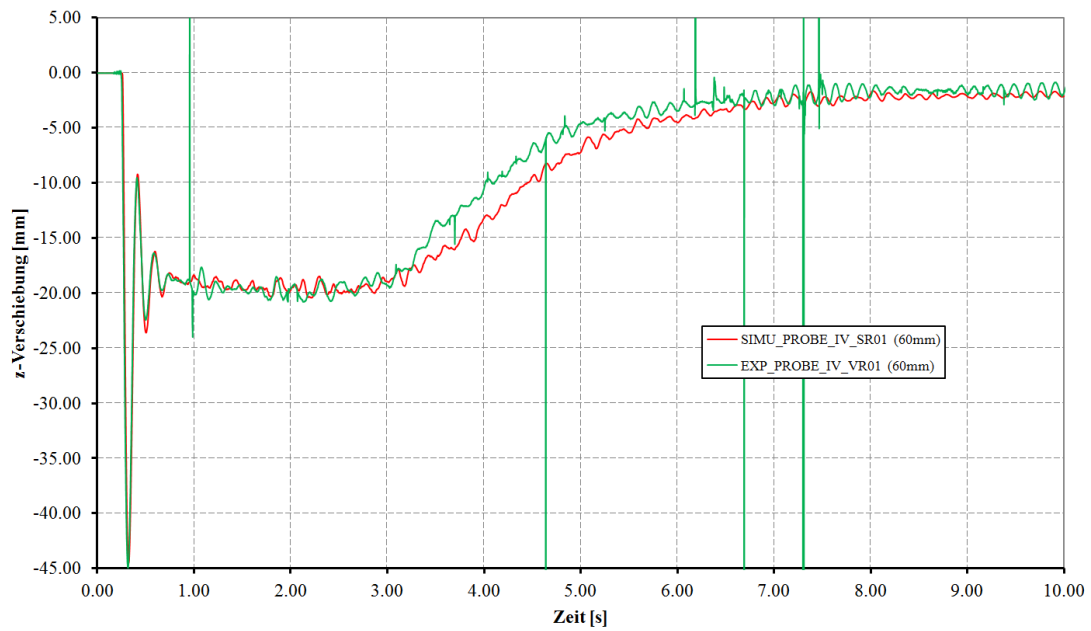
**Abb. 40:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$   
(© M. Dratt, IBAF GmbH)



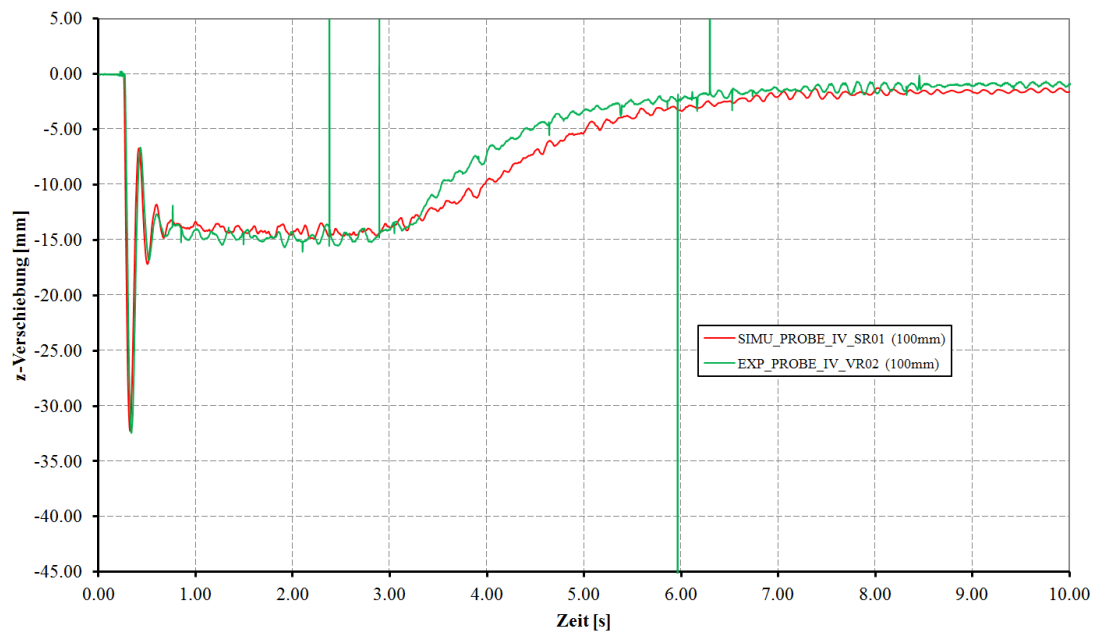
**Abb. 41:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 42:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

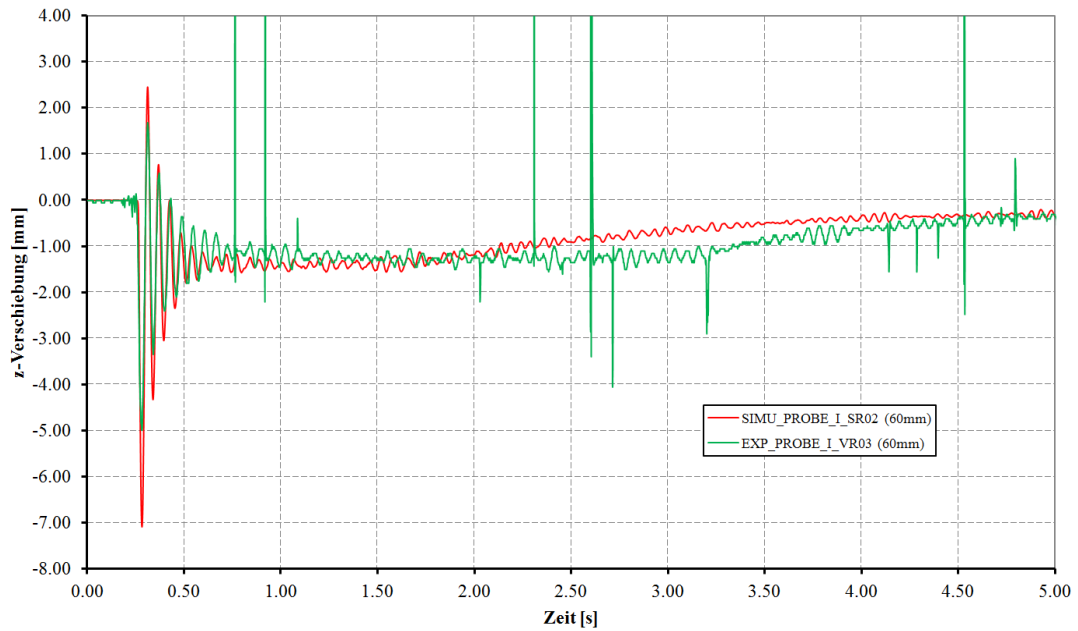


**Abb. 43:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

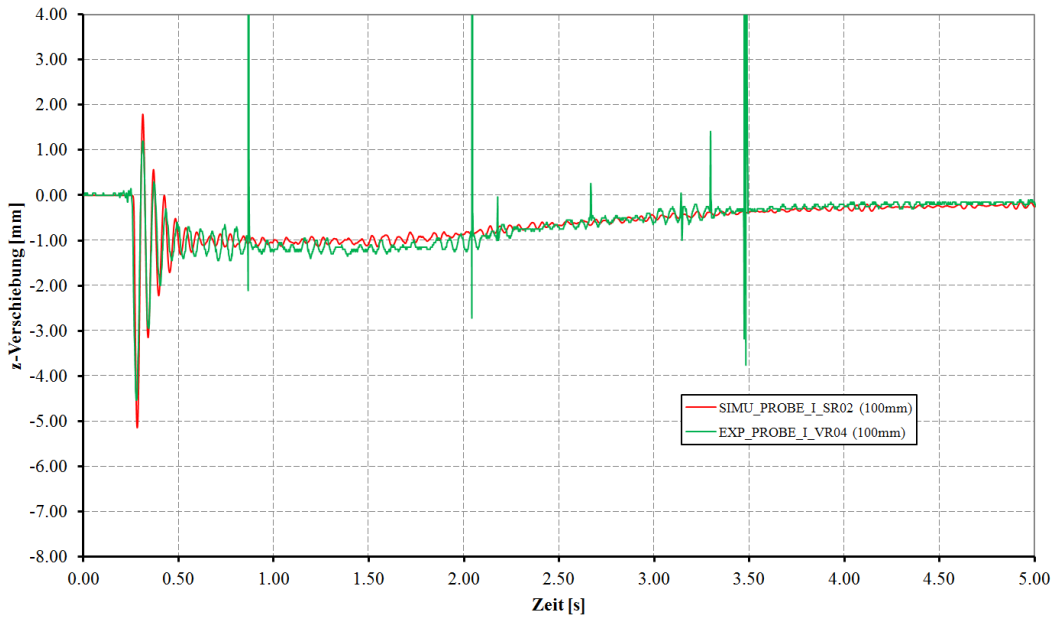


**Abb. 44:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Die folgenden Diagramme in Abb. 45 - Abb. 52 stellen die Ergebnisse der Versuchsreihen VR03/VR04 und die Simulationsreihe SR02 für das Schüttgut Weizen gegenüber.

