

## **Schlussbericht**

des Projektes:

**03FH072PX2**

**„Entwicklung einer Analysiereinrichtung zur Charakterisierung von  
Arbeitsfunktionen bei mobilen Arbeitsmaschinen, gezeigt am  
Beispiel eines Hydraulikbaggers“**

**MoMa**

im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Forschung an Fachhochschulen“  
Förderlinie "FHprofUnt" 2012



an der

Technische Hochschule Köln (ehemals Fachhochschule Köln)  
Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2015

Köln, den 11. Januar 2016

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung.....	1
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4	Wissenschaftlich-technische Ausgangslage.....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	12
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b> .....	<b>13</b>
2.1	Erzielte Forschungsergebnisse.....	13
2.1.1	Festlegung der Spezifikationen für die Entwicklung .....	13
2.1.2	Physikalisch-mathematische Beschreibung der Wirkkette .....	15
2.1.3	Erstellung eines Simulationsmodells.....	16
2.1.4	Definition und Ermittlung der Einflussparameter .....	17
2.1.5	Simulation der maßgeblichen Einflussgrößen .....	22
2.1.6	Entwicklung einer neuartigen Kraftmesseinrichtung.....	28
2.1.7	Entwicklung einer optimalen Messeinrichtung zur Positionsbestimmung .....	36
2.1.8	Entwicklung der Assistenzfunktionen für den Hydraulikbagger .....	39
2.1.8.1	Assistenzfunktionen für den Einsatz eines Tieflöffels.....	40
2.1.8.2	Assistenzfunktionen für den Einsatz eines Anbauverdichters .....	45
2.1.9	Ergebnisse aus der Erprobung des Gesamtsystems .....	46
2.1.9.1	Erprobung der Assistenzfunktionen eines Tieflöffels.....	46
2.1.9.2	Erprobung der Assistenzfunktionen eines Anbauverdichters .....	50
2.2	Notwendigkeit der geleisteten Arbeiten .....	52
2.3	Verwendung der Zuwendungen .....	53
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit.....	53
2.5	Fortschritte des Forschungsgebietes bei anderen Stellen.....	54
2.6	Erfolgte und geplante Publikationen des Ergebnisses.....	54
<b>3</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>56</b>

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens stellte die Entwicklung und Erprobung einer neuartigen Messeinrichtung für mobile Arbeitsmaschinen zur Optimierung von Arbeitsprozessen dar. Durch die beabsichtigte Entwicklung sollen die Grundlagen für eine Teilautomatisierung oder gar Vollautomatisierung von Arbeitsprozessen eines Hydraulikbaggers und dessen Werkzeuge geschaffen werden. Dem Anwender sollen hierzu in geeigneter Weise alle für den Arbeitsprozess relevanten Prozessgrößen visuell zur Verfügung gestellt werden. Als Ergebnis sollen die Qualität des Arbeitsprozesses, die Prozesssicherheit der Werkzeuge, die Maschinenauslastung und die Arbeitssicherheit verbessert werden.

Umgesetzt werden soll das Vorhaben mit Hilfe einer neuartigen Messeinrichtung am Hydraulikbagger, welche eine derzeit nicht verfügbare Prozessgröße - die am Werkzeug hervorgerufenen Reaktionskräfte aus dem Arbeitsprozess - in Echtzeit ermittelt. Erreicht werden kann diese Entwicklung durch eine innovative Kraftmesseinrichtung, die in das Werkzeugwechselsystem integriert werden soll und somit für alle Arbeitswerkzeuge bzw. -prozesse zur Verfügung steht.

Ein weiterer innovativer Anteil zur Umsetzung des Forschungsvorhabens soll die Entwicklung eines Steuerungssystems zur Optimierung des Arbeitsprozesses eines Hydraulikbaggers mit dessen unterschiedlichen Werkzeugen sein.

## 1.2 Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung

Das Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien an der Technischen Hochschule Köln beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Verfahren zur Optimierung der Arbeitsprozesse von mobilen Arbeitsmaschinen. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Entwicklung von Regelungssystemen und deren Untersuchung durch eine Simulation sowie durch praktische Erprobungen. Darüber hinaus kann der Antragssteller Herr Prof. Dr. Alfred Ulrich jahrzehntelange Erfahrung auf diesem Gebiet aufweisen.

Durch die hohe Anzahl der Forschungsprojekte auf diesem Gebiet konnte neben der Erfahrung bei der Durchführung von Versuchen in der Vergangenheit eine umfangreiche apparative Laborausstattung angeschafft werden. Hierzu gehört ein 12,5t Versuchsbagger (Atlas 1204, Baujahr 1991) mit einem Tieflöffel und einem Anbauverdichter, ein umfangreiches Hydrauliklabor sowie eine breit aufgestellte Messtechnik u.a. zur Aufnahme verschiedener hydraulischer Betriebsgrößen.

Aufgrund der hydraulischen Standard-Vorsteuerung unserer Versuchsmaschine ist eine Umsetzung von automatisierten Arbeitsbewegungen allerdings nicht möglich. Außerdem kann für eine abschließende Praxiserprobung nicht sichergestellt werden, dass eine unveränderte Testmaschine über die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung steht. Dies ist zwingend erforderlich, da die entwickelten Algorithmen eine Vielzahl von Maschinenparameter benötigen. Die Ermittlung dieser Parameter ist mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass innerhalb des Projekts ein Baggerprüfstand entwickelt wird, der sich mit einem entsprechenden Maßstab wie ein realer Bagger verhält. Die Hydraulik des Prüfstandes wird dafür ebenfalls einem realen System nachempfunden. Aus diesem Grund

können am geplanten Baggerprüfstand realistische Arbeitsbewegungen nachempfunden werden. Durch die Automatisierung aller Auslegerbewegungen können wir, im Gegensatz zu einem realen Bagger, wiederholbare Versuche durchführen. Ohne diese Randbedingung können die entwickelten Algorithmen nicht optimal untersucht werden. Des Weiteren besteht an der Hochschule keinerlei Möglichkeit, den Hydraulikbagger unter realen Bedingungen zu testen. Ein Versuchsfeld ist an diesem Standort nicht vorhanden. Der skalierte Baggerprüfstand ist so konzipiert, dass dieser unter realen Bedingungen auch außerhalb der Versuchshalle mobil eingesetzt werden kann. Die Versuche in der idealisierten Bodenrinne sind lediglich innerhalb der Entwicklungsphase angedacht.

Die neuartige Kraftmessung soll dessen ungeachtet für den Versuchsbagger des Instituts entwickelt werden. Damit soll eine Eignung für einen realen Bagger nachgewiesen werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung der in Kapitel 1.1 genannten Aufgabenstellung waren folgende Arbeitspakete (AP) auszuführen:

**AP1:** Als Ziel sollen in diesem Arbeitspaket das Pflichten- und Lastenheft welches die Spezifikationen, die Vorgehensweise der Vorentwicklung, die Schritte der Machbarkeitsuntersuchung, die durchzuführenden Testprozeduren und den Zeitplan für die Teilarbeitsschritte für alle Kooperationspartner festlegt. Des Weiteren werden bestehende Messsysteme an Hydraulikbaggern genau beschrieben um mit den neuartig ermittelten Prozessgrößen die Spezifikationen eines gesamthaften Messsystems definieren zu können.

**AP2:** Das Ziel ist die Beschreibung der physikalischen und mathematischen Zusammenhänge der verschiedenen Elemente im gesamten System des Arbeitsprozesses. Dies beinhaltet die mathematische Beschreibung der Teilkomponenten, wie Arbeitskinematik und Arbeitshydraulik des Baggers sowie den Arbeitsprozesse der Werkzeuge.

**AP3:** Die Ergebnisse von Arbeitspaket 2 werden genutzt, um Simulationsmodelle des gesamten Systems (Hydraulikbagger, Arbeitswerkzeug und Arbeitsprozess) zu erstellen. Dadurch kann die Kinematik des Baggers im Arbeitsprozess für die betrachteten Arbeitswerkzeuge und die grundlegenden Funktionalitäten des Arbeitsrechners in den folgenden Arbeitspaketen ermittelt werden. Zudem werden die Simulationsmodelle genutzt, um weitere Spezifikationen für benötigte Einflussparameter für die folgenden experimentellen Untersuchungen festzulegen sowie eine Vorauslegung der zu entwickelnden 6-Komponenten Kraftmesseinrichtung gewährleisten zu können.

**AP4:** Durch die experimentelle Ermittlung der maßgeblichen Einflussparameter der Arbeitswerkzeuge im Arbeitsprozess soll die Voraussetzung für eine brauchbare Abbildung der Wechselwirkung zwischen Arbeitsprozess und Arbeitsfunktion geschaffen werden. Es werden experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von den unter AP 3 identifizierten Einflussparametern durchgeführt. Mit einer Durchführung von Versuchen unter Realbedingungen sollen die Einflüsse des Arbeitsprozesses auf die Arbeitswerkzeuge ermittelt werden. Die Versuchsergebnisse werden ausgewertet und zur weiteren Spezialisierung und Entwicklung des vollständigen Systems genutzt.

**AP5:** Die Simulationsmodelle aus Arbeitspaket 3 und die Einflussparameter der betrachteten Arbeitswerkzeuge aus Arbeitspaket 4 werden genutzt um alle Arbeitsfunktionen zu simulie-

ren. Durch Variationen der Simulationsparameter soll das genaue Systemverhalten an die in den experimentellen Untersuchungen ermittelten Ergebnisse angepasst werden. Daraufhin erfolgt die genaue Auslegung des Messsystems und der 6-Komponenten-Kraftmesseinrichtung.

**AP6:** Im Vordergrund steht die Entwicklung einer neuartigen Kraftmesseinrichtung zur Erfassung aller relevanten statischen und dynamischen Prozessgrößen der betrachteten Arbeitsfunktionen. Diese Kraftmesseinrichtung wird unter Laborbedingungen kalibriert und bei verschiedenen Lastansätzen erprobt und an den Hydraulikbagger adaptiert.

**AP7:** Durch die Auswahl und die Adaption einer geeigneten Einrichtung zur Positionsbestimmung wird das Gesamtmesssystem komplettiert. Dabei werden existierende Messeinrichtungen zur Positionsbestimmung einer Tauglichkeitsprüfung unterzogen, um das am besten geeignete Messverfahren für diesen Anwendungsfall auszuwählen. Gegebenenfalls werden unterschiedliche Systeme miteinander kombiniert, die Tauglichkeit nachgewiesen und am Hydraulikbagger adaptiert.

**AP8:** Ein detailliertes Ablaufdiagramm, laut den Funktionen aus Arbeitspaket 5, wird für die Softwarestruktur des Arbeitsrechners erstellt. Die Hardware für den Arbeitsrechner wird für die Ansprüche der Softwarestruktur ausgewählt.

**AP9:** In diesem Arbeitspaket erfolgt die Programmerstellung zur Berechnung der Arbeitsergebnisse, der Arbeitssicherheit sowie des Wirkungsgrades der verwendeten Arbeitswerkzeuge aus gemessenen Größen der Werkzeuergenkennung, Kraftmessung und Positionsbestimmung sowie den Ergebnissen aus der Simulation (modellgestützte Messtechnik).

**AP10:** Die Teilkomponenten des Gesamtsystems werden in der virtuellen Simulationsumgebung getestet und aufeinander abgestimmt. Nach der Implementierung des Gesamtmesssystems am Hydraulikbagger wird dieses unter Laborbedingungen getestet. Durch Versuche mit verschiedenartigen Parametersätzen soll die Funktion im Laborbetrieb belegt werden.

**AP11:** In Baustellentests wird die Analysiereinrichtung praktisch erprobt. Kritische Begutachtung von Seite der Baubranche und der Kooperationspartner soll die Brauchbarkeit des Systems belegen. Kritische Parameter sollen versuchstechnisch nachgewiesen werden.

**AP12:** Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Ausarbeitung von Präsentationsunterlagen, Ausstellung der Forschungsergebnisse auf Messeveranstaltungen, Vorträge auf Fachtagungen zu entsprechenden Themengebieten und Abschlussarbeiten wie Bachelor- und Masterarbeiten sowie kooperative Promotionen.

Die folgende **Tabelle 1** zeigt den tatsächlich durchgeführten Arbeits- und Zeitplan. Demnach konnten außer dem Arbeitspaket 6 alle Arbeitspakete mit dem geplanten zeitlichen Ablauf bearbeitet werden.

#### Erläuterung Verzögerung Arbeitspaket 6

Aufgrund von langen Fertigungszeiten ist es bei der Entwicklung der neuartigen Kraftmess-einrichtung zu Verzögerungen bei der Fertigstellung und Erprobung gekommen. Ein Mehr-aufwand an Mensch-Monaten (MM) war nicht erforderlich.

**Tabelle 1:** Arbeits- und Zeitplan

Arbeitspaket	AP					Beginn	Ende
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Definition, Spezifikation und Mach-barkeitsstudie	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.01.13	31.03.13
Physikalisch-mathematische Be-schreibung der gesamten Wirkkette; Analyse des Systemverhaltens	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.03.13	30.03.13
Erstellung von Simulationsmodellen	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.04.13	30.09.13
Experimentelle Ermittlung der Ein-flussparameter	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.07.13	31.05.14
Simulation	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.09.13	30.06.14
Entwicklung einer neuartigen Kraft-messeinrichtung; Kalibrierung und Erprobung	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01.04.13	<b>30.05.15</b>
Messeinrichtung zur Positionsbe-stimmung	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.03.14	31.09.14
Arbeitsrechners	8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.06.14	31.12.14
Programmerstellung	9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.09.14	30.06.15
Hardware-in-the-loop-Simulation	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.02.15	31.09.15
Praxiserprobung	11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01.05.15	31.12.15

#### 1.4 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

Der Automatisierungsgrad ist bei mobilen Arbeitsmaschinen unterschiedlich weit fortgeschrit-ten, wobei vor allem Maschinen mit einer hohen Anzahl von wiederholbaren Arbeits-funktionen bereits vollständig automatisiert sind (**Bild 1**). Bei den dazu aufgeführten Maschi-nen handelt es sich vorwiegend um stationär oder quasistationär eingesetzte Anlagen, bei

denen der Arbeitsprozess beherrschbar ist, eine geeignete Aktorik zur Regelung verfügbar ist und Sensoren zur Erfassung der relevanten Prozessgrößen Stand der Technik sind.

Komplexität der Arbeitsfunktionen ↑	Fahrzeugkran	Bagger	Scraper	Durcharbeitungszug	Tunnelvortriebsmaschine
	Turmdrehkran	Tunnelbohrwagen	Grader	Straßenfertiger	Asphaltmischanlage
	LKW-Ladekran	Planierraupe	Vibrationswalze	Betonpumpe	Betonmischanlage
		Radlader	LKW	Bauaufzug	Bandförderer
wiederholbare Arbeitsfunktionen →					

bereits vollständig automatisiert

**Bild 1:** Einordnung von Baumaschinen nach Komplexität und wiederholbaren Arbeitsfunktionen

Momentan sind keine vollständig automatisierten mobilen Arbeitsmaschinen bekannt, bei denen die Anzahl der wiederholbaren Arbeitsfunktionen geringer und ihre Komplexität größer wird. Im Folgenden soll der aktuelle Stand der Technik zu den genannten Zielgrößen für die Optimierung einzelner Arbeitsfunktionen von Ladegeräten im Erdbau kurz erläutert werden.

Hydraulikbagger im Erdbau		
Arbeitsfunktionen	Automatisierung	Funktionsbeschreibung
Graben / Lösen	ST	Anzeige über 3D-Maschinensteuerungssystem
Nivellieren	ST / RE	- Anzeige über 3D-Maschinensteuerungssystem - Regelung des Hubzylinders mit Referenzgeometrie
Laden	-	Manueller Vorgang (Mensch)
Verdichten	-	Manueller Vorgang (Mensch)
Gewichtsermittlung	ST	Anzeige des ermittelten Schüttgutgewichts
Lastbegrenzung	ST	Lastdruckbegrenzung im Hub- und/oder Löffelzylinder
Höhen-/ Tiefenwarnung	ST / RE	- Anzeige über 3D-Maschinensteuerungssystem - Regelung des Hubzylinders mit Referenzgeometrie
Kollisionsvermeidung	RE	Erkennung von Objekten mit automatischem Maschinenstillstand
Werkzeugwechsel	-	Manueller Vorgang (Mensch)
Werkzeuerkennung	ST / RE	- Anzeige der Werkzeugparameter - Erkennung und Einstellung der Werkzeugparameter

**Legende:** ST Steuerung RE Reeluna - keine Automatisierung

**Bild 2:** Stand der Automatisierung beim Hydraulikbagger im Erdbau



Beim Hydraulikbagger sind bereits einzelne Teilfunktionen automatisiert (siehe **Bild 2**). Demgegenüber wird die Hauptfunktion des Baggers, das Bewegen des Arbeitswerkzeuges und die damit verbundene Arbeitsaufgabe, manuell über den Maschinenbediener realisiert. In der Vergangenheit haben sich aufgrund dessen vermehrt Assistenzfunktionen zur Unterstützung des Bedieners durchgesetzt. Vor allem mit der Entwicklung von 3D-Maschinensteuerungssystemen wurde eine visuelle Anzeige geschaffen, anhand derer ein Bediener die aktuelle Werkzeugposition bezüglich einer Referenzgeometrie erfassen kann. Daraus wurden weitere Funktionen, wie das automatisierte Nivellieren, abgeleitet. Dabei wird die Löffelschneide entlang eines zuvor festgelegten Wunschprofils geführt. Der Bediener muss hierzu lediglich die Stiel- und Löffelbewegung selbst koordinieren. Über den Hubzylinder wird die Lage der Löffelschneide automatisch geregelt [KOM15]. Damit können auch ungeübte Fahrer ein präzises Zielprofil in kurzer Zeit erreichen oder erfahrene Bediener deutlich entlastet werden. Ein automatisiertes Graben und Lösen von gewachsenem Erdreich ist mit dieser Technik zurzeit jedoch noch nicht möglich.

Anhand dieser Entwicklung lässt sich die aktuelle Ausgangslage zur Automatisierung eines Hydraulikbaggers gut beschreiben. Um für das automatisierte Nivellieren den Hubzylinder regeln zu können, wurde das hydraulisch vorgesteuerte Steuerungssystem mit einer parallel geschalteten Zusatzeinrichtung ergänzt. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise des Antriebs- und Steuerkonzepts wurde dabei nicht berücksichtigt, wodurch die Entwicklung neuer Ansätze zur Automatisierung beschränkt wird. Außerdem ist keine geeignete Sensorik zur Überwachung der Prozessbelastungen auf das Arbeitswerkzeug vorhanden. Hierbei muss der Bediener sich vollkommen auf sein Gefühl und seine Erfahrungen verlassen. Im Folgenden soll der Stand der Technik für weitere Arbeitsfunktionen nach **Bild 2** dargestellt werden. Abschließend wird der Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich einer Kraftmessung in der Werkzeugwechseleinrichtung sowie Möglichkeiten zur Optimierung von Arbeitsprozessen bei mobilen Arbeitsmaschinen erörtert.

### Gewichtsermittlung

Für die Optimierung von Prozessabläufen im Erdbau sowie in der Gewinnung von mineralischen Rohstoffen werden zur Unterstützung des Maschinenbedieners bereits mobile Wiegesysteme eingesetzt. Vorrangig werden Individuallösungen für verschiedene Maschinen, mit Hauptfokus im Bereich der Radlader, entwickelt. Im Gegensatz zum Radlader ist beim Bagger allerdings eine alleinige Druckdifferenzmessung an den Hubzylindern in einer definierten Stellung für das Wiegen von Schüttgütern nicht ausreichend. Infolge der komplexen Arbeitsbewegung muss die Position der Arbeitskinematik eines Hydraulikbaggers bestimmt und der gemessenen Druckdifferenz in den Hubzylindern zugeordnet werden. Interne Untersuchungen an der Fachhochschule Köln zeigen, dass bei den verschiedenen Systemen der Ladeprozess zum Teil unterbrochen oder verlangsamt werden muss. Gründe hierfür sind, dass während eines Schwenkvorgangs ein Wiegen nicht möglich ist oder dass lediglich eine definierte Auslegerposition für ein genaues Wiegen geeignet ist. Auch bei Wiegesystemen für Radlader muss ein langsames Anheben der Arbeitsausrüstung, wenn möglich bei Stillstand der Maschinen oder auf ebenem Grund, vorausgesetzt werden [TRI15]. Damit sinkt die Effizienz des Ladeprozesses erheblich, wodurch die Eignung der Wiegesysteme nicht gewährleistet werden kann. Ein weiteres Problem, das sich bei der Realisierung einer mobilen Wiegeeinrichtung ergibt, ist die Vielzahl von Gelenken und deren Reibverhalten, welches direkt



in das Wiegeergebnis eingeht und durch die vorhandene Druckmessung in den Hubzylindern nicht erfasst werden kann.

#### Lastbegrenzung / Standsicherheit

Anforderungen an die Standsicherheit von Hydraulikbaggern sind in Deutschland nach DIN EN 474-5 [DIN474] genormt. Der Geltungsbereich der Normung umfasst einen Hydraulikbagger selbst sowie die angebauten Arbeitswerkzeuge. Für den Einsatz mit dem Tieflöffel ergibt sich die maximale Standsicherheit eines Hydraulikbaggers aus der zulässigen Kipplast und der hydraulischen Hubfähigkeit nach [ISO10567], wobei der kleinere Wert maßgeblich ist. Der Schaufelinhalt muss nach [ISO7451] mit der entsprechenden Dichte des Ladegutes ebenfalls berücksichtigt werden. Nachteilig bei diesem genormten Berechnungsverfahren sind die Einflüsse aus dem Untergrund sowie die dynamischen Kräfte im Arbeitsbetrieb (Schwenken, Fahren, Heben). Diese werden nur durch empirische Beiwerte berücksichtigt [KUN02] und lediglich in der Entwicklung und Auslegung eines Hydraulikbaggers ermittelt. Anhand der vom Maschinenhersteller berechneten Hublasttabellen muss der Maschinenbediener selbst entscheiden, ob sich die Maschine in einem sicheren Zustand befindet. Die nach der Norm erfolgte Standsicherheitsermittlung gibt allerdings keinen Rückschluss auf plötzlich auftretende Kräfte, wie sie beispielsweise bei Abbrucharbeiten mit einem Hydraulikbagger auftreten können. In diesem Fall können große Kräfte am Werkzeug ein Umkippen des Baggers bewirken.

Eine Entwicklung für einen Ansatz zur kontinuierlichen Überwachung der Standsicherheit eines Hydraulikbaggers mithilfe eines modellbasierten Beobachters wird in [BEN12] vorgestellt. Dabei ermittelt der Beobachter die aktuellen Radlasten auf Basis der kinematischen Eingangsgrößen, wobei der Beobachter die statische Stabilität durch eine aufkommende Last und eine kritische Position des Baggerauslegers abschätzen kann. Allerdings wird die Ermittlung einer auftretenden Last in der Arbeit nicht näher untersucht. Wird diese Last jedoch als bekannt angenommen, kann mit dem entwickelten Ansatz die aktuelle Standsicherheit überwacht werden. Bedeutender ist allerdings die Möglichkeit, dass basierend auf den Beobachter zukünftige Auslegerpositionen auf ihre Standsicherheit überprüft werden können. Innerhalb dieser Arbeit wurden die modellbasierten Ansätze lediglich statisch betrachtet. Bei der Bewegung eines Baggerauslegers können allerdings hohe dynamische Belastungen in die mechanische Struktur eingeleitet werden. Nachteilig sind ebenfalls die notwendigen Kenntnisse aller einzelnen Gewichte und vor allem deren Schwerpunktpositionen. Diese Daten stehen nicht immer für alle Körper eines Hydraulikbaggers zur Verfügung.

Bei dem aktuellen Stand der Technik sind keinerlei Möglichkeiten vorhanden, wie die Standsicherheit eines Hydraulikbaggers kontinuierlich während des Arbeitsprozesses überwacht werden kann. Eine variable Last kann für die Standsicherheitsüberwachung nicht berücksichtigt werden. Die beabsichtigte kontinuierliche Kraftmessung in der Werkzeugwechseleinrichtung könnte diese Schwachstelle beseitigen.

#### Kraftmessung am Hydraulikbagger

Betrachtet man Werkzeugwechseleinrichtungen in anderen technischen Anwendungen, wie zum Beispiel an Werkzeugmaschinen [TUB13] oder bei der Handhabungstechnik mit Robotern [SUN13], dann entspricht eine Kraftmessung während des Prozesses dem Stand der Technik. Lediglich die Arbeitsweise der Industrieroboter ist mit der eines Hydraulikbaggers

vergleichbar, wobei die Randbedingungen vollkommen verschieden sind. Ein Industrieroboter wird mit einer definierten Arbeitsaufgabe (keine unbekanntenen Belastungen, gleichbleibende Umgebungseinflüsse etc.) ausgelegt, wohingegen ein Hydraulikbagger nur durch sein Gewicht und den maximalen Hydraulikkräften in seinem Arbeitseinsatz begrenzt wird.

Eine Kraftmessung am Hydraulikbagger während des Arbeitsprozesses ist keine Seltenheit. Ansätze zur Messung der Grabkräfte sind aus [BEI92] bekannt, wobei die Ermittlung der Grabkraft zu Verschleißuntersuchungen am Tieflöffel diente. Dabei wurden ein Zahnhalter und die dazu passende Aufsteckzahnspitze mit einer DMS-Applikation bestückt, um die Zahnlängs-, Vertikal- und Horizontalkraft sowie zwei Biegemomente an den Zahnspitzen des Tieflöffels messen zu können. Bei umfangreichen Untersuchungen konnte dabei festgestellt werden, dass vor allem die Zahnlängskraft den größten Teil zur Grabkraft beiträgt. Die Horizontalkomponente, also die Zahnseitenkraft, spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Jedoch muss erwähnt werden, dass ausschließlich erfahrene Maschinenbediener zum Einsatz gekommen sind. Über das Verschleißverhalten der Zahnspitze, bezogen auf die gemessenen Grabkräfte, wurden keine Aussagen getroffen.

Weitere Möglichkeiten zur Messung von Belastungen auf einem Tieflöffel wurden in [LEE09] ermittelt. Der Fokus der Kraftmessung lag dabei auf der Automatisierung der Grabbewegung eines unbemannten Hydraulikbaggers. Innerhalb der Arbeit wurde ein Ansatz zur Ermittlung der Kräfte und Momente zwischen Baggerausleger und Grabwerkzeug an einem skalierten Modell verfolgt. Dieser Ansatz wertet die im Hydraulikzylinder wirkenden Drücke sowie die Bewegung des Auslegers aus. Für die Verifizierung der Ergebnisse wurde eine 6-Komponenten-Messnabe zwischen dem Ausleger und dem Löffel eingesetzt. Jedoch waren die Vergleiche zwischen der berechneten und gemessenen Kraft nicht sehr befriedigend. Als Ungenauigkeit muss dabei die Reibung in den Zylindern und das unzureichend detaillierte mathematische Modell zur Berechnung der Schnittkräfte zwischen Baggerausleger und Grabwerkzeug genannt werden.

Einen ähnlichen Ansatz zur Kraftermittlung am Grabgefäß verfolgt [MIE12], wobei die Ermittlung der Lasteingangsfunktion für die Systemauslegung mobiler Arbeitsmaschinen im Vordergrund steht. Unter Verwendung der iterativ lernenden Regelung (ILR) wird die Lasteingangsfunktion am Tieflöffel schrittweise angepasst. Dabei werden in einer Vorwärtssimulation die benötigten Zylinderkräfte und Drehwerksmomente berechnet und mit gemessenen Druckgrößen verglichen. Aus der Differenz beider Größen wird über ein Lerngesetz die Lasteingangsfunktion für den nächsten Iterationsschritt angepasst, bis die Abweichung eine festgelegte Fehlergrenze unterschreitet. Verglichen wurde die iterative Methode mit einem messtechnischen Konzept, wobei die Prozesslasten an der Schnittstelle des Werkzeugs zur Maschine ermittelt werden sollen. Hierbei ist die Schnittstelle, wie bei der in dieser Arbeit untersuchten Methode, eine Werkzeugwechseinrichtung. Im Gegensatz zum hier verwendeten Kraftmesskonzept mittels Anschraubbuchsen werden die Werkzeugreaktionskräfte mithilfe einer DMS-Applikation auf den Seitenlaschen des Werkzeugwechslers kalkuliert. Beim Vergleich des iterativen Konzepts mit dem Messschnellwechsler zeigte die resultierende Grabkraft denselben charakteristischen Verlauf. Die durch die ILR bestimmten Kräfte wiesen allerdings einen kontinuierlich geringeren Wert auf. Abschließend konnte allerdings nicht bestimmt werden, welches Verfahren präziser ist, da ein korrekter Referenzwert nicht aufgeführt wurde. Bei der Validierung des Messschnellwechslers betrug die Abweichungen zur

eingeleiteten Kraft bis zu 20%. Bei dem iterativen Verfahren sind vor allem die unzulänglich ermittelten Modellparameter als Fehlerquelle zu nennen.

