

# Anwendung der PIV-Methode und klassischer Sensorkonzepte zur Bewertung moderner Verdichtungstechnologien

Alexander Knut<sup>1</sup>, Holger Pankrath<sup>1</sup>, Marco Barthel<sup>1</sup>, Ralf Thiele<sup>1</sup>

<sup>1</sup>HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, Karl-Liebknecht-Str. 132, 04277 Leipzig

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



FORSCHUNG AN  
FACHHOCHSCHULEN

## MOTIVATION

Maßnahmen zur Bodenverbesserung (z.B. durch Walzenzüge) sind zur Herstellung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Baugrundes notwendig. Diese Maßnahmen können dabei nach der Art des Energieeintrags (dynamisch / impulsartig), der Lokalisation des Energieeintrags (oberflächennah / in der Tiefe) bzw. der räumlichen Verteilung des Energieeintrags (flächig / punktuell) klassifiziert werden. Vor dem Hintergrund von Ressourcenknappheit und steigendem Kostendruck fokussiert sich das wissenschaftliche Interesse auf diesem interdisziplinären Themenfeld zusehends. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung neuer, bzw. der Verbesserung bestehender Technologien entlang der aufgezeigten Möglichkeiten des Energieeintrags. Der momentane Stand der Technik [1; 2; 3] zeigt, dass eine effektive Verdichtungstechnologie für den mitteltiefen Bereich von 2-5 m fehlt.

Seit 2012 arbeitet eine Forschergruppe im Rahmen des Projekts ECOmpact an der Erarbeitung eines Technologievorschlages zur effektiven Bodenverdichtung

des mitteltiefen Bereichs [4]. Das Projekt steht dabei auf drei Säulen. **Laborversuche** im kleinen Maßstab erlauben mit Hilfe der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) Einblicke in die bodendynamischen Vorgänge während der Verdichtung. Neben der eigentlichen Generierung des 2D-Verschiebungsfelds mit der PIV-Methode sind Maßnahmen im Pre- und Post-Processing durchzuführen. Die Kalibrierung der Kamera sowie die Aufbereitung der Verschiebungsfelder zur anschaulichen Darstellung sind hier die Kernaspekte der Arbeit mit MATLAB®. **Feldversuche** mit bestehenden Bodenverdichtungstechnologien, wie BOMAG-Walzenzügen und dem Impulsverdichter sind notwendig zum Geräteverständnis. Umfangreiche Messreihen an diesen Technologien wurden im Feld unter realen Umgebungsbedingungen durchgeführt. MATLAB® ermöglicht hierbei die Auswertung der Daten im Frequenzbereich, deren Filterung und die Visualisierung sowie Gegenüberstellung mit **numerischen** Ergebnissen. Die Feld- und Labordaten fungieren als wichtige Validierungsgrundlage für die numerischen Modelle zur Neugeräteentwicklung in ABAQUS®.

## LABORVERSUCHE

Die PIV-Methode ist ein etabliertes Werkzeug zur Berechnung von Geschwindigkeitsfeldern in der Fluidmechanik. Aber auch geotechnische Problemstellungen (Verschiebung granularer Materialien) können mit Hilfe dieser Methode analysiert werden [5].

Im Rahmen des Projekts ECOmpact wurde ein kleinskaliger Versuchsstand zur Bewertung impulsartiger und dynamischer Verdichtungs Vorgänge konzipiert und umgesetzt (siehe Abb. 1). An diesem werden moderne Methoden der Photogrammetrie mit der PIV-Methode kombiniert, um das 2D-Verschiebungsfeld des Bodens mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Die Verschiebung des definiert eingebrachten granularer Bodenmaterials wird dabei mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 1000 **fps** erfasst und mit geoPIV [6] in MATLAB® berechnet. Untersucht werden Modelle der dynamischen Intensivverdichtung sowie des Impulsverdichters unter Variation verschiedener gerätespezifischer Parameter zur Bewertung deren Sensitivität.

