

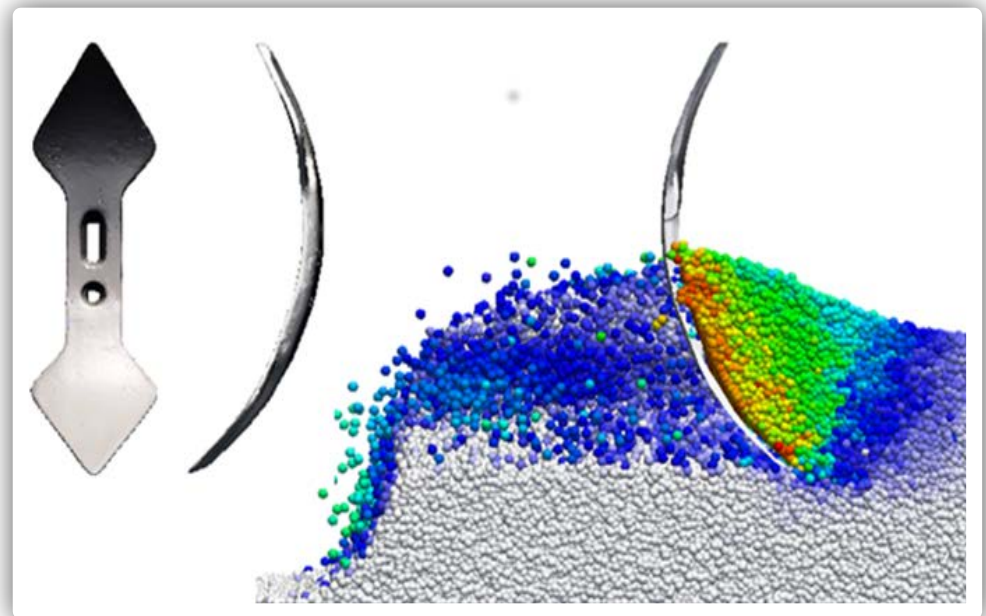
# Analyse von Grabprozessen durch systematische Nachbildung maschineller stoffgebundener Arbeitsprozesse mittels DEM

Dr.-Ing. Xin Wu, Institut für Landtechnik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
 Dipl.-Ing. Andreas Prüfer, Institut für Bau- und Landmaschinentechnik Köln, TH Köln  
 Dipl.-Ing. Jan Daniel Schendel, Valmet automotive GmbH

**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**

Vortragender:  
**Dipl.- Ing. Andreas Prüfer**  
**Institut für Bau- und**  
**Landmaschinentechnik**  
**TH Köln**

Dresden, 21.09.2018



# Gliederung

## 1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

➤ 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche

➤ 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren

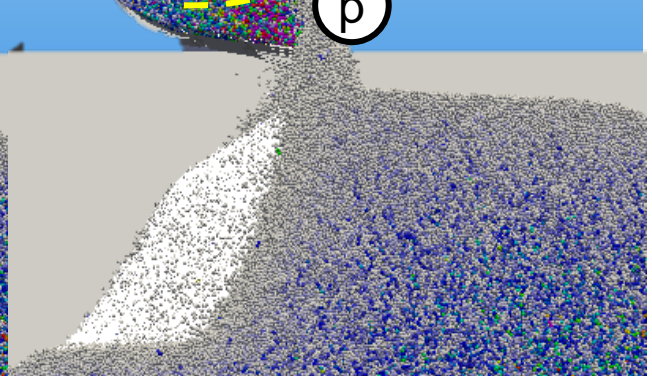
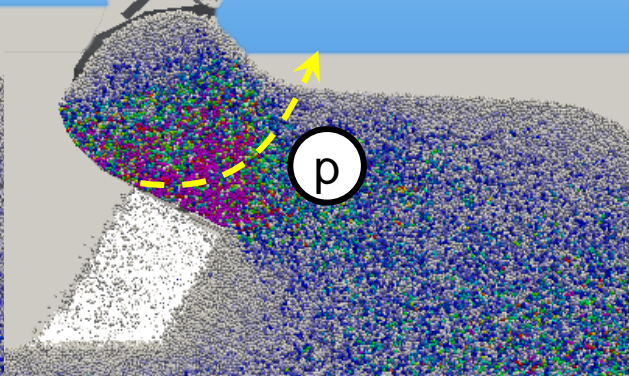
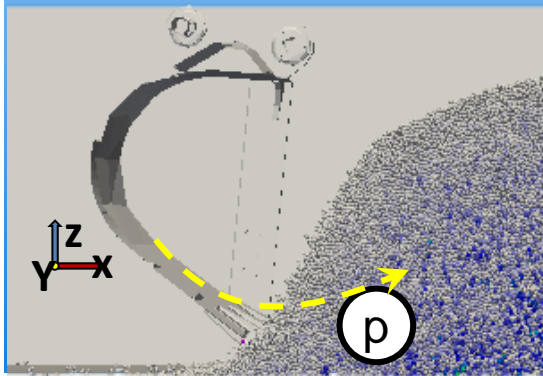
➤ 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse

4. Zusammenfassung und Ausblick

# Maschineller stoffgebundener Arbeitsprozess

## Begriffe und Zielstellung:

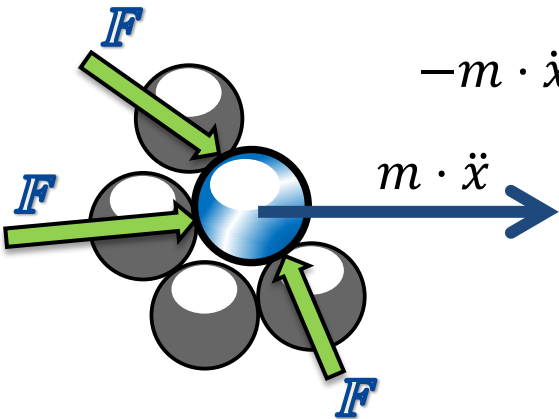
- (w) Arbeitswerkzeug (Löffel)
- (e) Arbeitsobjekt (Erdstoff)
- (p) Arbeitsprozess (Graben)
- (v) Charakteristisches Verhalten
- ⇒ Interaktion Werkzeug-Stoff
- ⇒ Energetische Betrachtung
- ⇒ Technologische Beurteilung



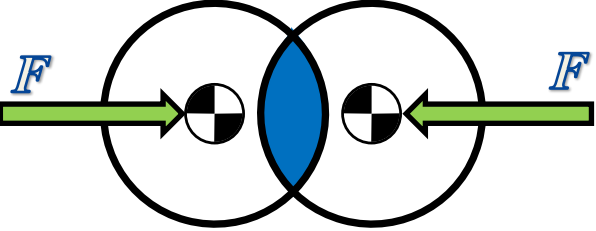
# Diskrete Elemente Methode (DEM)