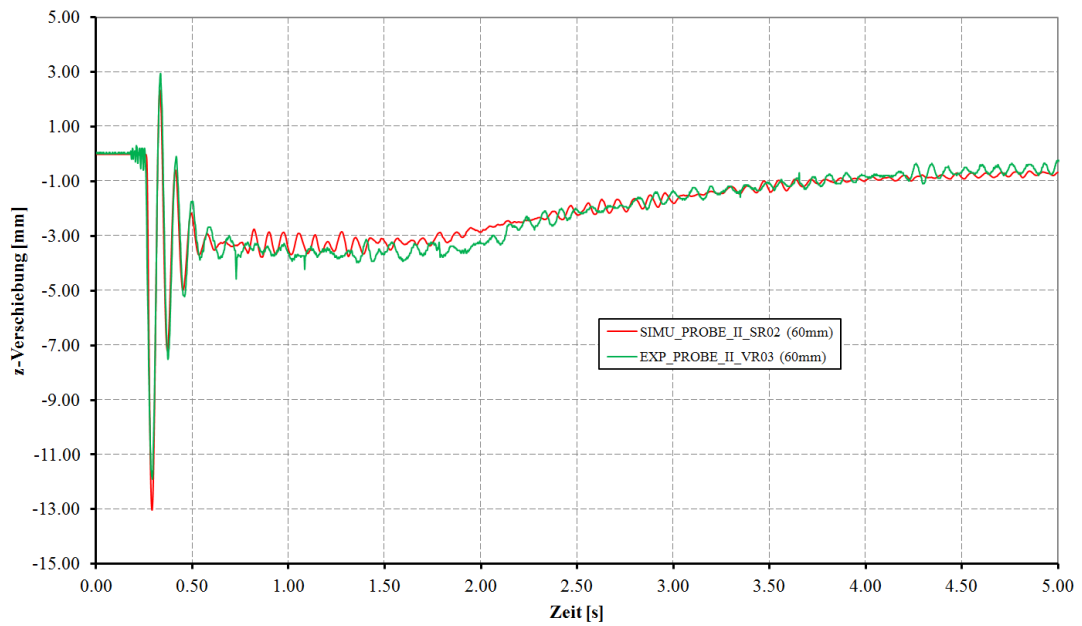


**Abb. 45:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

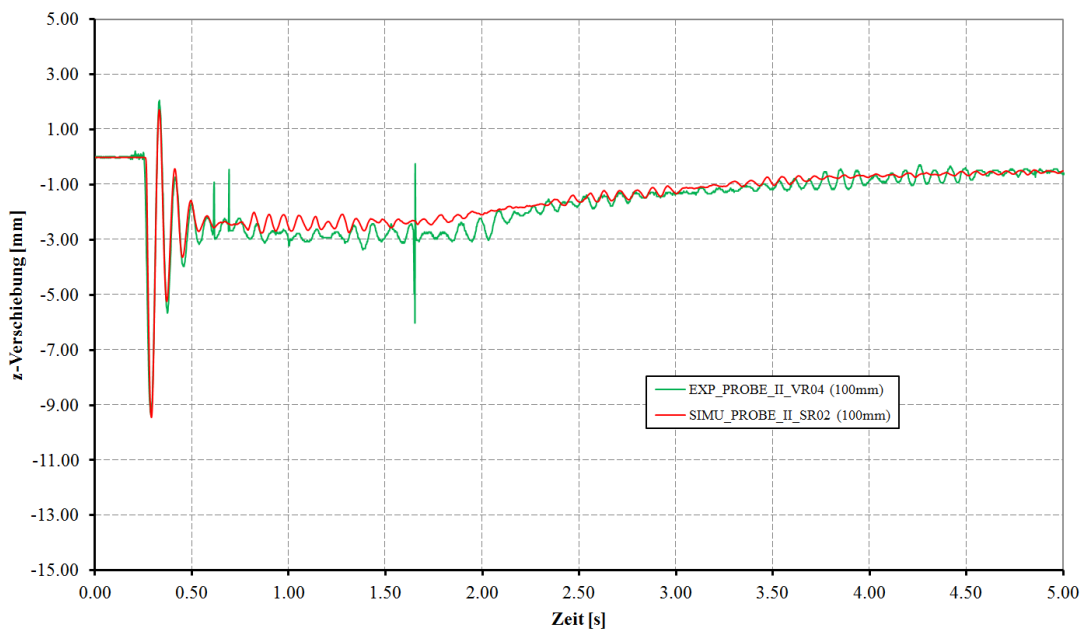


**Abb. 46:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

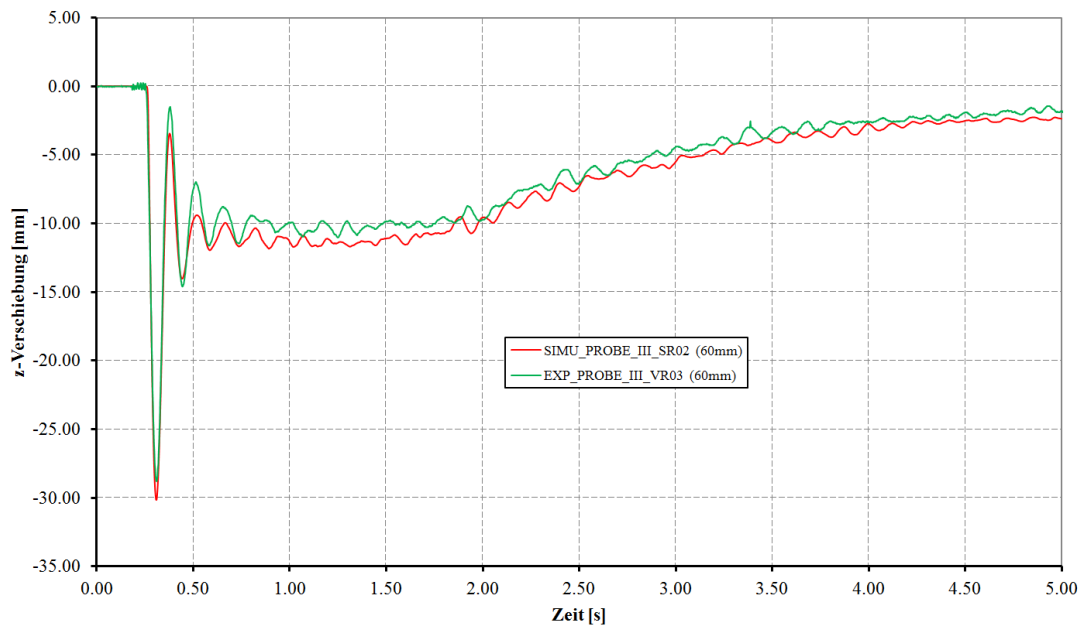




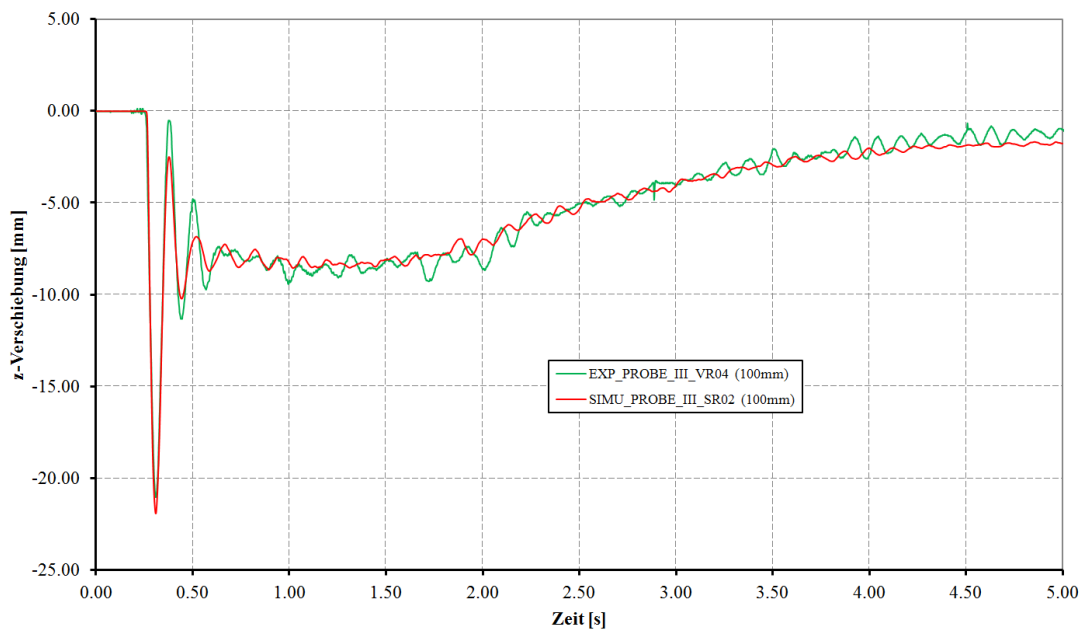
**Abb. 47:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



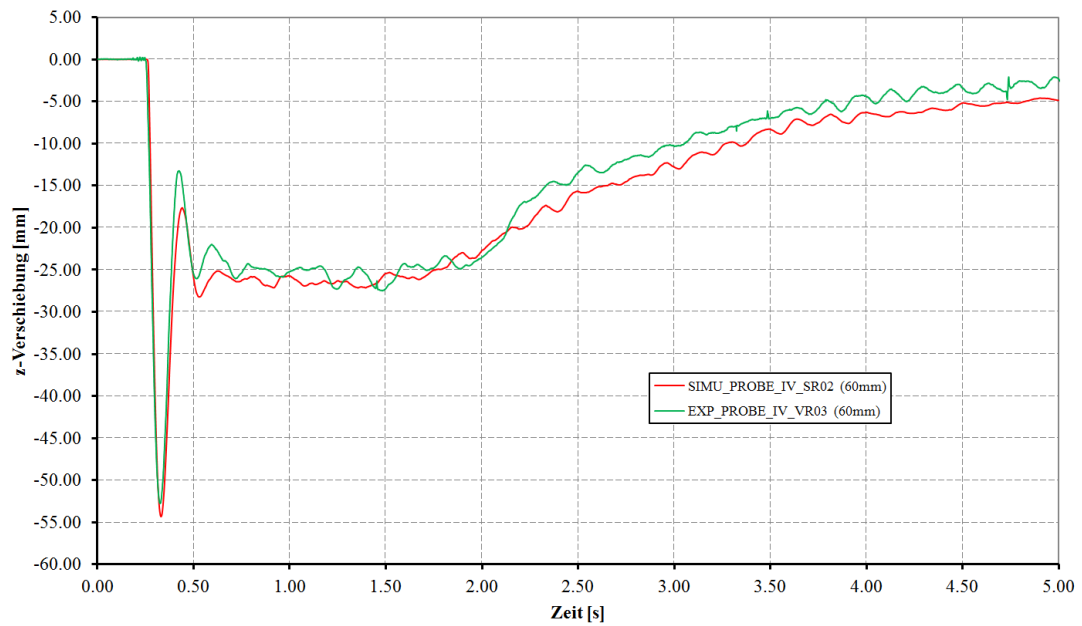
**Abb. 48:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