Die bisher vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Zylinderkräfte sahen immer eine modellbasierte Auswertung der gemessenen Zylinderdrücke vor. In [BAT13] wird eine direkte Messung der Zylinderkräfte mithilfe von einaxialen Kraftmessbolzen vorgestellt. Dieser Kraftmessbolzen dient dabei gleichzeitig als Gelenkbolzen zwischen Gelenkauge und Festlager. Problematisch dabei ist, dass für jeden Hydraulikbagger unterschiedliche Abmessungen der Bolzen entwickelt werden müssen. Außerdem ist eine Messung der Seitenkräfte nicht möglich. Als Anwendungsbeispiele werden in [BAT13] die Messung von Kräften am Baggerausleger, der Überlastschutz und die Kraftmessung bei Einpressvorgängen aufgelistet.

Grundsätzlich kann folgende Erkenntnis aus dem Stand der Technik zur Kraftmessung bei Hydraulikbaggern gewonnen werden: Die Ermittlung von Kräften am Baggerausleger stellt keine Seltenheit dar. Alle gezeigten Ansätze hatten allerdings nie das Ziel, den Arbeitsprozess eines Hydraulikbaggers zu optimieren, sondern dienten ausschließlich der Untersuchung von bestimmten Zusammenhängen und Einflussgrößen.

#### Sinnvoller und wirtschaftlicher Werkzeugeinsatz

Die Leistungsfähigkeit und die Effizienz eines Hydraulikbaggers sind maßgeblich von den Fähigkeiten des Maschinenbedieners abhängig. Nur durch gut geschultes Personal kann gewährleistet werden, dass das angekoppelte Arbeitswerkzeug sinnvoll eingesetzt wird. Allerdings sind die Eigenschaften des Erdstoffs und des Werkzeugs ebenso von großer Bedeutung. Diese Eigenschaften werden auch als systemgebundene Parameter beschrieben. Dabei sind beim Tieflöffeleinsatz vor allem die Auslegerposition, die Löffelgröße und -form, der Schnittwinkel (zum Teil auch Freiwinkel genannt), die Schnitttiefe sowie die Bodenart zu nennen.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Untersuchungen zur Klärung der Zusammenhänge zwischen der Grabkraft und der Auslegerstellung ([DUD78], [BER80]) sowie der Grabkraft und der Größe bzw. Form des Grabgefäßes ([BER80], [SPR10]) durchgeführt. Die Grabkraft wird darin als benötigte Kraft interpretiert, die zum Überwinden des auftretenden Widerstandes des Bodenmaterials notwendig ist. Wird die Breite eines Tieflöffels mit berücksichtigt, kann je nach Bodenart ein spezifischer Grabwiderstand definiert werden. Dieser ergibt sich aus der Grabkraft, bezogen auf die Spanquerschnittsfläche (Schnitttiefe mal Schneidenbreite des Löffels). Hierzu gab es in der Vergangenheit diverse Untersuchungen ([DOM67], [PAJ79], [BER80]). Bei der Betrachtung des spezifischen Widerstands wird sehr schnell ersichtlich, dass die Wahl eines geeigneten Tieflöffels für ein bestimmtes Bauvorhaben nicht immer sehr einfach und vor allem eindeutig ist. Erschwerend kommt hinzu, dass bei bestimmten Bodenarten der Einsatz eines Tieflöffels nicht mehr sinnvoll ist. Es muss auf ein anderes Lösewerkzeug, wie zum Beispiel den Aufreißzahn oder den Hydraulikhammer, gewechselt werden. Auch ein erfahrener Maschinenführer kann diese Auswahl nicht immer treffen, wodurch es in der Praxis sehr häufig zum Einsatz des falschen Werkzeugs kommen kann.

Eine weitere Hauptaufgabe eines Hydraulikbaggers ist das Laden des gelösten Materials. Auch hier sind unterschiedliche Einflussgrößen vorhanden, welche die Gesamtleistung der

Maschine beeinträchtigen können. Daher wird ein Hydraulikbagger beim Tieflöffeleinsatz nach der Nutzleistung, d.h. dem verladenen Volumen pro Stunde, beurteilt. Nach DIN ISO 9245 [DIN9245] sind darin alle leistungsbeeinflussenden Größen wie der Gerätezustand, die Gerätebedienung, die Baustellenorganisation und die Witterung durch Faktoren berücksichtigt. Der Nenninhalt des Tieflöffels spielt dabei ebenfalls eine entscheidende Rolle. Je größer der Nenninhalt, desto mehr Volumen kann pro Stunde verladen werden. Der Nenninhalt steht allerdings in Abhängigkeit zur Baggergröße und vor allem zu den Eigenschaften des Erdstoffs. Somit müssen an dieser Stelle immer wieder Kompromisse getroffen werden.

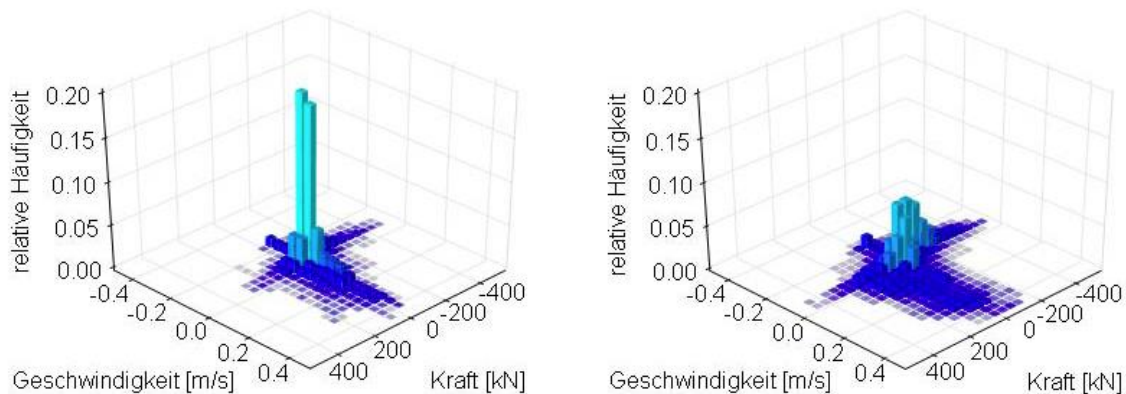
Weitere Ansätze zur Beurteilung des Arbeitsprozesses sind aus Untersuchungen für ein Steuerkonzept eines autonomen Baggers bekannt. Darin sollen Arbeitsbewegungen von erfahrenen Maschinenführern als Sollvorgabe des autonomen Baggers dienen. In [SAK06] und [SAK08] wird ein Vorgehen beschrieben, wie die Messgrößen einer Auslegerbewegung mathematisch interpretiert und damit die Fähigkeiten eines Maschinenbedieners ermittelt werden können. Folgenden Größen wurden hierfür berechnet und bewertet:

- der Eintrittswinkel zwischen Löffelboden und dem Untergrund zu Beginn der Grabbewegung,
- die Bewegungsbahn jedes Gelenks des Baggerauslegers,
- der Schnittwinkel zwischen dem Löffelboden und dem Grabrichtungsvektor und
- der Korrelationskoeffizient zwischen dem Stielwinkel und dem Löffelwinkel.

Bei der Auswertung des Eintrittswinkels wurde festgestellt, dass dieser selbstverständlich stark von der Entfernung des Grabstartpunktes abhängig ist. Dennoch konnten für mehrere Grabbewegungen zweier erfahrener Maschinenbediener bei gleichem Grabstartpunkt Eintrittswinkel mit einer maximalen Standartabweichung von  $7^\circ$  ermittelt werden. Es wurde dabei immer ein horizontaler Grabverlauf durchgeführt. Auch beim Vergleich der Bewegungsbahn jedes Gelenks konnten Übereinstimmungen bei beiden Maschinenbedienern erkannt werden. Beide Grabbewegungen waren flach und lang, wobei an dieser Stelle erwähnt werden muss, dass ein horizontal angeordneter Untergrund vorhanden war. Für den Winkel zwischen Löffelboden und Grabrichtungsvektor konnte für beide Bediener ein positiver Verlauf ermittelt werden. Bei genauerer Betrachtung des Grabprozesses erscheint ein positiver Winkel als die sinnvollere Lösung. Ein negativer Winkel würde bedeuten, dass der Löffelboden und nicht die Löffelspitze, Kontakt mit dem Untergrund hätte. Dies führt zu einem erhöhten Verschleiß an der Löffelrückwand und sollte daher vermieden werden. Auffällig ist der ermittelte Korrelationskoeffizient zwischen dem Stielwinkel und dem Löffelwinkel beider Maschinenbediener. Dieser lag im Schnitt bei über 0.93, wodurch ein sehr guter Zusammenhang zwischen der Löffel- und der Stielbewegung bei einem erfahrenen Bediener für eine optimale Grabbewegung angenommen werden kann. Mit dieser mathematischen Beziehung kann die Güte einer Grabbewegung sehr gut dargestellt werden.

[VOI12] untersucht den Bedienerinfluss im Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit einer mobilen Arbeitsmaschine. Darin wird beschrieben, dass mit einer identischen Maschine und unterschiedlichen Bedienern bei einer Bauaufgabe mit gleichen Umgebungseinflüssen erhebliche Leistungsschwankungen bestehen können. Um eine Vergleichbarkeit der Leistungszyklen eines Hydraulikbaggers mit unterschiedlichen Bedienern und Bauaufgaben schaffen zu können, wurde in der genannten Arbeit ein iteratives Verfahren zur Betrachtung

aller Arbeitsspiele entwickelt. Dieses Verfahren minimiert die Summe der Abstände aus Merkmalsvektoren und zugeordneten Clustern. Als unterschiedliche Cluster wurde eine Klassifizierung der Messdaten aus den einzelnen Arbeitsspielen in 'ungeübte' und 'geübte' Bediener durchgeführt. Mithilfe dieses Verfahrens konnte ein normierter Gleichzeitigkeitsgrad der Auslegerbewegung ermittelt werden, der die Fähigkeit eines Bedieners widerspiegelt. Die Korrelation zwischen der Zykluszeit eines Arbeitsspiels mit dem ermittelten Gleichzeitigkeitsgrad zeigt, dass bei den ungeübten Bedienern die Zykluszeit mit wachsenden Gleichzeitigkeitsgrad wächst. Dies lässt darauf schließen, dass bei mehreren gleichzeitigen Bewegungen des Auslegers die Zykluszeit steigt. Dem entgegen sinkt bei einem geübten Bediener die Zykluszeit bei wachsendem Gleichzeitigkeitsgrad. Diese Aussage deckt sich auch mit den Ergebnissen aus [SAK08] für den Zusammenhang des Korrelationskoeffizienten zwischen dem Stielwinkel und dem Löffelwinkel. Zum Abschluss der Untersuchungen wurde dem Gleichzeitigkeitsgrad als repräsentativer Leistungsvergleich die Stielzylindergerwindigkeit und -kraft gegenübergestellt. Eine Gegenüberstellung der genutzten Kraftverteilungen eines ungeübten und eines geübten Maschinenbedieners wird im **Bild 3** aufgezeigt.



**Bild 3:** Stielzylinderkräfte für ungeübte (links) und geübte Bediener (rechts) [VOI12]

Demzufolge nutzt der ungeübte Bediener zum großen Teil nur einen geringen Anteil der maximal möglichen Zylinderkräfte. Die Verteilung beim geübten Bediener ist dabei viel homogener, wodurch die Leistungsfähigkeit der Maschine viel besser genutzt wird. Zukünftig wird in der Studie geplant, dass die einzelnen Prozessmuster zur Beurteilung der Maschinenbediener vollautomatisch ablaufen sollen.

Abschließend darf bei der Betrachtung eines sinnvollen Tieflöffeleinsatzes die Grabposition eines Hydraulikbaggers nicht außer Acht gelassen werden. Aus [SON08] ist ein statischer Ansatz zur Berechnung der maximal umsetzbaren Reißkräfte in Abhängigkeit der Reißposition eines Hydraulikbaggers bekannt. Darin wird beschrieben, dass beim Arbeiten am Hang die Richtung der maximal möglichen Kräfte häufig mit der eigentlichen Reißrichtung übereinstimmt. Bedingt durch die Kinematik sind diese Kräfte meist im mittleren Hubbereich des Stiel- bzw. Löffelzylinders und daher auch beim Arbeiten am Hang vorhanden. Gleiches gilt selbstverständlich für den Tieflöffeleinsatz. Zusätzlich wird der Füllvorgang des Löffels am Hang durch das Nachrutschen des Materials begünstigt. Die Leistungsfähigkeit eines Hydraulikbaggers ist demnach im Wesentlichen von dessen Standposition abhängig.

Die hier aufgeführten Untersuchungen zeigen, dass sehr aussagekräftige mathematische Zusammenhänge für die Beschreibung eines sinnvollen Tieflöffeleinsatzes zur Verfügung stehen. Außerdem wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen durchge-



führt, welche die Eigenschaften des Erdstoffes, bezogen auf den Grabwiderstand, wieder spiegeln. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Kraftmessung zur Bestimmung der Grablasten der Arbeitsprozess in einem bisher unbekanntem Maß optimiert werden kann.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### Beteiligte Mittelständische Kooperationspartner

Zu den Forschungspartnern zählten vier Industrieunternehmen, davon ein Mittelstandsunternehmen (Kinshofer) und drei KMU (Pfreundt, Lehnhoff und MOBA). Alle am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen stehen mit ihren Produkten im direkten Zusammenhang mit dem Forschungsthema und bilden somit die direkten Komponenten in der gesamten Wirkkette ab. Die Beteiligten Unternehmen unterstützten das Vorhaben vor allem mit ihren langjährigen Erfahrungen in der Branche von mobilen Arbeitsmaschinen. Darüber hinaus wurde bei regelmäßigen Treffen Anregungen seitens der Industriepartner gegeben, die das Vorhaben erheblich bereichert haben.

Zusätzlich wurde das Forschungsvorhaben durch die maßgeblichen Industrieverbände VDMA (FVB) sowie VDBUM unterstützt. Dadurch konnten die Ergebnisse des Vorhabens bereits während der Projektlaufzeit einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht werden.

### Kooperationen mit anderen Hochschulen

Im Rahmen des Projektes ist eine kooperative Promotion an der Technischen Universität Berlin<sup>1</sup> initiiert worden. Das Thema beinhaltet die Automatisierung der Grabbewegung eines Hydraulikbaggers. Der voraussichtliche Abschluss dieser kooperativen Promotion ist für Ende 2017 angedacht.

Mit der TU Breslau herrschte bei der Entwicklung der neuartigen Kraftmesseinrichtung ein reger Austausch von Informationen und Ideen für die Integrierung einer Kraftmesseinrichtung in einen Werkzeugwechsler. Dabei konnte die Fachhochschule Köln sowie die TU Breslau enorm voneinander profitieren.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer, Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Forschungsergebnisse

#### 2.1.1 Festlegung der Spezifikationen für die Entwicklung

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde festgelegt, dass für die Entwicklung und Erprobung des geplanten Mess- und Informationssystems ein spezieller Baggerprüfstand entwickelt werden soll. Die Entwicklung der neuartigen Kraftmesseinrichtung im Werkzeugwechsler soll demgegenüber an einem realen Bagger adaptiert und getestet werden. Dafür wurde die verschiedenen Spezifikationen zu Beginn des Projektes festgelegt. Bei der Analyse der Arbeitsprozesse der verschiedenen Anbauwerkzeuge des Hydraulikbaggers wurde festgestellt, dass gewisse Eigenschaften der Werkzeuge übertragbar sind. Aus diesem Grund wurde als passives Anbauwerkzeug der Tieflöffel und als aktives Anbauwerkzeug der Anbauverdichter gewählt. Als aktives Werkzeug wird der Anbauverdichter bezeichnet, da dieser über eine separate Energieerzeugung für die Vibration der Platte besitzt. Die Arbeitsprozesse des Reißzahns (passiv) sowie des Hydraulikhammers (aktiv) lassen sich von diesen Werkzeugen jeweils ableiten.

Im Folgenden werden die Randbedingungen der Arbeitsprozesse des Tieflöffels sowie des Anbauverdichters kurz beschrieben.

#### Randbedingungen aus dem Arbeitsprozess

Betrachtet man den Arbeitsprozess eines Hydraulikbaggers mit einem Tieflöffel, dann lässt sich dieser in den Grab- und Ladeprozess gliedern. Beim Grabprozess wirken hohe dynamische Belastungen auf das Werkzeug, die von mehreren Einflussfaktoren abhängig sind. Vor allem die Lagerungsbeschaffenheit des Baustoffs, die ausgeführte Arbeitsbewegung des Maschinenbedieners, die Form und der Verschleißzustand des Werkzeugs sowie der Standort des Hydraulikbaggers beeinflussen die hervorgerufenen Belastungen. Ist der Tieflöffel gefüllt, wird über eine Auslegerbewegung der Baustoff auf einen LKW oder eine Verarbeitungsanlage verladen. Jeder Ladevorgang kann als instationäre Bewegung betrachtet werden, bei der unterschiedliche Füllungsgrade des Tieflöffels erreicht werden können. Zudem wird durch den unbefestigten Untergrund das Gesamtsystem zum Schwingen angeregt. Eine weitere Untergliederung des Arbeitsprozesses mit einem Tieflöffel ist das Nivellieren.

Anbauverdichter sind dynamische Verdichtungsgeräte, die an einem Bagger angekoppelt sind und durch den enthaltenen Unwuchterreger von der Baggerhydraulik angetrieben werden. Aufgrund der Fliehkraft der Unwucht wird die Platte im frei schwingenden Zustand, d.h. ohne Bodenkontakt, in eine sinusförmige Bewegung versetzt. Bei einem Bodenkontakt ändert sich diese Anregung in Anhängigkeit der Geräte- und der Bodeneigenschaften. Mit der hohen Auflast des Anbauverdichters durch den Baggerarm kann der Anbauverdichter nicht abheben, wodurch mit der großen Auflagefläche und Antriebsleistung eine sehr hohe Tiefenwirkung erzielt werden kann. Für den Energieeintrag in den Boden ist die Kontaktzeit der Platte zum Boden wichtig, die möglichst groß und sogar andauernd sein sollte. Hebt die Platte aufgrund einer zu großen Fliehkraft, zu großen Bodenkraft oder einer zu geringen statischen Auflast während einer Periode ab, ist der Energieeintrag ungünstig. Eine geeigne-



te Auflast sowie eine passende Fliehkraft ist für ein optimales Verdichtungsergebnis zwingend erforderlich.

### Ermittlung aller relevanten Geräte- und Systemkenngrößen

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die zu Beginn definierten Kenngrößen, die für die Entwicklung dieses Vorhabens notwendig sind. Die Parameter der aufgeführten Kenngrößen werden im Arbeitspaket 4 ermittelt. Es wird jeweils eine Tabelle für den Versuchsbagger Atlas 1204 sowie für den Baggerprüfstand dargestellt.

**Tabelle 2:** Geräte- und Systemparameter für den Versuchsbagger Atlas 1204

Kenngröße	Festgelegter Wert
Bagger	
Gerätetyp	Mobilbagger Atlas 1204 mit Verstellausleger
Werkzeugwechsler	Hydraulisch betätigter Wechsler von Lehnhoff HS10
Energieversorgung	Hydraulikanlage des Baggers
Energiesteuerung	Hydraulisch vorgesteuerte Proportionalventile des Baggers mit Standard-Vorsteuerung
Anbauwerkzeug	
Tieflöffel	Lehnhoff HTL15-500
Anbauverdichter	Ammann ACA350-R
Kraftmesseinrichtung	
Ort der Kraftmessung	Werkzeugwechsler
Art der Kraftmessung	Neuentwicklung

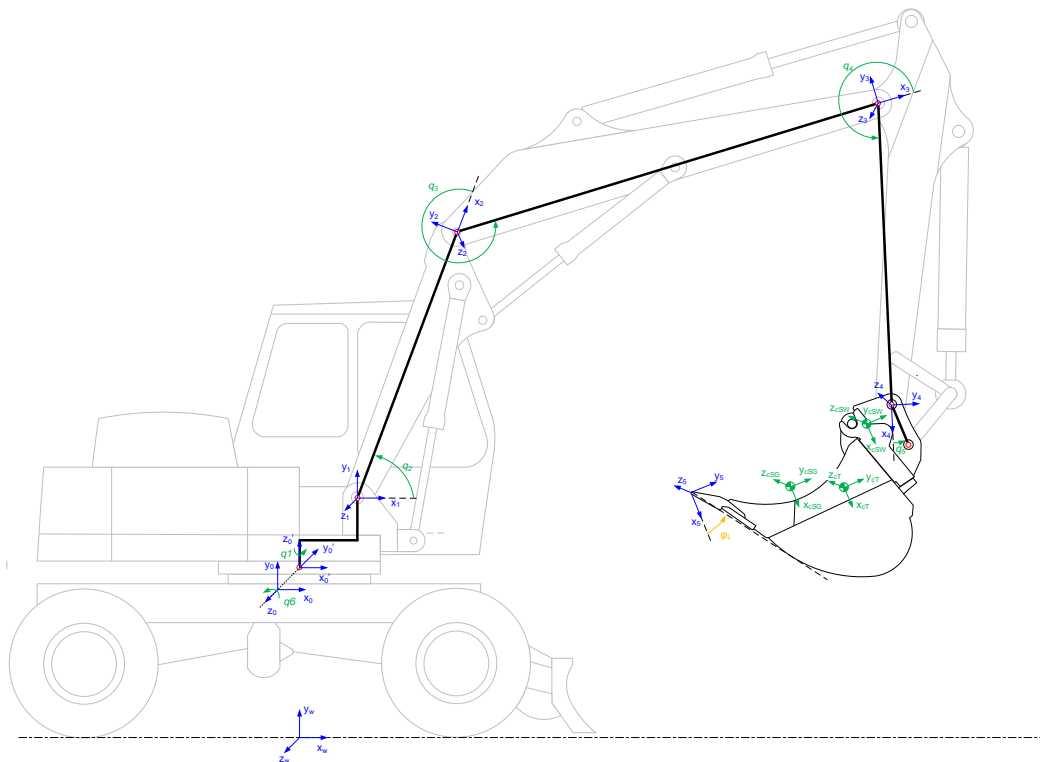
**Tabelle 3:** Geräte- und Systemparameter für den Baggerprüfstand

Kenngröße	Festgelegter Wert
Bagger	
Gerätetyp	Eigenkonstruktion oder Heckbagger für Traktor
Werkzeugwechsler	Mechanisch betätigter Wechsler von Lehnhoff MS01
Energieversorgung	Hydraulikaggregat
Energiesteuerung	Hydraulisch vorgesteuerte Proportionalventile mit CAN-Ansteuerung
Anbauwerkzeug	
Tieflöffel	Lehnhoff MTL1-300
Kraftmesseinrichtung	
Ort der Kraftmessung	Werkzeugwechsler
Art der Kraftmessung	6-Komponenten Sensor von Systemlieferant

### 2.1.2 Physikalisch-mathematische Beschreibung der Wirkkette

Ziel der Modellbildung ist die mathematische Beschreibung des vorliegenden Systemverhaltens. Dies besteht aus dem Hydraulikbagger, den ausgewählten Arbeitswerkzeugen und deren Arbeitsprozesse sowie dem Werkzeugwechselsystem. Hierbei soll ein möglichst einfaches, echtzeitfähiges Modell entwickelt werden, welches des Systemverhaltens hinreichend genau beschreibt. Vor allem der Zusammenhang der gemessene Kraftkomponenten und der möglichen Optimierung der Arbeitsprozesse steht im Vordergrund. Diese Modelle kommen zunächst für die analytische Betrachtung und in nachfolgenden Arbeitspaketen für den Aufbau des modellbasierten Mess- und Steuerungssystems zum Einsatz.

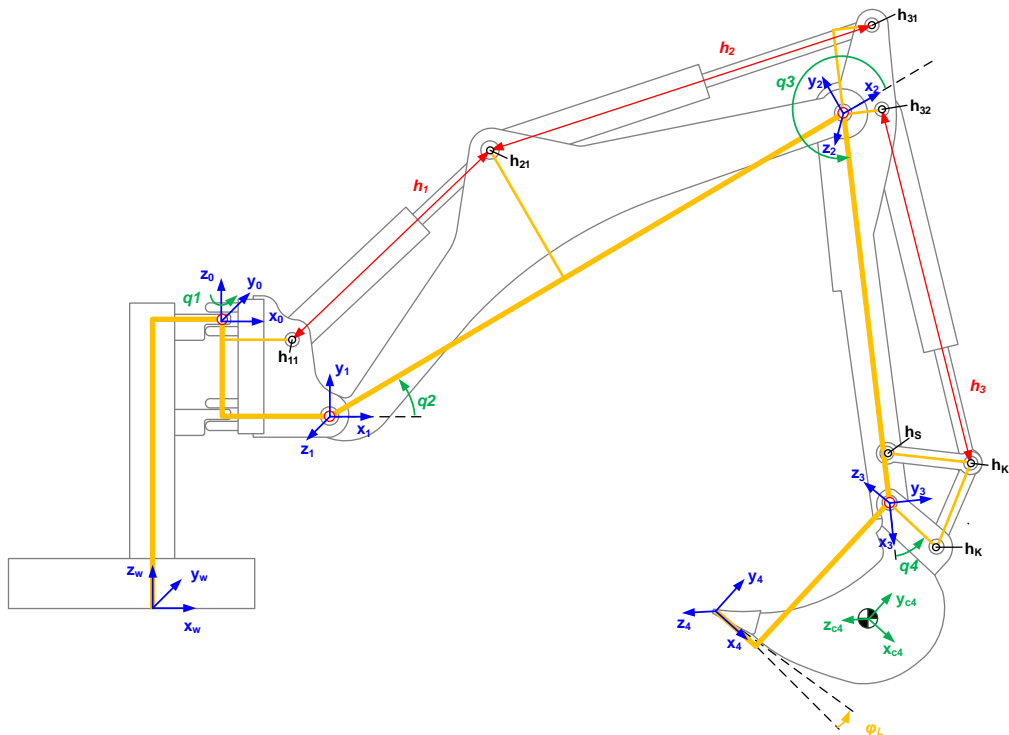
Bei der Erstellung des physikalischen Ersatzmodells eines Hydraulikbaggers müssen die einzelnen Segmente durch geeignete Mechanismen ersetzt werden, damit sie mathematisch beschrieben werden können. Hierzu wurde für den Versuchsbagger sowie für den Baggerprüfstand separate Ersatzsysteme gebildet, die im **Bild 4** sowie **Bild 5** dargestellt sind. Innerhalb des Projekts wurde ein Ersatzmodell entwickelt, das sich relativ einfach auf Änderungen der Arbeitskinematik eines Hydraulikbaggers anpassen lässt. Die mögliche Vielzahl an unterschiedlichen Systemen von Baggern wurde daher bereits zu Beginn des Projekts mit berücksichtigt.



**Bild 4:** Physikalisches Ersatzmodell der Prozesskette des Versuchsbagger Atlas 1204

Innerhalb der Modellbildung müssen lediglich die Werkzeugwechseleinrichtung sowie die angekoppelte Arbeitswerkzeuge als massebehafteter Körper betrachtet werden. Um deren Freiheitsgrade einschränken zu können, wurden die beweglichen Auslegererelemente zur Beschreibung der Körperbewegungen im Raum hinzugezogen. Aus den gesetzten Randbedingungen ergab sich daraus ein mathematisches Modell, das je nach Arbeitswerkzeug die prozessbedingten Lasten aus den Bewegungsgrößen und den gemessenen Kräften an der Werkzeugwechseleinrichtung ermittelt. Die mathematische Trennung der Werkzeugwechse-

leinrichtung und des Werkzeugs wurde vorgenommen, um das Wechseln der Werkzeuge mit denselben entwickelten Gleichungen betrachten zu können. Je nach Art und Funktion des Werkzeugs können die prozessbedingten Lasten zweckmäßig transformiert werden.