## FELDVERSUCHE

Im Rahmen von Feldversuchen mit Großgeräten unter realen Bedingungen wurden in ECOmpact Beschleunigungsmessungen am größten Walzenzug der Welt dem BOMAG BW322DI sowie der relativ jungen Technologie der Impulsverdichtung durchgeführt. Erfasst wurde die Beschleunigung durch zwei unidirektionale 50g Sensoren mit einer Abtastrate von 87kHz während der Verdichtung, auf vorher erkundeten Prüffeldern.

MATLAB® konnte hier zur Aufbereitung der Sensordaten genutzt werden. Zu dieser Aufbereitung gehört neben dem Import, dem Extrapolieren von Daten außerhalb des Erfassungsbereichs sowie dem Visualisieren und Exportieren auch eine geeignete Filterung. Im Rahmen der Projektarbeit werden dazu numerisch geführte Modalanalysen zur Bewertung der Eigenfrequenz des jeweiligen Verdichtungsgeräts genutzt. Mit diesen numerischen Ergebnissen werden die notwendigen Signalfilter in MATLAB® spezifiziert. In Abb. 2 ist ein typischer Signalverlauf der Impulsverdichtung dargestellt.

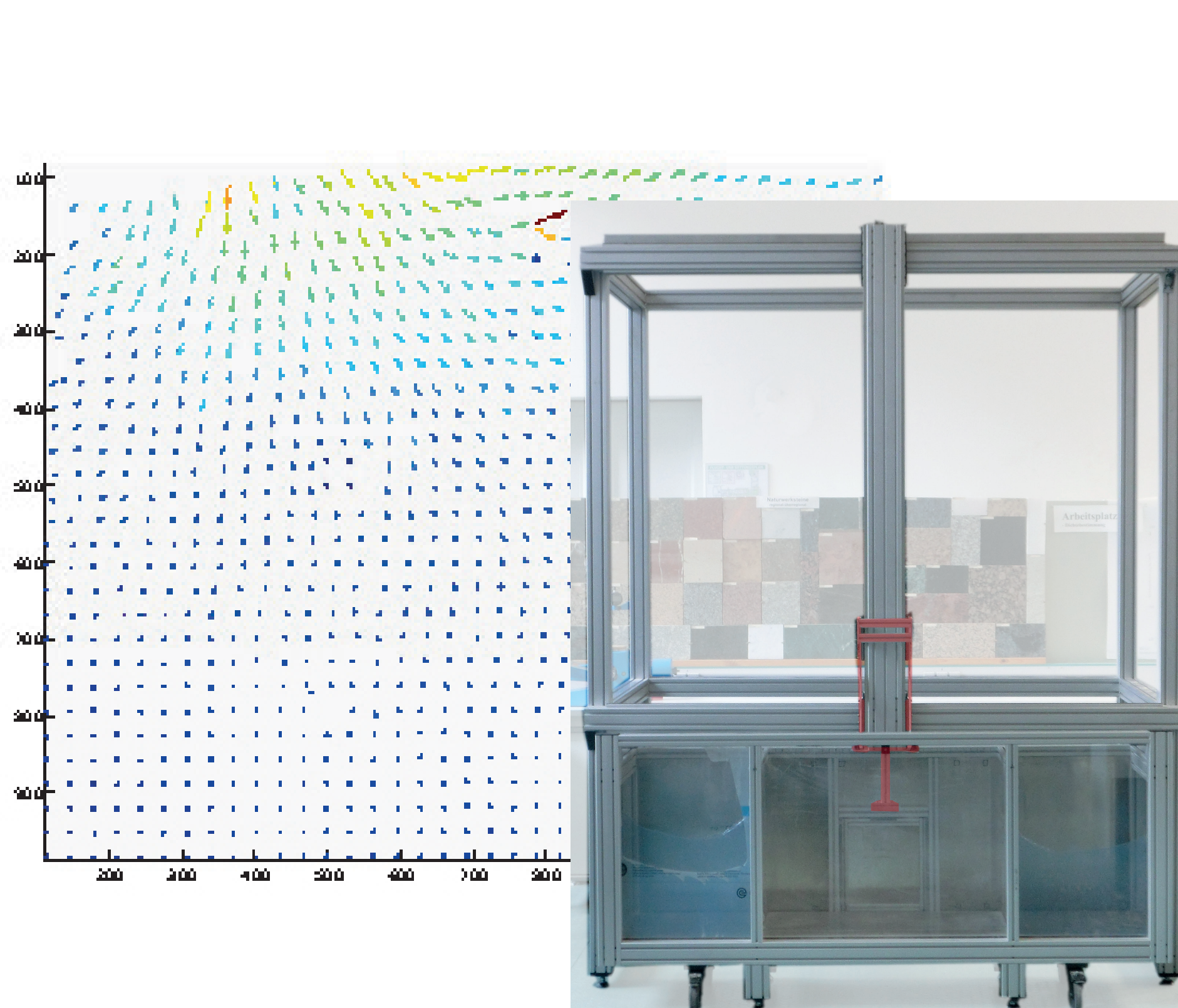


ABB. 1) LABORVERSUCHE: PIV & PHOTOGRAMMETRIE

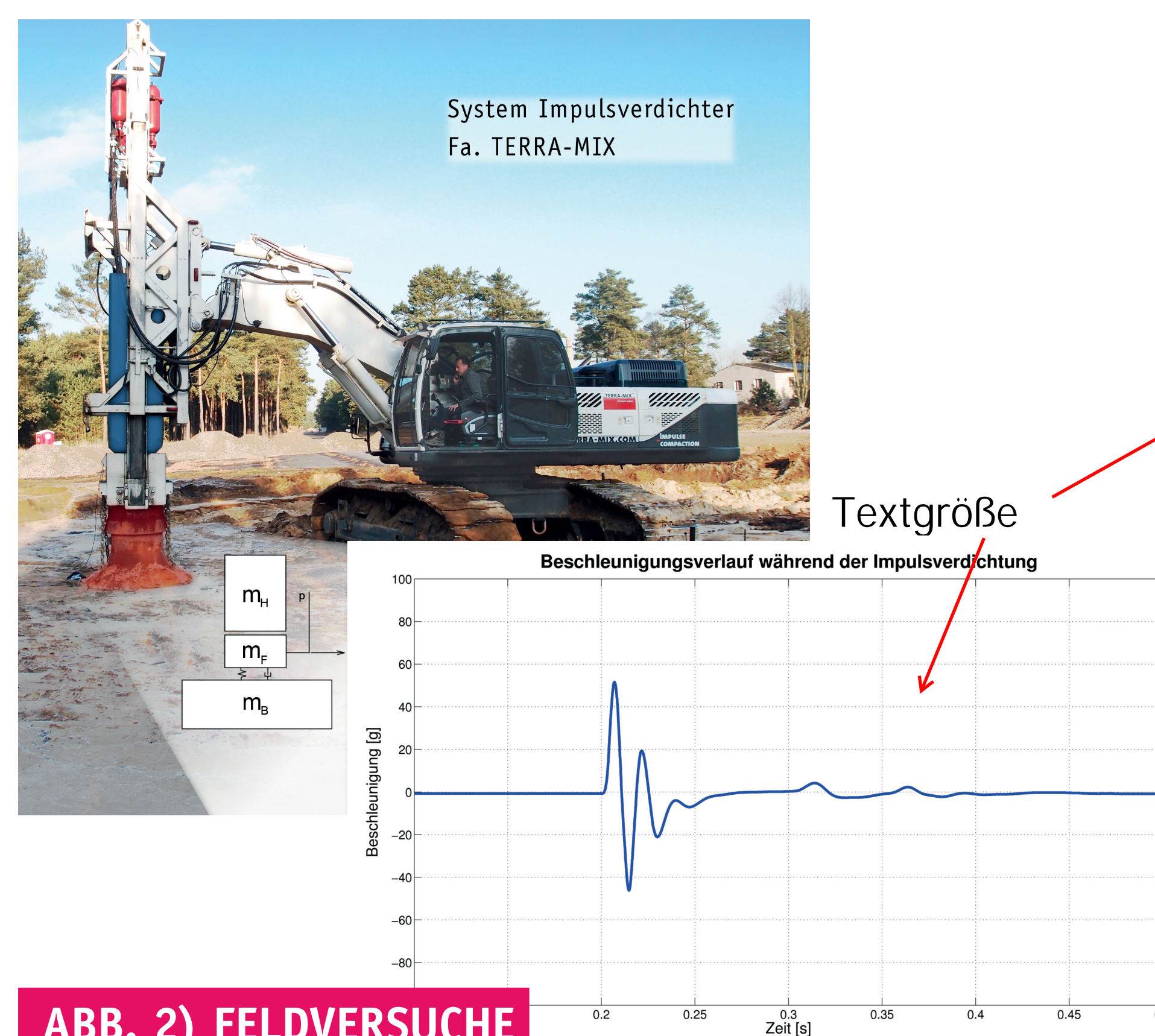


ABB. 2) FELDVERSUCHE

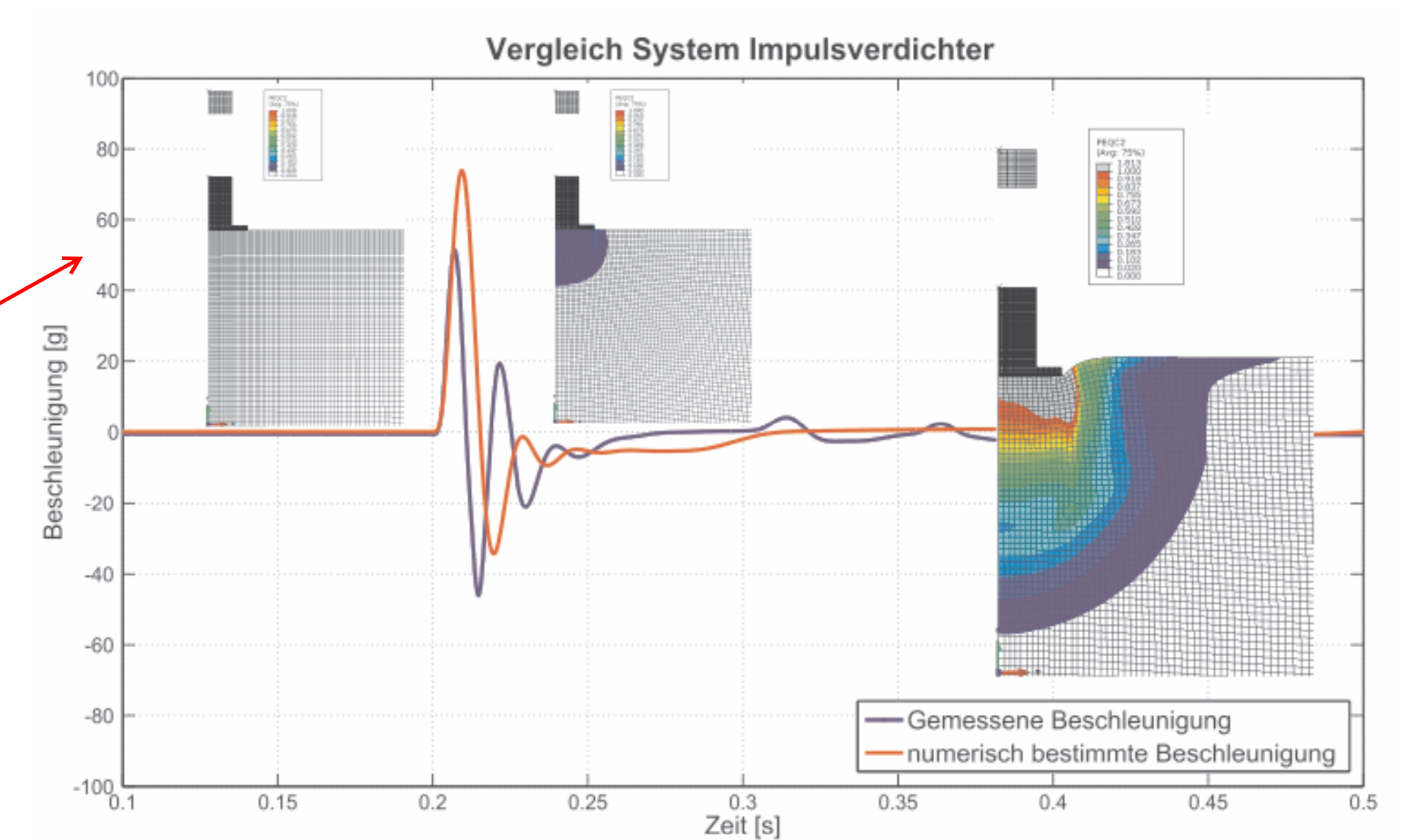


ABB. 3) VALIDIERUNG DER NUMERISCHEN MODELLE

## ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Die Validierung von numerischen Ergebnissen auf Basis von Feld- und Labordaten ist ein notwendiger und wichtiger Schritt hin zur Entwicklung eines Neugeräteansatzes. Besonders im aufgezeigten Anwendungsfall herrschen komplexe nichtlineare Abhängigkeiten zwischen Maschine und Boden. Eine korrekter Abgleich ist somit elementar für die Entwicklung neuer Technologien.

Durch die softwareseitige Signalverarbeitung der Felddaten lässt sich das Bewegungsverhalten des jeweiligen Geräts analysieren und mit numerischen