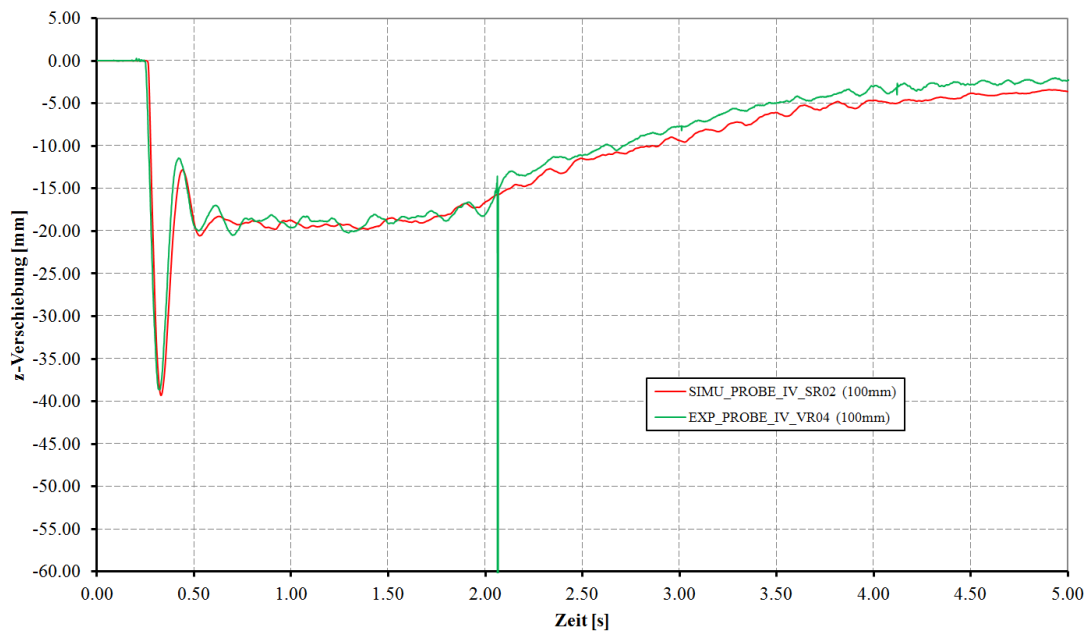
**Abb. 49:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 50:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

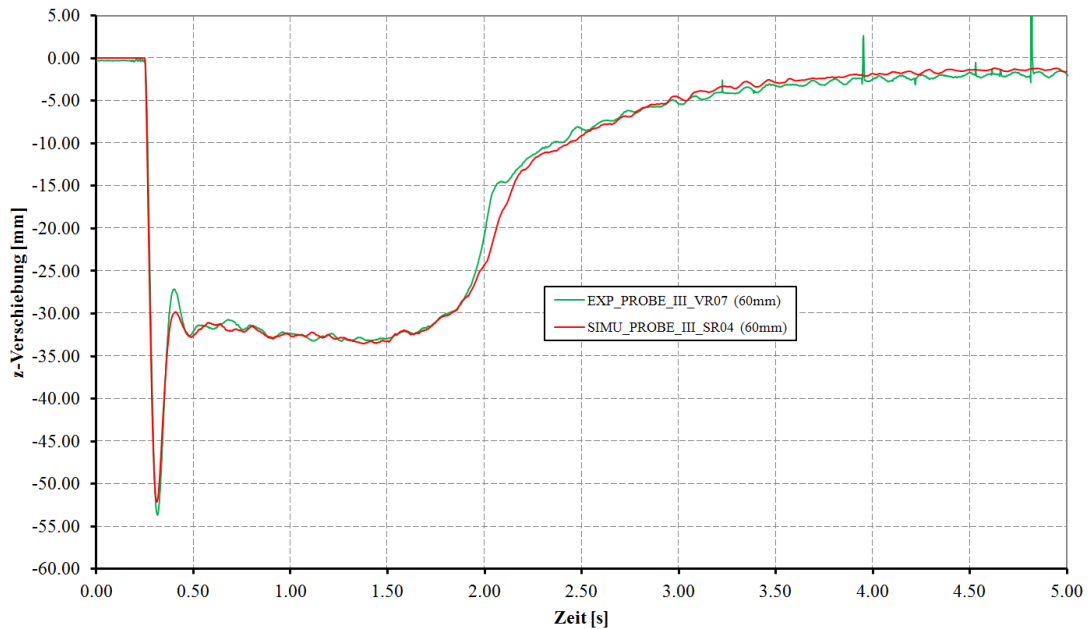


**Abb. 51:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

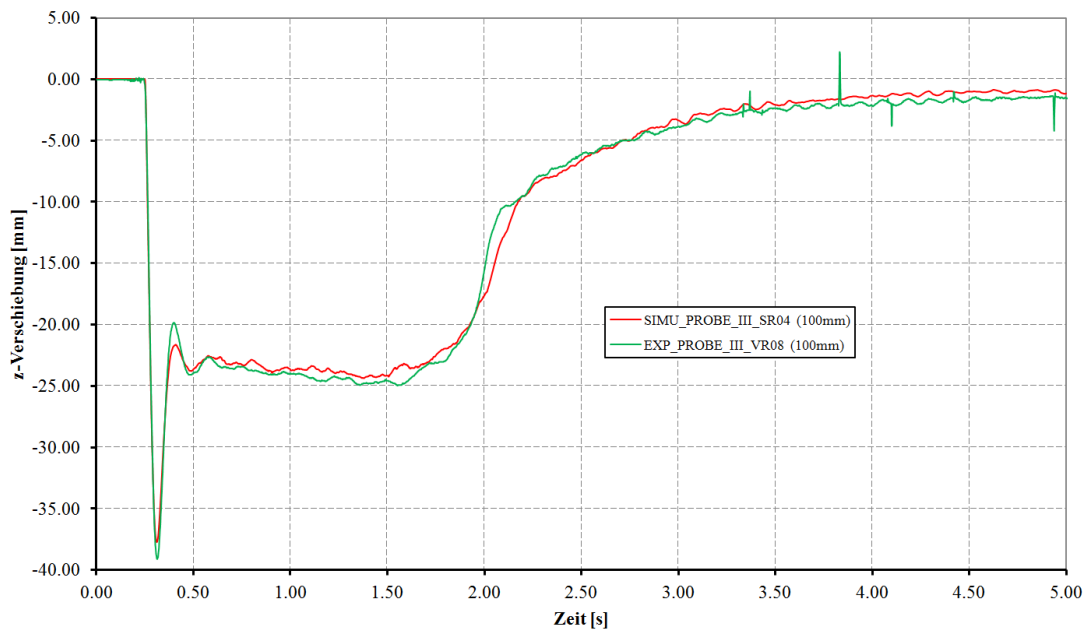


**Abb. 52:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **Weizen** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

Die folgenden Diagramme in Abb. 53 - Abb. 54 stellen die Ergebnisse der Versuchsreihen VR07/VR08 und die Simulationsreihe SR04 für das Schüttgut Kunststoffgranulat mit einer Gesamtmasse von  $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$  und einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$  gegenüber.