**Bild 5:** Physikalisches Ersatzmodell der Prozesskette des Baggerprüfstands

### 2.1.3 Erstellung eines Simulationsmodells

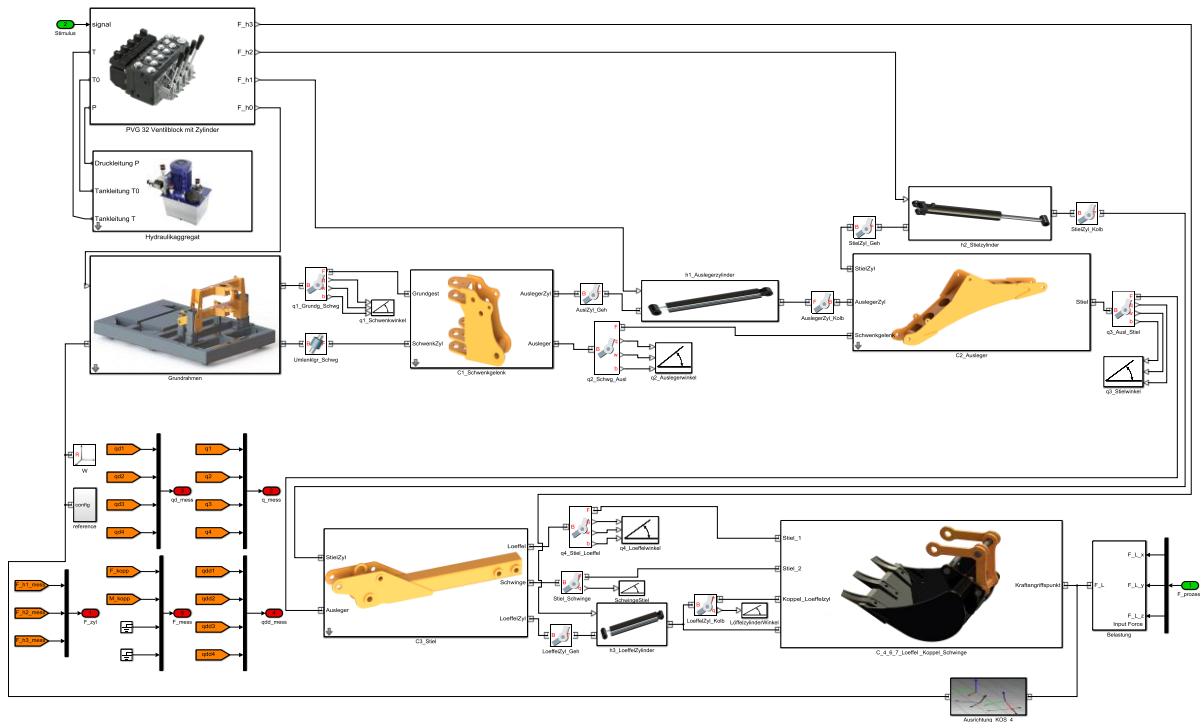
#### Simulationsmodell für den Versuchsbagger Atlas 1204

Für die Auslegung der Kraftmesseinrichtung am Werkzeugwechsler ist es von großer Bedeutung, die maximal wirkenden Kräfte auf das System zu kennen. Beim Tieflöffeleinsatz treten diese Kräfte beim Grabvorgang auf. Diese Kräfte werden Grabkräfte genannt. Die maximal möglichen Grabkräfte stehen in direkter Verbindung zu der Arbeitskinematik und den maximalen Hydraulikkräften eines Baggers sowie zu der Geometrie des Arbeitswerkzeuges. Die Norm ISO 6015 [ISO6015] definiert diese maximalen Kräfte als Reiß- und Losbrechkraft.

Laut Norm werden die beiden Größen in einem definierten Messverfahren ermittelt. Diese Werte werden dann in den Datenblättern der Bagger angegeben. Ändert sich nun der Tieflöffel gegenüber dem standartmäßig angebauten Löffel, oder wird, wie in diesem Fall, ein Werkzeugwechsler adaptiert, ändern sich auch die maximale Reiß- und Losbrechkraft. Es müssten neue Messungen durchgeführt werden, wobei auf Grund der statischen Messung auch eine Rechnung herangezogen werden kann. Dies entspricht nicht exakt dem Vorgehen, wie es durch die Norm festgelegt ist, allerdings sind die rechnerischen Werte sehr aussagekräftig für die Auslegung des hier geplanten Kraftmesssystems. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe des physikalischen Ersatzmodells des Versuchsbaggers ein Simulationsmodell erstellt, mit dem die maximal wirkenden Kräfte ermittelt werden können.

## Simulationsmodell für den Baggerprüfstand

Für die Untersuchung des Systemverhaltens wurde ein Simulationsmodell des Baggerprüfstands entwickelt, mit dem die wichtigsten Einflussfaktoren des Arbeitsprozesses abgebildet werden können. Das nachfolgende **Bild 6** zeigt den Aufbau der virtuellen Simulationsumgebung. Innerhalb des Simulationsmodells wurden alle bekannten Einflussparameter für den hydraulischen sowie für den mechanischen Teil berücksichtigt und an das reale Systemverhalten angepasst.



**Bild 6:** Virtuelle Simulationsumgebung zur Analyse des Systemverhaltens des Baggerprüfstands

Das hier vorgestellte Simulationsmodell wird bei der Entwicklung der verschiedenen Assistenzfunktionen eines Hydraulikbaggers im Arbeitspaket 9 wieder herangezogen. Vor allem für die Implementierung einer Lageregelung der Hydraulikzylinder ist ein hinreichend genaues Simulationsmodell für eine automatisierte Auslegerbewegung zwingend erforderlich. Zudem besteht die Möglichkeit, jegliche mechanische wie auch hydraulische Größe als Messgrößen zu definieren.

### 2.1.4 Definition und Ermittlung der Einflussparameter

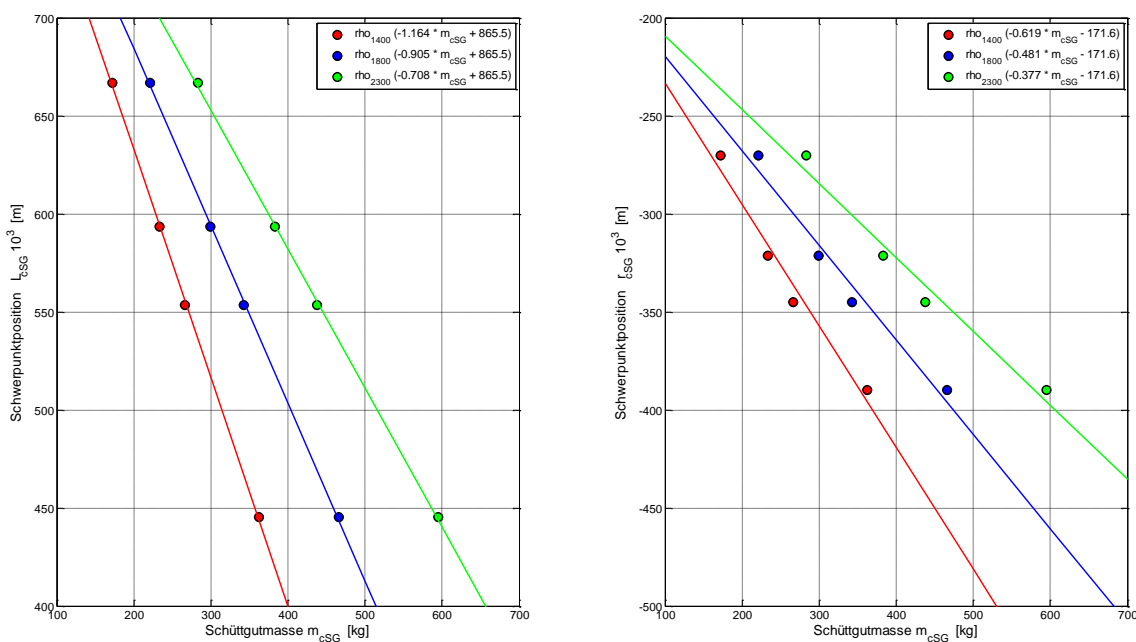
#### Experimentelle Ermittlung der Systemparameter des Tieflöffels und des Werkzeugwechslers

Für das mathematische Modell sind die geometrischen Größen und die Masseneigenschaften (Gewicht, Schwerpunktlage, etc.) des ausgewählten Werkzeugwechslers und Tieflöffels von Interesse. Diese können durch die Aufhängung an zwei unterschiedlichen Punkten ermittelt werden. Das Gewicht wurde mit Hilfe einer Waage ermittelt, wobei für die ausgewählte Kombination Werkzeugwechsler/Tieflöffel auch die vorhandenen CAD-Daten zur Gewichtsbestimmung geeignet sind.

Im Gegensatz zu den Parametern der Werkzeuge und des Wechslers sind die Parameter des Schaufelinhalt von der variablen Schaufelfüllung abhängig. Füllt sich der Tieflöffel,

ändern sich die Eigenschaften des Schüttgutkörpers. Letztendlich ist bei der Ermittlung des Schaufelinhaltes der Parameter 'Gewicht' von Interesse. Daher müssen die Parameter des Schüttgutes in Abhängigkeit der sich mit der Zeit veränderlichen Schüttgutmasse beschrieben werden. Allerdings kann die Masse im Tieflöffel immer eine unterschiedliche Form annehmen, wodurch die Annahme einer Massenabhängigkeit immer eine gewisse Ungenauigkeit mit sich bringt. Betrachtet man jedoch den Ladeprozess eines Hydraulikbaggers genauer, dann fällt auf, dass die Löffelstellungen bei jedem Ladeprozess relativ ähnlich sind. Dies gilt vor allem bei losem Schüttgut, wohingegen bei einem bindigen Erdstoff unterschiedliche Formen des Inhaltes möglich sind. Grundsätzlich wird die Einstufung des maximalen Tieflöffelvolumens nach ISO 7451 [ISO7451] bestimmt. Je nach Erdstoff sind abweichende Füllungsgrade zu dieser Norm möglich.

Innerhalb des Projektes wurde zur Lösung dieses Problems eine vereinfachte mathematische Beschreibung der Schüttgutparameter geschaffen, die von der Schüttgutmasse abhängig ist. Das nachfolgende **Bild 7** zeigt für unterschiedliche Füllungsgrade des verwendeten Tieflöffels die x- und y-Komponenten der Schwerpunktposition. Durch den symmetrischen Aufbau des Tieflöffels kann die z-Verschiebung vernachlässigt werden. Um eine Abhängigkeit von der Schüttgutmasse zu erhalten, wurden ebenfalls unterschiedliche Materialdichten herangezogen.



**Bild 7:** Verschiebung des Schwerpunktes bei unterschiedlichen Schüttgutdichten

Anhand einer Regressionsgeraden kann die Gleichung für die Schwerpunktposition mit einer variablen Schüttgutmasse berechnet werden. Bei den Gleichungen mit den unterschiedlichen Materialdichten wird ersichtlich, dass die Achsenabschnitte der angenäherten Geraden einer Konstanten  $b$  folgen. Bei näherer Betrachtung wird ersichtlich, dass die Steigung von der Dichte abhängig ist. Dabei entspricht die Steigung näherungsweise einer Konstanten  $g_r$  multipliziert mit dem Verhältnis aus einer Referenzdichte  $\rho_{SG,0}$  und der vorhandenen Dichte  $\rho_{SG}$ . Hieraus ergeben sich die allgemein gültigen Gleichungen

$$L_{cSG}(m_{cSG}) = g_{r,x} \cdot \frac{\rho_{SG,0}}{\rho_{SG}} \cdot m_{cSG} + b_x \quad \text{und}$$

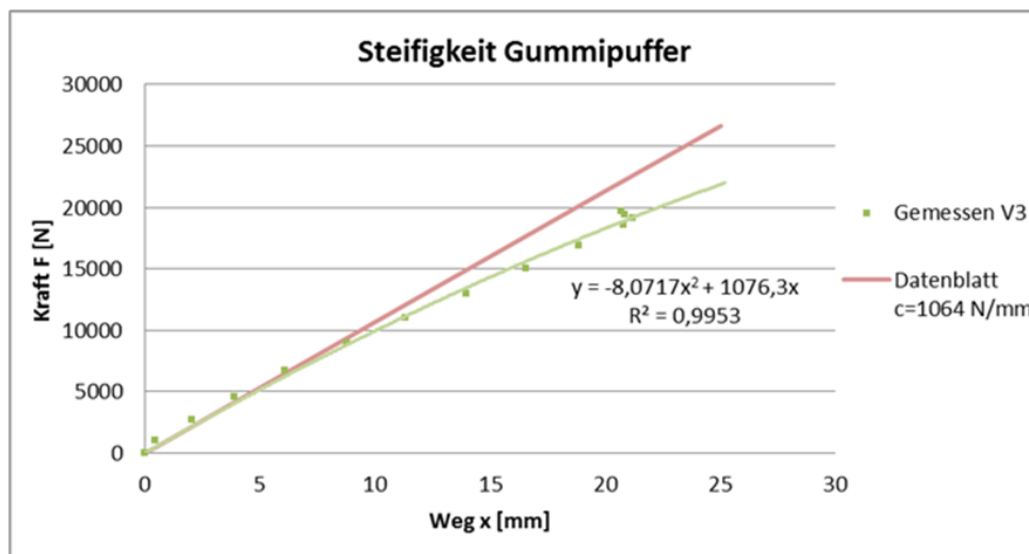
$$r_{cSG}(m_{cSG}) = g_{r,y} \cdot \frac{\rho_{SG,0}}{\rho_{SG}} \cdot m_{cSG} + b_y$$

für die Schwerpunktpositionen des Schüttguts. Ein ähnliches Verhalten gilt für die Trägheitsmomente der variablen Schüttgutmasse. Dieses Verfahren ist aus keinerlei Untersuchungen zur Ermittlung einer Schüttgutmasse bekannt und kann daher als Innovation in diesem Projekt angesehen werden.

### Experimentelle Ermittlung der Systemparameter des Anbauverdichters

Für die analytische Beschreibung des Anbauverdichters aber auch für die Auswertung der praktischen Versuche spielt die Geometrie und die Massenverteilung eine große Rolle. Daher wurden die charakteristischen Maße vom realen Modell erfasst und in eine 3D-Baugruppe übertragen. Bei der analytischen Betrachtung von Maschinenteilen spielt die Schwerpunktlage eine große Rolle. Dafür kommt neben einer rechnerischen Bestimmung über das CAD-Modell auch eine aufwendigere Messung am realen Modell infrage. Diese hat den Vorteil, dass auch die Peripherie wie Hydraulikschläuche berücksichtigt werden.

Zwischen Ober- und Untermaße sorgen vier parallel angeordnete Schub-Scheibenfedern aus Gummi für eine mechanische Entkopplung. Die zylindrischen Elemente werden bei vertikaler Belastung durch den Bagger vorwiegend quer verformt, bis der Stempel der Obermaße gegen den Anschlag der Untermaße drückt.

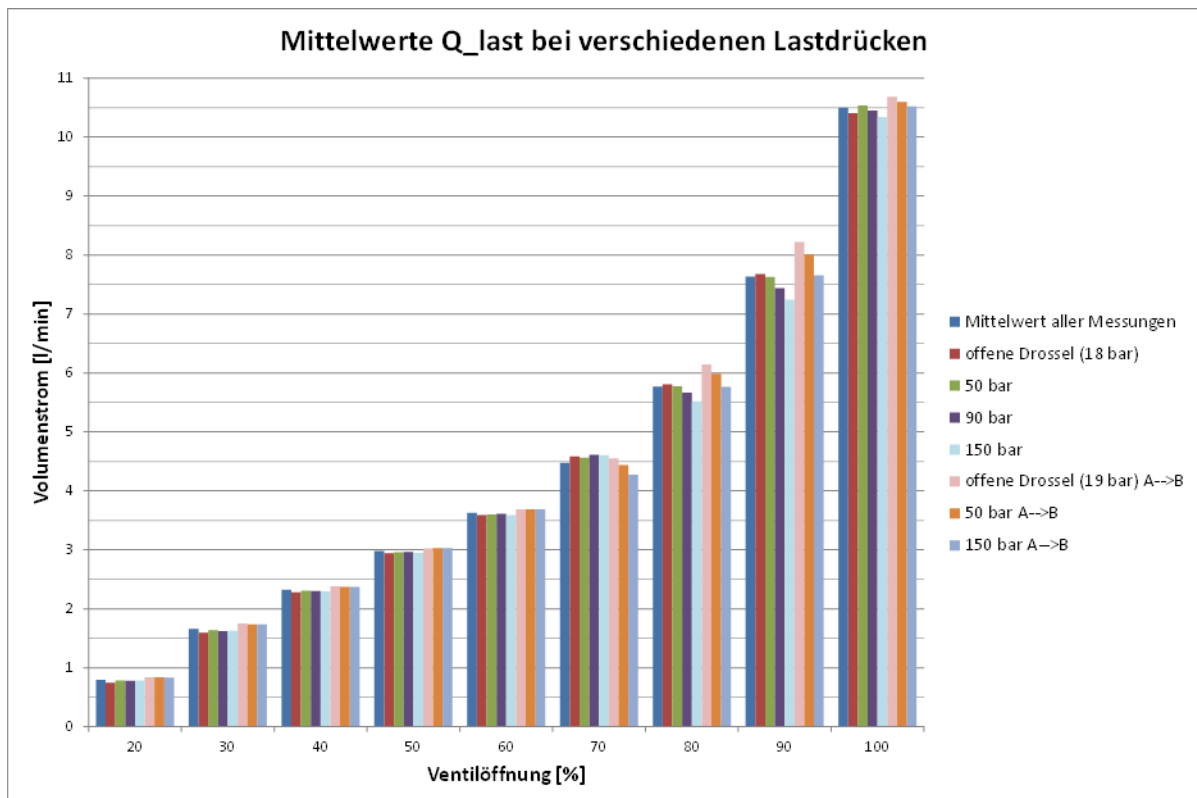


**Bild 8:** Steifigkeit der vier Schub-Scheibenfedern am Anbauverdichter

Aufgrund der großen inneren Reibung sind die Belastungs- und Entlastungskräfte unterschiedlich groß. Da der angegebene Steifigkeitswert nur für reine Querbelastung gilt und des Weiteren nicht mit einem linearen Steifigkeitsverlauf ausgegangen werden kann, sind zusätzliche Steifigkeitsmessungen bei unterschiedlichen Belastungen im tatsächlichen Einbaufall wichtig. Erfasst wurde diese, durch die Messung des Relativweges zwischen Ober- und Untermaße bei definierter Druckbelastung der Untermaße. Die Ergebnisse sind im **Bild 8** aufgeführt.

### Experimentelle Ermittlung von Systemparametern des Baggerprüfstands

Um die Arbeitskinematik des geplanten Baggerprüfstands automatisieren zu können, wurden CAN-gesteuerte Proportionalventile ausgewählt. Für die Entwicklung der dazu notwendigen Lageregelung der Hydraulikzylinder ist ein hinreichend genaues Simulationsmodell erforderlich. Die Genauigkeit eines Modells steht und fällt mit den benötigten Modellparametern. Aus diesem Grund wurden die Funktionsweise und das Verhalten eines kompletten Ventilblocks mit verschiedenen Lasten ermittelt, um so die benötigten Parameter für die Entwicklung und Verifizierung des Simulationsmodells zu generieren. Das nachfolgende **Bild 9** zeigt für unterschiedlichen Ventilöffnungen sowie unterschiedliche Lastdrücke den resultierenden Volumenstrom.



**Bild 9:** Darstellung des resultierenden Volumenstroms bei unterschiedlichen Ventilöffnungen

Dabei ist zu erkennen, dass die verwendeten Proportionalventile eine interne Volumenstromregelung besitzen, die bei veränderlichen Lastdrücken den Ventilschieberweg automatisch anpasst. Zudem ist zu erkennen, dass keine lineare Ventilkennlinie vorhanden ist. Dies ist bei der späteren Auslegung einer Lageregelung zu berücksichtigen.

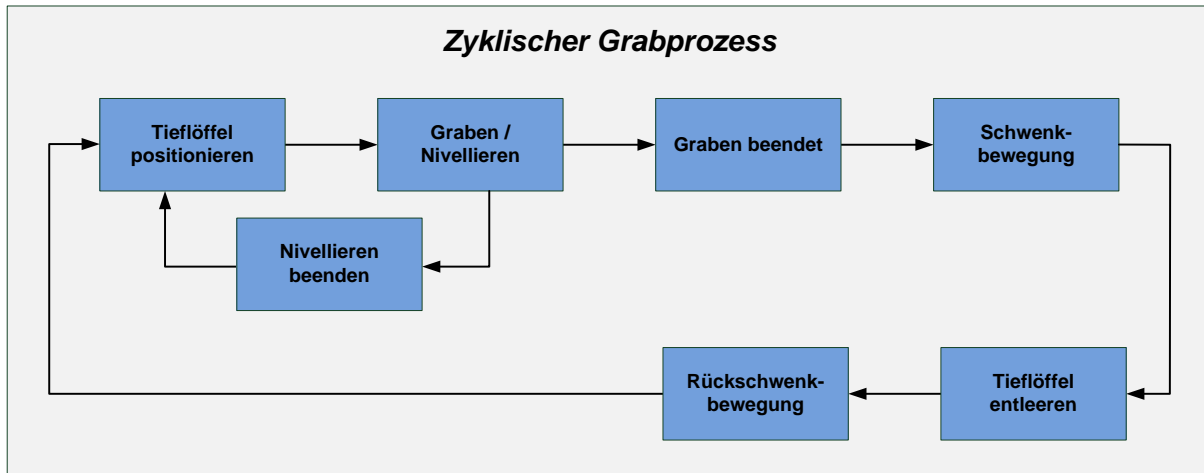
### Experimentelle Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Hydraulikbaggers

Ziel der Untersuchungen war das Festlegen der Randbedingungen für die abschließende Erprobung des zu entwickelnden Gesamtsystems. Nachfolgend werden jeweils für den Tieflöfteleinsatz sowie den Verdichtungsprozess mit dem Anbauverdichter die Randbedingungen festgelegt.

Der Arbeitsprozess eines Hydraulikbaggers mit Tieflöfelausrüstung ist ein zyklischer Vorgang, bei dem überlagerte Teilbewegungen zu einer resultierenden Arbeitsbewegung führen. Insgesamt kann der Arbeitsprozess in mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen für den



Erdaushub beschrieben werden. Ein Arbeitsspiel setzt sich dabei jeweils aus dem Graben, dem Heben und Schwenken, dem Entleeren sowie dem Rückschwenken und Senken zusammen (siehe hierzu **Bild 10**). Jeder dieser Vorgänge hat dabei eine charakteristische Kräfte- wirkung auf das Werkzeug.



**Bild 10:** Zyklischer Ablauf eines Grabprozesses

Allerdings ist ein Grabprozess niemals einem anderen gleich. Jeder Grabprozess hat, bedingt durch die gegebenen Einflüsse, gewisse Besonderheiten. Daraus ergibt sich eine Auswahl eines geeigneten Tieflöffels. Ein Optimum kann dabei niemals getroffen werden, allerdings können durch Erfahrungen sehr viele Randbedingungen berücksichtigt werden. Durch die langjährige Entwicklung von Tieflöffel konnte über den Kooperationspartner Lehnhoff auf ein hohes Maß an Erfahrungen zurückgegriffen werden.

Die Arbeitsfunktion von Anbauverdichter ist die Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften von Böden durch Verringerung des mit Wasser und Luft gefüllten Hohlraums. Sowohl Sand- und Kiesboden als auch Fels setzen sich aus einer Anhäufung fester Einzelkörper und einem mehr oder weniger großen Anteil an Hohlräumen zusammen. Die festen Einzelkörper (Körner) lassen sich kaum zusammen drücken. Unter der Einwirkung von Vibrationen oder Druck verlieren die einzelnen Körner ihren Zusammenhalt, kleinere Körner verlagern sich in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern. Der Hohlraum füllt sich bei der Verdichtung mit Teilchen, was eine dichte Lagerung des gesamten Materialverbandes bewirkt. Der Boden wird tragfähiger, seine Wasserdurchlässigkeit und Wasseraufnahmefähigkeit verringern sich.

Die optimale Vibrationsfrequenz für Boden mit kugeligen und gedrungenen Kornformen liegt theoretisch bei der Eigenfrequenz des Bodens. Die Resonanz des Bodens ist jedoch nicht nur von der Bodenart sondern auch von der Lagerungsdichte, dem Wassergehalt, der Schichtdicke usw. abhängig, so dass ein ständiges Angleichen der Vibrationsfrequenz notwendig würde. Des Weiteren ist das Verdichtungsgerät im Resonanzbereich extrem hoher mechanischer Belastung ausgesetzt. Man geht deshalb dazu über, das Verdichtungsgerät in der Nähe des Resonanzbereiches zu betreiben.

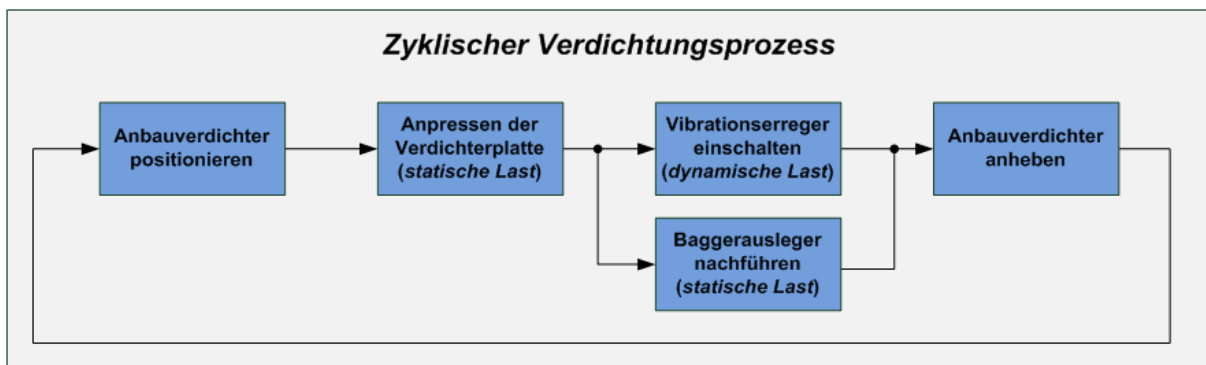
Grundsätzlich unterscheidet man bei der Bodenverdichtung zwischen drei Bodenarten:

- nicht bindige Böden
- gemischt körnige Böden

- bindige Böden

In der Praxis nutzt man aus Gründen der unterschiedlichen Resonanzbereiche für bindige Böden eher niedrige Frequenzbereiche und für nicht bindige Böden höhere Frequenzbereiche, um die innere Reibung überwinden zu können. Demnach muss für unterschiedliche Böden eine unterschiedliche Frequenz bei dem Anbauverdichter eingestellt werden können. Nicht alle Hersteller bieten unterschiedliche Anregungsfrequenzen für ihre Anbauverdichter an.

Im nachfolgenden **Bild 11** wird der zyklische Verdichtungsprozess mit einem Anbauverdichter dargestellt. Dieser Vorgang wiederholt sich stetig, bis die gewünschte Fläche vollkommen verdichtet ist. Aus der Darstellung geht hervor, dass für das Verdichten von Böden eine statische sowie eine dynamische Last von Nöten sind.