**Kontinuumsgesetz**

Newton's 2<sup>nd</sup> law


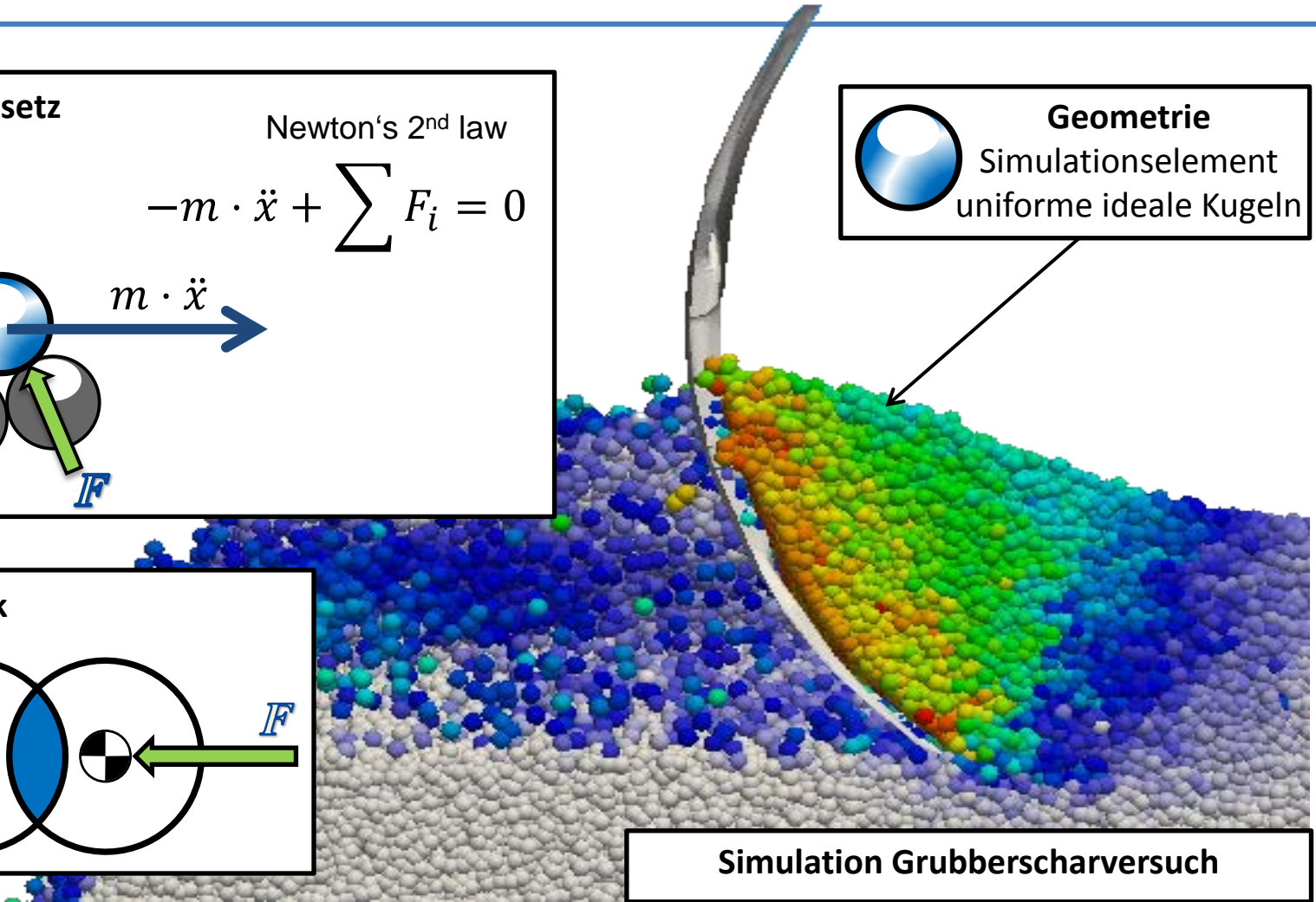
$$-m \cdot \ddot{x} + \sum F_i = 0$$


**Kontaktphysik**



**Geometrie**

Simulationselement  
uniforme ideale Kugeln

**Simulation Grubberscharversuch**

# Gliederung

1. Einleitung

**2. Konzept der Vorgehensweise**

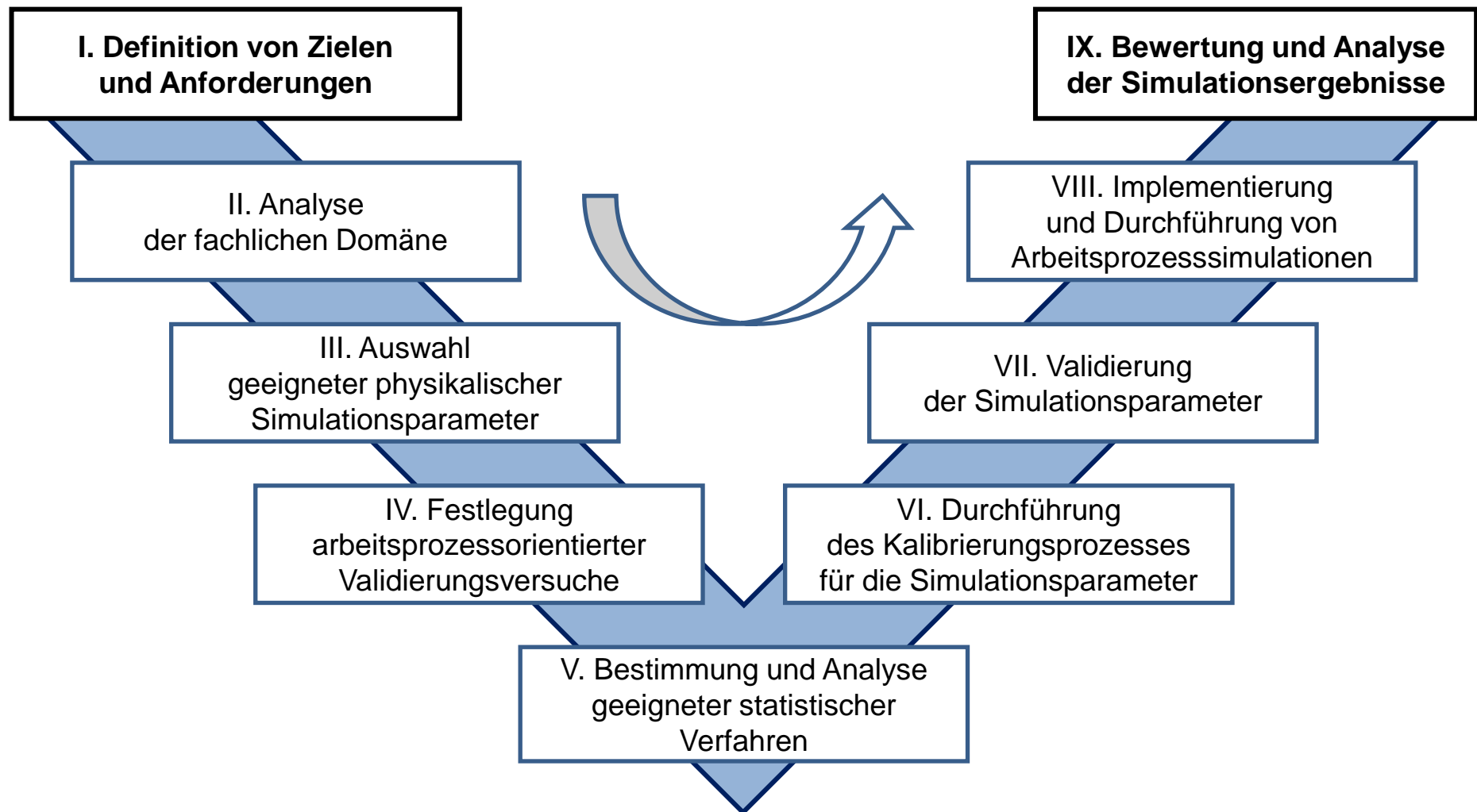
3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

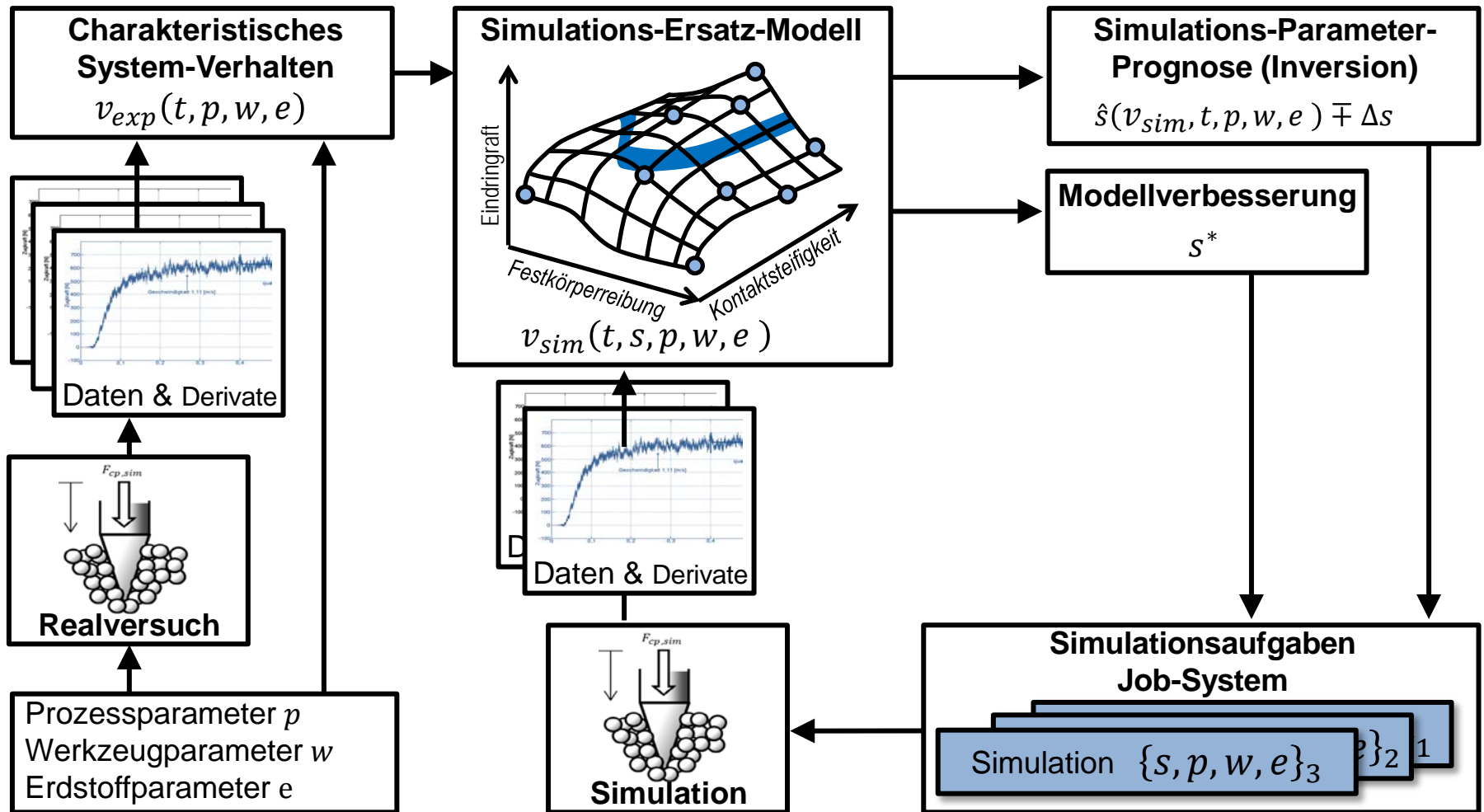
- 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
- 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren
- 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse

4. Zusammenfassung und Ausblick

# V-Modell als Grundkonzept



# Ersatzmodell und Inversion



# Gliederung

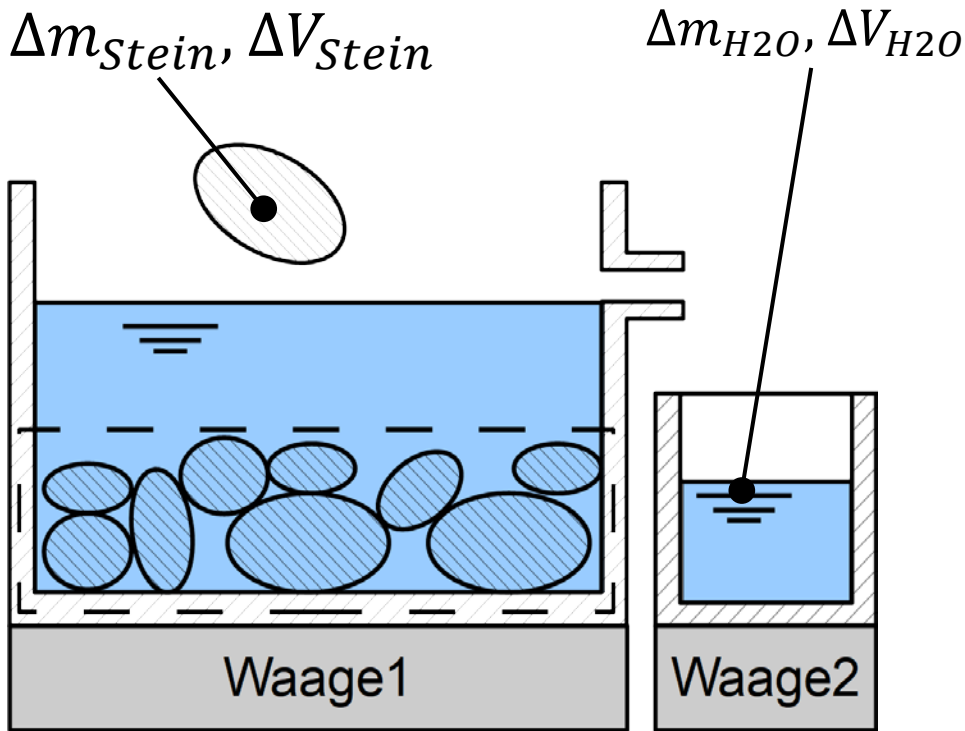
1. Einleitung
2. Konzept der Vorgehensweise
- 3. Implementierung des Konzeptes**  
**(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)**
  - **3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche**
  - 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren
  - 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse
4. Zusammenfassung und Ausblick



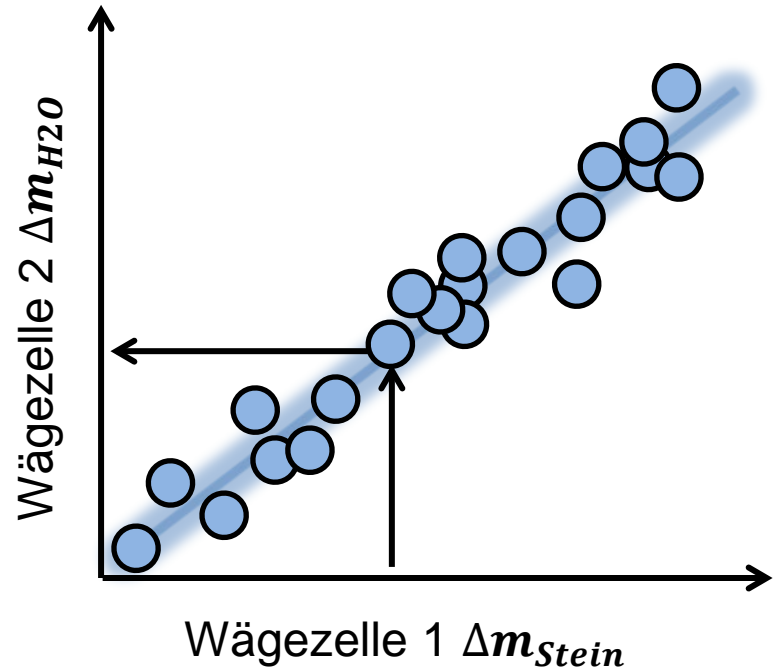
# Ausgewählte Versuche

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Messgrößen	Versuchszweck
1	Pyknometerversuch	Reindichte	Parameterermittlung
2	Penetrometerversuch	Eindringverhalten Eindringkraft Eindringtiefe	Kalibrierung
3	Rahmenscherversuch	Scherverhalten Scherfestigkeit Scherweg Setzung	Kalibrierung
4	Grubberscharversuch	Horizontale Zugkraft	Validierung
5	Zugkraftversuch	Horizontale Zugkraft	Validierung