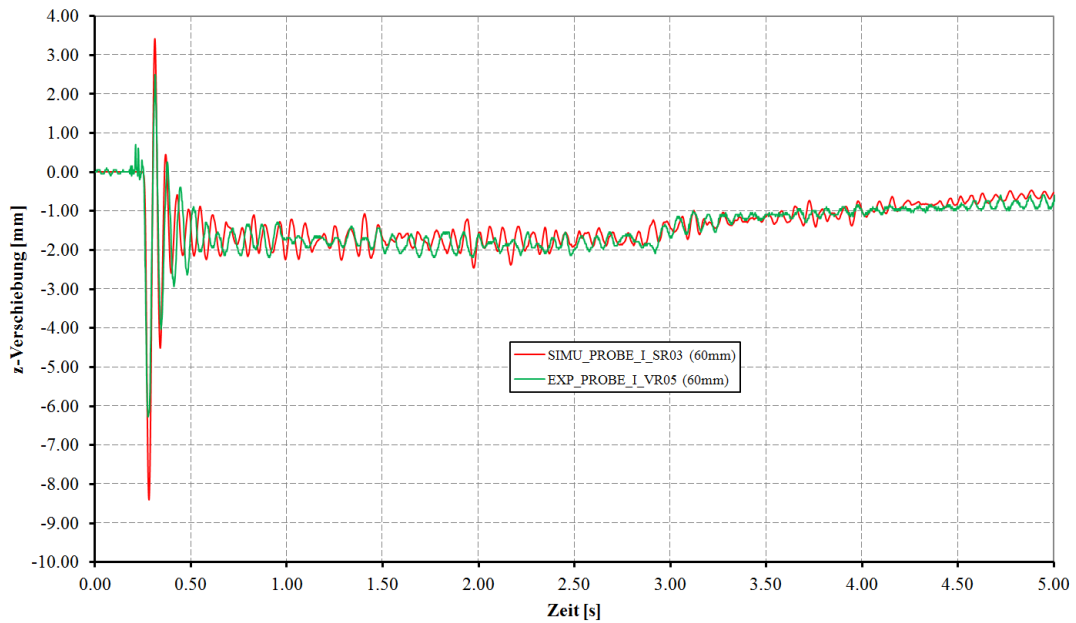


**Abb. 53:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $l_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

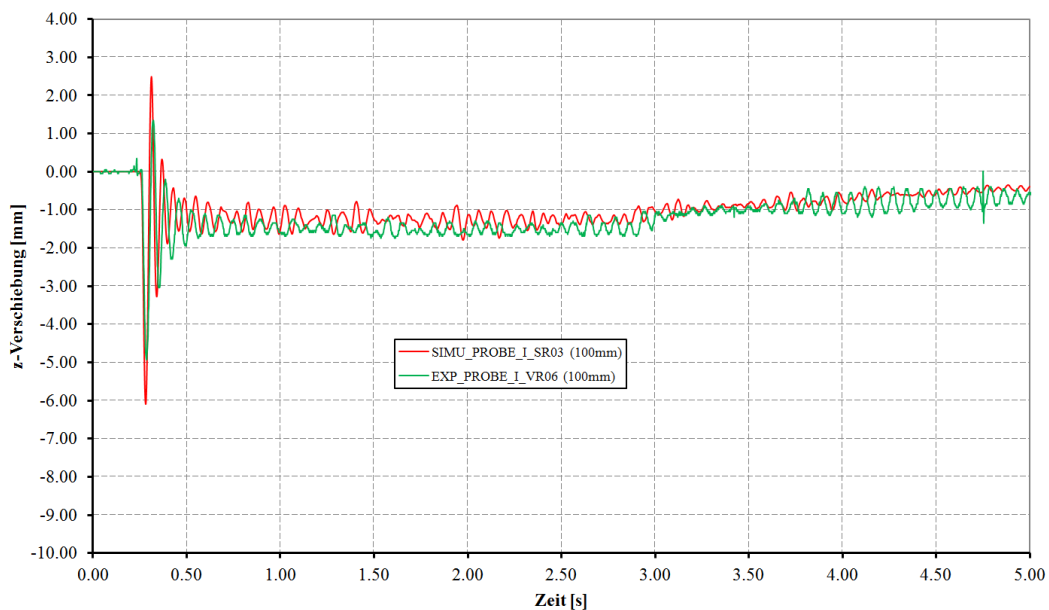


**Abb. 54:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **Kunststoffgranulat** ( $m_{Ges} = 13 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $l_{Aus} = 100 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $l_{LMP} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)

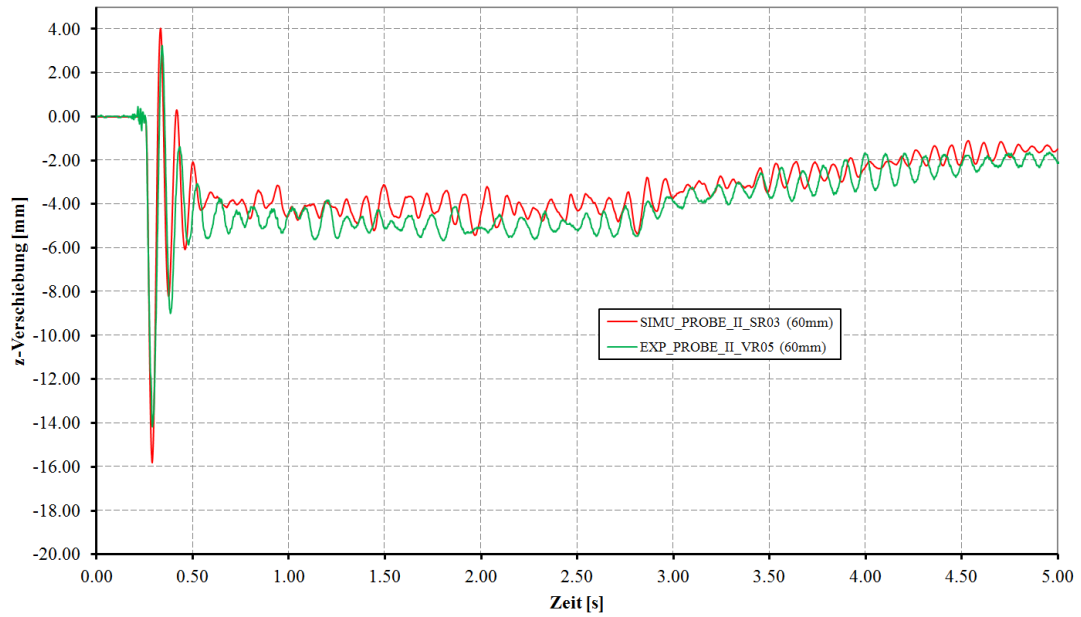
Die folgenden Diagramme in Abb. 55 - Abb. 62 stellen die Ergebnisse der Versuchsreihen VR05/VR06 und die Simulationsreihe SR03 für das zusätzliche Versuchsgut granuliertes Kalisalz mit einer Gesamtmasse von  $m_{Ges} = 10 \text{ kg}$  und einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  gegenüber.



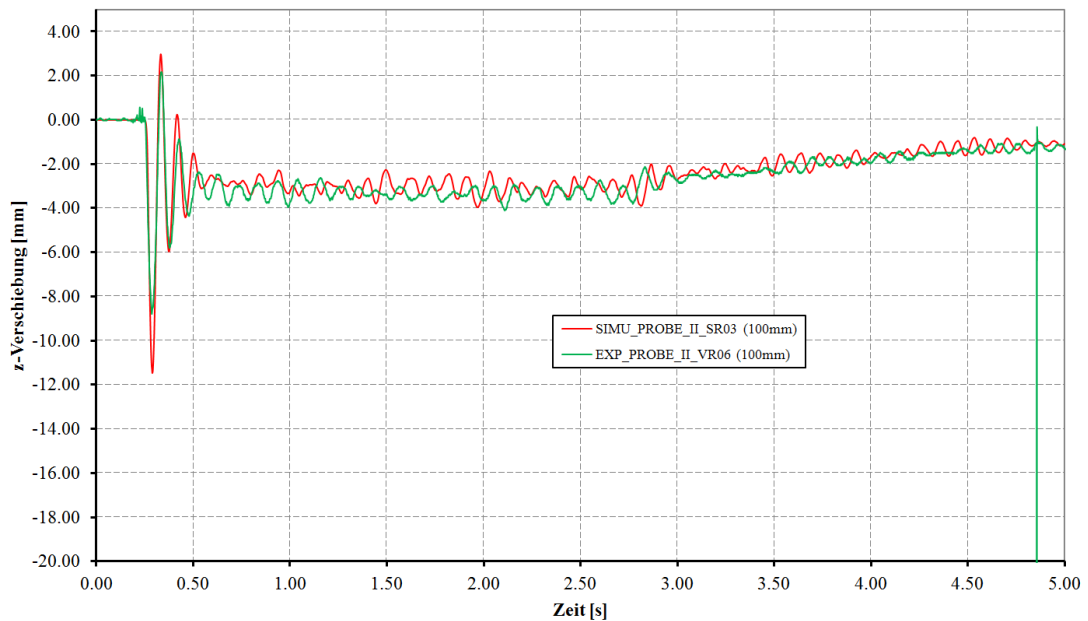
**Abb. 55:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



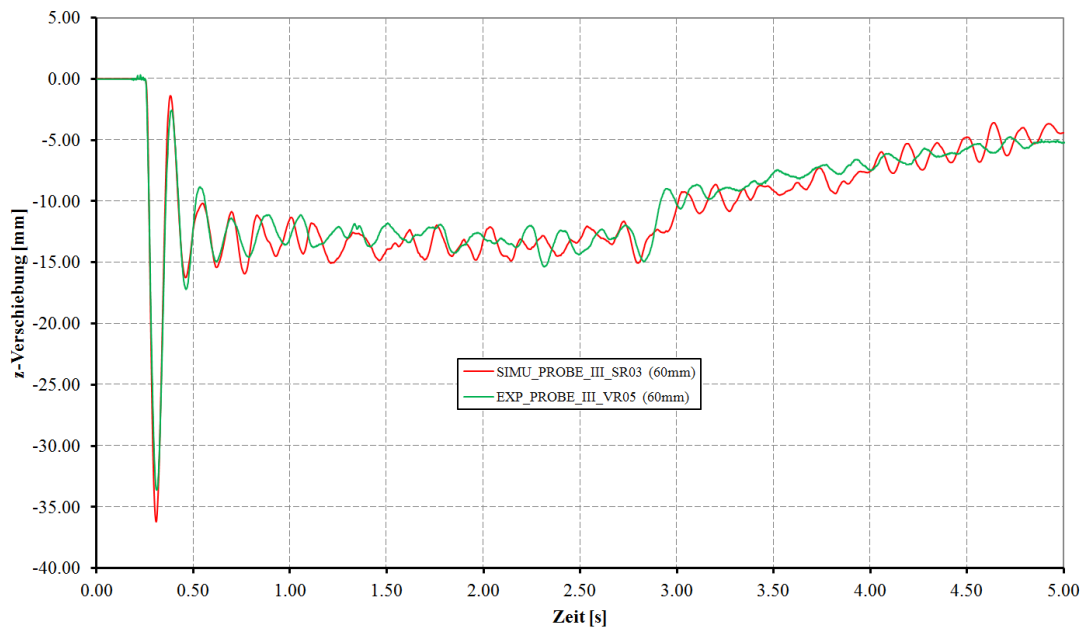
**Abb. 56:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe I (2mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10 \text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40 \text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100 \text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