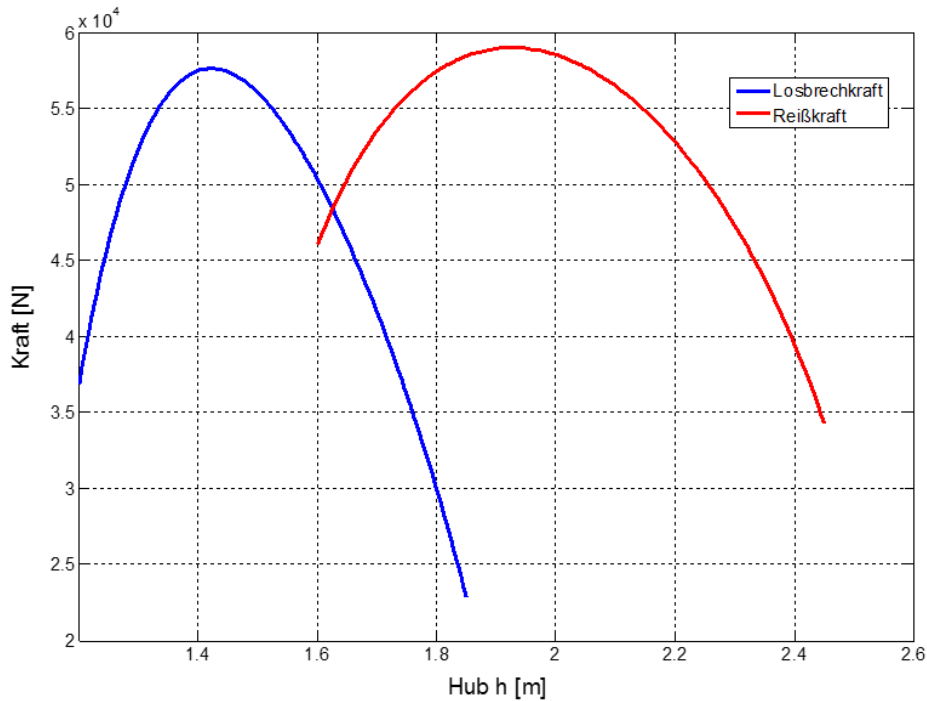
**Bild 11:** Verdichtungsprozess mit einem Anbauverdichter

In Vorversuchen wurde die optimale statische Vorbelastung des Anbauverdichters ermittelt (siehe hierzu Ergebnisse in **Bild 8**). Diese statische Vorbelastung der Anbauverdichter ist für einen optimalen Verdichtungsprozess zwingend erforderlich. Vor allem muss gewährleistet werden, dass diese statische Last über den Verdichtungsprozess möglichst konstant gehalten wird. Mit der Entwicklung einer integrierten Kraftmesseinrichtung im Werkzeugwechsler kann diese statische Vorbelastung gemessen werden. Dies soll in den abschließenden Untersuchungen im Arbeitspaket 11 durchgeführt werden. Ebenfalls könnten die dynamischen Kraftanteile eine Aussage über die abschließende Verdichtung geben. Dies soll ebenfalls im Arbeitspaket 11 untersucht werden.

### 2.1.5 Simulation der maßgeblichen Einflussgrößen

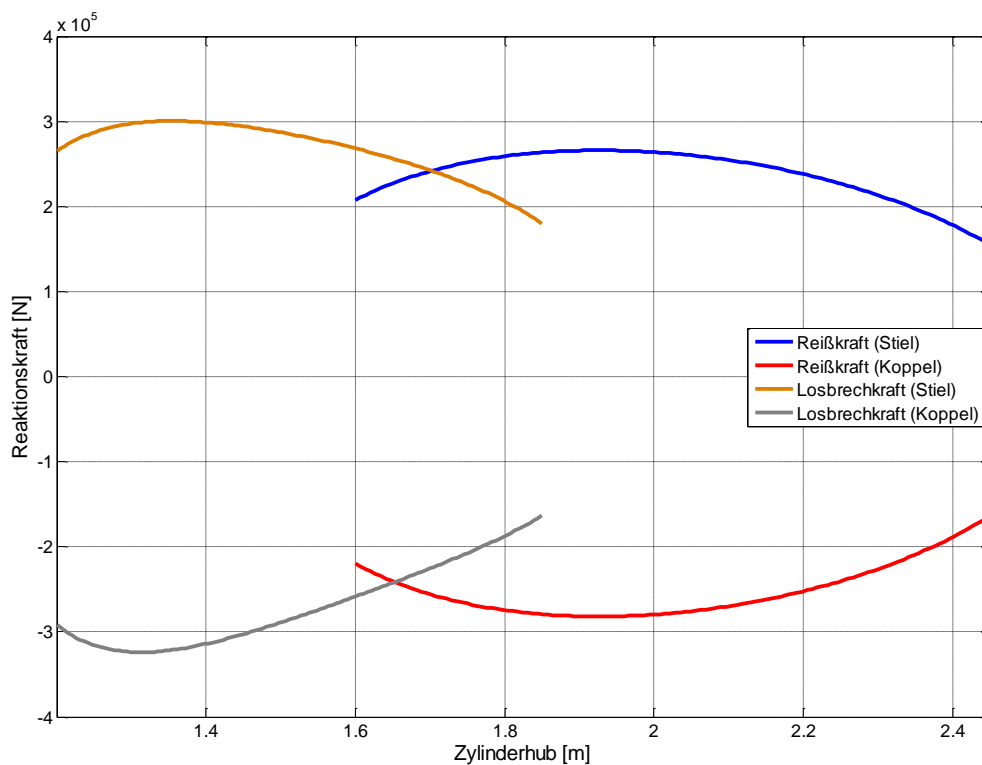
#### Ermittlung der maximalen Belastungen auf das geplante Kraftmesssystem

Für die verwendete Maschinenkombination der Versuchsmaschine Atlas 1204 ergeben sich nach **Bild 12** die Verläufe der Reiß- und Losbrechkräfte für die entsprechende Stiel- bzw. Löffelzylinderlänge.



**Bild 12:** : Reiß- und Losbrechkraft für bestehende Maschinenkombination des Versuchsbaggers Atlas 1204

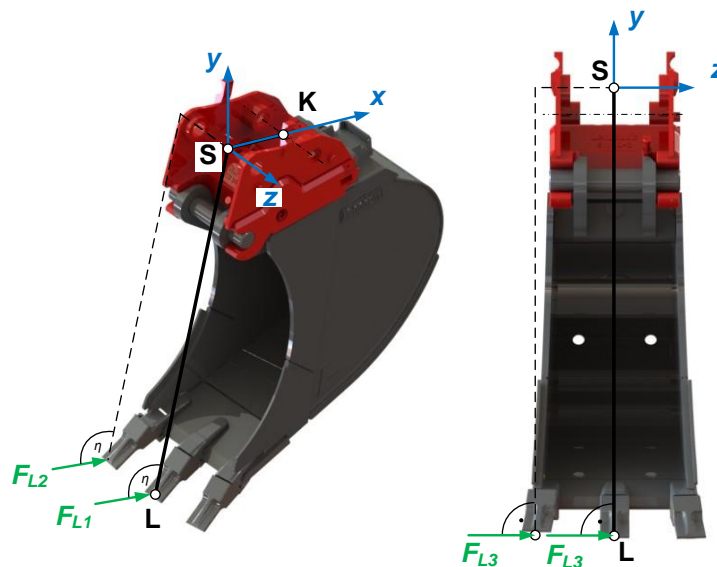
Die beiden Maximalwerte weichen vom Standardwert aus dem Datenblatt teilweise erheblich ab. Dies liegt zum einen an einer anderen Werkzeuggeometrie sowie an der veränderten Kinematik durch die Bohrungsabstände an der Werkzeugwechseleinrichtung. Mit diesen maximal auf das Arbeitswerkzeug wirkenden Kräften können nun die Kräftewirkung auf den Werkzeugwechsler mit Hilfe des Simulationsmodells ermittelt werden.



**Bild 13:** Reaktionskräfte am Wechsler durch Reiß- und Losbrechkräfte

Bei der Konzeptionierung des neuartigen Werkzeugwechslers mit integrierter Kraftmeseinrichtung wurde festgelegt, dass der Ort der Kraftmessung an der Schnittstelle zwischen Werkzeugwechsler und Bagger liegt. Aus diesem Grund müssen die Bolzenkräfte am Stiel und an der Koppel ermittelt werden. Über den jeweiligen Zylinderhub und der definierten Krafteinleitungsrichtung ergeben sich die Reaktionskräfte nach **Bild 13** als Kraftbetrag am Stiel und an der Koppel und somit am Werkzeugwechslersystem. In den Kraftverläufen ist eindeutig zu erkennen, dass sowohl die Kraft am Stiel wie auch die Koppelkraft für die eingeleitete Losbrechkraft, betragsmäßig größer sind, als die durch die Reißkräfte verursachten Reaktionskräfte.

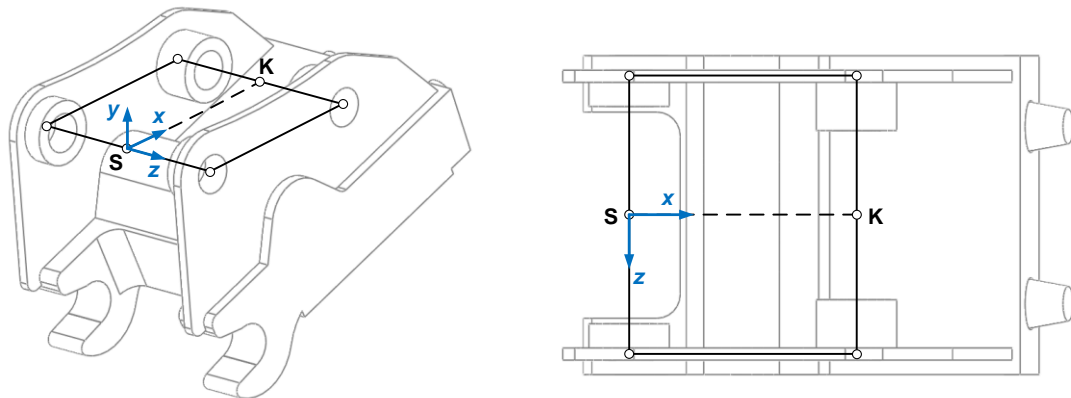
Betrachten man den Arbeitsprozess eines Tieflöffels genauer, dann fällt auf, dass eine symmetrische Krafteinleitung in das Werkzeug keineswegs der Realität entspricht. Die Kraft kann asymmetrischer oder sogar von der Seite angreifen. Daraus ergeben sich für die Krafteinleitung in den Tieflöffel nach **Bild 14** drei mögliche Lastfälle, wobei der Lastfall 3 (Seitenkraft) auch als Kombination mit den beiden anderen Lastfällen auftreten kann.



**Bild 14:** Mögliche Lastfälle am Tieflöffel

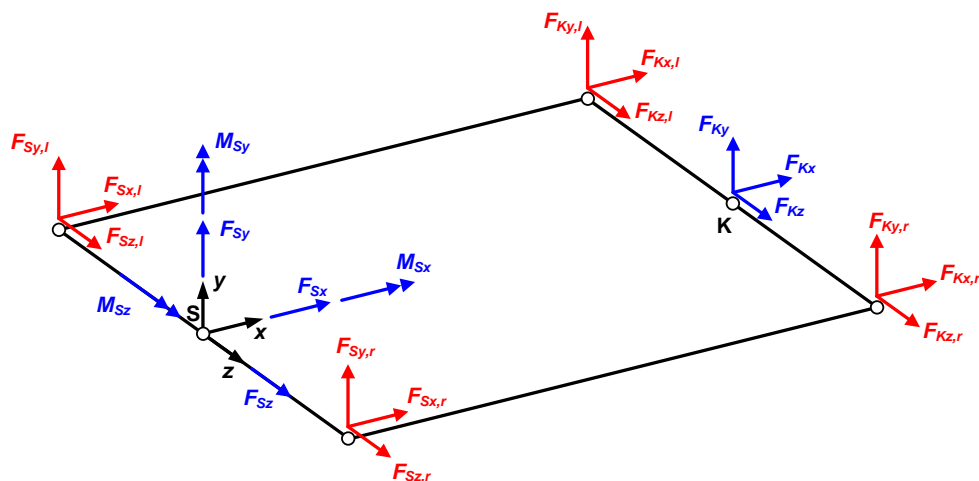
Die gesamte Betrachtung der Prozesskräfte für einen Tieflöffel beruht auf den maximal möglichen Kräften auf die Zahnspitzen. Reale Schnitt- bzw. Grabkräfte folgen aufgrund der zufälligen Schwankungen der Betriebs- und Erdstoffparameter ebenfalls einer Zufallsgröße. Aus diesem Grund ist der realer Grabvorgang eines Tieflöffels als räumlicher, stochastischer Vorgang nur mit einem sehr großen Aufwand zu betreiben. Somit werden die ermittelten Maximalkräfte aus den möglichen Lastfällen für die Auslegung der Kraftmeseinrichtung herangezogen. Die maximale Seitenkraft wird näherungsweise durch die Division aus den maximalen Schwenkmoment des Hydraulikbaggers und dem minimal möglichen Abstand der Zahnspitze zum Drehpunkt ermittelt.

Um die maximal auf den Werkzeugwechsler einwirkenden Kräfte zu beschreiben, wurde eine Schnittebene, wie in **Bild 15** zu sehen ist, definiert. Die Ermittlung des Kraftmessortes erfolgte im Arbeitspaket 6.



**Bild 15:** Schnittenebene am Werkzeugwechsler

Durch diese Schnittenebene entstehen aufgrund der beispielhaften Lastfälle am Tieflöffel Schnittkräfte am Werkzeugwechsler, die in der folgenden Bild verdeutlicht werden sollen. Demnach müssen an jedem Eckpunkt der Schnittenebene drei Kraftkomponenten (positive und negative Richtung) messtechnisch erfassbar sein (rote Koordinatensysteme in **Bild 16**).



**Bild 16:** Schnittenebene mit messtechnisch zu ermittelnden Schnittgrößen

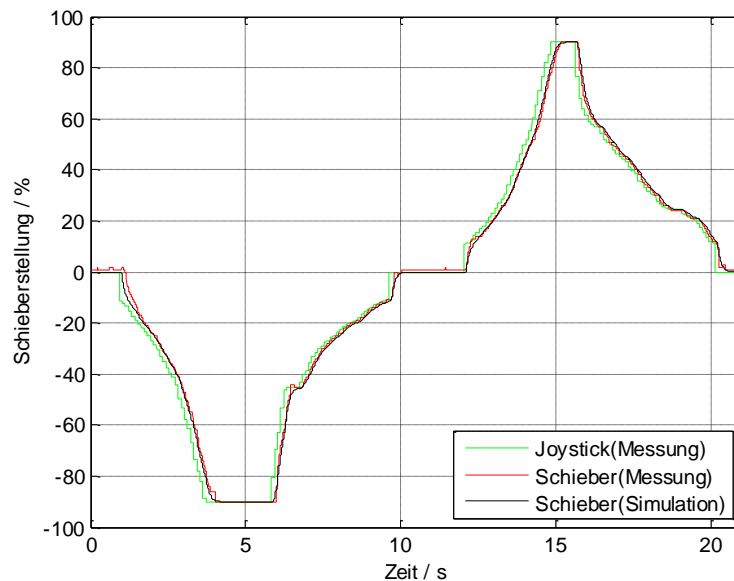
Die Lage der Schnittenebene am Baggerausleger wird mit Hilfe der Sensorik zur Positionsbestimmung des Werkzeugs ermittelt. Demnach ist die Lage und Orientierung dieser Ebene im Raum bekannt. Basierend auf den drei Lastfällen und der maximal umsetzbaren Arbeitskraft des verwendeten Hydraulikbaggers können die maximal messtechnisch zu ermittelnden Schnittgrößen aus **Bild 16** berechnet werden. Daraus ergibt sich das ermittelbare Kraftspektrum für die Kraftsensorik, das in **Tabelle 4** dargestellt wird.

**Tabelle 4:** Kraftspektrum für die Auslegung der Kraftsensorik

	betragmäßiges Maximum	Kraftspektrum
Kraft in x-Richtung	111,529 kN	- 125 kN ... 125 kN
Kraft in y-Richtung	173,278 kN	- 185 kN ... 185 kN
Kraft in z-Richtung	10,4 kN	0 kN ... 12 kN

### Simulation des Baggerprüfstands und Verifizierung der Ergebnisse

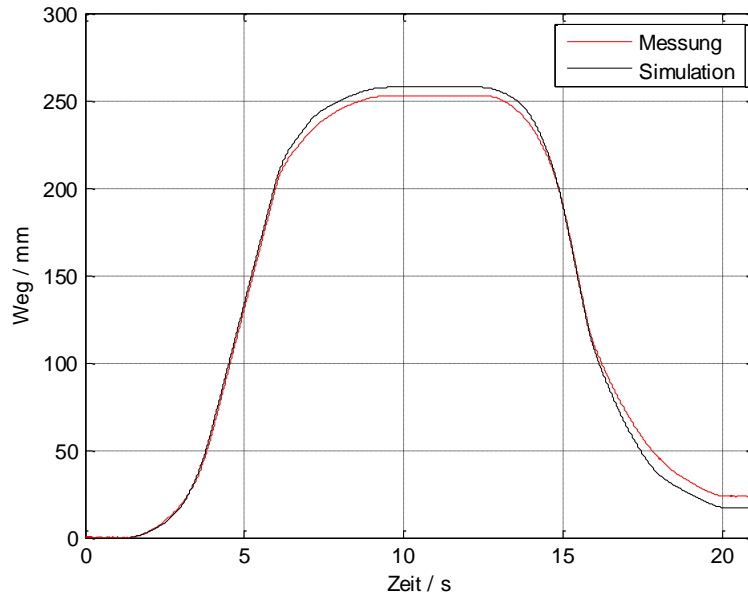
Zur Validierung des Baggerprüfstandmodells, die durch den Vergleich von simulierten Zeitantworten und gemessenen Signalen erfolgt, sind identische Anregungssignale erforderlich. Daher wurden am entwickelten Baggerprüfstand verschiedene Versuchsreihen durchgeführt und Anregungs- sowie Messgrößen aufgezeichnet. Exemplarisch an einer Zylinderbewegung soll die Validierung des Simulationsmodells dargestellt werden. Das in diesem Experiment aufgezeichnete Signal des Joysticks (grün) und die daraus resultierenden Schieberstellungen des Proportionalventils am Prüfstand (rot) und aus der Simulation (schwarz) sind im **Bild 17** dargestellt.



**Bild 17:** Anregungssignal des Joysticks und resultierende Schieberstellung des Ventils für den Stielzylinder

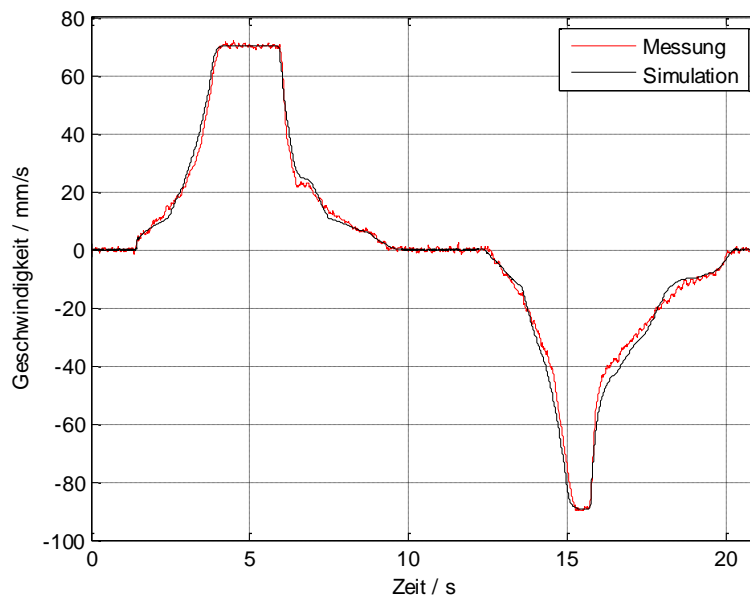
Die einzige Auffälligkeit in dieser Darstellung besteht darin, dass die rote Zeitantwort ein Offset von 1,5% besitzt. Dies ist jedoch aufgrund der Ventilüberdeckung von 11,5% ohne Bedeutung für die weiteren Ergebnisse. Die Schieberstellung des Ventils beeinflusst maßgeblich die Geschwindigkeit und somit auch die Lage des Zylinders

Die Zeitantworten der Auslenkungen des Stielzylinderkolbens sind im **Bild 18** vorzufinden. Hieran ist zu sehen, dass das Simulationsmodell minimal schneller verfährt als der reale Prüfstand. Die Ursachen hierfür sind zum einen bedingt durch die Ventildynamik veränderten Schieberstellung und zum anderen an Parameterungenauigkeiten sowie der vereinfachten Modellbildung diverser Reibmodelle. Mit einem maximalen Fehler von 2...3%, der in den Endlagen auftritt, sind die Ergebnisse akzeptabel.



**Bild 18:** Auslenkung der Kolbenstange des Stielzylinders

Dies wird auch anhand der Zeitantworten der Auslenkungsgeschwindigkeit sichtbar, die in **Bild 19** dargestellt sind. Bis auf geringfügige Abweichungen liegen die Zeitantworten nahezu übereinander.



**Bild 19:** Auslenkungsgeschwindigkeit der Kolbenstange des Stielzylinders

Bei der Validierung des Simulationsmodells des Baggerprüfstands wurde ersichtlich, dass eine sehr gute Näherung des Modells an die Realität erreicht werden konnte. Einmal ist es von nun an möglich, potentielle Komponenten, die in den Prüfstand integriert werden sollen, vorab virtuell zu untersuchen, indem deren Teilmodelle ins Simulationsmodell integriert werden. Darüber hinaus können auf der Grundlage des Baggerprüfstandmodells diverse Regelalgorithmen entworfen werden. Das wiederum ermöglicht die Erforschung und den Entwurf neuer Assistenzfunktionen. Ein anderer Zweck besteht darin, mit Hilfe der Regelung reproduzierbare Grabprozesse erzeugen zu können, die dazu dienen, beispielsweise die Effizienz verschiedener Löffel miteinander zu vergleichen.



### 2.1.6 Entwicklung einer neuartigen Kraftmesseinrichtung

Für das Erfassen von hochdynamischen Belastungen auf das Arbeitswerkzeug eines Hydraulikbaggers kann derzeit auf kein gängiges Messverfahren zurückgegriffen werden. Demgegenüber kann am Baggerprüfstand, angesichts der geringen Maschinengröße, auf Standard-Kraftsensoren zurückgegriffen werden. Zwischen dem Werkzeugwechsler und dem Baggerausleger können die Kräfte sowie Momente aller drei Raumachsen gemessen werden. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde daher eine Kraftmessdose für den Baggerprüfstand beschafft, mit der die Belastungen auf das Arbeitswerkzeug ermittelt werden können. Für eine reale Anwendung ist diese Methode allerdings nicht zielführend. Aus diesen Grund wurde im Projekt ein Konzept entwickelt, mit dem eine mehrdimensionale Prozessbelastung in einer geeigneten Art und Weise am Werkzeugwechsler ermittelt werden kann. Im Folgenden wird die Entwicklung der Kraftmesseinrichtung für den Versuchsbagger sowie für den Baggerprüfstand erläutert.

#### Entwicklung einer Kraftmesseinrichtung für den Versuchsbagger Atlas 1204

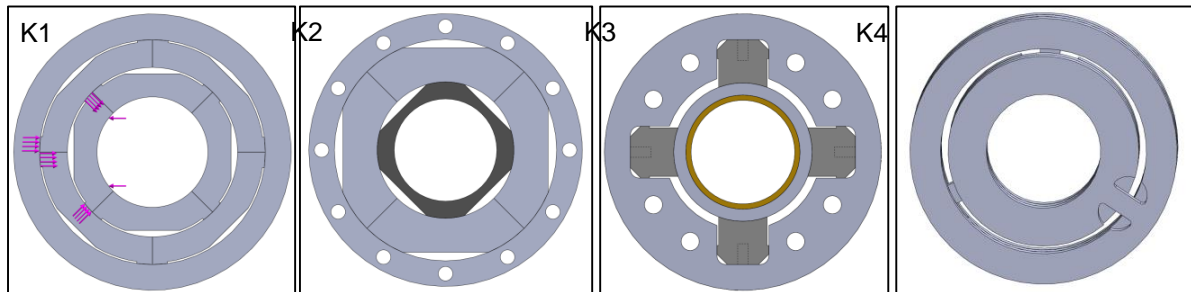
Da der Werkzeugwechsler fest mit dem Bagger verbaut ist und gleichzeitig als Schnittstelle zwischen Bagger und Anbauwerkzeug dient, ist aus dieser Betrachtung heraus der Werkzeugwechsler der ideale Ort für eine Kraftmesseinrichtung zur Ermittlung der Prozesskräfte bei der Anwendung unterschiedlicher Werkzeuge.

Mit Hilfe der morphologischen Analyse wurden systematisch entstandene Kombinationen von Ausprägungen gefunden, die zu einer optimalen Gesamtidee der Kraftmesseinrichtung führen sollen. Zur Beurteilung einiger Kombinationen aus der morphologischen Analyse wurden verschiedene Konzepte untersucht. In erster Linie handelt es sich hierbei um integrierte Lösungen bzw. um Konzepte, die mit marktüblicher Messtechnik realisiert werden können. Anhand der Ergebnisse dieser Voruntersuchungen konnte eine Auswahl der Lösungen für die einzelnen Teilfunktionen weiter eingeschnürt werden. So ergibt sich für die einzelnen Teilfunktionen einer Kraftmesseinrichtung im Werkzeugwechsler eines Hydraulikbaggers folgende Konstellation aus dem morphologischen Kasten:

**Tabelle 5:** Gewählte Kombination mittels morphologischer Analyse

Nr.	Teilfunktion	Nr.	Lösungsprinzip
1	Kraftmessort festlegen	3	Augen der Bolzenlagerung am Wechsler
2	Aufnehmerkörper	1	Druckstab
3	Kraftwirkung erzeugen	1	Dehnung
4	Kraftwirkung aufnehmen	1	DMS-Prinzip
5	Aufnehmer befestigen	1	Schrauben
6	Kraftsignal erzeugen	2	Kraftkomponenten
7	Überlast verhindern	1	Dimensionierung
8	Störgrößen abhalten	2	Mechanisch entkoppeln

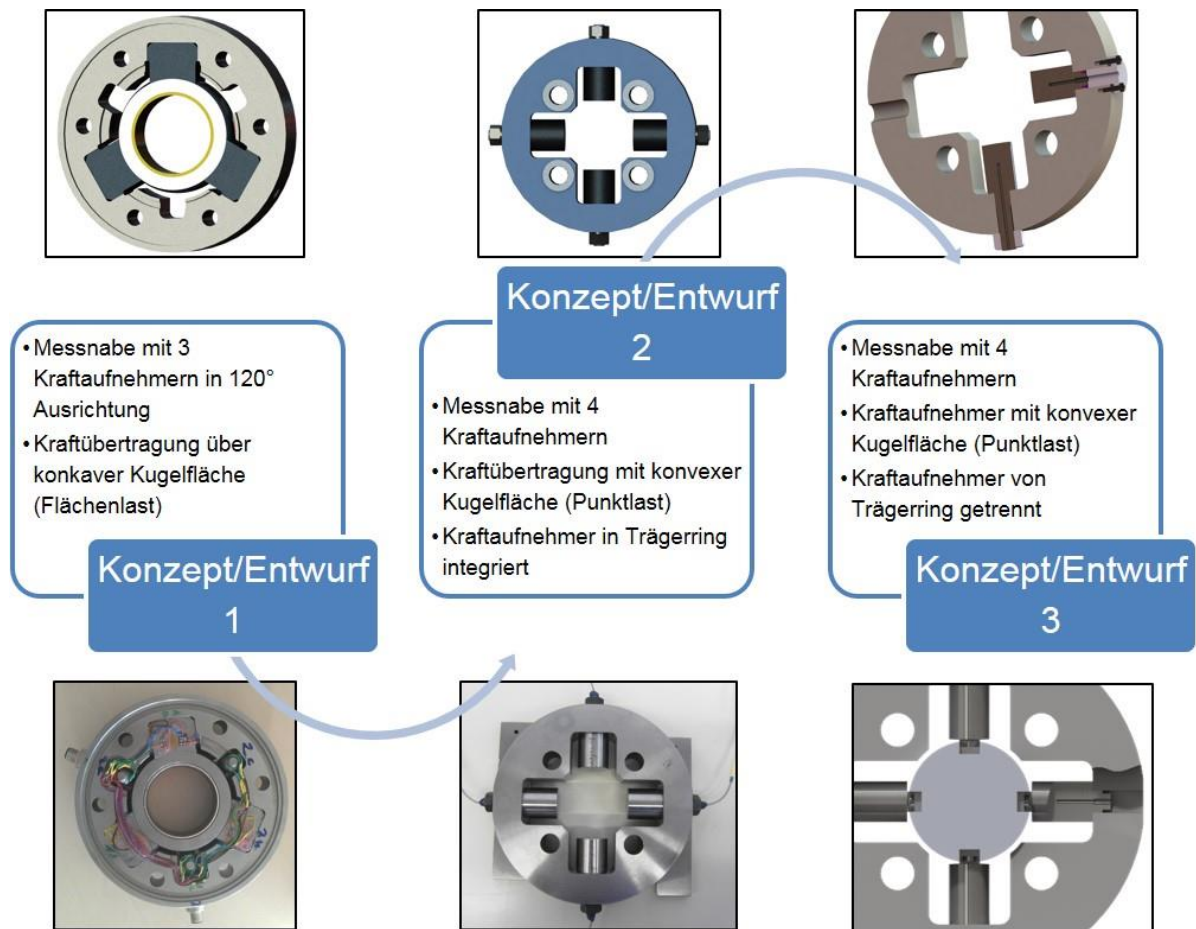
Nachdem die Entscheidung über die Wahl der Lösungsprinzipien, also der Ort der Kraftmessung und die Art der Kraftmessung, getroffen wurde, konnten erste detailliertere Konzepte ausgearbeitet werden. Die Entwicklung der Konstruktion erfolgte schrittweise, wobei der Fokus auf die mechanische Entkopplung der Messaufnehmer zur Minimierung der Störgrößen gelegt wurde.