# 1. Pyknometerversuch

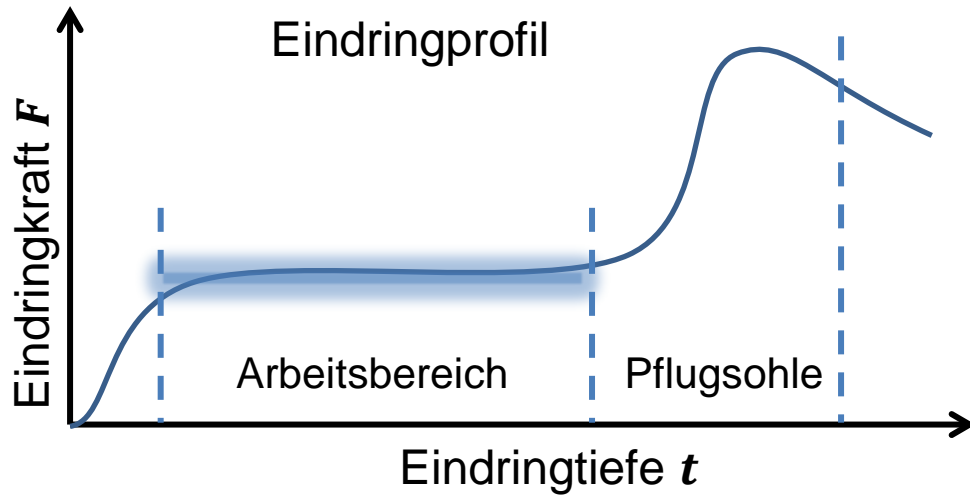
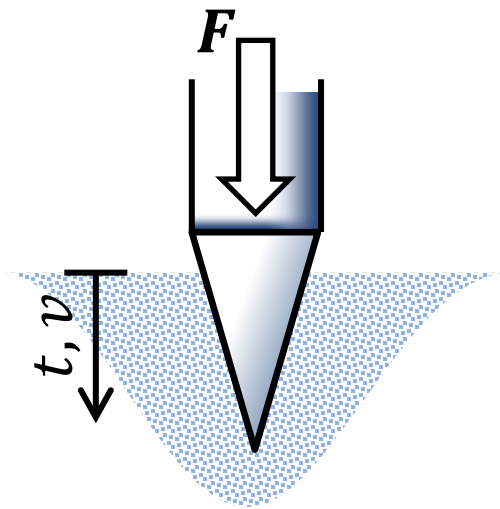


Messprinzip Überlaufbehälter



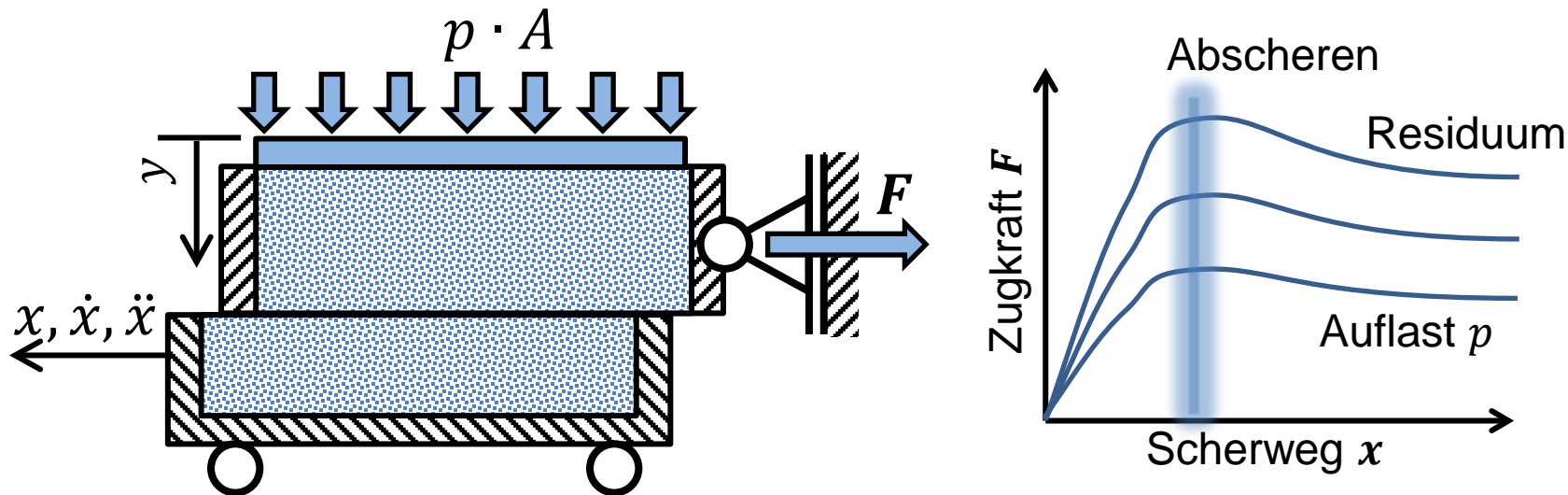
Analyseergebnis: Reindichte

## 2. Penetrometerversuch



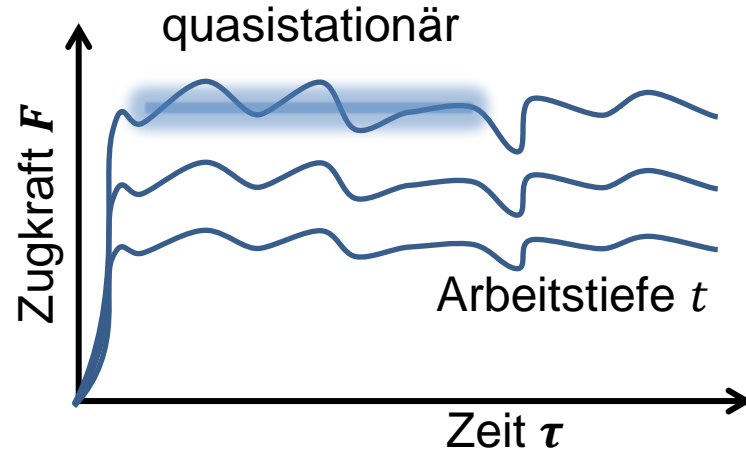
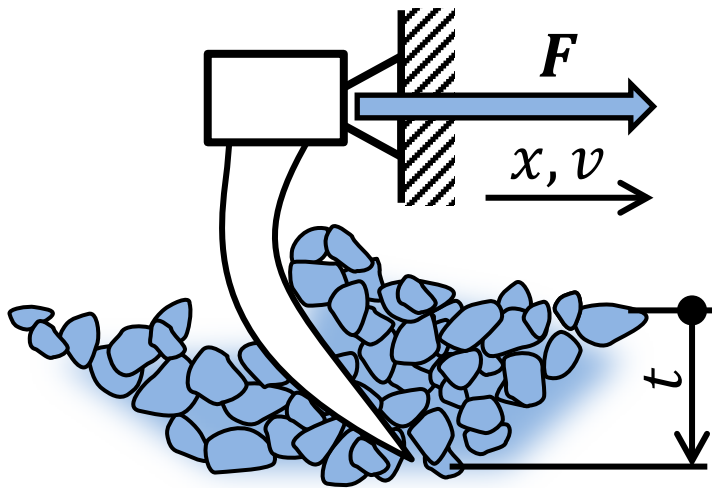
Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Konischer Probekörper Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Erdstoff	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Eindringgeschwindigkeit $v$ , Eindringtiefe $t$
Charakteristisches Verhalten	Eindringtiefe-Eindringkraft-Verhalten $F(t)$

### 3. Rahmenscherversuch



Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Scherzelle Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Kies	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Schergeschwindigkeit $v$ , Auflast $p$ , Scherfläche $A$
Charakteristisches Verhalten	Scherverhalten $F(p,x)$ , Scherfestigkeit $T$

# 4. Grubberscharversuch



Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Geometrie (3D-Lasercanner) Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Erdstoff	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Arbeitsgeschwindigkeit $v$ , Arbeitstiefe $t$
Charakteristisches Verhalten	Zugkraft-Zeit-Verlauf, Median der Zugkraft $medF(v,t)$

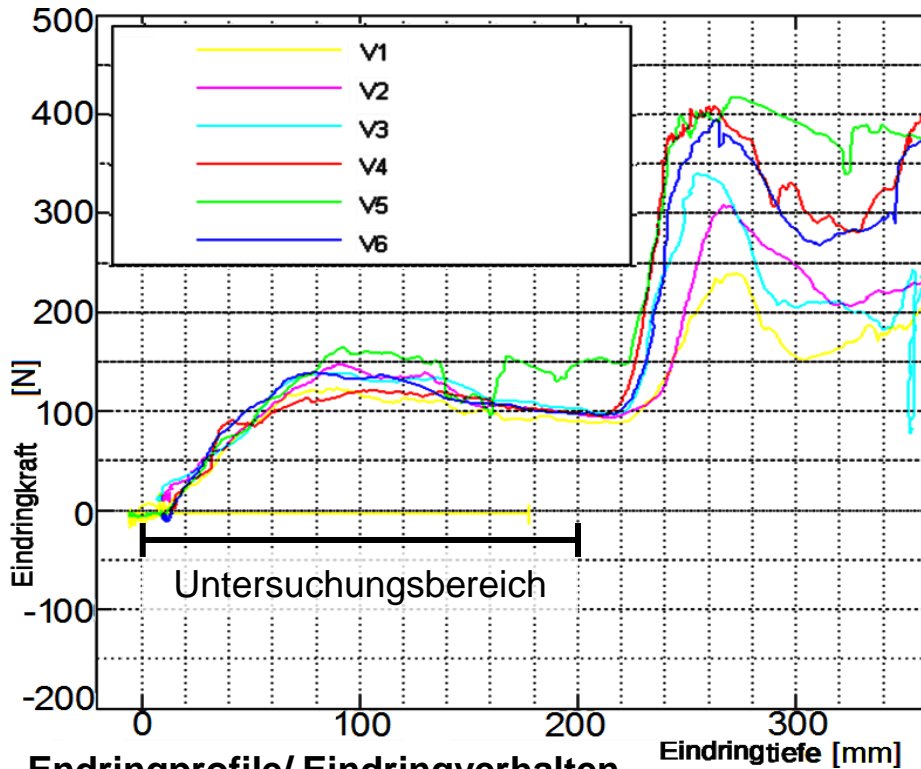
# Gliederung

1. Einleitung
2. Konzept der Vorgehensweise
3. **Implementierung des Konzeptes**  
**(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)**
  - 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
  - **3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren**
  - 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse
4. Zusammenfassung und Ausblick