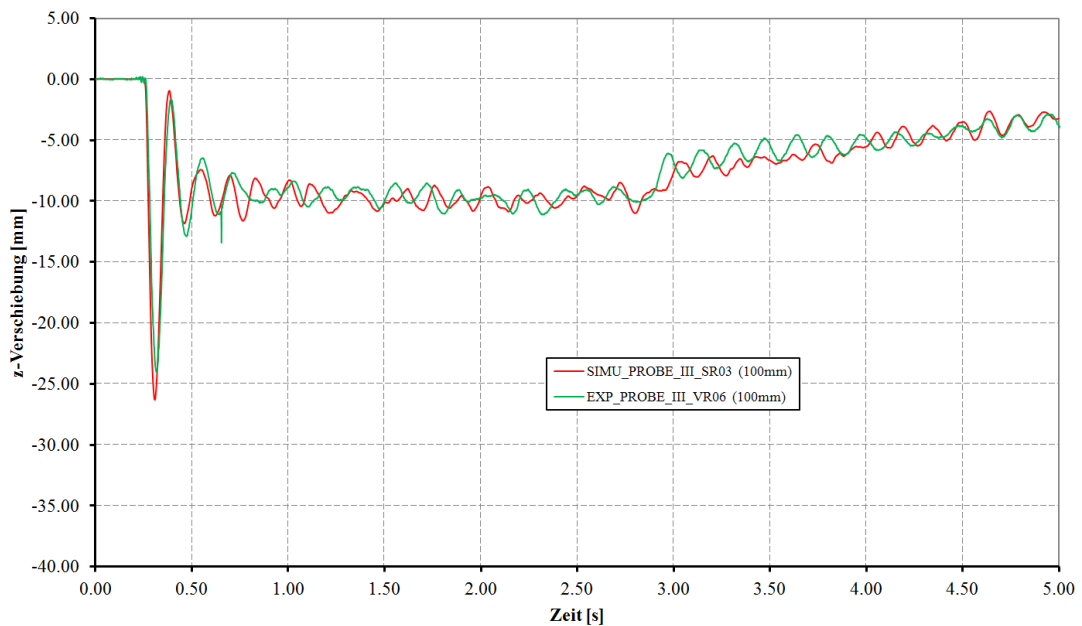
**Abb. 57:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$   
(© M. Dratt, IBAF GmbH)



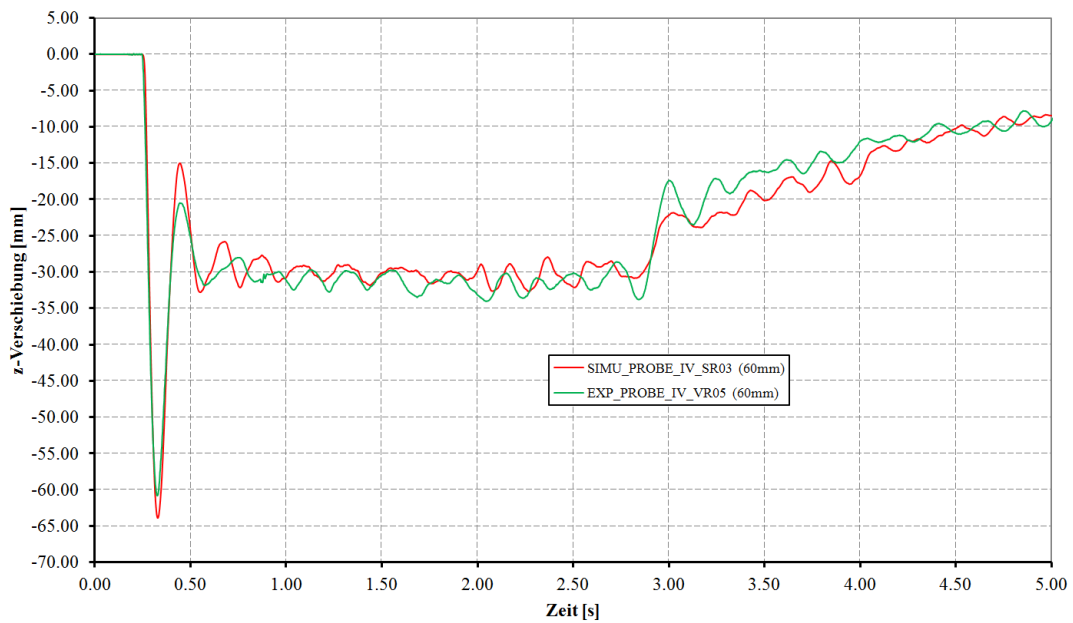
**Abb. 58:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe II (1,5mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$   
(© M. Dratt, IBAF GmbH)



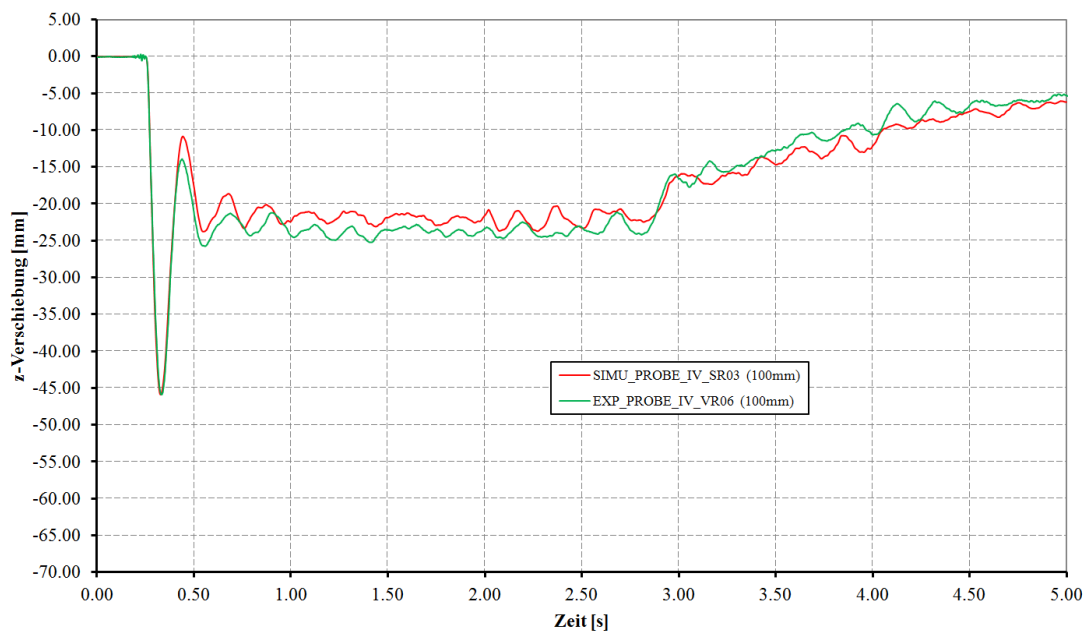
**Abb. 59:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 60:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe III (1mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 10\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 61:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 60\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



**Abb. 62:** Vergleich der Verformungsergebnisse zwischen experimentellem Versuch und analoger Simulation für die **Probe IV (0,75mm)** mit **granuliertem Kalisalz** ( $m_{Ges} = 6\text{ kg}$ ), einer Auslassweite von  $I_{Aus} = 40\text{ mm}$  bei der Mess-Position von  $I_{LMP} = 100\text{ mm}$  (© M. Dratt, IBAF GmbH)



Die Analyse der umfangreichen Messdaten macht deutlich, dass die gekoppelte DEM-MKS-FEM-Simulation sehr exakt die komplexen dynamischen Vorgänge infolge der Schüttgut-Bauteil-Interaktion abbilden kann. Die Verformungsverläufe über die Zeit zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Das gilt insbesondere für die jeweilige Initialauslenkung nach dem ersten Kontakt. Auch die annähernd konstanten Auslenkungen im stationären Zustand (konstanter Massenstrom) und die abnehmende Verformung bis hin zum Ende der Entleerung stimmen sehr gut überein. Die hochdynamischen Bauteilschwingungen können trotz idealisierter Simulationsmodelle (geringere Partikelsteifigkeit in der DEM, abgeschätztes Materialdämpfungsverhalten im FEM-Modell) sehr gut in der gekoppelten Simulation abgebildet werden.

Damit kann die entwickelte DEM-MKS-FEM-Kopplung als verifiziert und validiert betrachtet werden. Mit diesen Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass die Simulationsmethode auch für industrielle Anwendungen praxisrelevante Ergebnisse liefern wird.

⇒ Das Ziel 9 „*Dokumentation des Vergleichs zwischen Simulation und Validierungsversuch*“ wurde erreicht.

- **Entwicklung eines Visualisierungs-Plug-In**

Arbeitsinhalte:

Programmierung eines Plug-In zur gemeinsamen Darstellung der Ergebnisdaten, sowohl der Partikel- als auch der FEM-Simulationsergebnisse in Falschfarbendarstellung für das Visualisierungsprogramm „ParaView“.

Arbeitsergebnis:

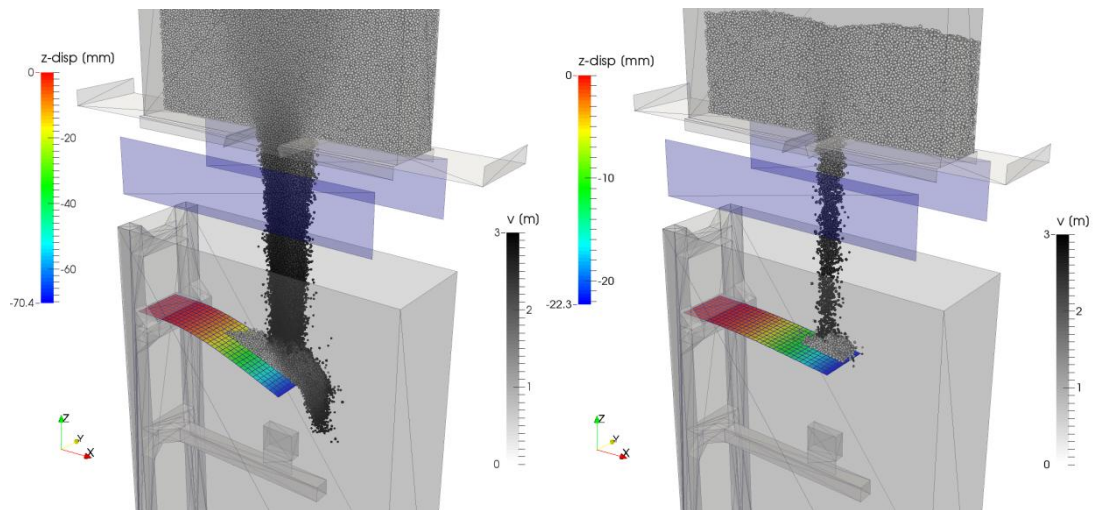
Zur Darstellung der mit LIGGGHTS<sup>®</sup> erzeugten Partikeldaten wurde ein Plug-In in C++ erstellt, das die Positionen, die Geschwindigkeiten und die wirkenden Kräfte pro Partikel einlesen kann. Dieses Plug-In wird direkt in das Open Source Visualisierungsprogramm ParaView eingebunden. Mit ParaView ist es möglich, Kugeln unterschiedlicher Durchmesser, als sogenanntes „Shader-Programm“ direkt auf der Grafikkarte (GPU) zu rendern. Somit ist eine effiziente Darstellung und das Rendern aussagekräftiger Präsentationsvideos und Einzelbilder möglich. Der Quellcode des Plug-Ins wurde auf der Internetseite github.com veröffentlicht, da es auch außerhalb des Projektes einen hohen Nutzwert für andere Anwender des Simulationsprogramms LIGGGHTS<sup>®</sup> hat.