**Bild 20:** Konzepte (K1-K4) mit mechanisch entkoppelten Messaufnehmern

Im **Bild 20** sind vier Konzepte K1 bis K4 abgebildet. Bei diesen Konzepten sind die Kraftaufnehmer alle mechanisch voneinander entkoppelt. Die Konzepte K1, K2 und K4 arbeiten nach dem Biegebalken-Prinzip. Bei diesen Konzepten wird die Biegung der einzelnen Kraftmessselemente mittels DMS gemessen. Durch eine Kalibrierung im Vorfeld können so Rückschlüsse auf die einwirkenden Kräfte und deren Richtung gezogen werden. Bei dem Konzept K3 werden die Kraftaufnehmer nur in eine Richtung gedehnt, das reduziert den Kalibrieraufwand auf ein Minimum. Durch die so gemessenen Kräfte lässt sich aus den Verhältnissen der Werte der einzelnen Kraftaufnehmer ebenfalls die Richtung der einwirkenden Kraft ermitteln. Bei Betrachtung der Vor- und Nachteile hebt sich das Konzept K3 hervor. Diese Lösungsvariante erfüllt weitestgehend die Anforderungen, ist jedoch nicht optimal. Aus diesem Grund muss dieses Konzept für die geplante Anwendung weiter angepasst werden.

Bei der Entwicklung der Messnaben wurden mehrere Entwicklungsschritte durchlaufen, wobei bei den einzelnen Konzepten die Schwachstellen ermittelt und analysiert wurden. Daraufhin konnte in einem weiteren Konzept eine Optimierung erfolgen. Die Entwicklungsschritte sind im nachfolgenden **Bild 21** dargestellt.



**Bild 21:** Konzeptphasen der Entwicklung einer anschraubbaren Kraftmessnabe

Im Folgenden werden die Nachteile der einzelnen Konzeptphasen erläutert:

#### *Schwachstellen von Konzept 1*

- Zu hohe Anforderung an die Fertigungsgenauigkeit der Kontaktflächen der drei Kraftaufnehmer (Ursache für undefinierte punktuelle Kraftübertragung von Kugelring auf Kraftaufnehmer und die daraus entstehende mehrachsige Biegung). Wenn jedoch eine andere Form der Kontaktfläche gewählt wird, optimaler Weise eine möglichst kleine Fläche, dann steigt die Flächenpressung. Optimal wäre eine Punktberührung in der neutralen Biegelinie des Kraftaufnehmers.
- Bei einer Kräfteinleitung zwischen zwei Kraftaufnehmer wird durch das Spiel zwischen Kugelring und Kraftaufnehmer die Kraft außermittig in den jeweiligen Kraftaufnehmer eingeleitet und erzeugt ein Biegemoment. Dies führt zu einer Ungenauigkeit der Messung

#### *Änderungen vom Konzept 2*

- Vier Kraftaufnehmer mit gehärtete konvexen Kugeloberfläche
- Druckkraftmessung erfolgt über eine Dehnschraube, die bei einer Kräfteinleitung entlastet wird.
- Messung der Kraft erfolgt in der neutralen Biegeachse der Dehnschraube

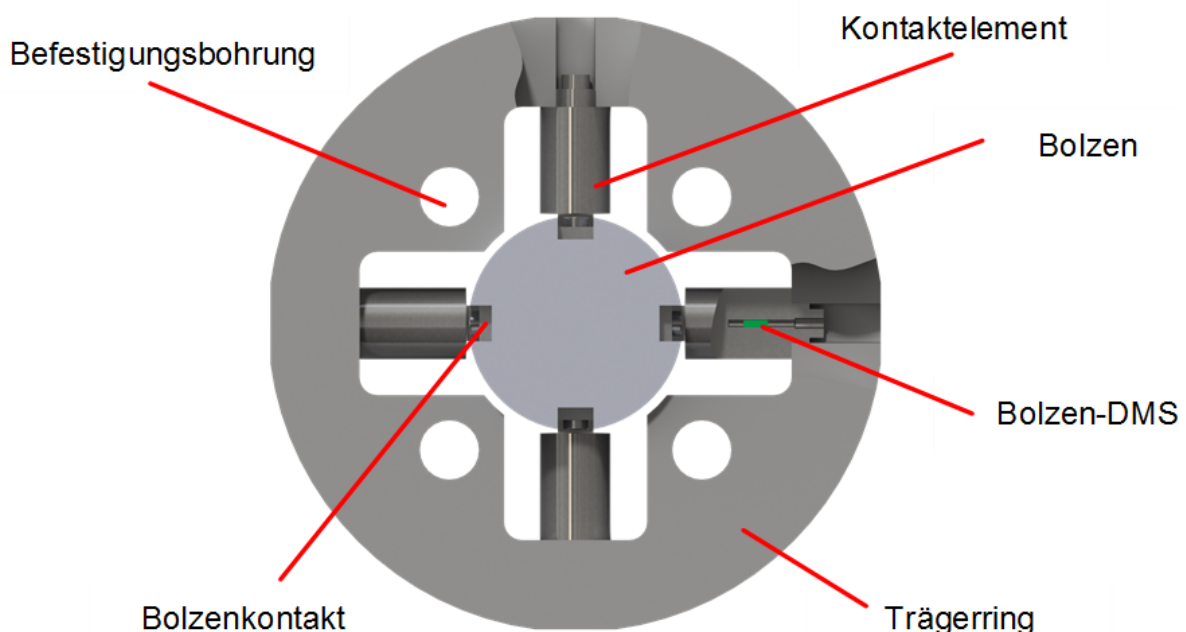
### Schwachstellen vom Konzept 2

- Bei einer Kräfteinleitung zwischen zwei Kraftaufnehmer ist eine Beeinflussung der einzelnen Kraftaufnehmer über den Trägerring vorhanden. Zusätzlich konnte bei der Auswertung der Ergebnisse festgestellt werden, dass sich das Gewinde der Dehnschraube nach der Belastung setzt. Dies führt zu einer Nullpunktverschiebung
- Durchmesser-Längenverhältnis der einzelnen Kraftaufnehmer muss korrigiert werden. Damit können Störeinflüsse aufgrund einer fehlerhaften Kräfteinleitung reduziert werden. Ein Durchmesser-Längenverhältnis von 2/3 ist optimal

### Änderungen vom Konzept 3

- Messung der Kraft erfolgt in der neutralen Biegeachse des Kraftaufnehmers
- Durchmesser-Längenverhältnis des Kraftaufnehmers von 2/3 wurde gewählt

Der Aufbau der aktuellen und letzten Entwicklungsstufe wird im nachfolgenden **Bild 22** dargestellt. An den Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Kontaktelementen und den Bolzenkontakten sind die Oberflächen randschichtgehärtet. Der Trägerring wird in diesem Versuch mit vier Befestigungsbohrungen über einen Adapterring (nicht im Bild enthalten) an dem Aufnahme ring des Kalibrierprüfstands (siehe **Bild 23**) befestigt.



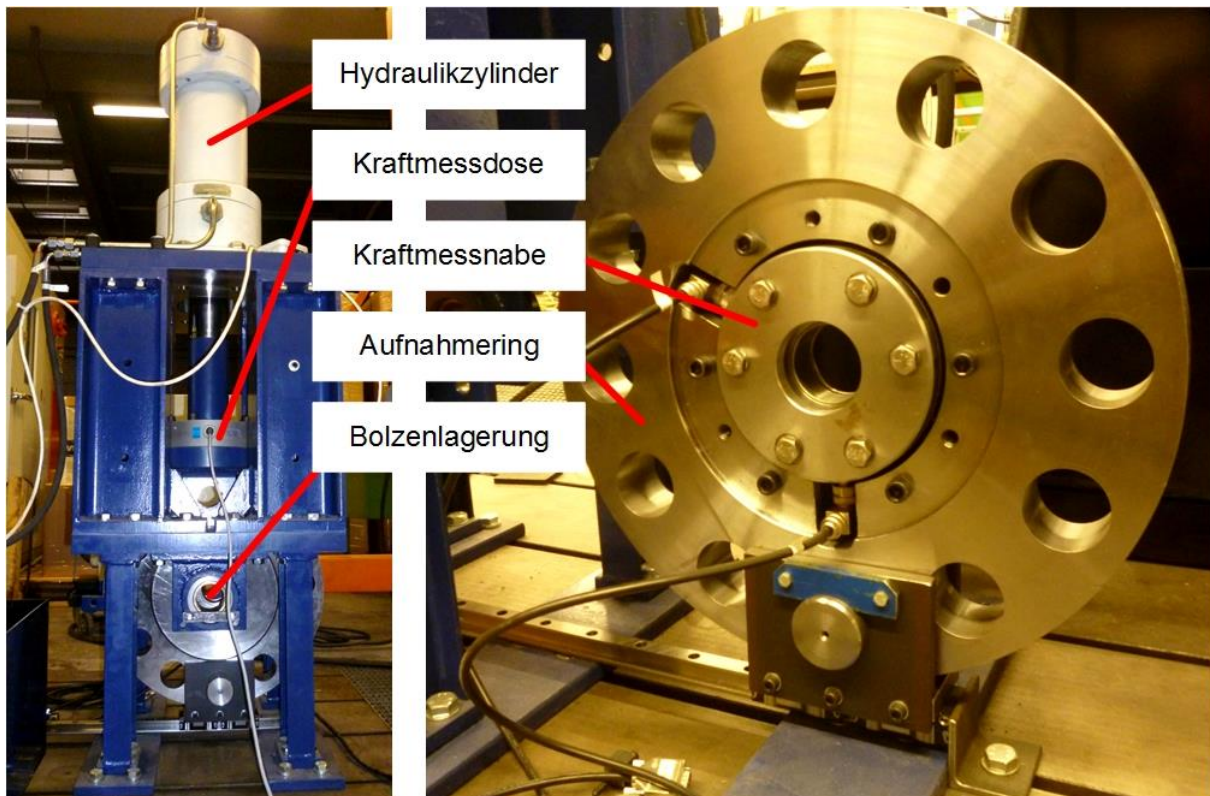
**Bild 22:** Dritte Entwicklungsstufe der Kraftmessnabe

Dieser Aufnahme ring kann mit unterschiedlichen Richtungen belastet werden, womit gezielt Kräfte über den Bolzen und den Bolzenkontakt in die einzelnen Kontaktelemente eingeleitet werden. Die Bestrebung mit der hier vorgestellten Entwicklung besteht darin, dass die Kontaktelemente lediglich Druckkräfte erfahren. Dies soll durch die mechanische Trennung des Bolzens erreicht werden. Damit sollen letztlich Radialkräfte der Messnabe aus den einzelnen Druckkräften der Kontaktelemente ermittelt werden. Die Druckkräfte werden über einen zy-



linderförmigen Dehnungsmessstreifen (Bolzen-DMS [ZSE01]) in der neutralen Fase der Kontaktelemente erfasst.

Für die Entwicklung und Konstruktion der Kraftmesseinrichtung wurde ein Kalibrierprüfstand entwickelt. Dabei können reproduzierbare Kräfte mit verschiedenen Krafteinleitungswinkeln hydraulisch in die Messnabe eingeleitet werden (**Bild 23**).

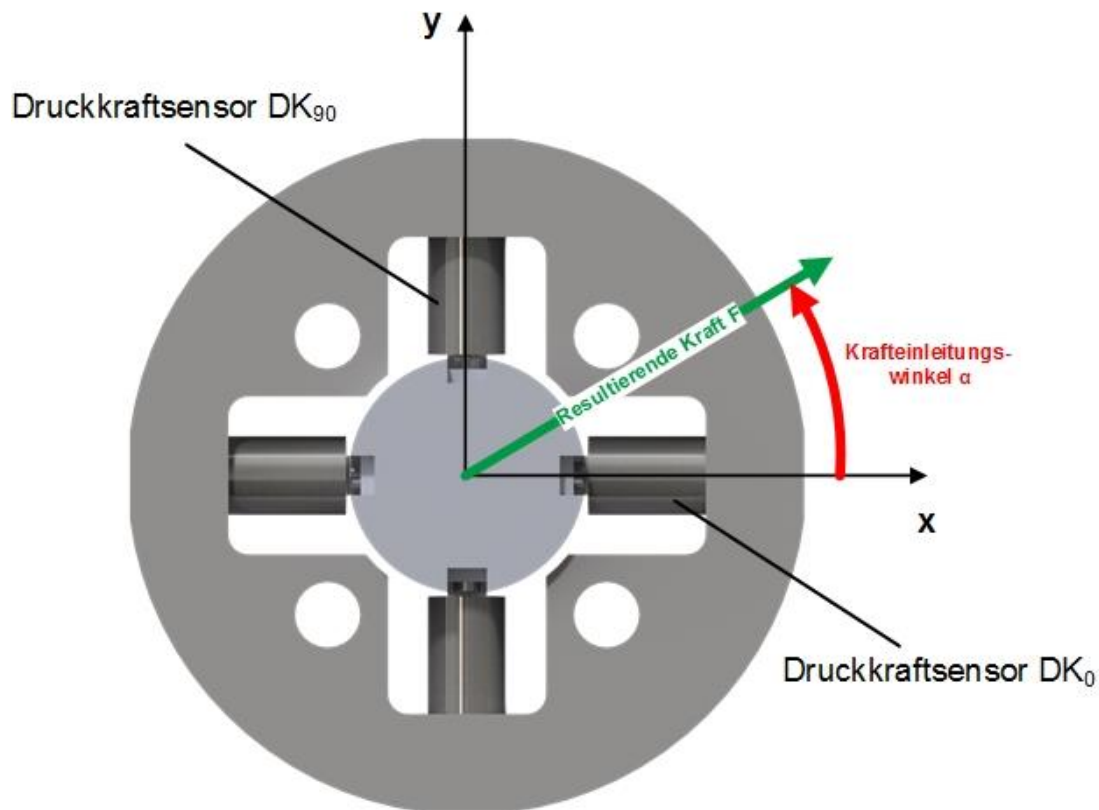


**Bild 23:** Kalibrierprüfstand für die Dreikomponenten-Kraftmessnabe

Die drei entwickelten Konzepte der Kraftmessnaben wurden zur Kalibrierung im Aufnahmering verschraubt. Die Aufnahme wurde so konzipiert, dass die Kraftmessnabe anschließend an den Werkzeugwechsler geschraubt werden kann. Um eine symmetrische Krafteinleitung zu garantieren wird ein Deckel vor die Messnabe mit dem Aufnahmering geschraubt (in **Bild 23** nicht abgebildet). Die Einheit aus Aufnahmering und Messnabe wird anschließend in das Gestell des Prüfstands geschoben und dort über einen Bolzen gelagert. Die Bolzenlagerung ermöglicht ein Verdrehen der Messnabe, wodurch verschiedene Krafteinleitungswinkel realisiert werden können, ohne die Messnabe erneut in einer anderen Position verschrauben zu müssen. Nachdem die Messnabe gelagert wurde, kann der Aufnahmering über einen weiteren Bolzen mit der Zylinderstange verbunden werden. Hierzu ist ein Gabelkopf vorgesehen, der über eine Kraftmessdose mit der Zylinderstange verschraubt ist. So kann über den Hydraulikzylinder eine Zugkraft von bis zu 185 kN auf die Kraftmessnabe übertragen werden. Da der Zylinder eine Zugkraft von bis zu 250 kN aufbringen kann, wird der hydraulische Druck im Zylinder mit einem Druckbegrenzungsventil geregelt, damit unterschiedliche Kräfte konstant in die Messnabe eingeleitet werden können. Mit der Kraftmessdose wird die eingeleitete Kraft gemessen. Mit den 12 Bohrungen im Aufnahmering ist eine Krafteinleitung in 30°-Schritten möglich. Der Vorgang der Kalibrierung ist an die Norm DIN EN ISO 376 [ISO376] angelehnt. Darin wird beschrieben, wie Kraftmessgeräte mit einachsiger Beanspruchung

kalibriert werden. Im nachfolgenden werden die Kalibrierergebnisse des dritten und letzten Messkonzepts dargestellt.

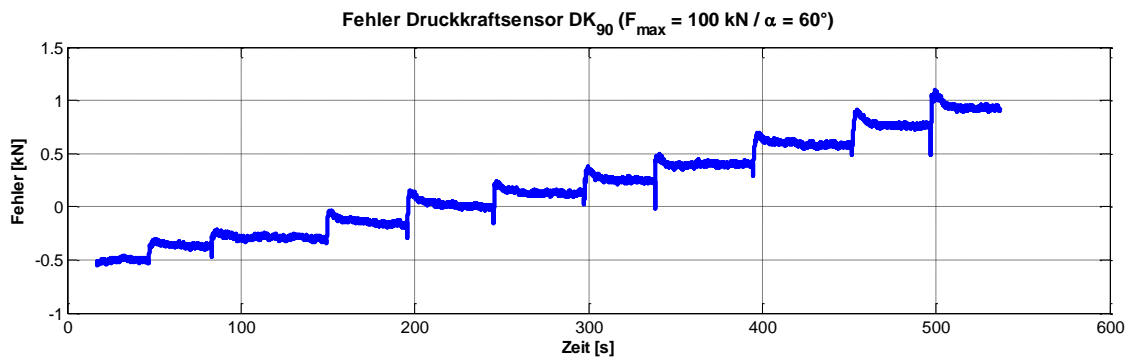
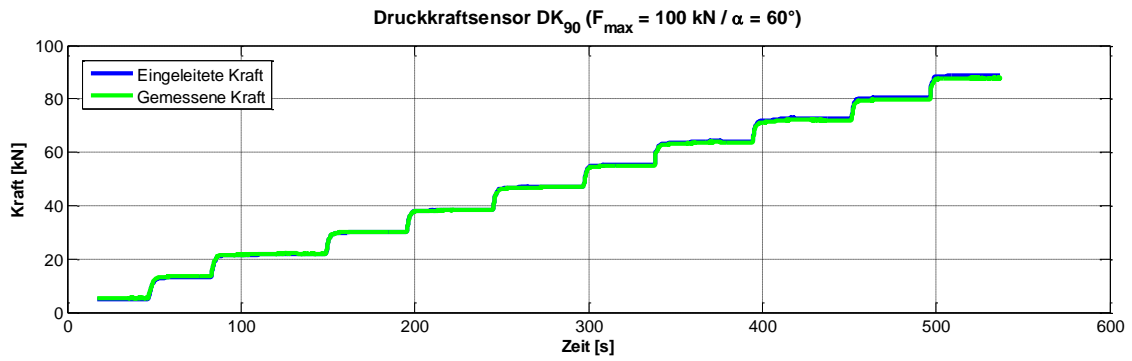
Zunächst wurden die einzelnen Druckkraftsensoren (Kontaktelemente) mit einer stufenförmigen resultierenden Kraft  $F$  beaufschlagt. Damit können die einzelnen Druckkraftsensoren kalibriert werden. Daraufhin kann die Eignungsprüfung der Messnabe erfolgen, indem die Kraft zwischen zwei Druckkraftsensoren mit unterschiedlichen Krafteinleitungswinkeln  $\alpha$  eingeleitet wird (siehe hierzu **Bild 24**).



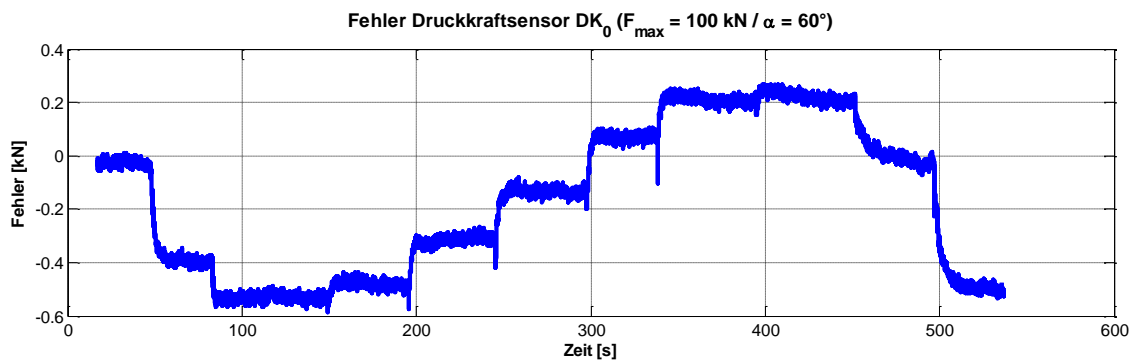
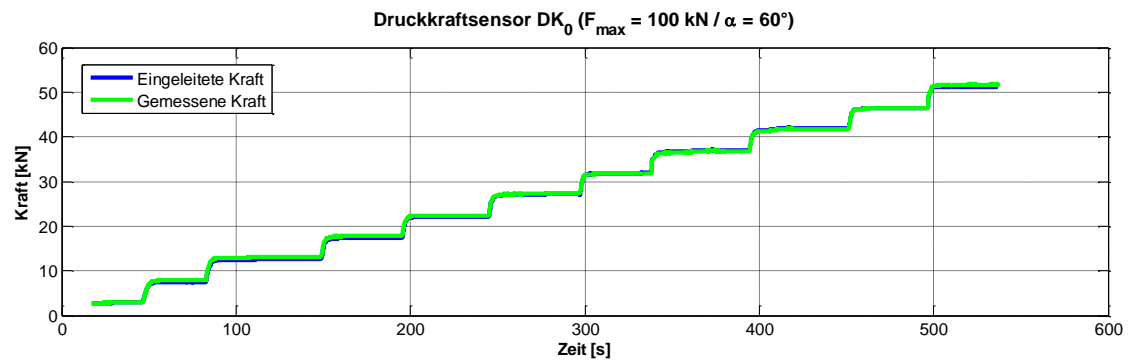
**Bild 24:** Krafteinleitung in die Messnabe

In den beiden nachfolgenden Bildern ist exemplarisch das Ergebnis aus der Eignungsprüfung der entwickelten Kraftmessnaben dargestellt. Im oberen Teil der Ergebnisse ist die tatsächlich eingeleitete Kraft (blau) und die gemessene Kraft mit der entwickelten Kraftmessdose (grün) bei einer Krafteinleitung von  $60^\circ$  in den jeweiligen Druckkraftsensor dargestellt. Im unteren Teil werden die relativen Fehler dargestellt. Dabei tritt ein maximaler Fehler von 1kN bei einem maximalen Kraftmessbereich von 100kN auf. Die Maximalkraft wurde bei der Entwicklung des Prototyps verringert. Die Konstruktion wurde jedoch auf den Maximalbetrag ausgelegt. Somit ergibt sich mit dem aktuellen Stand bei der Entwicklung der Messnabe für einen Werkzeugwechsler ein relativer Fehler von 1% bei einer Bolzenlagerung. Dieses Ergebnis ist mit der Betrachtung des aktuellen Stands der Technik bei der Messung von mehrdimensionalen Bolzenkräften als hoch innovativ anzusehen.

Um die gesamten Prozesslasten auf den Werkzeugwechsler ermitteln zu können sind vier dieser Messnaben erforderlich. Diese dienen gleichzeitig als Bolzenlagerung im Werkzeugwechsler.



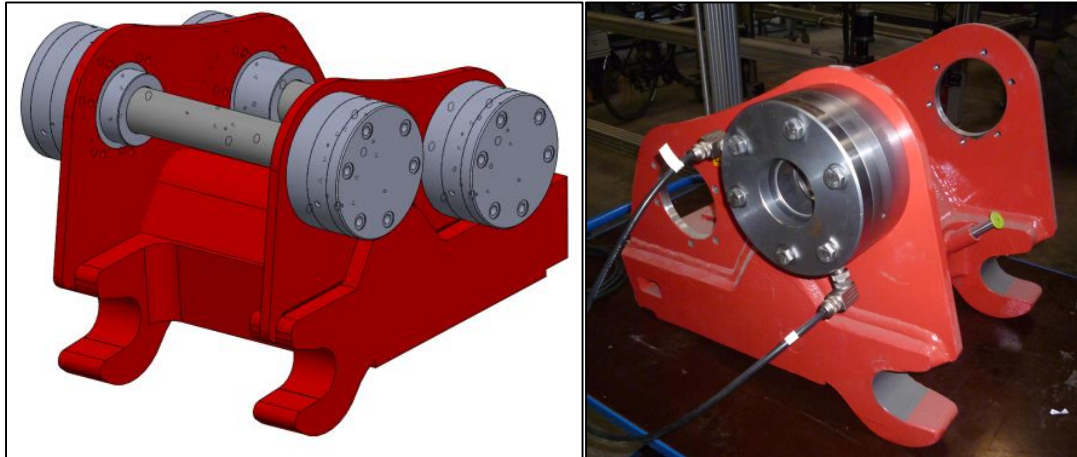
**Bild 25:** Messung der Kraft am Druckkraftsensoren DK<sub>90</sub> bei einer Kräfteinleitung von 60°



**Bild 26:** Messung der Kraft am Druckkraftsensoren DK<sub>0</sub> bei einer Kräfteinleitung von 60°



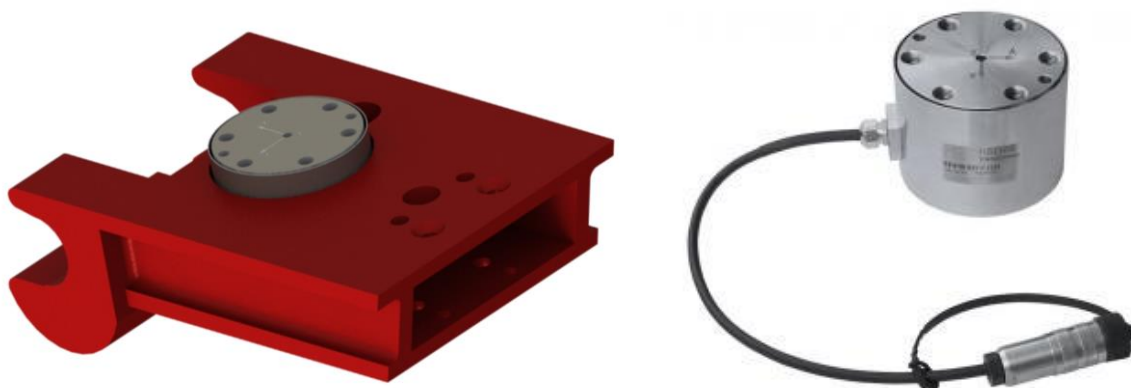
Die einzelnen Kraftmessnaben sind für den Anbau in den vier Bolzenlagerstellen am Werkzeugwechsler vorgesehen. Da aufgrund der Größe der Messeinheiten ein Anbau am bestehenden Werkzeugwechselsystem nicht möglich ist, wurde für den Demonstrator ein passender Werkzeugwechsler auf Basis des bestehenden Werkzeugwechselsystems konstruiert und gebaut (**Bild 27**).