Werten abgleichen. Abb. 3 zeigt den Vergleich der gemessenen und numerisch berechneten Beschleunigung des Verdichtungsfußes eines Impulsverdichters. Weiterhin lässt sich eine Veränderung des Systemverhaltens während der Verdichtung durch eine Analyse des Frequenzspektrums erkennen.

Die Versuche im Labormaßstab erlauben eine hochwertige Aussage zum Bodenverhalten während der Verdichtung. Mit Hilfe von MATLAB® lässt sich auf Basis des ermittelten 2D-Verschiebungsfelds die Dehnung im betrachteten Bodenschnitt berechnen.

Ein Abgleich mit numerischen Werten ist somit möglich.

MATLAB® ist ein zentraler Baustein im Datenmanagement im Projekt ECOmpact. Neben der Auswertung klassischer Sensoren ermöglicht die Software bislang autark arbeitender Messsysteme in einem neuen (Photogrammetrie & PIV) zu kombinieren. Dadurch wird es möglich, numerische Modelle für den speziellen Anwendungsfall Verdichtung zu validieren und neue Geräte zu entwickeln.

### Quellen

- [1] Floss, E.: *Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau*, Band 1: Fachbuch der BOMAG GmbH & Co. OHG, Boppard, 2001
- [2] Henke, S.: *Zur Wirkungsweise des Impulsverdichters auf trockenem Sand auf Basis numerischer Simulationen*, Geotechnik 33 (Nr. 3), 2010
- [3] Adam, C.; Falkner, F.-J.; Adam, D.; Paulmichl, I.; Fürpass, J.: *Dynamische Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter*, Endbericht ÖFG, 2010
- [4] Pankrath, H.; Barthel, M.; Knut, A.; Bracciale, M.; Thiele, R.: *Tragfähige Idee gesucht – numerische Simulationen von Bodenverdichtung als Entwicklungsbaustein innovativer Geräteansätze*, DECGE 2014, Paper No. 099
- [5] White, D. J.; Take, W. A.; Bolton, M. D.: *Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry*. In *Geotechnique* 53 (Nr. 7), S. 619 - 631, 2003
- [6] White, D. J.; Take, W. A.: *GeoPIV: particle image velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing*. Technical Report. Cambridge University Department of Engineering, 2002