Parallel zu der Entwicklung des Partikeldaten-Plug-Ins durch das Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) wurde durch IBAF eine Exportschnittstelle für verformte Geometrieobjekte in der ANSYS<sup>®</sup> eigenen Makro-Programmiersprache APDL entwickelt.

Durch das gleichzeitige Laden beider Simulationsergebnisse können die Daten zeitsynchron visualisiert und gerendert werden.

Weiterhin sind mit Hilfe der ParaView-eigenen Filter umfangreiche Datenanalysen, beispielsweise bezüglich des Verformungszustandes von Geometrien oder der zurückgelegten Pfade einzelner Partikel möglich. Eigene Filter ermöglichen ein Kumulieren der Kontaktkräfte, Partikelmassen und deren Darstellung in Diagrammform.

Das entwickelte Visualisierungskonzept konnte auf die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Validierungssimulationen angewendet werden. Die nachfolgende Abb. 63. zeigt die überlagerte Darstellung der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation.



**Abb. 63:** Anwendung des entwickelten Visualisierungskonzepts auf Basis der Software ParaView für die gekoppelte DEM-MKS-FEM-Simulation am Beispiel des Validierungsversuchs

⇒ Das Ziel 10 „ganzheitliche Darstellung der Simulationsergebnisse aus der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation“ wurde erreicht.

- **Mitarbeiterschulungen, gemeinsame Veröffentlichungen auf Fachtagungen, im Internet, Fachzeitschriften**

#### Arbeitsinhalte:

Die Mitarbeiter der Simulationsabteilung der IBAF GmbH sollen eine Schulung zum Umgang mit der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation und dem Postprozessing mit dem Visualisierungs-Plugin erhalten.

Den Mitarbeitern des Vertriebs sollen in einem firmeninternen Workshop die neuartigen Möglichkeiten der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation aufgezeigt werden, um diese Dienstleistung offensiv bei potentiellen Kunden anbieten zu können.

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter des ILM sollen eine Grundlagenschulung in FEM-Makro-Programmierung von erfahrenen FEM-Berechnungsingenieuren der IBAF GmbH erhalten, damit sie kleine Änderungen an den für die Kopplung notwendigen Makros selbstständig vornehmen können.

#### Arbeitsergebnis:

Im Rahmen eines firmeninternen Workshops wurden zwei Simulations-Ingenieure der IBAF GmbH im Umgang mit der gekoppelten Simulation durch einen Mitarbeiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg geschult. Die Mitarbeiter der IBAF-Simulationsabteilung konnten danach mit dem Simulationsprogramm umgehen.

An einer Weiterentwicklung des Softwareprototypen zu einem stabilen, marktreifen Produkt wird derzeit seitens der IBAF GmbH in Zusammenarbeit mit der ITI Gesellschaft für ingenieurtechnische Informationsverarbeitung mbH im Rahmen des Projektes DEM4X (Diskrete Elemente Methode für SimulationX; AIF, ZIM, Förderkennzeichen: KF3383401KM4) gearbeitet.

Durch die Vertriebsmitarbeiter der IBAF GmbH konnten bereits erste Kunden für die Dienstleistung der gekoppelten Simulation interessiert werden. Auf die genauen Projekteinhalte kann aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Es wurde ein Mitarbeiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik im Umgang mit den im Rahmen dieses Projektes erstellten APDL-Makros geschult.

⇒ Das Ziel 11 „Schaffen eines Bewusstseins für die Möglichkeiten der gekoppelten DEM-MKS-FEM Simulation“ wurde erreicht.

### **Abschließende Gesamteinschätzung der erreichten Ziele**

Im Projekt SimBa „*Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und -beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen*“ wurden alle in der Vorhabenbeschreibung definierten Ziele termin- und kostengerecht erreicht. Die Genauigkeit der in dem Projekt entwickelten gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulationsmethode wurde in zahlreichen Validierungsversuchen und -simulationen erfolgreich überprüft.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Während der Projektlaufzeit sind Personalkosten für einen Ingenieur in Höhe von 175.123,52 € angefallen. Gegenüber den geplanten Kosten wurden diese um -4.207,48 € unterschritten, da die geplanten jährlichen Gehaltssteigerungen in Höhe von 3% nicht umgesetzt wurden.

Materialkosten waren nicht geplant und sind auch nicht angefallen.

Reisekosten in Höhe von 1.208,40 € (Plan 2.700 €) sind für folgende Projekttreffen angefallen:

- Kick-Off Meeting am 22.10.2013 in Magdeburg
- Projekttreffen zum 1. Meilenstein am 12.06.2014 in Magdeburg
- Abschlusstreffen am 10.09.2015 in Magdeburg

Die verbleibenden Mittel in Höhe von 1.491,60 € wurden nicht ausgeschöpft, da die geplanten Projektabsprachen mit dem Evaluierungsunternehmen im Rahmen der Meilensteintreffen durchgeführt wurden. Das Projekttreffen zum 2. Meilenstein am 17.02.2015 wurde per WebMeeting durchgeführt.

In Summe sind damit Selbstkosten des Vorhabens in Höhe von 176.331,92 € angefallen. Gegenüber den geplanten Kosten in Höhe von 182.032 € ist das ein Delta von -5.699,08 €.

An Fördermitteln wurden damit in Summe 2.849,54 € weniger als geplant beansprucht.

Zuwendungen sind bislang entsprechend dem Zuwendungsbescheid vom 31.07.2013 bzw. dem Änderungsbescheid Nr. 2 vom 19.11.2014 bis einschließlich zum 2. Quartal 2015 abgerechnet worden.

## Vergleich der Kosten-/Ausgabenplanung

01IS13006B SimBa		Kosten Zeitraum 01.09.2013 - 31.08.2015		
		<b>Vorkalkulation</b>	<b>IST</b>	<b>DELTA</b>
837	<b>Personal</b>	179.331,00	175.123,52	-4.207,48
838	<b>Reise</b>	2.700,00	1.208,40	-1.491,60
855	<b>Gesamt</b>	182.032,00	176.331,92	-5.699,08
882	<b>Eigenmittel</b>	91.015,50	88.165,96	-2.849,54
884	<b>Zuwendung</b>	91.015,50	82.250,87	-8.764,63
		<b>Summe:</b>	170.416,83	
		<b>offen:</b>	5.915,09	

5915,09 EUR werden noch per Zahlungsanforderung zum 29.02.2016 beantragt.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

AP 1 – Erstellung Anforderungskatalog				
Geplante Laufzeit:	09/2013 – 09/2013		Insgesamt kalkulierte PM:	2 PM
Tatsächliche Laufzeit:	09/2013 – 09/2013		Insgesamt eingesetzte PM:	2 PM
Projektpartner	ILM	IBAF		
kalkulierte PM:	1 PM	1 PM		
eingesetzte PM:	1 PM	1 PM		
<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <p><b><u>Arbeitsinhalte:</u></b>  Vergleich mehrerer geeigneter FEM-Programme, Analyse der darin vorhandenen Eingangs-Schnittstellen für Kräfte, Momente und Verschiebungen.  Analyse der vorhandenen Ausgangs-Schnittstellen für Bauteilverformungen.</p> <p><b><u>Geplantes Arbeitsergebnis:</u></b>  Auf Basis einer methodischen Bewertung wird die verwendete FEM Software festgelegt.</p>				
<p><b><u>Geleistete Arbeiten:</u></b>  In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ILM wurden die Ein- und Ausgabeschnittstellen der verwendeten Simulationsprogramme analysiert und ein Anforderungskatalog erstellt. Die zu verwendende FEM Simulationssoftware wurde festgelegt.</p>				
<p><b><u>Anmerkungen:</u></b> keine</p>				



<b>AP 2 – Schnittstellenentwicklung</b>				
Geplante Laufzeit:	10/2013 – 09/2014		Insgesamt kalkulierte PM:	19 PM
Tatsächliche Laufzeit:	10/2013 – 09/2014		Insgesamt eingesetzte PM:	21 PM
Projektpartner	ILM	<b>IBAF</b>		
kalkulierte PM:	12 PM	<b>7 PM</b>		
eingesetzte PM:	12 PM	<b>9 PM</b>		
<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <p><b><u>Arbeitsinhalte:</u></b>            Erstellen von Programmierskripten zur automatischen Vernetzung und schrittweisen Lastaufbringung (unter Berücksichtigung separater Lastfälle) in der dem FEM-Programm eigenen Makroprogrammiersprache.            Erstellen von Programmierskripten zum Import von Lastdateien aus der DEM in der dem FEM Programm eigenen Makroprogrammiersprache.            Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen.</p> <p><b><u>Geplantes Arbeitsergebnis:</u></b>            Export- / Importmakros für das in Arbeitspaket 1 ausgewählte FEM-Programm.            Reproduzierbare Verifizierung der gekoppelten DEM-MKS-FEM-Simulation.</p>				
<p><b><u>Geleistete Arbeiten:</u></b></p> <p>Die im FEM-Programm berechneten Knotenverschiebungen bzw. Bauteilverformungen müssen aus dem FEM-Programm exportiert und in die DEM-Software eingelesen werden. FEM-Simulationen mit großen Verformungen erfolgen in der Regel über mehrere Lastschritte. Dies wurde über einen iterativen Export berücksichtigt. Um den Export der Verformungsdaten zu automatisieren, wurden entsprechende Funktionen in der programminternen Makro-Programmiersprache entwickelt.</p> <p>Es wurden Programmierskripte zum Import von Lastdateien aus der DEM in der dem FEM Programm eigenen Makroprogrammiersprache erstellt.            Anhand von einfach analytisch berechenbaren Problemstellungen wurde das Ergebnis der numerischen Berechnung mit der analytischen Lösung verglichen.</p>				
<p><b><u>Anmerkungen:</u></b>            Für die durchgeführten Arbeiten in AP2 Punkt 2.3 <i>Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen</i> mussten entgegen der ursprünglichen Planung insgesamt zwei Monate mehr aufgewendet werden. Im Gegensatz dazu konnten in AP3 Punkt 3.2.1 <i>Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes</i> insgesamt zwei Monate eingespart werden.</p>				