**Bild 27:** Werkzeugwechselsystem mit integrierter Kraftmessung (Demonstrator)

#### Kraftmesseinrichtung am Baggerprüfstand

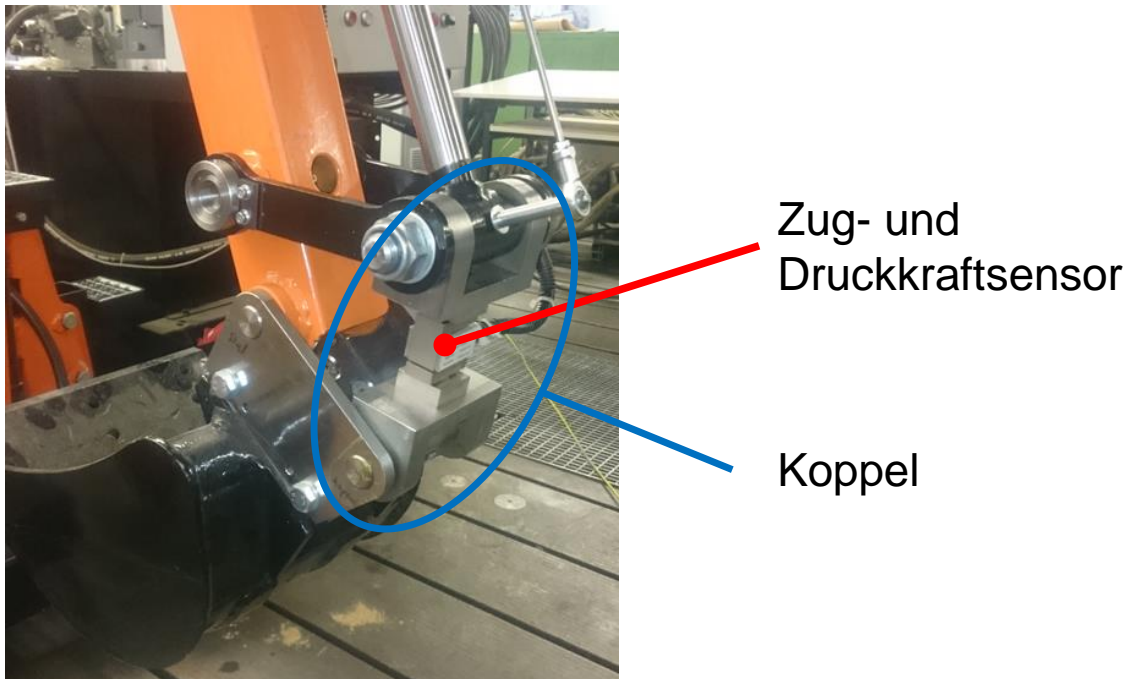
Angesichts der geringen Maschinengröße des Baggerprüfstands kann bei der Ermittlung der Arbeitsbelastungen am Werkzeugwechsler auf einem Standard-Kraftsensor zurückgegriffen werden (**Bild 28** rechts). Mit diesem Sensor können die Kräfte sowie die Momente um alle drei Raumachsen gemessen werden. Auf Grund der geringen Baugröße konnte dieser in den verwendeten Werkzeugwechsler integriert werden (**Bild 28** links). Somit stehen zwischen dem Werkzeugwechsler und dem Baggerausleger die Kräfte sowie Momente aus den Arbeitsbelastungen zur Verfügung.



**Bild 28:** Integration eines Mehrachsen-Sensors in die Werkzeugwechseleinrichtung

Für die Entwicklung eines Assistenzsystems ist diese aufwendige Belastungsermittlung nicht immer erforderlich. Daher wurde für die Optimierung einzelner Arbeitsfunktionen an dieser Stelle ein neuer Ansatz angestrebt, bei dem indirekt die Belastung auf das Arbeitswerkzeug erfasst wird. Mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes wird daraufhin eine belastungsproportionale Größe ermittelt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die mechanische Struktur, in

der die Kraftmesseinrichtung integriert wird, lediglich Zug- und Druckkräfte aufnehmen können.

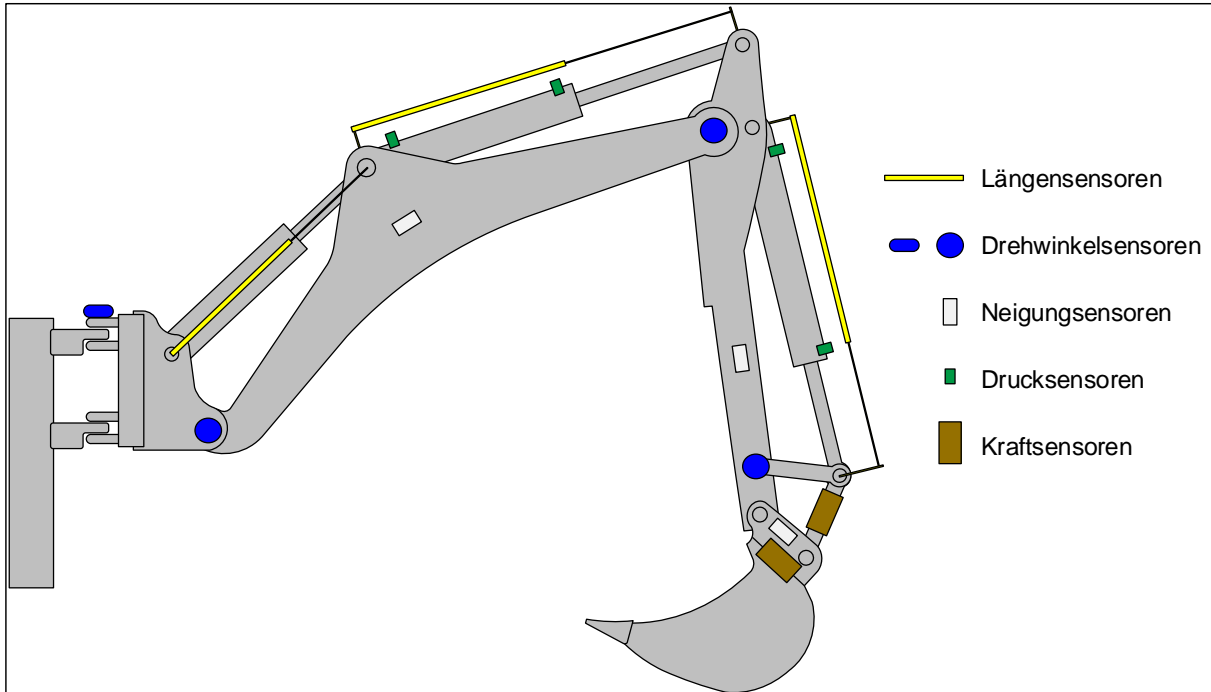


**Bild 29:** Integration einer Zug-/ Druckkraftmessung in die Koppel

Als geeignete Struktur hat sich dabei die Koppel am Baggerparallelogramm ergeben. Diese wird lediglich mit der genannten Belastungsrichtung beaufschlagt. Mit der Messung der Koppelkraft lässt sich das Moment, welches um den Aufnahmebolzen des Löffels erzeugt wird, als belastungsproportionale Größe messen. Wie diese Belastungsgröße für die Entwicklung eines Assistenzsystems verwendet wird, ist Bestandteil des Arbeitspakets 8.

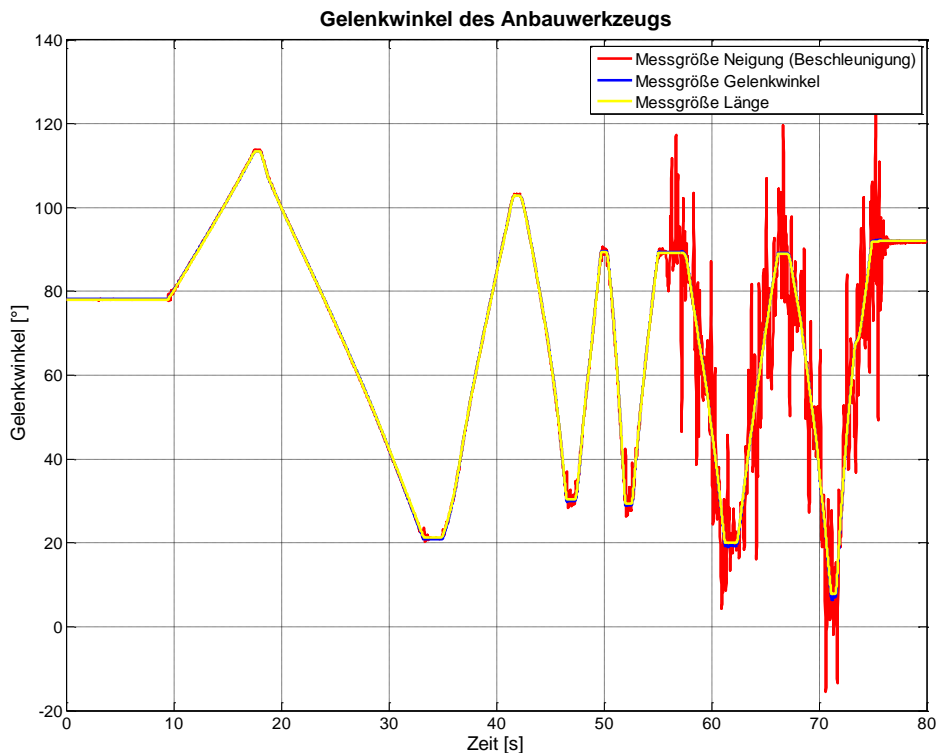
### 2.1.7 Endwicklung einer optimalen Messeinrichtung zur Positionsbestimmung

Messeinrichtungen zur Erfassung der Position eines Baggerauslegers gehören heute zum Stand der Technik. Zudem sind auf dem Markt die unterschiedlichsten Techniken zur Erfassung von relativen Positionsänderungen vorhanden. Zur Erfassung der instationären Bewegungszustände eines Hydraulikbaggers werden drei unterschiedliche Arten von Bewegungsgrößen mit verschiedenen Messprinzipien am Baggerprüfstand unter Laborbedingungen getestet (siehe hierzu **Bild 30**). Die dargestellte Sensorik zur Messung der Zylinderlängen dient lediglich zur Verifizierung der Sensorik des Drehwinkels an den Gelenken sowie den Neigungssensoren an den verschiedenen Auslegersegmenten. Ist eine Integration der Längensensoren im Zylinder nicht möglich, ist diese Messprinzip nicht für den realen Einsatz geeignet. Um das am besten geeignete Messsystem für diese Themenstellung zu bestimmen, sind Vergleichsversuche durchgeführt worden.



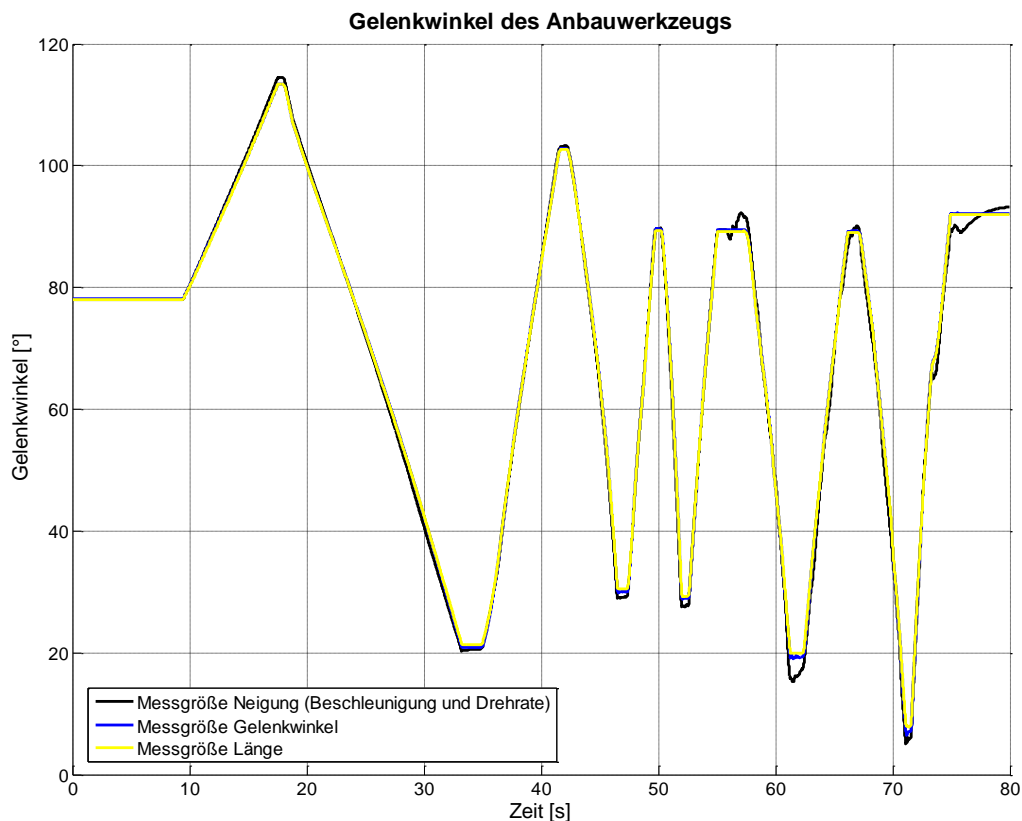
**Bild 30:** Eingesetzte Messtechnik am Baggerprüfstand zur Erfassung der Prozessgrößen

Im **Bild 31** sind die Messgrößen der Neigungs-, Winkel- und Längsensoren nach Einsatz eines Savitzky-Golay-Filters zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Signale zu Beginn bei langsamen Bewegungen des Auslegers gleichmäßig einem Bewegungsverlauf folgen. Im hinterlegten Bereich, der das Auftreten von Störeinflüssen beziehungsweise schnellen Bewegungen markiert, sind jedoch extreme Messschwankungen bei der Neigungsmessung zu erkennen, die selbst nach Einsatz eines Savitzky-Golay-Filters bestehen bleiben.



**Bild 31:** Vergleich der Messgrößen bei einer Löffelbewegung

Bei den hier verwendeten Neigungssensoren werden die Messsignale von zwei orthogonal zueinander angeordneten Beschleunigungssensoren ausgewertet und mit einem einfachen Tiefpass innerhalb des Sensors gefiltert. Damit können dynamische Bewegungen eines Baggerauslegers allerdings nicht zielführend ermittelt werden. Vor allem sind hiermit keine zeitlichen Ableitungen der Messgrößen zu ermitteln. Daraufhin wurden Neigungssensoren ausgewählt, die zur Signalverarbeitung Beschleunigungsgrößen sowie die Drehrate hinzuziehen. Über eine geeignete Sensordatenfusion wird daraufhin der Neigungswinkel ermittelt. Im nachfolgenden **Bild 32** sind deutliche Verbesserungen gegenüber einer herkömmlichen Neigungsmessung zu erkennen.

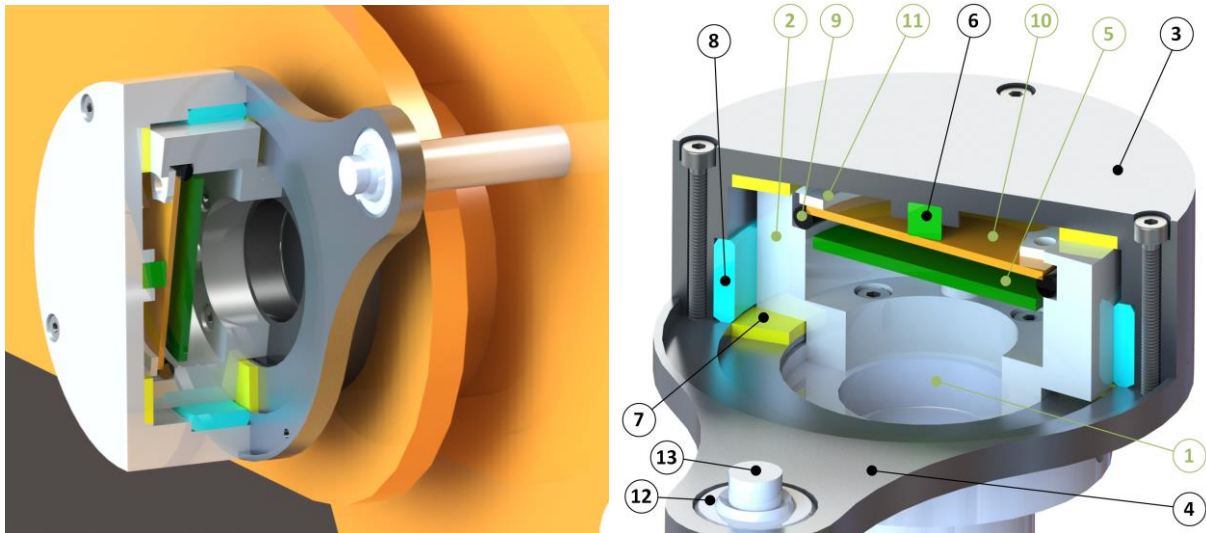


**Bild 32:** Vergleich der Messgrößen bei einer Löffelbewegung mit optimierten Neigungssensoren

Aus den gezeigten Messergebnissen wird deutlich, dass mit den Winkel- und Längensensoren Signale mit hoher Genauigkeit aufgezeichnet werden können. Wird bei der Bestimmung der Neigungen jedoch eine geeignete Sensordatenfusion durchgeführt kann die Auslegerbewegung hinreichend genau ermittelt werden. Allerdings ist eine Messung der Zylinderlängen oder eine direkte Messung der Gelenkwinkel zur Bestimmung der Auslegerbewegungen am besten geeignet.

Da eine Längenmessung nachträglich nicht sinnvoll an einen Zylinder adaptiert werden kann und demzufolge nicht nachrüstbar ist, wird innerhalb des Forschungsvorhabens die Winkelmessung weiterverfolgt. Eine Längenmessung der Zylinder bei Hydraulikbagger ist bereits Stand der Technik. Allerdings rüsten hauptsächlich Maschinenhersteller ihre Maschinen von Beginn an mit dieser Sensorik aus. Grundsätzlich ist eine in die Zylinder integrierte Wegmessung optimal. Zur Messung der Auslegerbewegung wurde für den geplanten Baggerprüfstand ein spezielles Gehäuse für die Messung der Drehbewegung eines Baggergelenks entwickelt. Der entwickelte Sensor besticht durch den relativ günstigen Herstellungspreis, die

Robustheit, die kompakte Bauweise sowie der Möglichkeit einer Nachrüstung an jeglichen Baggertyp. Die nachfolgenden Darstellungen im **Bild 33** zeigen den Einbaufall am Baggerprüfstand (links) sowie den mechanischen Aufbau des neu entwickelten Sensors im Halbschnitt (rechts). Die grüngefärbten Positionsnummern weisen auf die im Bewegungsablauf starren Elemente. Der Drehwinkelsensor setzt sich aus dem Gelenkbolzen **(1)**, der den Formschluss zwischen den Gelenkskomponenten, beispielsweise Ausleger und Stiel, darstellt, dem Sensorchipsatz, der aus Sensorplatine **(5)** und Permanentmagnet **(6)** besteht und dem Sensorgehäuse zusammen.



**Bild 33:** Einbaufall und Aufbau des Gelenkwinkelsensors

Das Sensorgehäuse besteht wiederum aus drei zueinander drehbar gelagerten Gehäuseelementen, dem Platinenaufnehmer **(2)**, dem Magnetaufnehmer **(3)** und dem Gehäusedeckel **(4)**, der mit dem Magnetaufnehmer verschraubt ist und gleichzeitig das Mitnehmerelement darstellt. Die Rotation dieser Elemente wird über die Gleitlagerelemente, Anlaufscheiben **(6)** und Gleitlagerbuchse **(7)**, gewährleistet. Der Platinenaufnehmer ist mit dem Gelenkbolzen verschraubt und ist als starres Bauteil das Führungselement für Magnetaufnehmer und Gehäusedeckel.

Die Nick- und Wankbewegungen wie auch die Rotation des Oberwagens werden innerhalb des Projekts mit Hilfe eines inertialen Messsystems (IMU) mit Kalman-Filter bestimmt. Diese Messplattform kann an jegliche Stelle des Oberwagens platziert werden, womit eine optimale Nachrüstbarkeit gegeben ist. Messsysteme zur Rotationsmessung, die direkt am Zahnkranz des Baggers adaptiert werden müssen, sind nicht möglich. Hydraulikbagger verfügen durchgängig innenliegende Zahnkränze, die abgekapselt sind. Ein weiterer Vorteil der IMU ist die Möglichkeit, dass eine GPS-Ortung integriert werden kann. Zudem sind diese System robust und werden derzeit bereits in mobilen Arbeitsmaschinen eingesetzt und sind somit für den rauen Baustelleinsatz geeignet.

### 2.1.8 Entwicklung der Assistenzfunktionen für den Hydraulikbagger

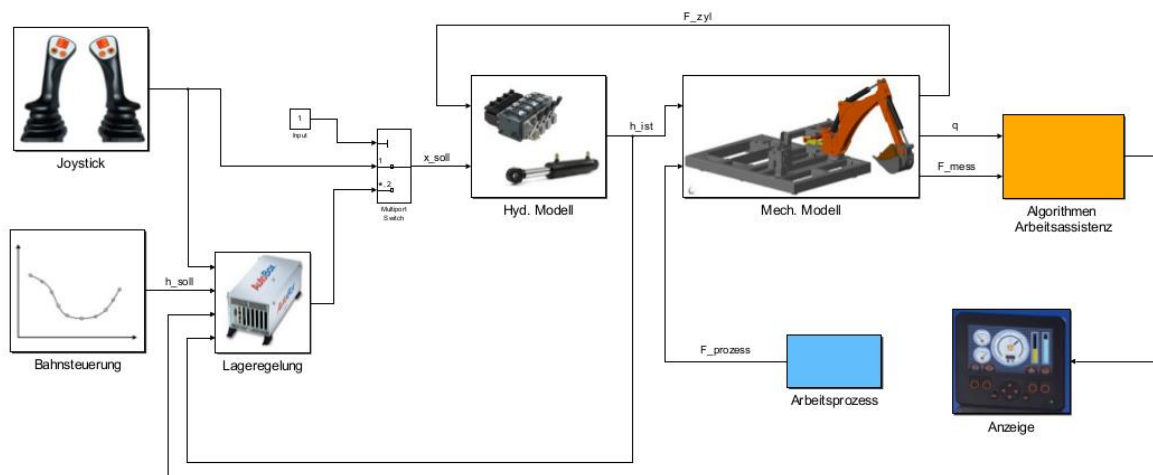
Die in diesem Vorhaben entwickelten Assistenzfunktionen greifen zum großen Teil auf einen modellbasierten Ansatz zurück. Dabei wird zwischen folgenden Anwendungen eines modellbasierten Ansatzes unterschieden:

- Algorithmen der Assistenzfunktion basieren auf einem mathematischen Modell



- Messgrößen werden mit Hilfe von mathematischen Modellen verarbeitet
- Modellparameter oder Messgrößen werden mit Hilfe von mathematischen Modellen abgeschätzt

Für die Entwicklung der unterschiedlichen modellbasierten Ansätze wurde das im Arbeitspaket 3 entwickelte Simulationsmodell des Baggerprüfstands (siehe hierzu **Bild 6**) erweitert. Das in dem genannten Arbeitspaket entwickelte mechanische sowie hydraulische Ersatzmodell ist in der erweiterten Simulationsumgebung (**Bild 34**) in der Mitte zu erkennen. Zusätzlich wurde in der virtuellen Umgebung die Bewegungsvorgabe durch eine manuelle Eingabe oder durch eine automatisierte Bahnsteuerung mit einer Lagerregelung der Zylinder implementiert. Damit können zum einen reproduzierbare Rahmenbedingungen zur Untersuchung des Arbeitsprozesses geschaffen werden und zum anderen wird dadurch eine Automatisierung einzelner Arbeitsbewegungen möglich. Des Weiteren sind in der virtuellen Simulationsumgebung die unterschiedlichen Algorithmen für die möglichen Arbeitsassistenzsysteme implementiert. Mit diesem Simulationsmodell und dem vorhandenen Baggerprüfstand kann somit der gesamte mechatronische Entwicklungskreislauf für neue Assistenzsysteme eines Hydraulikbaggers durchlaufen werden.



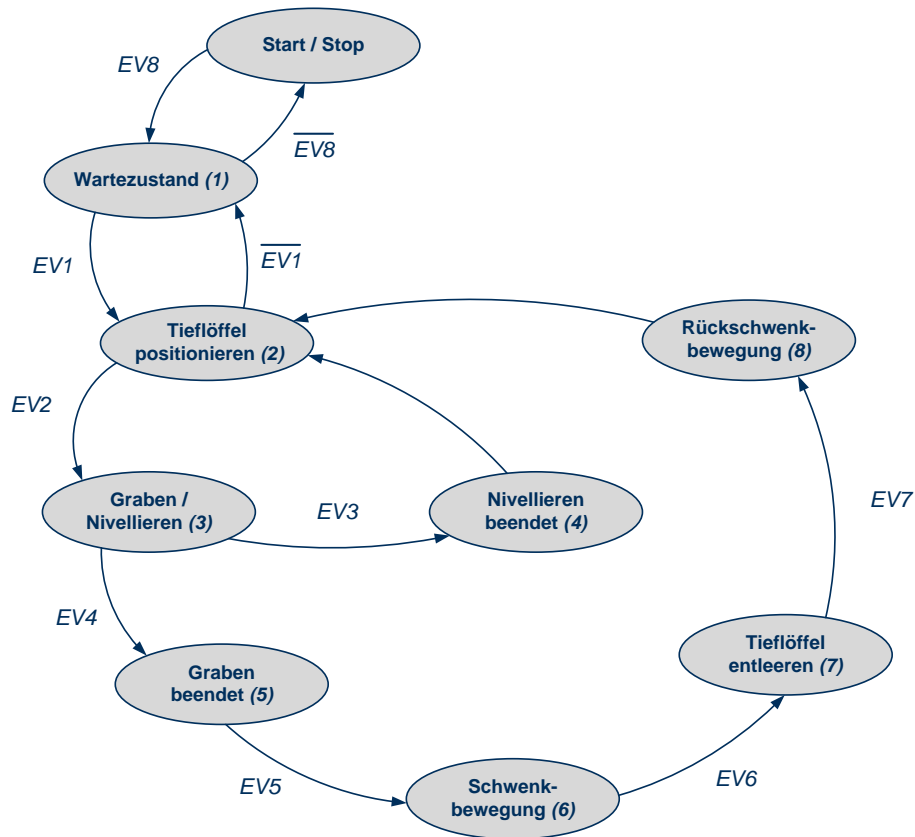
**Bild 34:** Virtuelle Simulationsumgebung zur Analyse des Systemverhaltens eines Hydraulikbaggers

Im Folgenden wird die Herleitung der entwickelten Assistenzfunktionen eines Hydraulikbaggers für den Tieflöffel und den Anbauverdichter dargestellt.

### 2.1.8.1 Assistenzfunktionen für den Einsatz eines Tieflöffels

Die Voruntersuchungen zum Arbeitsprozess eines Tieflöffels zeigten, dass dieser meist ein zyklischer Vorgang besitzt. Ein Arbeitsspiel setzt sich jeweils aus dem Graben, dem Heben und Schwenken, dem Entleeren sowie dem Rückschwenken und Senken zusammen. Jeder dieser Vorgänge hat dabei eine charakteristische Kräftewirkung auf das Werkzeug. Das gesamte Arbeitsspiel kann in zwei Hauptvorgänge zusammengefasst werden, dem Lösen und dem Laden des Materials. Beim Lösen des Materials wird der Festverbund des Erdstoffs getrennt und gleichzeitig erfolgt ein Befüllen des Löffels. Diesen Vorgang mathematisch zu beschreiben ist sehr komplex, daher soll das Lösen und Befüllen im Weiteren immer zu-

sammen aufgeführt werden. Man kann diesen kombinierten Vorgang auch als Graben und Nivellieren bezeichnen. Auf das Graben folgt immer das Laden des Materials. Daher kann ein Zustandsmodell erstellt werden. Im **Bild 35** wird das entwickelte Zustandsmodell eines Arbeitsspiels (Zustände als graue Blasen dargestellt) für den Tieflöffeleinsatz aufgezeigt.



**Bild 35:** Zustandsautomat für den Erdaushub mit einem Hydraulikbagger

Beim Auftreten eines bestimmten Ereignisses *EV* erfolgt ein Zustandsübergang nach dem vorgegebenen Pfad. Dieses Ereignis kann durch eine gewisse Bewegung, durch eine bestimmte Position des Baggerauslegers oder durch eine charakteristische Kraft hervorgerufen werden. Wird durch dieses Ereignis ein neuer Zustand erreicht, kann dieser Zustand nur durch ein bestimmtes Ereignis wieder verlassen werden. Man spricht daher auch von einem Zustandsautomaten.