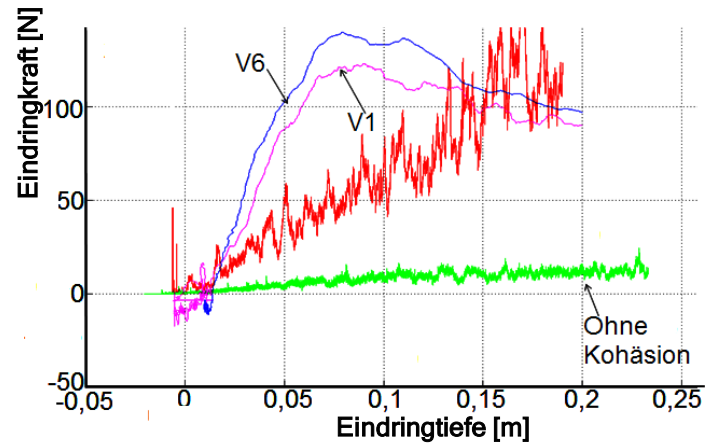
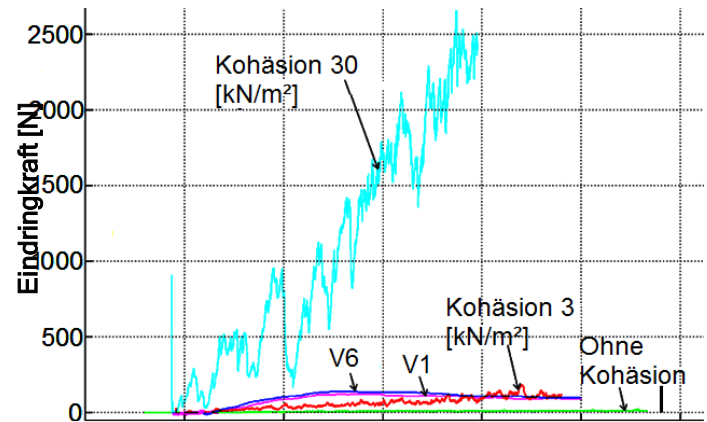
# Kalibrierung mittels Penetrometerversuch

## Eindringkraft am Penetrometer

- Vereinfachung
- Beschreibungsparameter: Eindringkraft
- Einfluss der Kohäsion

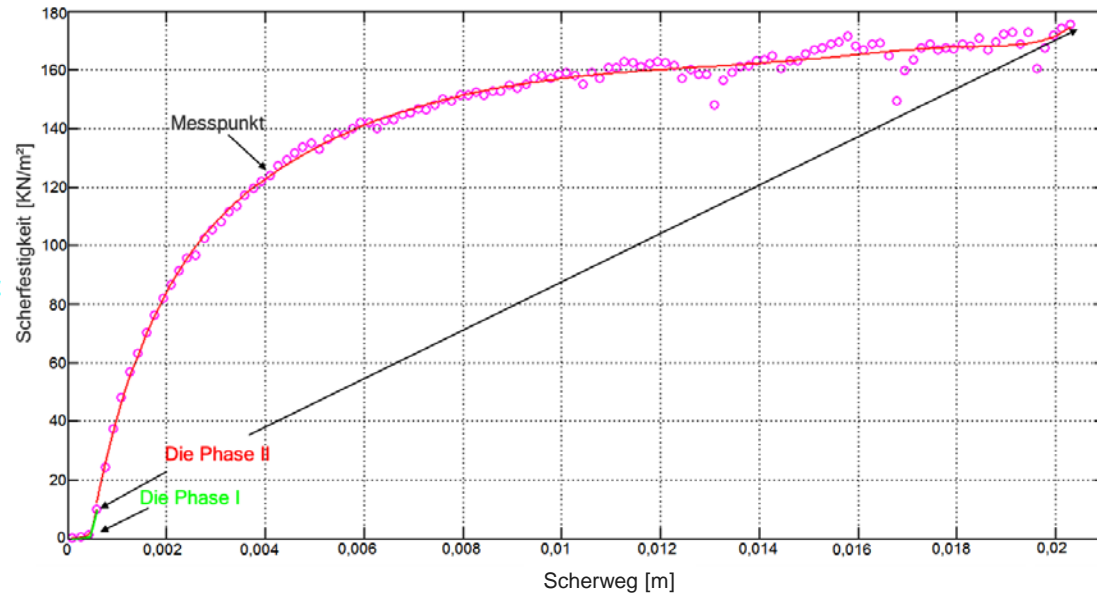
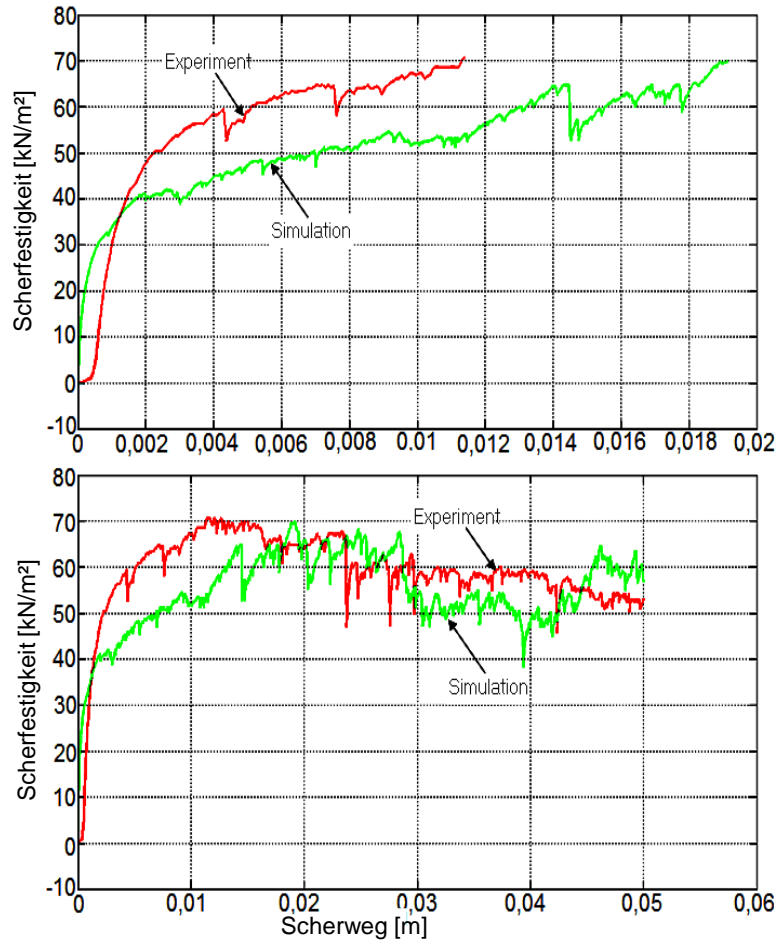


Eindringprofile/ Eindringverhalten  
Messungen in der Bodenrinne



Simulation mit unterschiedlichen  
Werten für die Kohäsionen (Detail vergrößert)