<b>AP 3 – Validierung</b>				
Geplante Laufzeit:	04/2014 – 04/2015		Insgesamt kalkulierte PM:	19 PM
Tatsächliche Laufzeit:	06/2014 – 04/2015		Insgesamt eingesetzte PM:	17 PM
Projektpartner	ILM	<b>IBAF</b>		
kalkulierte PM:	7 PM	<b>12 PM</b>		
eingesetzte PM:	7 PM	<b>10 PM</b>		
<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <p><b><u>Arbeitsinhalte:</u></b>  Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstands.  Durchführung von DEM-Simulationen mit Parametervariation zur Kalibrierung der Simulationsparameter.  Durchführung gekoppelter DEM-MKS-FEM Simulationen.</p> <p><b><u>Geplantes Arbeitsergebnis:</u></b>  Konstruktion und statische Auslegung eines Validierungsversuchsstandes zum Nachweis des Realitätsgrades der gekoppelten Simulationsergebnisse.  Erstellung kalibrierter DEM-Parameter.  Reproduzierbare und mit dem Experiment übereinstimmende Simulationsergebnisse.</p>				
<p><b><u>Geleistete Arbeiten:</u></b>  Die Konstruktion des Versuchsstandes wurde planmäßig Ende August 2014 durch IBAF abgeschlossen. Die Fertigung des Versuchstandes konnte planmäßig durch den Projektpartner ILM durchgeführt werden.  Um den Realitätsgrad der gekoppelten DEM-FEM-MKS-Simulationen nachzuweisen, wurden die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen aus zahlreichen Versuchen verglichen.  Zur Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ILM eine Parameterstudie mit 150 Simulationen durchgeführt.</p>				
<p><b><u>Anmerkungen:</u></b>  Für die durchgeführten Arbeiten in AP2 Punkt 2.3 <i>Verifizierung der Schnittstellen-Algorithmen</i> mussten entgegen der ursprünglichen Planung insgesamt zwei Monate mehr aufgewendet werden. Im Gegensatz dazu konnten in AP3 Punkt 3.2.1 <i>Entwicklung und Konstruktion eines Validierungsversuchsstandes</i> insgesamt zwei Monate eingespart werden.</p>				

<b>AP 4 – Entwicklung von Verfahren zum Post-Prozessing der Simulationen</b>				
Geplante Laufzeit:	05/2015 – 07/2015		Insgesamt kalkulierte PM:	6 PM
Tatsächliche Laufzeit:	05/2015 – 07/2015		Insgesamt eingesetzte PM:	6 PM
Projektpartner	ILM	<b>IBAF</b>		
kalkulierte PM:	3 PM	<b>3 PM</b>		
eingesetzte PM:	3 PM	<b>3 PM</b>		
<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <p><b><u>Arbeitsinhalte:</u></b>          Programmierung eines Plug-In zur gemeinsamen Darstellung der Ergebnisdaten, sowohl der Partikel- als auch der FEM-Simulationsergebnisse in Falschfarbendarstellung für das Visualisierungsprogramm ParaView.</p> <p><b><u>Geplantes Arbeitsergebnis:</u></b>          Erstellung eines Visualisierung-Plug-In. Export von FEM-Geometrien in einem für ParaView lesbaren Datenformat.</p>				
<p><b><u>Geleistete Arbeiten:</u></b>          Zur Darstellung der verformten FEM-Geometrien in Falschfarbendarstellung wurde eine Exportfunktion in APDL erstellt, die neben den Knotenpunkten die Berechnungsergebnisse (u.a. Knotenverschiebungen, vonMises-Spannungen) ausgibt. Diese Dateien können direkt zusammen mit den Partikeldaten in dem Open Source Programm ParaView visualisiert und zu einem Video gerendert werden.</p>				
<p><b><u>Anmerkungen:</u></b> keine</p>				

<b>AP 5 – Publikation der Forschungsergebnisse</b>				
Geplante Laufzeit:	08/2015 – 08/2015		Insgesamt kalkulierte PM:	2 PM
Tatsächliche Laufzeit:	08/2015 – 08/2015		Insgesamt eingesetzte PM:	2 PM
Projektpartner	ILM	<b>IBAF</b>		
kalkulierte PM:	1 PM	<b>1 PM</b>		
eingesetzte PM:	1 PM	<b>1 PM</b>		
<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <p><b><u>Arbeitsinhalte:</u></b>  Die Mitarbeiter der Simulationsabteilung der IBAF GmbH erhalten eine Schulung zum Umgang mit der gekoppelten DEM-MKS-FEM Simulation und des Postprozessing mit dem Visualisierungs-Plug-In.</p> <p>Den Mitarbeitern des Vertriebs werden in einem firmeninternen Workshop die neuartigen Möglichkeiten der gekoppelten DEM-MKS-FEM Simulation aufgezeigt, um diese Dienstleistung offensiv bei potentiellen Kunden anbieten zu können.</p> <p>Die wissenschaftlichen Mitarbeiter des ILM erhalten eine Grundlagenschulung in FEM-Makro-Programmierung von erfahrenen FEM-Simulationsingenieuren der IBAF GmbH, damit sie kleine Änderungen an den für die Kopplung notwendigen Makros selbstständig vornehmen können.</p> <p>Veröffentlichung der Forschungsergebnisse auf diversen Fachtagungen, in Fachzeitschriften und im Internet.</p> <p><b><u>Geplantes Arbeitsergebnis:</u></b>  Die Mitarbeiter der IBAF-Simulationsabteilung können mit dem Simulationsprogramm umgehen.  Die Programmierer können nach Abschluss des Projekts den Softwareprototypen zu einem stabilen, marktreifen Produkt weiterentwickeln.  Die Vertriebsmitarbeiter können erste Kunden für die Dienstleistung der gekoppelten Simulation akquirieren.</p>				
<p><b><u>Geleistete Arbeiten:</u></b>  Im Rahmen eines firmeninternen Workshops wurden zwei Simulations-Ingenieure der IBAF GmbH im Umgang mit der gekoppelten Simulation durch den Projektbearbeiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik geschult. Weiterhin wurden dem Vertrieb der IBAF GmbH die neuartigen Möglichkeiten der Kopplung aufgezeigt. Die Mitarbeiter der IBAF-Simulationsabteilung konnten danach mit dem Simulationsprogramm umgehen. Es wurde ein Mitarbeiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik im Umgang mit den im Rahmen dieses Projektes erstellten APDL-Makros geschult. Der Abschlussbericht wurde erstellt und veröffentlicht.</p>				
<p><b><u>Anmerkungen:</u></b> keine</p>				

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts muss die Kopplung vor allem in Hinblick auf ihre numerische Leistungsfähigkeit und die Anwendungsfreundlichkeit weiterentwickelt werden, um den Aufwand zur Erstellung solcher Simulationen sowie die Laufzeit zu minimieren. Hier sind weitere Software-Entwicklungsprojekte denkbar.

Es wird außerdem damit gerechnet, dass sich in Bezug auf die Anwendung der DEM-MKS-FEM Kopplung für eine konkrete Problemstellung weiteres Forschungs- und Entwicklungspotential ergeben wird. Solche Aufgabenstellungen könnten zum Teil im Rahmen eines öffentlich finanzierten Forschungsprojekts in Kooperation mit Universitäten oder anderen Forschungsinstituten bearbeitet werden. Denkbar ist zum Beispiel, dass die Nutzung der gekoppelten Simulation im Bereich der Raumfahrttechnik zur Belastungsanalyse von Sonden-Bauteilen für die lunare Erkundung und Beprobung unter Berücksichtigung der reduzierten Gravitation ein ganz neues Anwendungsgebiet für die IBAF GmbH erschließen wird.

### **Geplante Maßnahmen zur wirtschaftlichen Verwertung nach Projektende mit Zeitangabe**

Nr.	Maßnahme	Monat/Jahr
1	Aktive Akquise von komplexen Problemstellungen mit den verifizierten und validierten Simulationsergebnissen aus diesem Forschungsprojekt	ab 2015
2	Veröffentlichung der Projektergebnisse auf Fachkonferenzen (z.B. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2016) und in industrienahen Zeitschriften im deutschsprachigen Raum (z.B. Schüttgut, Cement International, Glückauf)	ab 2015
3	Durchführung von Workshops beim Kunden, um über den neuen ganzheitlichen Simulationsansatz zu informieren	ab 06/2015
4	Präsentation der Projektergebnisse auf internationalen Fachmessen (z.B. BAUMA 2016)	ab 2016

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse wird dadurch dokumentiert, dass in Zusammenarbeit mit der Firma ITI GmbH, Dresden und der TU Dresden ein ZIM-Forschungsprojekt mit dem Titel „DEM-4-X - Systemlösung zur integrierten Simulation der Umwelt-Interaktion von Maschinen im Arbeitsprozess“ erfolgreich beantragt werden konnte. In diesem Forschungsprojekt werden Teile der entwickelten DEM-MKS-FEM-Kopplung für die Nutzung in der kommerziellen ITI-Software „Simulation X“ aufbereitet.