Grund für die Entwicklung dieses Zustandsautomaten ist, dass für die verschiedenen Arbeitsfunktionen die Berechnungsgrößen nur ermittelt werden, wenn diese auch notwendig sind. Zum Beispiel soll die Grabkraft nur ermittelt werden, wenn der Zustand Graben und Nivellieren vorhanden ist. Beim Ladezustand treten keine Grabkräfte auf und müssen somit auch nicht berechnet werden. Die beschriebenen Assistenzfunktionen können teilweise auch überlagert auftreten, wobei mit der Zustandserkennung der Baggerbewegung immer eine eindeutige Zuweisung möglich ist. Mit dieser Zuweisung lässt sich der Arbeitsprozess des Tieflöffels in folgende Einzelfunktionen untergliedern:

- Assistenzfunktion zur Überwachung und Optimierung des Arbeitsprozesses
- Kontinuierliche Regelung der Tieflöffelposition
- Optimierte Gewichtsermittlung mit Kompensation der Störgrößen

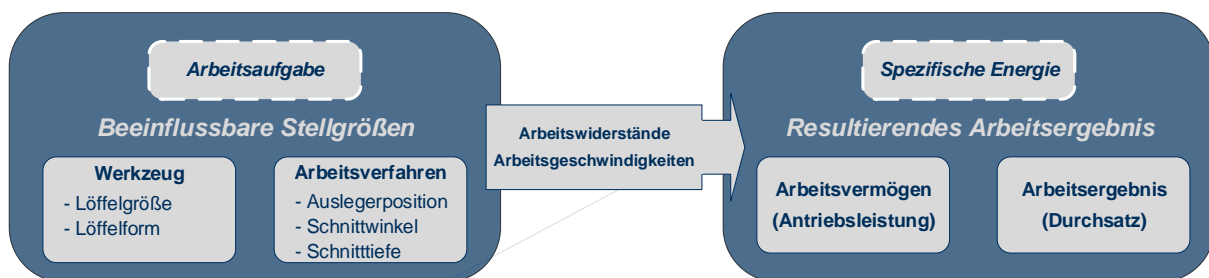


Für diese Teilfunktionen wurden die jeweiligen Assistenzfunktionen entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

### Assistenzfunktion zur Überwachung und Optimierung des Arbeitsprozesses

Generell gilt für jeden Grabprozess eines Tieflöffeleinsatzes, dass eine vorliegende Arbeitsaufgabe mit den anzutreffenden Erdstoffeigenschaften, dem möglichen Arbeitsverfahren und dem ausgewählten Werkzeug gelöst werden muss. Diese Aufgabe kann nur wirtschaftlich durchgeführt werden, wenn bei dem vorliegenden Erdreich das richtige Arbeitsverfahren und vor allem das richtige Werkzeug ausgewählt wurde. Hierfür ist nicht nur der Bediener der Arbeitsmaschinen, sondern auch der Maschinenbetreiber oder Auftraggeber verantwortlich.

Die Frage stellt sich nun, wie mit dem entwickelten Messsystem eine Aussage darüber getroffen werden kann, ob ein korrektes Arbeitswerkzeug und Arbeitsverfahren angewandt wird. Das nachfolgende **Bild 36** zeigt, mit welchen Einflussgrößen der Maschinenbediener den Erfolg der Arbeitsaufgabe bestimmen kann. Hierbei spielen die Einflussgrößen des Werkzeugs (Löffelgröße und Löffelform) ebenfalls eine Rolle, da der Bediener mithilfe der Werkzeugwechsler selbst entscheiden kann, wann er welches Werkzeug ankoppelt. Die in **Bild 36** aufgeführten bedienerabhängigen Stellgrößen führen zum resultierenden Arbeitsergebnis, wobei der Bediener vor allem die Arbeitswiderstände und die Arbeitsgeschwindigkeit subjektiv wahrnehmen kann. Je nach Erfahrung kann dies mehr oder weniger ausgeprägt auftreten. Diese Wahrnehmung ist demnach die Schnittstelle zwischen den Einflussgrößen des Maschinenbedieners und dem resultierenden Arbeitsergebnis. Als resultierendes Arbeitsergebnis sind beim Tieflöffeleinsatz vor allem das Arbeitsvermögen (die zur Verfügung stehende Leistung zum Bewältigen der Arbeitsaufgabe) und der abschließende Durchsatz an gelöstem und verladenem Material maßgeblich. Das Verhältnis aus beiden Größen kann als spezifische Energie betrachtet werden, die zum Erfüllen der Arbeitsaufgaben notwendig ist.



**Bild 36:** Einflussgrößen des Maschinenbedieners auf das Arbeitsergebnis

Zur Beschreibung der dargestellten Schnittstelle wurden mathematische Größen, wie der Schnitttiefe, der Schnittwinkel, die vorhandenen Grabkraft, der spezifische Grabwiderstand und die spezifische Grabenergie für die Überwachung des Grabprozesses entwickelt. Die genannten Größen basieren dabei immer auf die Positions- und Kraftmessung, die in diesem Forschungsvorhaben entwickelt wurde.

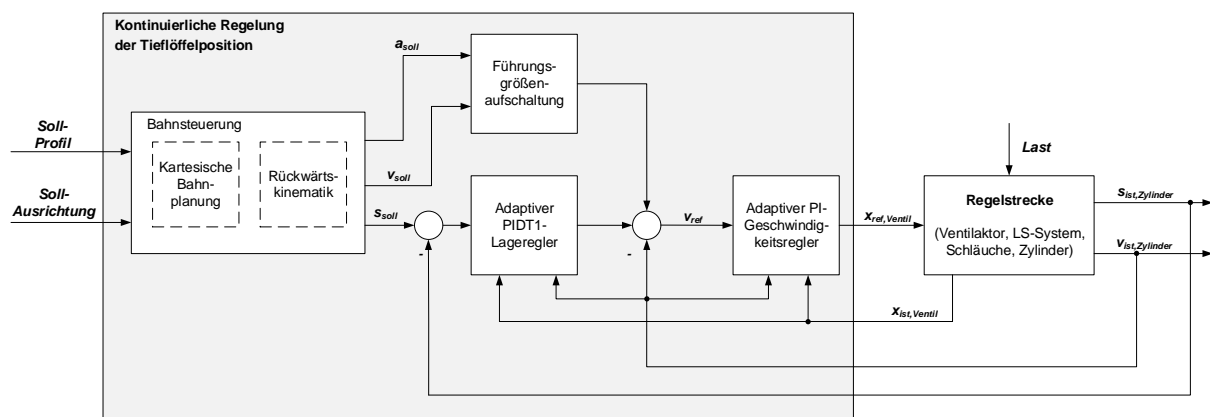
Somit stehen mit einer Messung der Grabkräfte und der Auslegerbewegung vollkommen neuartige Prozessgrößen zur Verfügung stehen. Mit der Einführung der spezifischen Gewinnungsenergie und der maximal zur Verfügung stehenden Energie eines Hydraulikbaggers zum Lösen einer bestimmten Materialmenge könnten nicht nur unterschiedliche Maschinenhersteller besser miteinander verglichen werden. Auch die Beurteilung des aktuellen Grab- und Ladeprozesses wird damit möglich. Dieser Zusammenhang wurde bis zum jetzigen Zeit-

punkt in keiner Art und Weise zur Beurteilung der Maschinenauslastung in Betracht gezogen. Hiermit kann ein Verhältnis zwischen der maximalen Maschinenleistung und einem aktuellen Arbeitsprozess ermittelt werden. Diese Betrachtungsweise stellt ebenfalls eine Innovation in diesem Projekt dar. Letztendlich wurde mit dieser Arbeit ein mathematisches Werkzeug bereitgestellt, mit dem ein Grab- und Ladeprozess in der Zukunft besser überwacht, optimiert und gesteuert werden kann. Die Umsetzung dieser Thematik wird bei der Erprobung der Assistenzfunktionen dargestellt.

### Kontinuierliche Regelung der Tieflöffelposition

Bei der Entwicklung des Baggerprüfstandes wurde festgelegt, dass dieser über eine manuelle Steuerung der Hydraulik via Joystick und über eine automatisierte Auslegerbewegung verfügen soll. Unter der automatisierten Auslegerbewegung ist letztlich eine Regelung der Löffelposition sowie der Löffelneigung zu verstehen. Demnach soll die Löffelspitze einer vorgegebenen Bahn mit einer vorgegebenen Neigung folgen.

Für die automatisierte Auslegerbewegung sind zunächst eine Bahnplanung sowie die Beschreibung der Rückwärtskinematik der vorhandenen Baggerstruktur erforderlich. Diese werden in der Bahnsteuerung vereinigt (siehe **Bild 37**). In der kartesischen Bahnplanung werden für vorgegebene Bahnsegmente die Bewegungsgrößen für eine Sollbewegung des Löffels im kartesischen Raum berechnet. Mit Hilfe der Rückwärtskinematik folgen daraus die zugehörigen Sollverläufe für die einzelnen dynamischen Zylinderbewegungen, die der Lageregelung zugeführt werden. Die Lageregelung stellt sicher, dass die tatsächlichen Zylinderwege den Sollvorgaben möglichst gut folgen. Dies wird durch eine Kaskadenregelung erreicht. Dabei ist eine Geschwindigkeitsregelung der eigentlichen Lageregelung unterlagert. Zusätzlich werden die in der Bahnsteuerung generierten Sollverläufe der Geschwindigkeit sowie Beschleunigung aufgeschaltet. Bei den entworfenen Regelungen handelt es sich zudem um einen adaptiven Regler, weshalb dieser zusätzlich den tatsächlichen Schieberweg der Proportionalventile sowie die Ist-Geschwindigkeit des Zylinders benötigt. Die Ausgangsgröße der Regelung entspricht dem gewünschten Ventilschieberweg des Proportionalventils. Die beschriebene Struktur wird im **Bild 37** dargestellt.



**Bild 37:** Struktur der entworfenen Lageregelung (exemplarisch für einen Zylinder)

Das Proportionalventil steuert wiederum den Zylinder und somit die Arbeitsbewegung des Baggers. Als Last wirkt auf den Zylinder die Kraft aus der Bewegung des Auslegers sowie Belastungen aus dem eigentlichen Arbeitsprozess. Mit den verwendeten Proportionalventilen wird jedoch diese Störung über eine interne Druckregelung im Ventil kompensiert. Damit ist

letztlich eine Lageregelung mit einer kombinierten Kraftregelung möglich. Die komplette Auslegung des Reglers und dessen Parameter erfolgten mit Hilfe des vorhandenen Simulationsmodells.

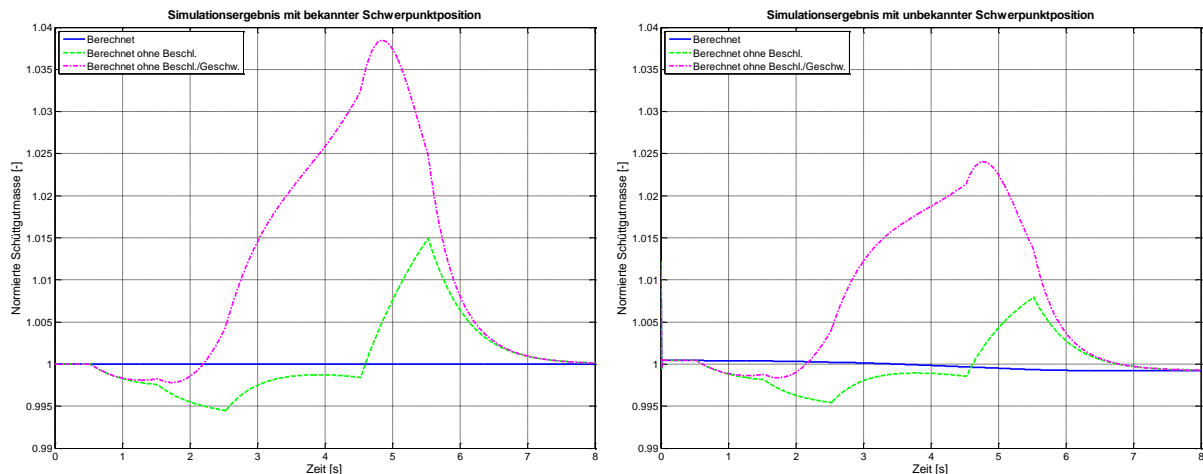
#### Optimierte Gewichtsermittlung mit Kompensation der Störgrößen

Für die Entwicklung einer modellbasierten Wiegeeinrichtung ist es notwendig, die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wiegeprozess zu ermitteln. Dazu sind folgende Störgrößen zu nennen:

- Position des Tieflöffels
- Geschwindigkeits- und Beschleunigungszustände des Auslegers
- Unbekannte Position des Erdstoffs im Tieflöffel
- Unbekanntes Massenträgheitsmoment des Erdstoffs im Tieflöffel
- Reibung in den Zylindern sowie den Auslegergelenken

Die Reibung in den Zylindern und den Gelenken sind nur mit großem Aufwand sinnvoll zu berücksichtigen und treten im realen Prozess nicht reproduzierbar auf. Durch das von uns entwickelte Konzept der Wiegeeinrichtung sind die Reibeffekte nicht in dem Maße von Nöten, wie es bei herkömmlichen Konzepten der Fall ist. Mit Hilfe eines mathematischen Modells wird unter Berücksichtigung der eben genannten Störgrößen (ohne Reibeffekte) mit einem theoretischen Gewicht die Kraft in der Koppel berechnet. Über einen Optimierungsalgorithmus wird das theoretische Gewicht variiert, bis die berechnete Koppelkraft mit der gemessenen Koppelkraft übereinstimmt. Die Messeinrichtung der Koppelkraft wurde in **Bild 29** beschrieben. Die Störgrößen werden über Modellgleichungen im Wiegealgorithmus berücksichtigt.

Die modellbasierte Wiegeeinrichtung wurde mit Hilfe des Simulationsmodells umfangreich getestet. Aus den Simulationsergebnissen ließ sich eindeutig ableiten, dass vor allem die Geschwindigkeitszustände der Baggerbewegung einen erheblichen Anteil zur Genauigkeit der Schüttgutmasse beitragen (siehe hierzu **Bild 38**). Des Weiteren wird die Ermittlung der Schüttgutmasse nicht von den Beschleunigungseffekten während der Schwenkbewegung beeinflusst. Dessen ungeachtet muss bei der Entwicklung einer Wiegeeinrichtung berücksichtigt werden, dass eine geeignete Sensorik zum Einsatz kommt, mit der man auch Geschwindigkeitszustände und bestenfalls Beschleunigungszustände der Auslegerbewegung erfassen kann. Die Simulationsergebnisse zeigen zusätzlich, dass mit dem entwickelten Ansatz zur Bestimmung der Schwerpunktposition und des Massenträgheitsmoment der Schüttgutmasse (siehe hierzu Kapitel 2.1.4) Fehler entstehen können. Für eine praxistaugliche Wiegeeinrichtung ist diese Besonderheit jedoch von essentieller Bedeutung und kann nicht vernachlässigt werden. Mit den entwickelten Ansätzen zur Berücksichtigung von variablen Schaufelfüllungen kann der Fehler allerdings erheblich eingegrenzt werden (siehe hierzu **Bild 38** rechts).



**Bild 38:** Darstellung der Einflussgrößen auf den Wiegevorgang bei einer Hubbewegung des Auslegers

### 2.1.8.2 Assistenzfunktionen für den Einsatz eines Anbauverdichters

Wie bereits bei der Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Anbauverdichters im Kapitel 2.1.4 erwähnt wurde, spielen für eine erfolgreiche Verdichtung des Erdreichs die statische Vorlast sowie die dynamische Erregerkraft eine große Rolle. Folgende Assistenzfunktionen sollen für einen Anbauverdichter in diesem Vorhaben entwickelt werden:

- Geregelte statische Auflast
- Automatisiertes Nachführen des Auslegers beim Verdichten
- Ermittlung der maximalen Verdichtbarkeit

Für die beiden ersten Funktionen ist eine Automatisierung der Auslegerbewegung zwingend erforderlich. Diese wurde bereits beim Einsatz des Tieflöffels vorgestellt und kann für den Anbauverdichter adaptiert werden. Als Belastungsgröße wird die gemessene Kraft orthogonal zur Verdichterplatte herangezogen. Mit Hilfe derer kann die Auflast begrenzt oder über ein gezieltes Nachführen konstant gehalten werden. Neben den hervorgerufenen Kräften am Werkzeugwechsler ist die Amplitude der Untermasse von großer Bedeutung, da die Eindringtiefe in den Boden einen wichtigen Einfluss auf die Tiefenwirkung des Verdichtungsprozesses hat. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Relativweg der Ober- und Untermasse des Anbauverdichters sowie der gemessene orthogonale Kraft besteht. Damit kann auf eine Messung des Relativwegs zwischen Ober- und Untermasse verzichtet werden.

Für die dynamische Verdichtungswirkung spielt die statische Auflast eine große Rolle. Allerdings wird erst durch die dynamische Anregung der Verdichterplatte das Erdreich verdichtet. Die optimale Vibrationsfrequenz für Boden mit kugeligen und gedrunenen Kornformen liegt theoretisch bei der Eigenfrequenz des Bodens. Die Resonanz des Bodens ist jedoch nicht nur von der Bodenart, sondern auch von der Lagerungsdichte, dem Wassergehalt, der Schichtdicke usw. abhängig. Wird ein Boden ausreichend verdichtet, ändert sich daraufhin die Resonanz. Dieser Effekt soll innerhalb des Forschungsvorhabens ausgenutzt werden. Hierfür wurde ein Algorithmus entwickelt, mit dem kontinuierlich das Frequenzspektrum der Kraftmesssignale ausgewertet werden kann. Somit wird eine Änderung der Resonanz er-

kennbar. Daraufhin kann ein weiteres Verdichten und damit ein Wiederauflökern des Bodens verhindert werden.

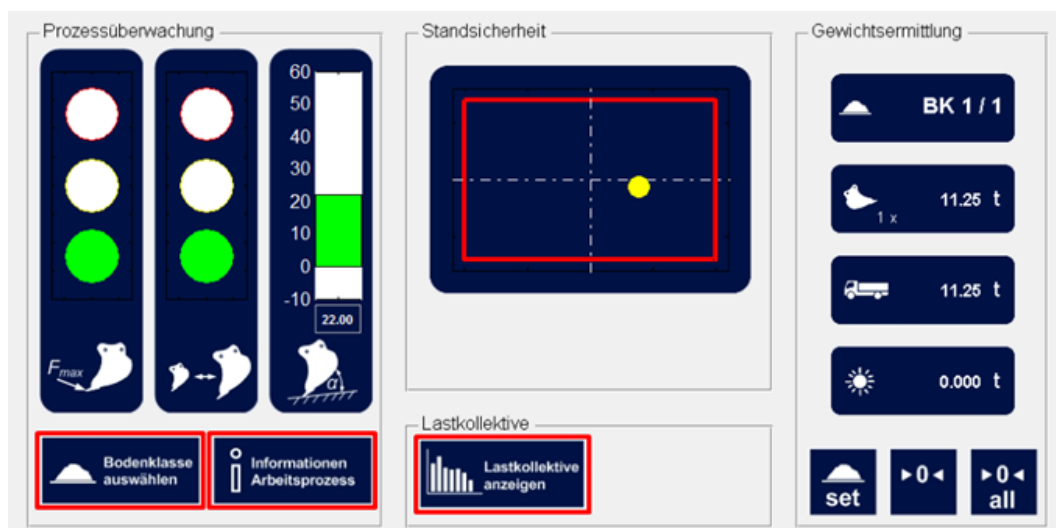
## 2.1.9 Ergebnisse aus der Erprobung des Gesamtsystems

Innerhalb des Projektes wurden unterschiedliche Arbeitsfunktionen eines Hydraulikbaggers automatisiert. Damit kann der Maschinenbediener erheblich entlastet werden, wodurch wiederum die Maschinenauslastung gesteigert wird. Die Ergebnisse werden für den Tieflöffel sowie den Anbauverdichter vorgestellt.

### 2.1.9.1 Erprobung der Assistenzfunktionen eines Tieflöffels

#### Assistenzfunktion zur Überwachung und Optimierung des Arbeitsprozesses

Die Untersuchungen eines sinnvollen und wirtschaftlichen Werkzeugeinsatzes haben in diesem Projekt gezeigt, dass bereits mit einer Positionsmessung eine Bewertung und Überwachung des Arbeitsprozesses möglich ist. Hierbei sind vor allem der Schnittwinkel, die Schnitttiefe und das gelöste Schüttgutvolumen zu nennen. Ein wichtiger Einflussfaktor für einen wirtschaftlichen Arbeitsprozess wird durch den Schnittwinkel charakterisiert. Dieser entspricht dem Winkel zwischen dem Löffelboden und dem Grabrichtungsvektor. Wird dieser Winkel während einer Grabbewegung überwacht, kann ein erhöhter Verschleiß an der Löffelrückwand vermieden werden. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass der Grabwiderstand bei einem negativen Schnittwinkel steigt und den Füllvorgang des Löffels behindert. Aus vorangegangenen Untersuchungen in [BER80] ist bekannt, dass ein positiver Schnittwinkel von etwa  $20^\circ$  den Grabprozess begünstigt. Allgemein zeigt sich bei größer werdender Schnitttiefe eine Zunahme des Schnittwinkels von Vorteil. Eine generelle Aussage aus [BER80] ist, dass durch eine Überwachung oder Steuerung des Schnittwinkels und der Schnitttiefe eine Optimierung des Grabprozesses stattfinden kann. Dadurch kann der Maschinenbediener zusätzlich entlastet werden. Als praktische Umsetzung wurde eine einfache Anzeige des Schnittwinkels und der Schnitttiefe umgesetzt (siehe gesamte Anzeige **Bild 39**). Ein direkter Steuereingriff in die Maschine ist für den Schnittwinkel und für die Schnitttiefe über die entwickelte Regelung der Tieflöffelposition möglich. Diese benötigt als Eingangsgröße die Löffelposition sowie die Löffelneigung und damit letztlich die Schnitttiefe und den Schnittwinkel.



**Bild 39:** Entwickelte Anzeige für den Tieflöffeleinsatz

Mit einer Messung der Grabkräfte am Baggerprüfstand stehen allerdings vollkommen neuartige Prozessgrößen für die Überwachung und die Optimierung des Grabprozesses zur Verfügung. Mit der Einführung der spezifischen Gewinnungsenergie und der maximal zur Verfügung stehenden Energie eines Hydraulikbaggers zum Lösen einer bestimmten Materialmenge können nicht nur unterschiedliche Maschinenhersteller besser miteinander verglichen werden. Auch die Beurteilung des aktuellen Grabprozesses wird damit möglich. Dies wurde über eine einfach Ampeldarstellung realisiert (**Bild 39** oben links und **Bild 40**).



**Bild 40:** Erläuterung der Ampeldarstellung für die Prozessüberwachung des Tieflöffels

Theoretisch betrachtet, kann die spezifische Gewinnungsenergie als die benötigte Energie zum Lösen einer bestimmten Materialmenge aus dem Festverbund interpretiert werden. Hierzu sind nach umfangreicher Recherche aktuell keinerlei verwertbaren Untersuchungen bekannt. Betrachtet man die mögliche Anzahl von Abhängigkeiten durch die unterschiedlichen Eigenschaften des Erdstoffs, der Werkzeuggestaltung und der Maschinenbedienung, dann führt die spezifische Grabenergie zu einer Vielfalt von Zuordnungsmöglichkeiten. Technische Grenzen werden dabei durch die Antriebsleistung der Arbeitsmaschine und durch die Maschinenabstützung gesetzt.

Diese Betrachtungsweise stellt ebenfalls eine Innovation in diesem Projekt dar. Letztendlich wurde mit dieser Arbeit ein mathematisches Werkzeug bereitgestellt, mit dem ein Grab- und Ladeprozess in der Zukunft besser überwacht, optimiert und gesteuert werden kann.

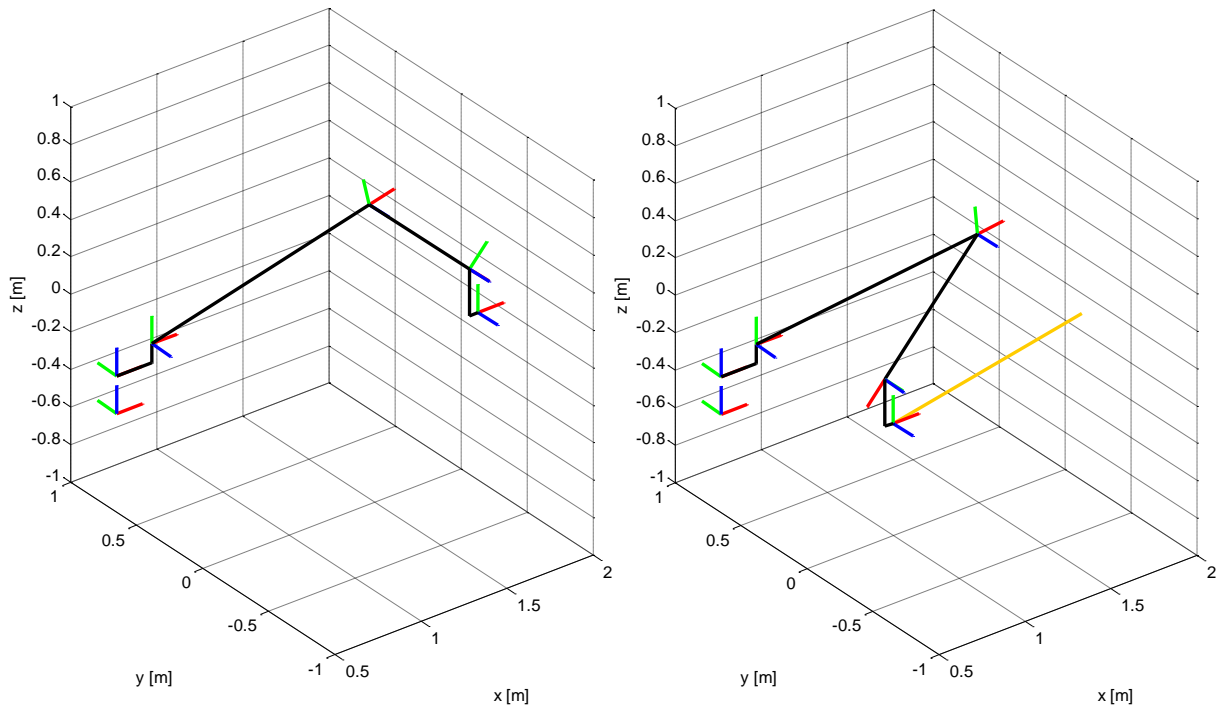
#### Kontinuierliche Regelung der Tieflöffelposition

Mit einer kontinuierlichen Regelung der Auslegerposition besteht die Möglichkeit, dass der Maschinenbediener einen gewünschten Bewegungsablauf vorgibt. Dies kann bei einer hohen Anzahl von gleichen Bewegungen nützlich sein. Aber auch bei der Untersuchung der entwickelten Assistenzfunktionen in diesem Vorhaben spielt die Lageregelung eine wichtige Rolle. Damit können reproduzierbare Bewegungsabläufe erzeugt werden, um denselben Arbeitsprozess wiederholt betrachten zu können.