# Kalibrierung mittels Rahmenschererversuch

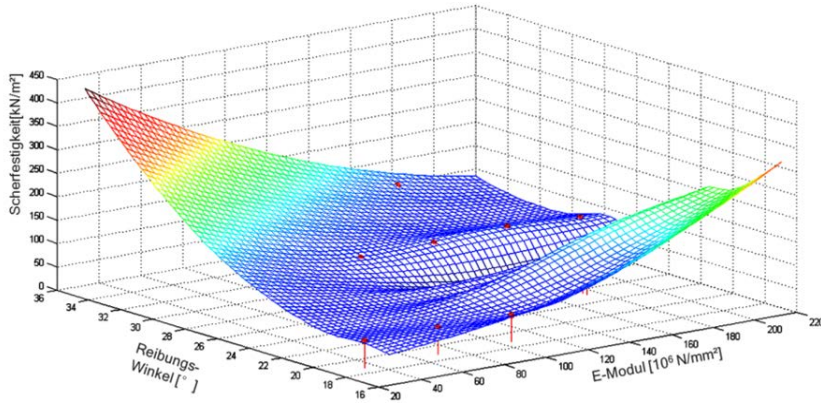


**Kriterium 1: Scherfestigkeit**

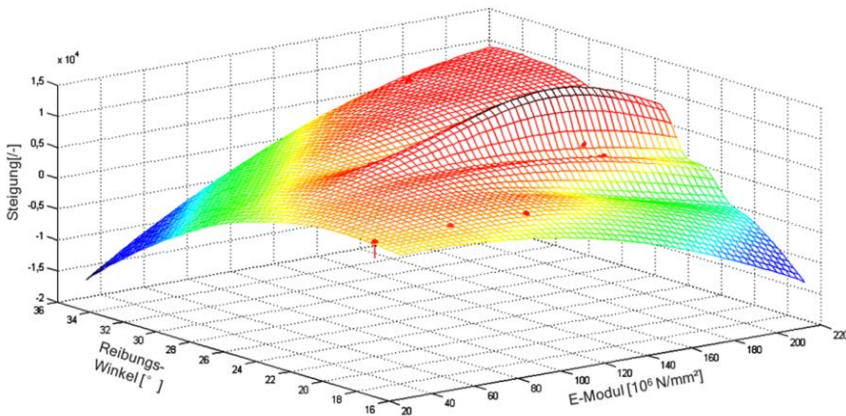
**Kriterium 2: Krümmung der Kurve**



# Kalibrierung mittels Rahmenschererversuch



Scherfestigkeit Kriterium<sub>1</sub>



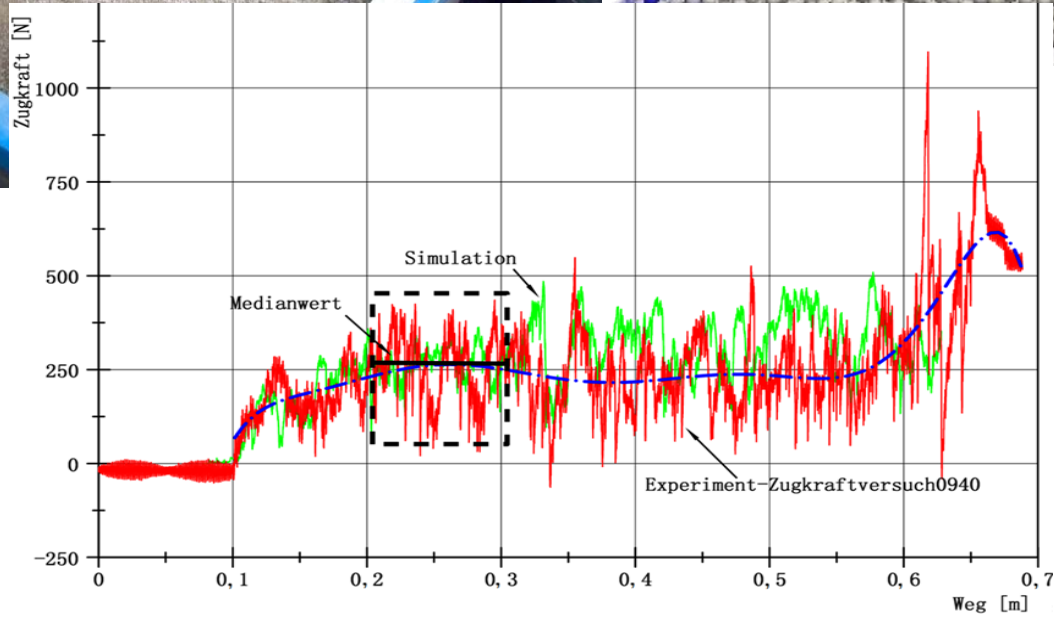
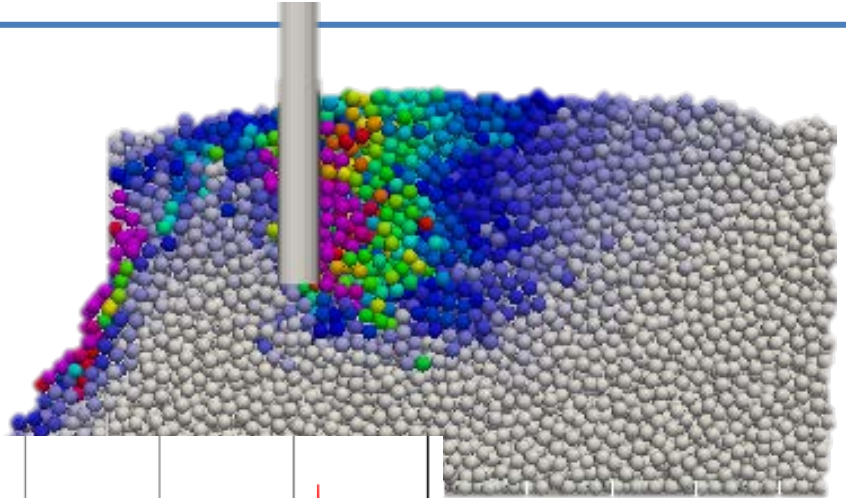
Kurvenkrümmung Kriterium<sub>2</sub>

Variation der Simulationsparameter  
 Multikriterielles Optimierungsproblem

$$\mathfrak{N}_1: (x_1, x_2) \rightarrow f_1(x_1, x_2) = \textit{Kriterium}_1$$

$$\mathfrak{N}_2: (x_1, x_2) \rightarrow f_2(x_1, x_2) = \textit{Kriterium}_2$$

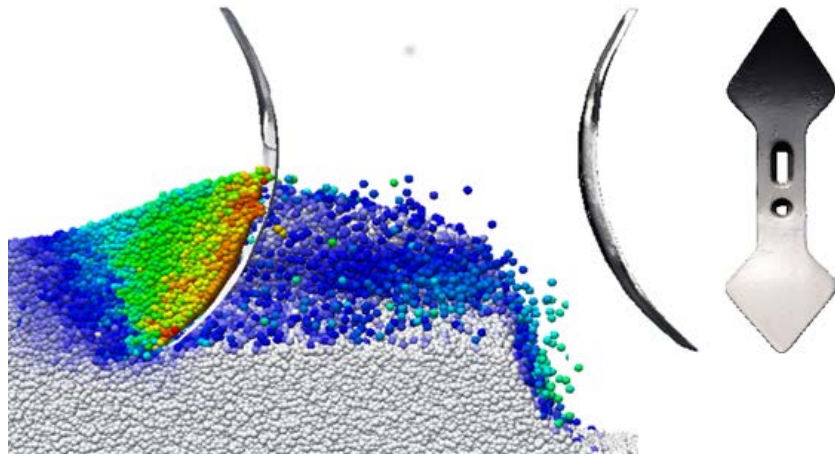
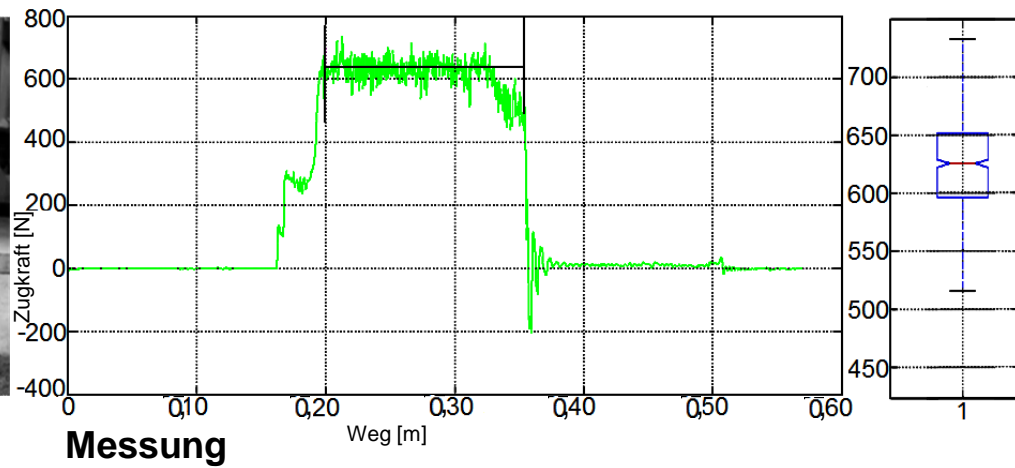
# Validierung mittels Zugkraftversuch



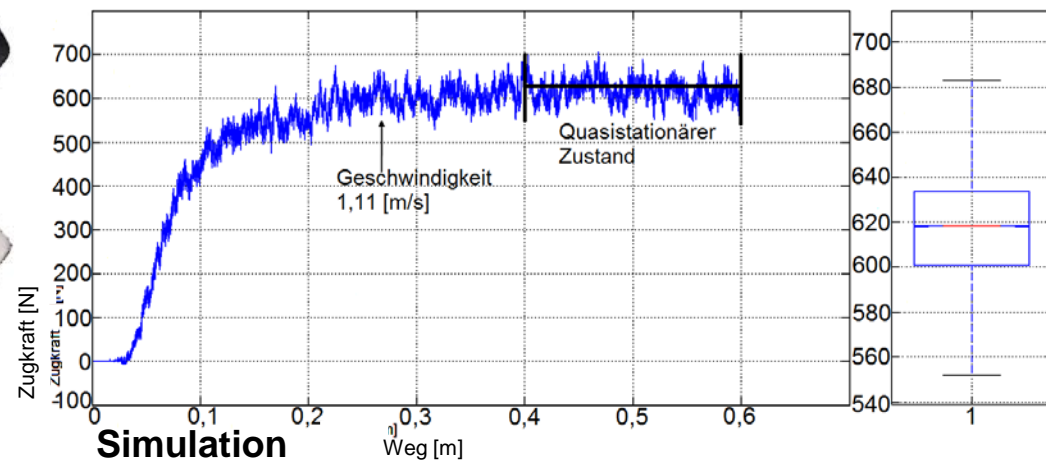
# Validierung mittels Grubberscharversuch



Laborversuch -Messung



Simulation mit YADE



# Gliederung

1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

**3. Implementierung des Konzeptes**

**(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)**

➤ 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche

➤ 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren

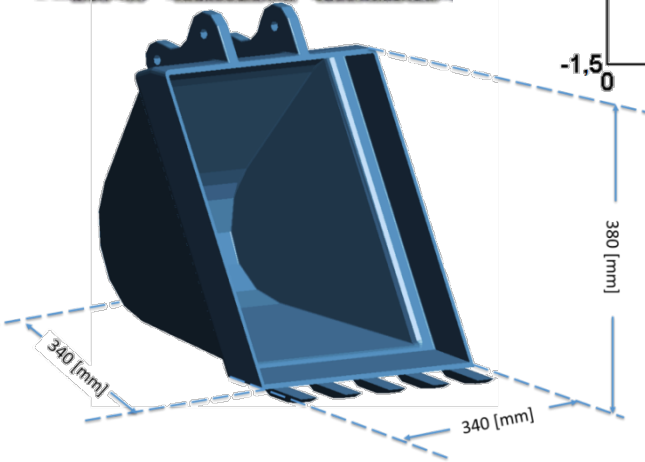
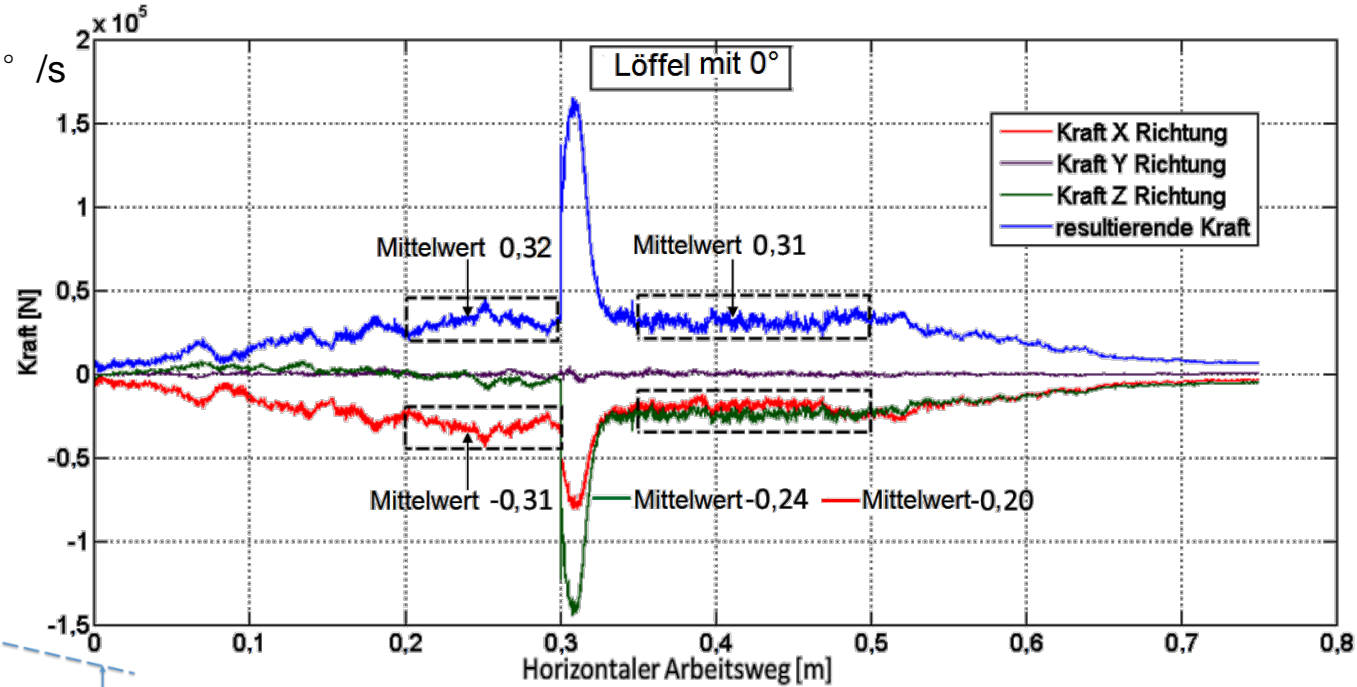
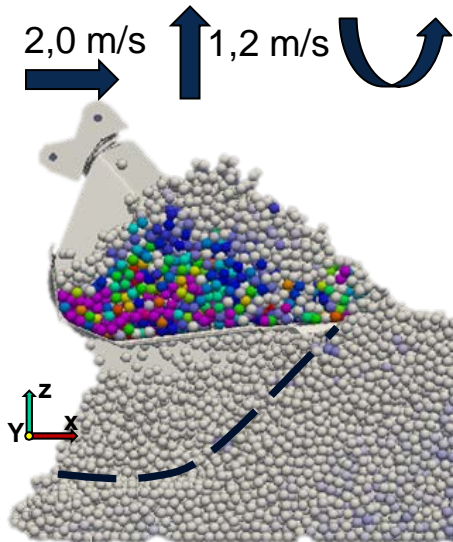
➤ **3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse**