Nach Verifizierung und Validierung der gekoppelten Simulation müssen die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse eine wesentlich verkürzte Simulationszeit zum Ziel haben.

Der in der Vorhabenbeschreibung formulierte angestrebte Anwendernutzen wird in Anbetracht der erreichten Projektergebnisse vollumfänglich erreicht. Die Einschränkung der Systemgröße aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität ist nicht der entwickelten Methode einer gekoppelten DEM-MKS-FEM Simulation geschuldet, sondern dem rechentechnischen Aufwand der drei verwendeten Methoden selbst.

Einer Weiterentwicklung und anschließender wirtschaftlicher Verwertung des entwickelten Software-Prototyps steht nichts im Wege.

## **2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es sind zur Projektlaufzeit keine FuE-Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die die Zielstellung des Vorhabens obsolet machen.

Es sind keine Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die die Aussichten auf eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse beeinflussen.

Es wurden keine Fortschritte Dritter, die für die Zielerreichung im Projekt hilfreich gewesen wären, genutzt.

Es wurden einschlägige Internetportale (z.B. [www.cfdem.com](http://www.cfdem.com), <http://www.elsevier.de/>) sowie Fachzeitschriften (unter anderem: Schüttgut, BULK Solids Handling) sowie eine Internet-suche nach Schlüsselwörtern zur Informationsrecherche genutzt.



## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses aller Projektpartner

Neben der Veröffentlichung des Abschlussberichtes sind Beiträge auf den folgenden Fachtagungen und Veröffentlichungen in folgenden Zeitschriften geplant:

Nr.	Maßnahme	Monat/Jahr
1	Vortrag und Tagungsbandbeitrag Fachtagung "Fördertechnik im Bergbau", TU Clausthal (erfolgt)	01/2016
2	Vortrag und Tagungsbandbeitrag International Conference on Bulk Material Handling Transport and Storage (12th ICBMH 2016)	06/2016
3	Vortrag und Tagungsbeitrag Fachtagung Schüttgutfördertechnik TU München	09/2016
6	Verfassung eines Grundlagen-Artikels für die rezensierte international anerkannte Zeitschrift „Granular Matter“ (Impactfactor 1.75)	03/2016
7	Verfassung eines anwendungsorientierten-Artikels für die rezensierte international anerkannte Zeitschrift „Chemical Engineering Science“ (Impactfactor 2.43)	09/2016

Weiterhin wurde die Entwicklung der DEM-FEM-MKS-Kopplung für den VDBUM-Förderpreis 2016 eingereicht.

## Quellenverzeichnis

- [1] ANSYS: *Release 11.0 Documentation for ANSYS*, ANSYS Inc., 2007
- [2] Cundall, P. A.; Strack, O. D. L.: *A discrete numerical model for granular assemblies*. In: *Geotechnique*, Vol. 29 (1979) No. Iss: 1, pp. 47-65
- [3] Gröger, T.: *Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Schlauchgurtförderung*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität, Dissertation, 1999
- [4] Heckmann, A.; Otter, M.; Dietz S.; López J.D.: *The DLR FlexibleBodies library to model large motions of beams and of flexible bodies exported from finite element programs*. In: The Modelica Association, 2006
- [5] <http://www.cad.de/de>
- [6] Katterfeld, A.; Kunze, G.; Richter C.: *Plattform- und Softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion*. In: 5. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden: 2012
- [7] Katterfeld, A.; Mothes, M.; Deimel, T.: *DEM-Simulation von Grabprozessen*. In: 4. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden: 2009
- [8] Kloss, C., Goniva, C.: *LIGGGHTS – A New Open Source Discrete Element Simulation Software*. In: 5<sup>th</sup> International Conference on Discrete Element Methods, London, UK: 2010
- [9] Kunze, G.; Katterfeld, A.; Grüning T.: *Simulation maschineller Erdbauprozesse*. In: 15. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, München: 2010, II, 13 S.
- [10] Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker Band 1: Grundlagen*. 8. Auflage. Renningen: Expert Verlag, 2007
- [11] Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker Band 2: Strukturodynamik*. 5. Auflage. Renningen: Expert Verlag, 2008
- [12] Wallrapp, O.: *Standardization of Flexible Body Modeling in Multibody System Codes, Part 1: Definition of Standard Input Data*. In: *Mechanics of Structures and Machines*, 22(3):283-304, 1994

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel SimBa - Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und –beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Scholten, Jan Dratt, Mathias	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2015
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Forschungsbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IBAF – Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik GmbH Heinrichstraße 67 D-44805 Bochum	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 01 IS 13 006 B
	11. Seitenzahl 97
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 12
	15. Abbildungen 63
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) SimBa - Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und –beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen, Technische Informationsbibliothek (TIB) – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 29.02.2016	
18. Kurzfassung a) Stand der Technik Im heutigen Entwicklungsprozess moderner Maschinen und Anlagen der Baumaschinen- und Fördertechnik hat sich die Computersimulation von Bauteilen fest etabliert. Mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) können Bauteilbeanspruchungen bereits simuliert werden, bevor überhaupt ein Prototyp hergestellt wird. Seit den ersten Arbeiten zur FEM vor 60 Jahren haben sich Algorithmen und Computer-Hardware rasant entwickelt, sodass Bauteil- und Baugruppenberechnungen im Produktentwicklungsprozess heute zum Standardwerkzeug des Maschinenbau-Ingenieurs gehören. Die Diskrete Elemente Methode (DEM) wurde erstmals 1979 zur Lösung von geomechanischen Problemstellungen beschrieben. Heute kann sie im Bereich der Verfahrenstechnik und der Fördertechnik/Logistik ebenfalls ein Standardwerkzeug zur Modellierung von partikelmechanischen Problemstellungen bezeichnet werden. b) Begründung/Zielsetzung der Untersuchung Für die FEM-Simulation von Bauteilbeanspruchungen im Gebiet der Baumaschinen- und Fördertechnik sind detaillierte Lastannahmen als Eingangsgrößen erforderlich. Diese Lasten resultieren aus dem eigentlichen Arbeits- bzw. Transportprozess und können mit Hilfe der DEM zuverssrig durch moderne Rechentechnik simuliert werden. Dazu ist die Entwicklung eine Kopplungs-Schnittstelle zwischen DEM und FEM sowie zur Mehrkörper- bzw. Maschinensimulation (MKS) erforderlich. Eine solche Kopplung wurde im vorliegenden Forschungsprojekt entwickelt. Damit ist es erstmals möglich, die Bauteilbelastungen und -beanspruchungen auf Struktur-Ebene für Baumaschinen (bspw. Schaufeln, Fräsen) und Förderanlagen (bspw. Übergabestellen an Bandanlagen) mit realistischen, dynamischen Lastannahmen zu simulieren. c) Methode Es wurden die drei bekannten Simulationsmethoden DEM, FEM und MKS in einem open source Programm gekoppelt. In aufwändigen theoretischen und experimentellen Verifizierungs- und Validierungsuntersuchungen wurden sehr realitätsnahe Simulationsergebnisse nachgewiesen. d) Ergebnis Das Ergebnis ist ein durch wissenschaftlich validierter Softwareprototyp, welcher von der IBAF GmbH weiterentwickelt und für eigene Fragestellungen im Rahmen von Consultingprojekten eingesetzt wird. e) Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Die entwickelte Softwarekopplung wird für Belastungs- und Beanspruchungsanalysen von Bauteilen eingesetzt, deren Lage, Geschwindigkeit und Beanspruchung stark von der Interaktion mit dem Schüttgut abhängt. Die Kopplung ist universell einsetzbar und kann für viele verschiedene Anwendungsfälle verwendet werden.	
19. Schlagwörter Diskrete Elemente Methode, Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode, opensource	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB)	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title SimBa - Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und –beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen	
4. author(s) (family name, first name(s)) Scholten, Jan Dratt, Mathias	5. end of project 31.08.2015
	6. publication date planned
	7. form of publication research report
8. performing organization(s) (name, address) IBAF – Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik GmbH Heinrichstraße 67 D-44805 Bochum	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01 IS 13 006 B
	11. no. of pages 97
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. references 12
	14. no. of tables 12
	15. no. of figures 63
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) SimBa - Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und –beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen, Technische Informationsbibliothek (TIB) – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 29.02.2016	
18. abstract a) State of the art In today's development process of modern machinery and equipment of construction and conveying technology, the computer simulation of components has become firmly established. Using the finite element method (FEM) component stresses may already be simulated before any prototype is produced. From the first works to FEM 60 years ago, algorithms and computer hardware have developed rapidly, so that part and assembly calculations in the product development process today are standard tools of the mechanical engineer. The Discrete Element Method (DEM) was first described in 1979 for solving geomechanical problems. Today, the DEM can be called a standard tool for modeling particle mechanical problems in the field of chemical engineering and materials handling / logistics. b) project objectives Detailed design loads are required as input variables for the FEM simulation of component stresses in the field of construction machinery and conveying technology. These loads result from the actual operation or transport process, and can be simulated reliably using the DEM by modern computing technology. For the combined use of both methods the developing of a coupling interface between DEM and FEM as well as multi-body or machine simulation (MBS) is required. Such a coupling has been developed in this research project. Thus it is now possible, to simulate the stresses and the deformation of parts on a structural level for construction equipment (eg. Blades, milling) and conveyors (for example, transfer points on belt conveyors) with realistic load conditions. c) Research method The three known simulation methods DEM, FEM and MKS were coupled by the help of an open source program. In extensive verification and validation studies very realistic simulation results could be observed. d) Research results The result is a software prototype which was scientifically validated. The coupling software will be used and will be further developed from the project partner IBAF GmbH to solve industrial problems within consulting projects. e) Conclusion & applications The developed software coupling is used for stress and strain analysis of components, which orientation, speed and stress strongly dependent on the interaction with the bulk material. The coupling is universal and can be used for many different applications.	
19. keywords Discrete element method, multibody simulation, finite element method, open source	
20. publisher Technische Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB)	21. price