4. Zusammenfassung und Ausblick

# Ausgewählte Arbeitsprozesssimulationen

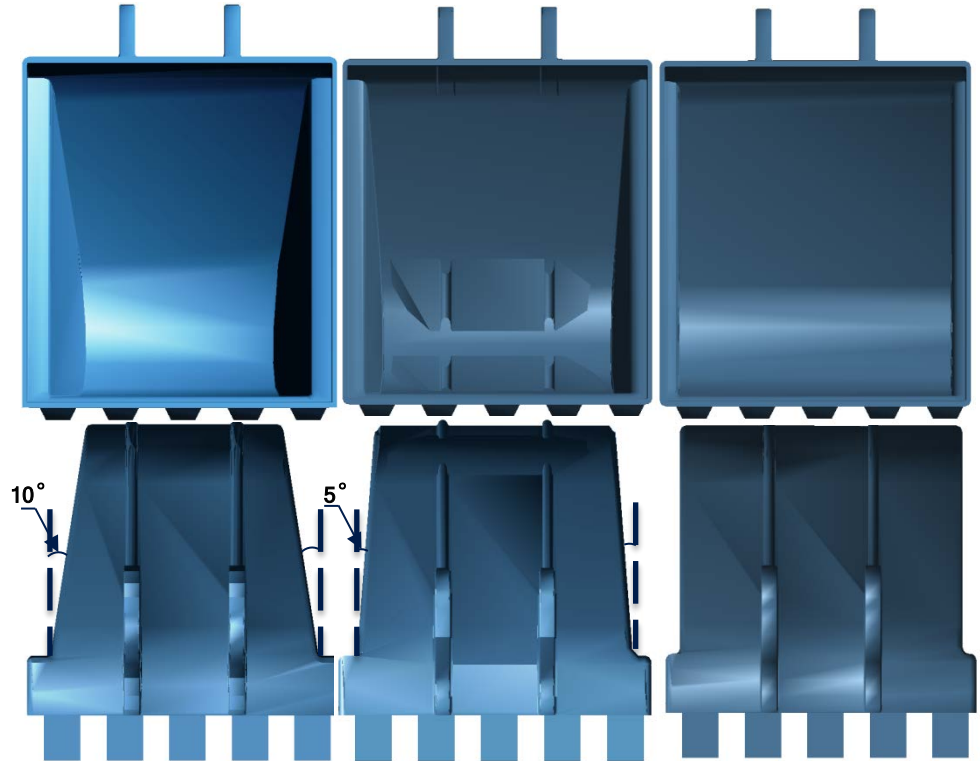
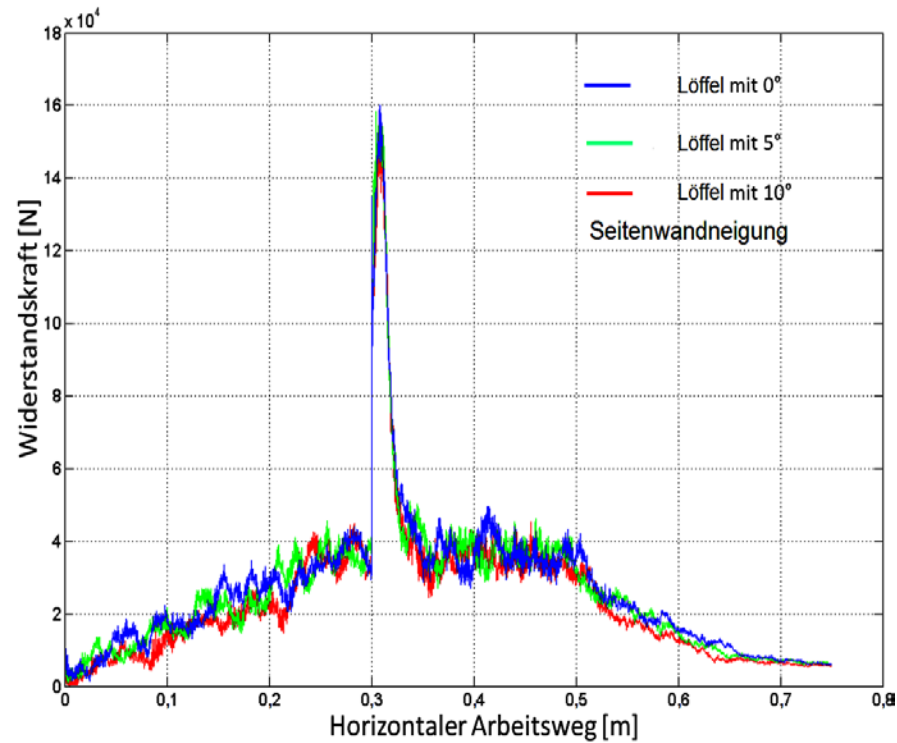
Lfd. Nr.	Simulation	Simulationszweck	Ermittelte Größen
1	Gabprozess an Minilöffeln unter Variation der Seitenwände	Simulation Arbeitsprozess (Werkzeugeinfluss) Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft Füllmenge
2	Gabprozess von Löffel eines XCMG Baggers	Simulation Arbeitsprozess Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft
3	Planierschild	Simulation Arbeitsprozess Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft

# Grabprozess am Minilöffel

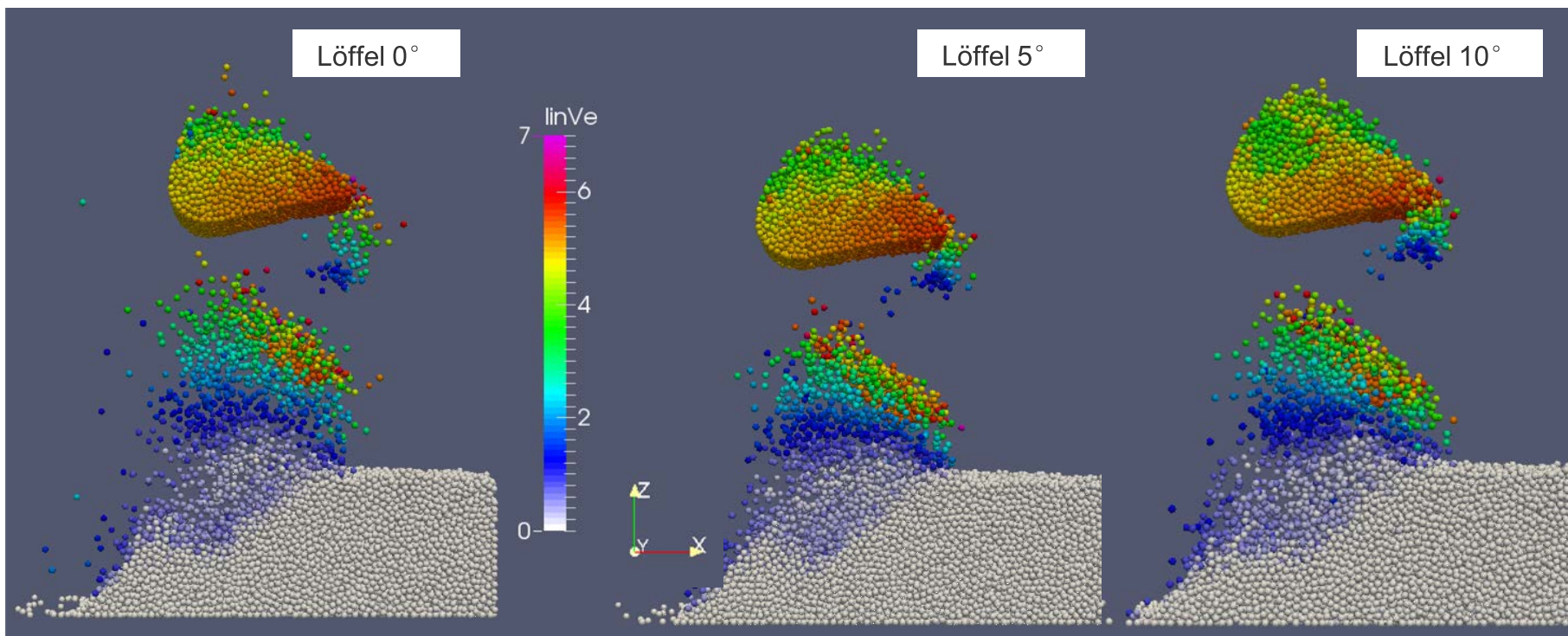


Vergleich mit Theoretischem Grabkraft-Modell  $F_{th} = 13 \text{ kN}$   
 (nach G. Kunze)  $F_{sim} = 32 \text{ kN}$

# Variation der Werkzeugform am Minilöffel



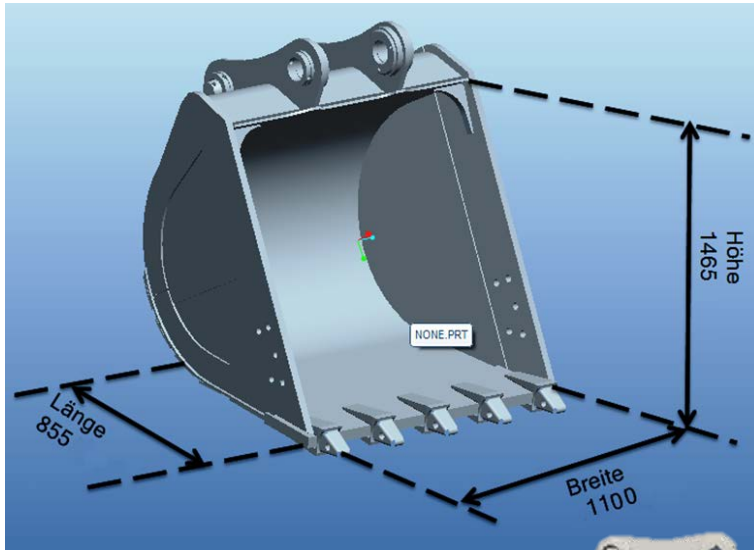
# Variation der Werkform am Minilöffel



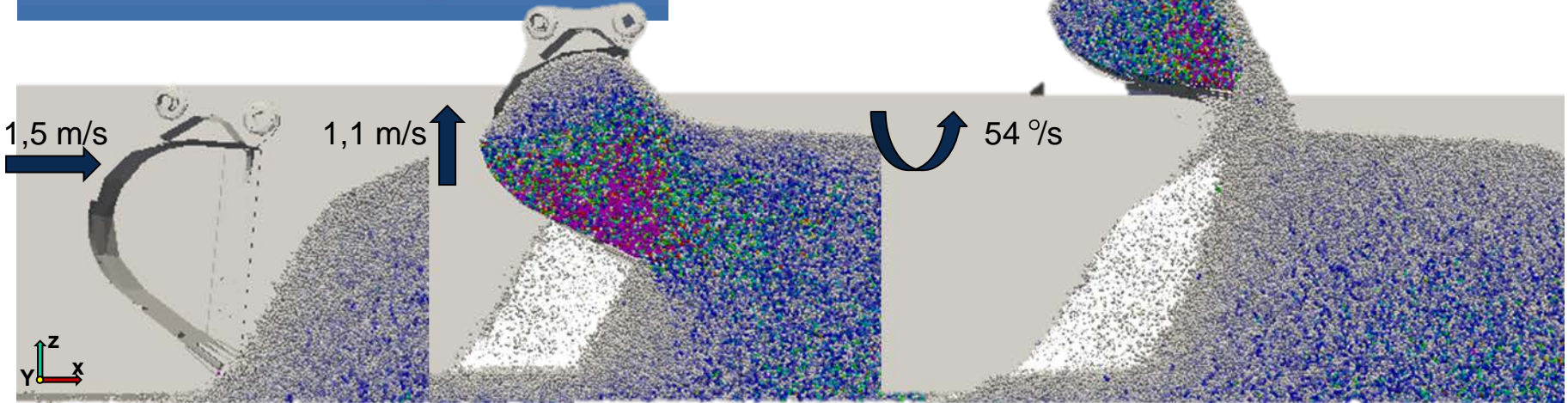
- Löffel 0° -Seitenwand: Lademasse 43,1 kg (4476 Kugeln )
- Löffel 5° -Seitenwand: Lademasse 47,5 kg (4926 Kugeln)
- Löffel 10 ° -Seitenwand: Lademasse 46,4 kg (4813 Kugeln)



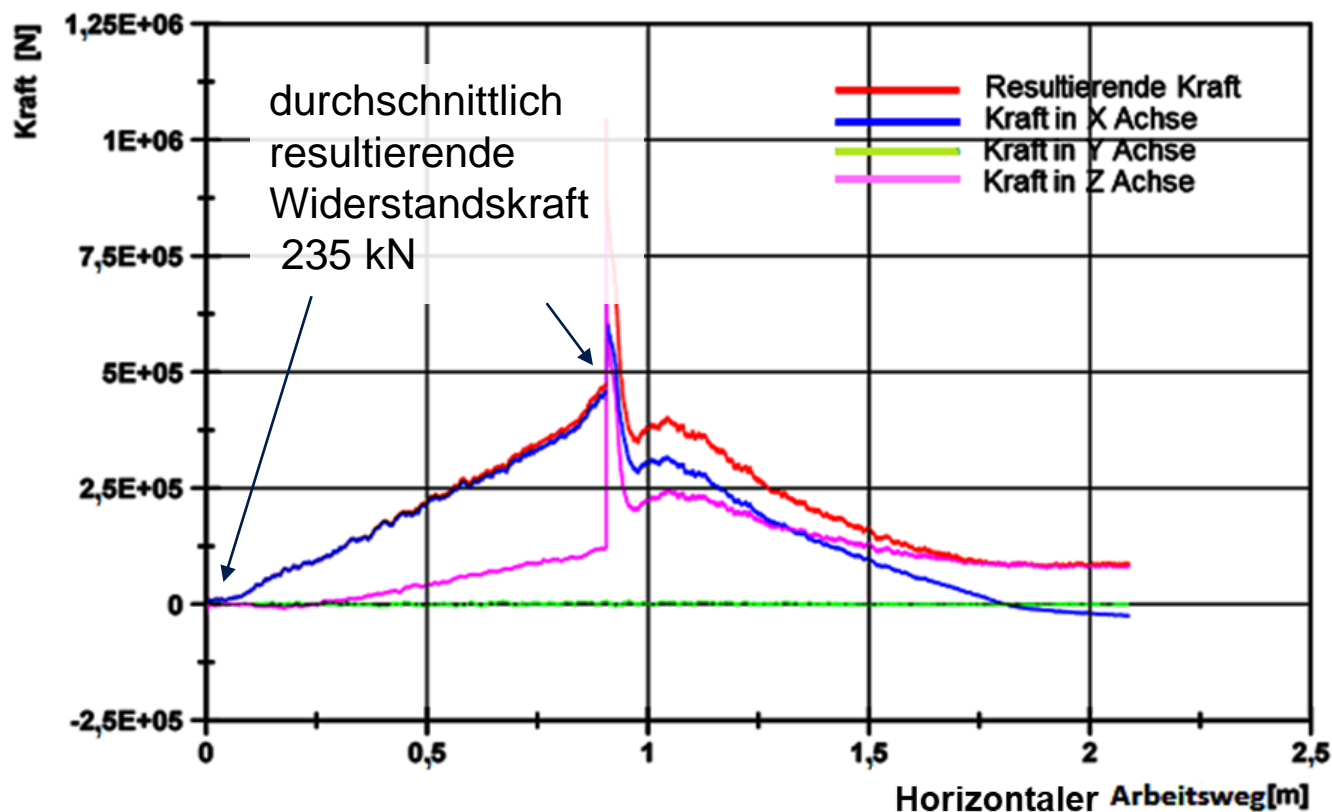
# Grabprozess am Löffel eines XCMG-Baggers



- Startpunkt (0,0 m)
- Wendepunkt (0,907 m)
- Schlusspunkt (2,1 m)



# Grabprozess am Löffel eines XCMG-Baggers

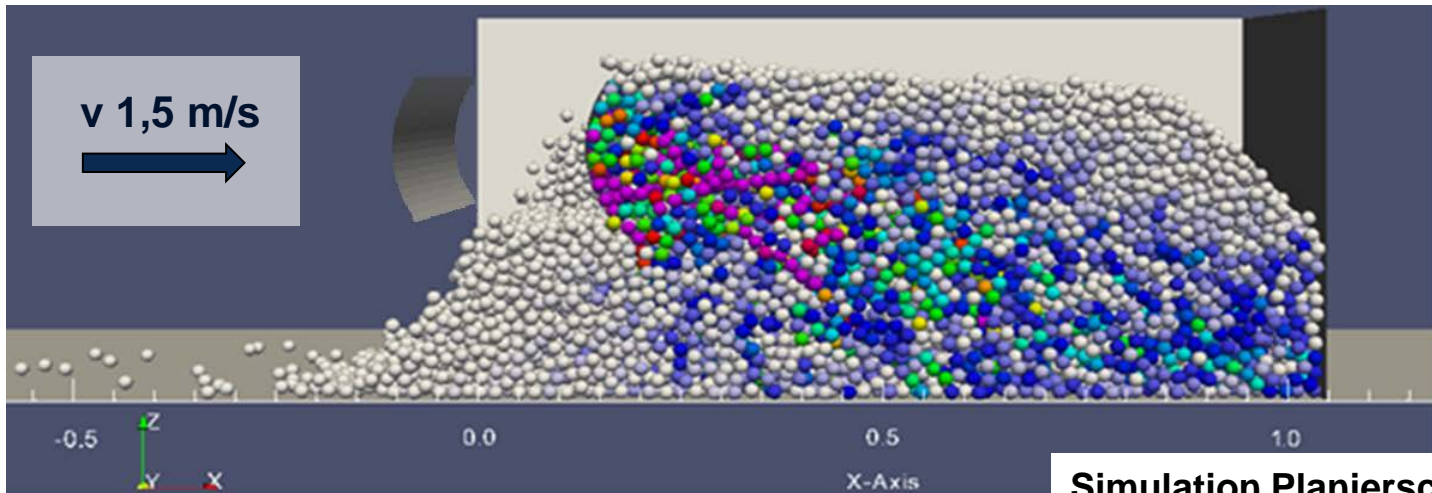


Vergleich mit Theoretischem Grabkraft-Modell

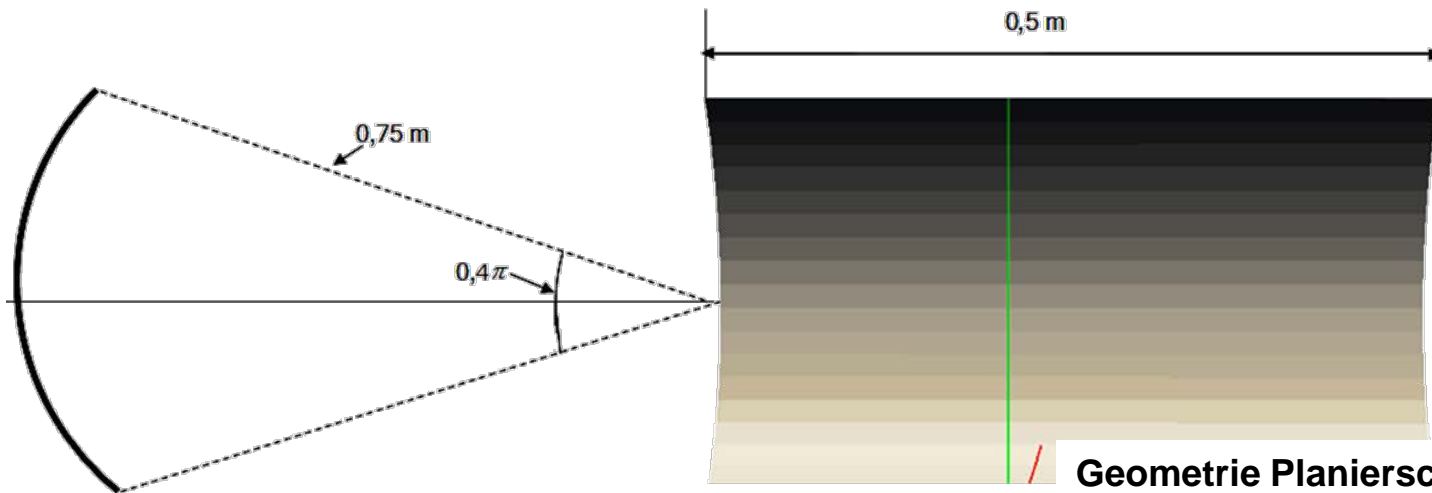
$$F_{th} = 113 \text{ kN}$$

$$F_{sim} = 235 \text{ kN}$$

# Arbeitsprozess eines Planierschildes

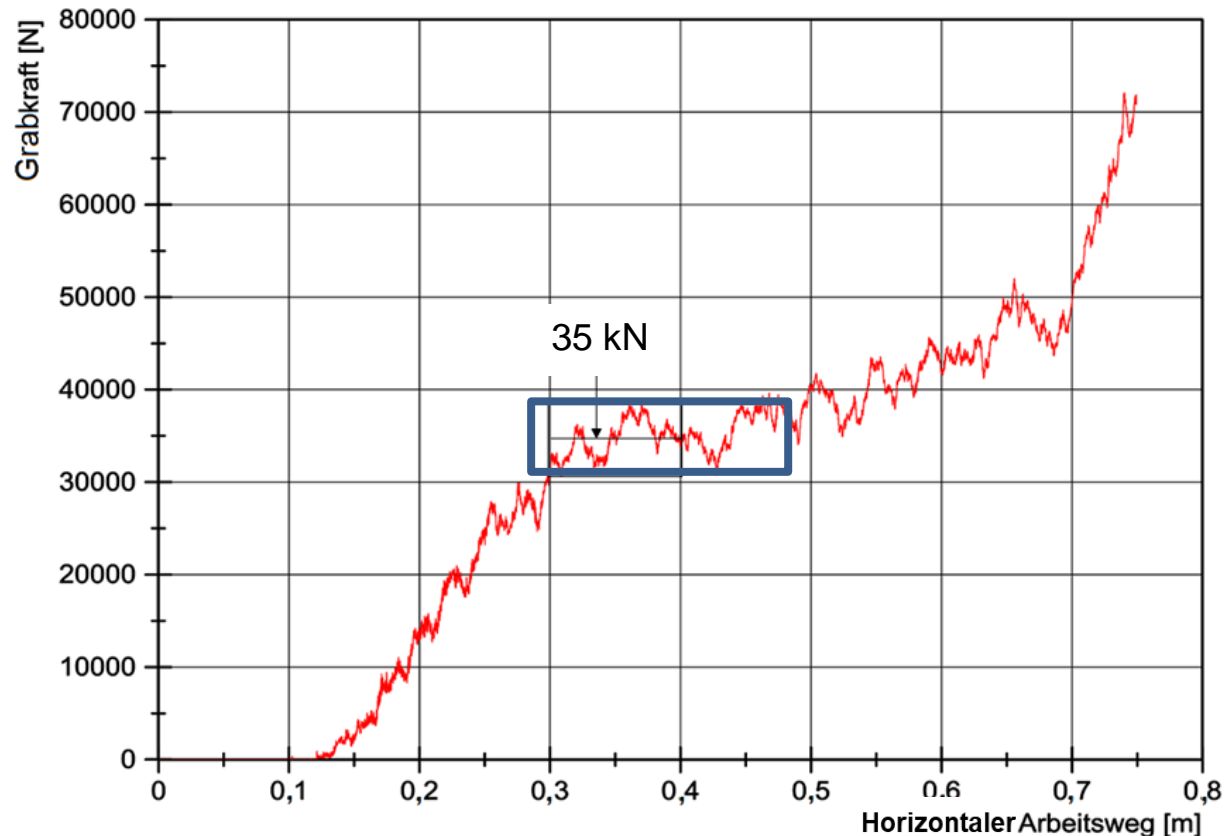


**Simulation Planierschild**



**Geometrie Planierschild**

# Arbeitsprozess eines Planierschildes



Vergleich mit Theoretischem  
 Grabkraft- Modell  $F_{th}=35 \text{ kN}$

# Gliederung

1. Einleitung
2. Konzept der Vorgehensweise
3. Implementierung des Konzeptes  
(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)
  - 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
  - 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren
  - 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse
4. **Zusammenfassung und Ausblick**

# Zusammenfassung

- Konzeptionierung der Vorgehensweise analog dem V-Modell (Ziel – Analyse – Synthese – Validierung)
- Auswahl der Kalibrierungs- und der Validierungsversuche sowie der statistischen Methoden und der Optimierungsverfahren
- Durchführung der Kalibrierungsprozesse mit dem Pentrometerversuch und dem Rahmenscherversuch in Kombination mit dem Kriging-Verfahren und der Multivariaten Analyse
- Durchführung der Validierungsprozesse mit dem Zugkraftversuch und dem Grubberscharversuch
- Aufbau der Simulationsmodelle für die Arbeitsprozesse von Minilöffel und XCMG-Löffel mit 0.8 m<sup>3</sup> Arbeitsvolumen sowie Planierschild
- Analyse der Simulationsergebnisse

## Ausblick

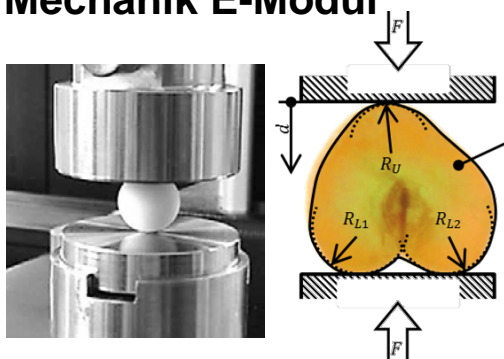
- Aufbau einer Stoff- und Prozess-Datenbank
  - Beschreibungsparameter oft in Arbeitsprozessen vorkommender Erdstoffe
  - Simulationsmodelle für oft verwendete Kalibrierungsexperimente
  - Simulationselemente für verschiedene Kornformen
- Überprüfung der Anwendungsmöglichkeiten weiterer statistischer Methoden
  - Künstliche neuronale Netze
  - Evolutionäre Algorithmen
  - Radial-Basis-Funktionen
- Identifikation weiterer Zielgrößen als geeignete Kriterien für Kalibrierungsverfahren
  - Residuum der Scherfestigkeit
  - Krümmung und Verlauf der Kurven

# Projekt ADALS – Anwenderfreundliche DEM

## Kornform



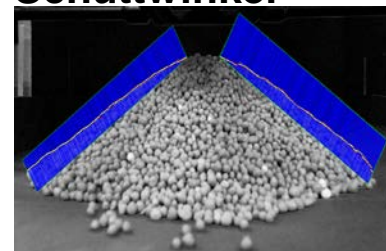
## Mechanik E-Modul



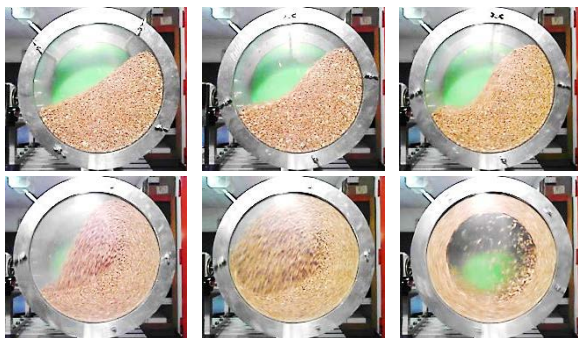
## Reindichte



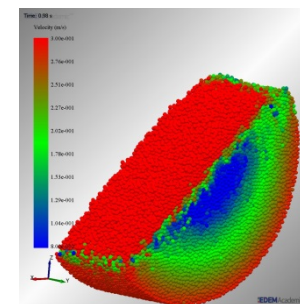
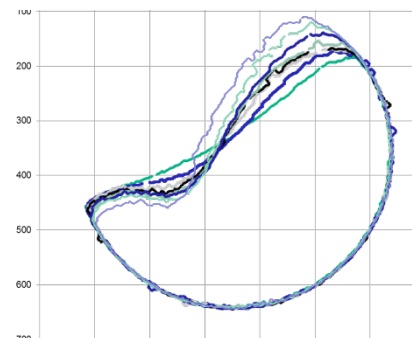
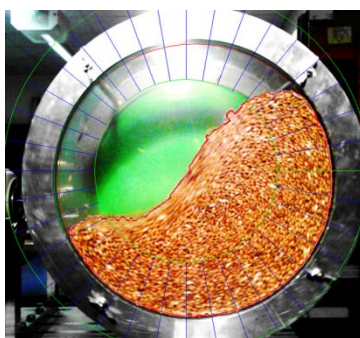
## Statischer Schüttwinkel



## Trommelversuch



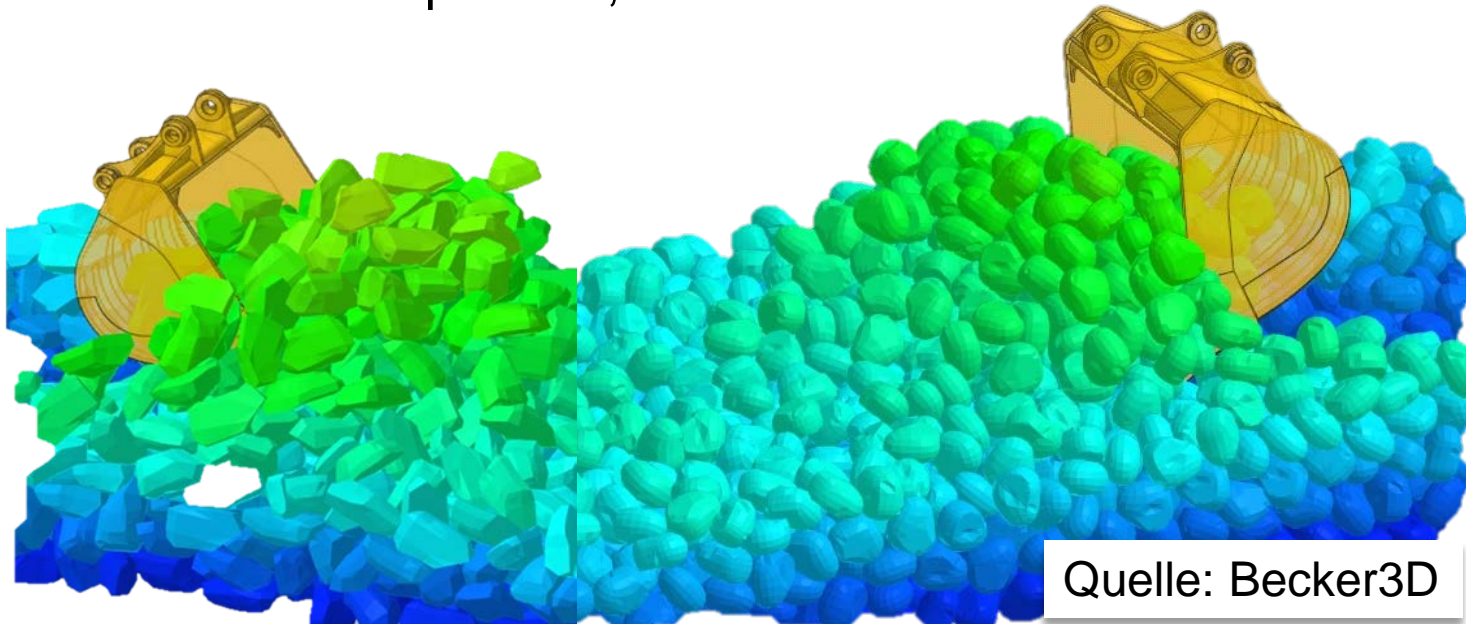
## Prozesssimulation und Vergleich





## Trends für die Zukunft

- Komplexere Partikelformen
- Komplexere Physik
- Direkte Interaktion mit  
CFD – MKS – FEM – CAE<sup>x</sup>
- Bessere Problemzerlegungsverfahren
- Transparente, offene Simulation



Quelle: Becker3D

Danke



**»Knowledge builds bridges  
- education unites people.«**