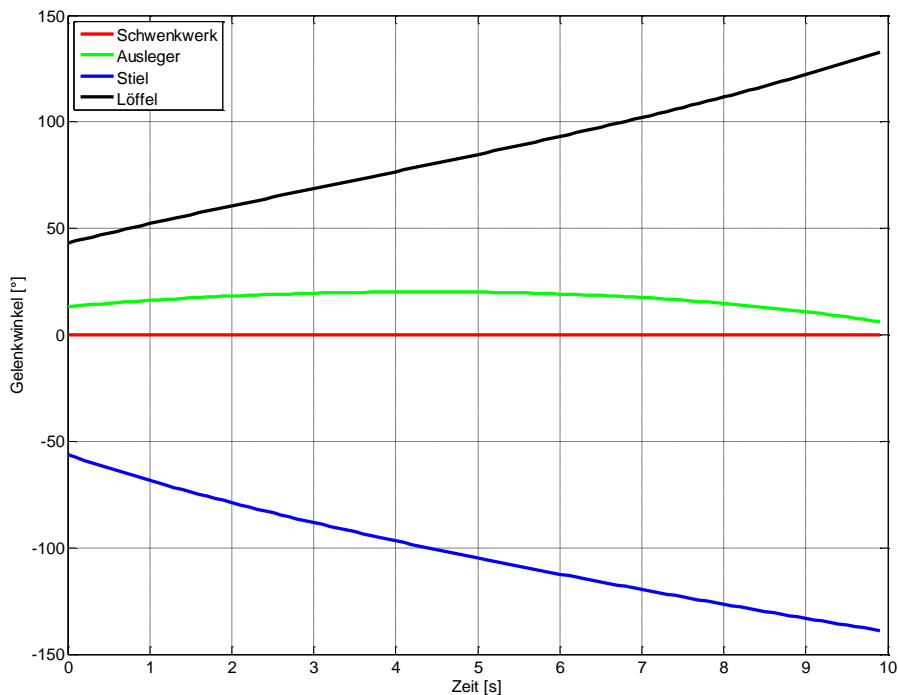
Wird ein Bewegungsablauf vorgegeben, müssen mit Hilfe der Rückwärtskinematik die erforderlichen Zylinderbewegungen ermittelt werden, die für die eigentliche Lageregelung erforderlich sind. Ein beispielhafter Bewegungsablauf entlang einer geraden Bahn mit einem konstanten Schnittwinkel ist hierzu im **Bild 41** dargestellt. Die dazu notwendigen Gelenkwinkel sind im **Bild 42** dargestellt.

Die über die Rückwärtskinematik generierten Gelenkwinkel werden über kinematische Beziehungen in die benötigten Zylinderlagen umgerechnet. Diese werden dann der Lageregelung übergeben.





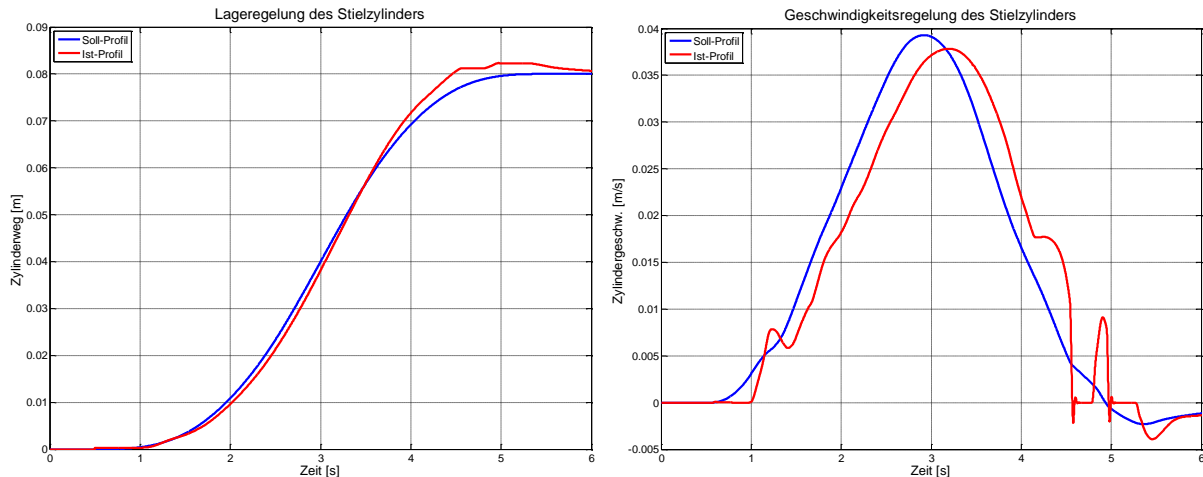
**Bild 41:** Bewegung des Baggerauslegers entlang einer Sollbahn (braun) mit konstantem Schnittwinkel, Anfangslage links, Endlage rechts



**Bild 42:** Benötigte Auslegerwinkel für die gewünschte Sollbahn

Nach der Auslegung der Reglerparameter mit Hilfe des entwickelten Simulationsmodells wurde der Regelalgorithmus auf den realen Baggerprüfstand implementiert und umfangreich getestet. Das nachfolgende **Bild 43** zeigt exemplarisch das Ergebnis der Lageregelung für den Stielzylinder.





**Bild 43:** Ergebnis aus der Erprobung der Lageregelung für den Stielzylinder

Auf der linken Seite ist die gewünschte (blau) sowie die erreichte Lage (rot) des Stielzylinders dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Lage trotz Störeinflüsse aufgrund der Gewichtbelastung und der Bewegung gut kompensiert werden. Zudem ist zu erkennen, dass trotz der positiven Ventilüberdenkung der verwendeten Proportionalventile keine signifikant erkennbaren Totzeiten bei der Regelung entstehen. Betrachtet man die Ergebnisse aus der unterlagerten Geschwindigkeitsregelung (**Bild 43** rechts), dann ist die Totzeit durch die Ventilüberdeckung zu erkennen. Dies zeigt, dass die überlagerte Lageregelung die Totzeiten sehr gut kompensiert.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die verwendeten Proportionalventile gewöhnlich für eine Steuerung von Hydraulikzylindern verwendet werden die nicht für eine Regelung gedacht sind. Deren Aufbau entspricht dabei den gängigen Ventilen, wie sie bei mobilen Arbeitsmaschinen eingesetzt werden. Betrachtet man mit diesem Hintergrund die Ergebnisse der Lageregelung, dann sind die Ergebnisse sehr zufriedenstellend.

#### Optimierte Gewichtsermittlung mit Kompensation der Störgrößen

Zur Verifizierung der modellbasierten Wiegeeinrichtung wurde diese umfangreich auf dem entwickelten Baggerprüfstand getestet. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Auslegerpositionen durchgeführt, wobei die Hubgeschwindigkeiten variiert wurden. Die Ergebnisse weichen dabei maximal um 2,5 % zur Referenzmasse ab (**Bild 44**). Dies konnte auch mit anderen Referenzmassen bestätigt werden.

Gewicht Löffelinhalt (Referenz 9,47 kg)					
Auslegerposition 1		Auslegerposition 2		Auslegerposition 3	
Gewicht	Fehler	Gewicht	Fehler	Gewicht	Fehler
9,58 kg	1,2 %	9,45 kg	-0,2 %	9,23 kg	-2,5 %
9,55 kg	0,8 %	9,49 kg	0,2 %	9,26 kg	-2,2 %
9,59 kg	1,3 %	9,49 kg	0,2 %	9,24 kg	-2,4 %

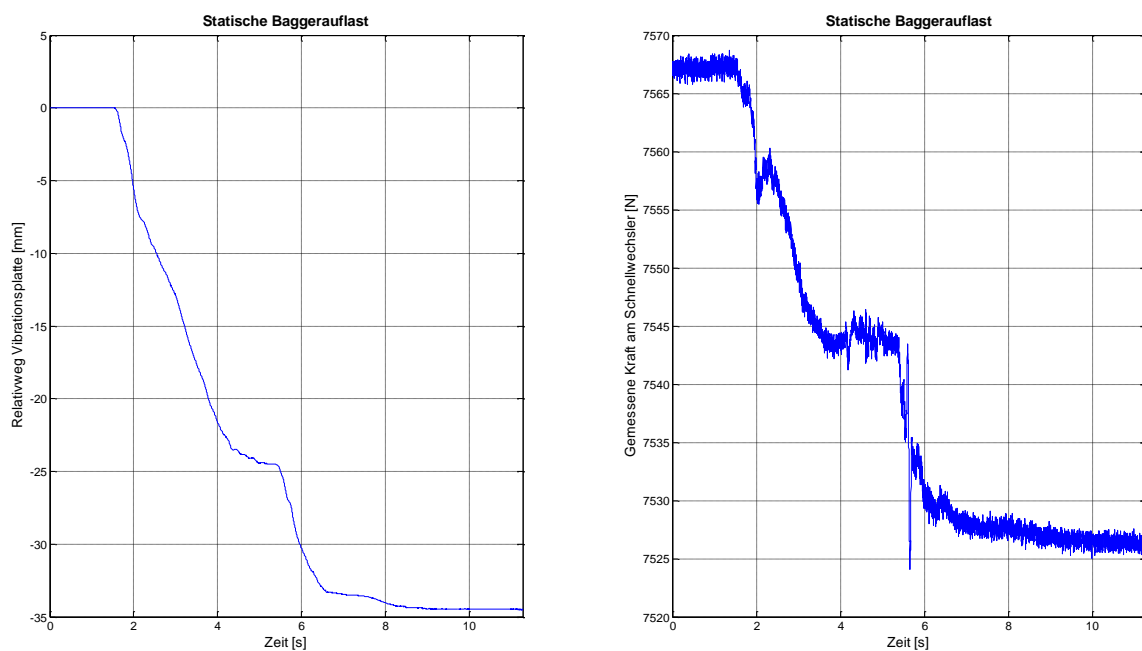
**Bild 44:** Praxiserprobung der modellbasierten Wiegeeinrichtung am Baggerprüfstand

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die im **Bild 44** dargestellten Wiegeergebnisse ohne einer Kalibrierung der Wiegeeinrichtung möglich war. Allein durch die modellbasierte Berechnung der Koppelkraft und den dafür benötigten Modellparameter konnte die genannte Genauigkeit erreicht werden. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar, wenn man den Stand der Technik von mobilen Wiegeeinrichtungen betrachtet. Bei der Berechnung der Schüttgutmasse wurde zudem das Schwingen des Prüfstands nicht mit berücksichtigt. Dies macht sich vor allem bei einem gestreckten Ausleger (Auslegerposition 3) negativ bemerkbar. Wird dies Größe bei der modellbasierten Wiegeeinrichtung zusätzlich mit berücksichtigt, dann ist mit einer Verringerung des maximalen Fehlers zu rechnen.

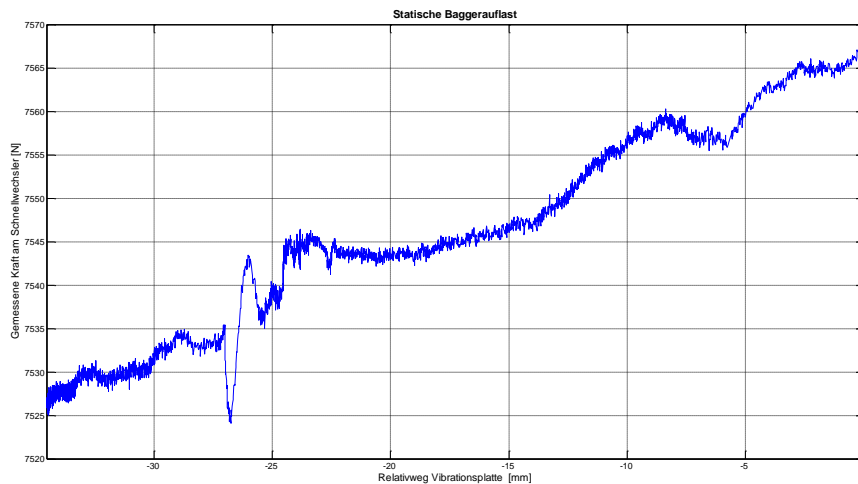
### 2.1.9.2 Erprobung der Assistenzfunktionen eines Anbauverdichters

Für die Erprobung der entwickelten Assistenzfunktionen eines Anbauverdichters wurde der Versuchsbagger Atlas 1204 mit der neu entwickelten Kraftmessung im Werkzeugwechsler herangezogen. Als Anbauwerkzeug diente der Verdichter ACA350-R von Ammann. Da der Versuchsbagger für eine automatisierte Arbeitsbewegung nicht vorbereitet ist, kann hierbei lediglich die Ermittlung der statischen Auflast, die daraus resultierende Amplitude der Verdichterplatte sowie die maximale Verdichtbarkeit getestet werden. Mit Hilfe des entwickelten Baggerprüfstandes konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Auslegerbewegung mit einem Tieflöffel automatisiert werden konnte. Dies lässt sich auf den Anbauverdichter übertragen.

Das Messergebnis für die statische Vorbelastung des Anbauverdichters zeigt eindeutig einen linearen Zusammenhang zwischen der resultierenden Kraft am Wechsler und dem Relativweg zwischen Ober- und Untermaße (siehe hierzu **Bild 45** und **Bild 46**). Demnach kann festgehalten werden, dass mit einer Kraftmesseinrichtung am Werkzeugwechsler die statische Baggerauflast ermittelt werden kann.

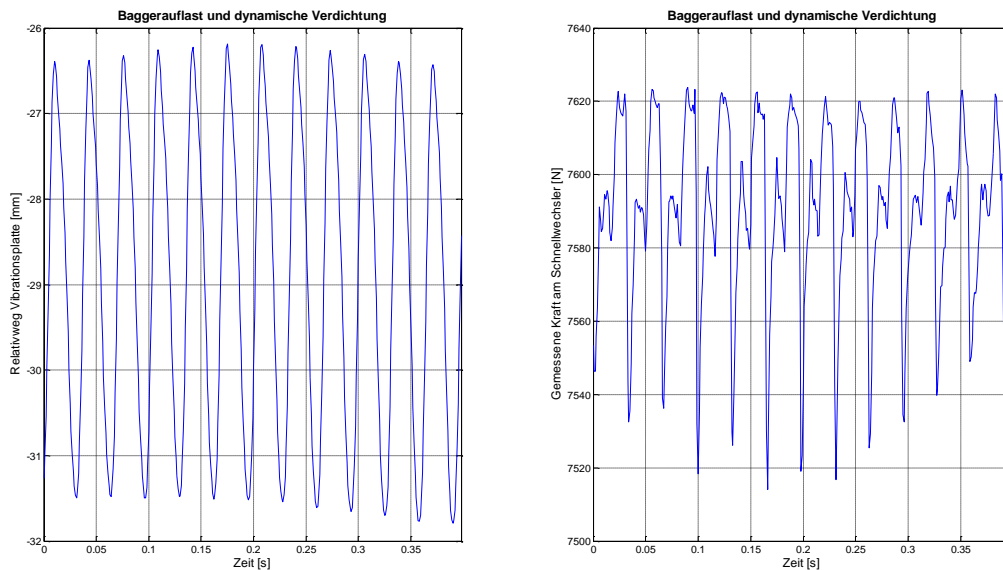


**Bild 45:** Darstellung der gemessenen Kraft am Wechsler und dem Relativweg der Untermaße bei statischer Baggerauflast



**Bild 46:** Zusammenhang zwischen gemessener Kraft am Wechsler und Relativweg der Untermasse

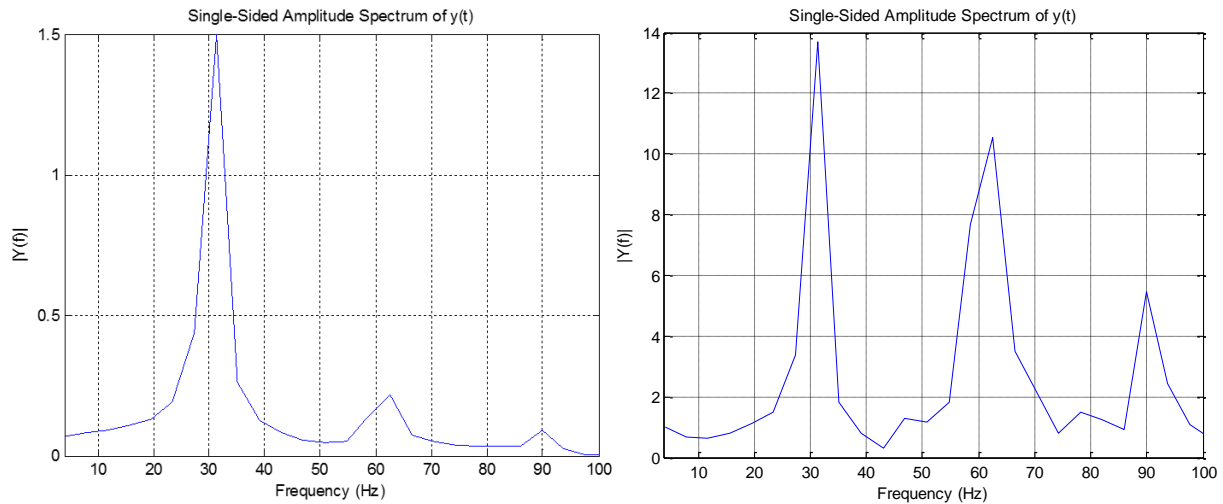
Bei der Untersuchung der maximalen Verdichtbarkeit eines Bodens wurde vor allem untersucht, ob die Vibrationsfrequenz der Untermasse in den gemessenen Kraftsignalen zu erkennen ist. Durch die Gummipuffer zwischen der Ober- und Untermasse kann das Kraftsignal verfälscht werden. Das nachfolgende **Bild 47** zeigt für einen dynamischen Verdichtungsprozess einen Teilausschnitt des gemessenen Relativweges der Untermasse sowie der gemessenen Kraft am Wechsler.



**Bild 47:** Darstellung der gemessenen Kraft am Wechsler und dem Relativweg der Untermasse bei dynamischer Verdichtung

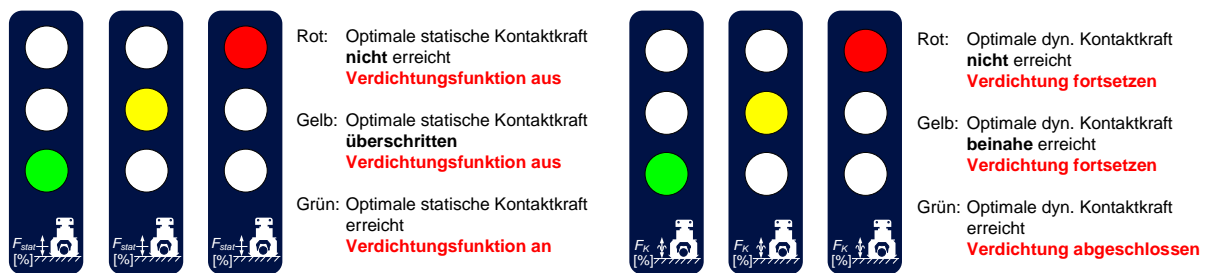
Von Interesse an dieser Stelle ist nicht der zeitliche Verlauf der gemessenen Kraft am Werkzeugwechsler, sondern das Verhalten im Frequenzbereich. Vor allem musste untersucht werden, ob das Schwingungsverhalten der Untermasse über die Messung der Kräfte erfasst werden kann. Anhand der dargestellten Amplitudenspektren des Wegsignals (**Bild 48** links) und des Kraftsignals (**Bild 48** rechts) ist eindeutig die Erregerfrequenz der Verdichterplatte im Bereich von 30 Hz zu erkennen. Dabei kann ebenfalls festgestellt werden, dass sich die Frequenzanteile der beiden Messsignale aufgrund der Gummipuffer nicht gegeneinander verschieben. Mit Hilfe einer Kraftmessung am Werkzeugwechsler ist somit eine Änderung der Anregungsfrequenzen aufgrund eines verdichteten Erdreichs ermittelbar. Ist ein Boden

vollkommen verdichtet, kann diese Eigenschaft im Kraftsignal interpretiert werden und somit gezielt eine weitere Verdichtung vermieden werden. Durch eine weitere Verdichtung könnte sich das verdichtete Erdreich wieder lösen. Des Weiteren kann der gesamte Verdichtungsprozess erheblich beschleunigt werden, da ein zu langes Verdichten vermieden werden kann.



**Bild 48:** Amplitudenspektrum des Relativwegs der Untermasse (links) sowie der gemessenen Kraft am Wechsler (rechts) bei einer dynamischen Verdichtung

Die optimale statische Vorbelastung sowie die optimale dynamische Verdichtung wurde ebenfalls in der entwickelten Anzeige (**Bild 39**) mit einer Ampeldarstellung (**Bild 49**) integriert.



**Bild 49:** Erläuterung der Ampeldarstellung für die Prozessüberwachung des Anbauverdichters

## 2.2 Notwendigkeit der geleisteten Arbeiten

Das Projektziel bestand in der Entwicklung und dem Aufbau einer neuartigen Messeinrichtung für mobile Arbeitsmaschinen zur Optimierung des Arbeitsprozesses. Als Neuerung in diesem Projekt ist vor allem das erstmalige Erfassen von Prozessgrößen zu nennen, die für eine Automatisierung einzelner Arbeitsfunktionen eines Hydraulikbaggers relevant sind. Mit einer Automatisierung einzelnen Funktionen kann der Maschinenbediener erheblich entlastet werden, wodurch wiederum die Maschinenauslastung gesteigert wird.

Dieses Projekt gab der Technischen Hochschule Köln die Möglichkeit ihre Kernkompetenz "Automatisierung von Arbeitsprozessen bei mobilen Arbeitsmaschinen" weiter auszubauen. Dieses Wissen fließt direkt in die Ausbildung von zukünftigen Ingenieuren. Mit diesem Vorgehen wird an einer Hochschule Wissen vermittelt, das weit über den Stand der Technik hinausgeht. Durch einen intensiven Austausch von Erfahrungen und Zwischenergebnissen

während der Projektlaufzeit konnte zudem die Innovationskraft aller Beteiligten Unternehmen wesentlich erhöht werden.

### 2.3 Verwendung der Zuwendungen

Details über die Verwendung der Zuwendungen im Projekt werden von der Drittmittelabteilung der Technischen Hochschule Köln beim Projektträger vorgelegt.

### 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die nachfolgende **Tabelle 6** zeigt die erreichten Ergebnisse innerhalb des Projekts, deren Nutzen und die geplante Verwertung dieser Ergebnisse.

**Tabelle 6:** Verwertung der erreichten Ergebnisse

Erreichte Ergebnisse	Nutzen der Ergebnisse	Zukünftige Verwertung
Entwicklung eines modellbasierten Messsystem zur Analyse des Arbeitsprozesses für einen Hydraulikbagger	Neue Funktionen für das Arbeitswerkzeug stehen zur Verfügung	Übertragung des modellbasierten Messsystems auf andere Anbauwerkzeuge und dessen Arbeitsprozesse
Demonstrator-Entwicklung eines Werkzeugwechslers mit integrierter Kraftmesseinrichtung Belastungsmessung am Werkzeug mit einem modellbasierten Ansatz über die Koppelkraftmessung	Möglichkeit zur Ermittlung der Prozessbedingten Lasten auf die Arbeitsmaschine und das Arbeitswerkzeug	Weiterentwicklung der integrierten Kraftmesseinrichtung zum Einsatz im rauen Baustelleneinsatz. Erweiterung auf andere mobile Arbeitsmaschinen (z.B. Radlader, Raupen, etc.)
Demonstrator-Entwicklung einer optimierten Gewichtsermittlung mit Kompensation der Störgrößen	Genauerer Wiegen von Rohstoffen direkt beim Verladen möglich.	Weiterentwicklung des Demonstrators hin zum Serienprodukt. Einbindung der Gewichtsermittlung in die gesamten Wertschöpfungskette von mineralischen Rohstoffen
Entwicklung eines Bewertungsalgorithmus für den Grabprozess und Verdichtungsprozess eines Hydraulikbaggers	Eine Bewertung, Optimierung und Steuerung des Arbeitsprozesses wird möglich. Damit kann der Maschinenbediener erheblich entlastet werden.	Übertragung des Vorgehens auf weitere Arbeitswerkzeuge und deren Arbeitsprozesse. Erweiterung des Systems hin zu einer kontinuierlichen, lastabhängigen Regelung der Tieföffelneigung eines Hydraulikbaggers
Kontinuierliche, lastabhängige Regelung der Auslegerposition eines Hydraulikbaggers	Automatisierung von Arbeitsfunktionen eines Hydraulikbaggers werden möglich	Übertragung der Regelung vom Baggerprüfstand auf einen realen Bagger.

Durch dieses Forschungsprojekt wurde die Fachhochschule Köln in die Lage versetzt, ihre Kompetenz auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik weiter auszubauen. Dieses Wissen wurde über die Lehre den Studenten zugänglich gemacht. Auf diese Weise werden Nachwuchingenieure ausgebildet, die eine hohe Fachkompetenz in dem zukunftssträchtigen Gebiet der Automatisierung aufweisen. Die folgende **Tabelle 7** zeigt die geleisteten wissenschaftlichen Arbeiten an der TH Köln innerhalb der Projektlaufzeit.

**Tabelle 7:** Zusammenfassung der geleisteten wissenschaftlichen Arbeiten an der TH Köln

Titel der wissenschaftlichen Arbeiten	Typ
Konzeptionierung eines automatischen Kalibriervorgangs einer Mehrkomponenten-Kraftmesseinrichtung	Studienarbeit
Entwicklung eines analytischen Ansatzes zur Optimierung des Arbeitseinsatzes von Tieföffeln mittels Kraftmessung an der Werkzeugwechseleinrichtung	Masterarbeit
Integration einer Kraftmesseinrichtung in ein Werkzeugwechselsystem für einen Grabprüfstand	Masterprojekt
Modellbildung und Simulation der hydraulischen Komponenten eines Baggerprüfstandes	Bachelorarbeit
Entwicklung einer Dreikomponenten-Kraftmessnabe für einen Werkzeugwechsler an einem Hydraulikbagger	Masterarbeit
Konzeptionierung, Modellbildung und Simulation der mechanischen Komponenten eines Baggerprüfstandes	Bachelorarbeit
Konzeptionelle Entwicklung einer Kraftmessung zur Bestimmung der axial wirkenden Prozesskräfte eines Hydraulikbaggers	Bachelorarbeit
Entwicklung eines Anbauverdichters für einen Baggerprüfstand	Masterprojekt
Analytische Untersuchung der Gelenkkette am Löffel eines Hydraulikbaggers	Studienarbeit
Entwicklung einer Mensch-Maschinen-Schnittstelle für eine mobile Wiegeeinrichtung	Praxisprojekt
Modellbildung und Validierung des Baggerprüfstands	Masterprojekt
Entwicklung eines Steuerungs- und Sicherheitssystems für einen skalierten Baggerprüfstands	Masterarbeit
Ermittlung des Reibverhaltens der Hydraulikzylinder an einem Baggerprüfstand	Studienarbeit
Entwicklung eines Sensorprinzips zur Ermittlung der Kräfte in einer Baggerkoppel	Masterarbeit

## 2.5 Fortschritte des Forschungsgebietes bei anderen Stellen

Innerhalb des Vorhabens wurden während der Projektlaufzeit keine Fortschritte bei anderen Stellen registriert.

## 2.6 Erfolgte und geplante Publikationen des Ergebnisses

### Erfolgte

[HAM13] Hameister, H.; Sontheim, F.: Möglichkeiten der Prozessautomation im Straßen- und Tiefbau; Vortrag: „Innovative Forschungsprojekte des VDMA“ im Rahmen der *bauma2013*, München, 19.04.2013

- [SON15-1] Sontheim, F.: Assistenzsysteme für den Bagger - was heute schon geht und was wir erwarten dürfen; Vortrag: 37. Betriebsleiter-Seminar des MIRO, Göttingen, 24.02.2015
- [SON15-2] Sontheim, F.: Arbeitsassistenzsysteme für Hydraulikbagger - Entwicklung einer modellbasierten Wiegeeinrichtung; Tagungsschrift: 44. VDBUM Seminar, Kassel, 2015
- [SON15-3] Sontheim, F.: Arbeitsassistenzsysteme für Hydraulikbagger - Entwicklung einer modellbasierten Wiegeeinrichtung; Vortrag: 44. VDBUM Seminar, Kassel, 25.02.2015
- [SON15-4] Sontheim, F.: Keine grenzenlose Autonomie – Neue Automatisierungskonzepte für Bagger und Straßenfertiger; Zeitschriftenband: bd Baumaschinendienst, Heft: Sondernummer, 2015
- [SON15-5] Sontheim, F.: Assistenzsystem für den Lade- und Transportprozess bei der Erdbewegung; Tagungsschrift: 6. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2015
- [SON15-6] Sontheim, F.: Assistenzsystem für den Lade- und Transportprozess bei der Erdbewegung; Vortrag: 6. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 18.09.2015

#### Geplante

- [ULR16] Ulrich, A.: Projektergebnisse MoMa; Vortrag: FVB-Beiratssitzung, Karlsruhe, 03.03.2016
- [SON16] Sontheim, F.: Neuartiges Mess- und Steuerungskonzept für Hydraulikbagger; Zeitschriftenband: BauPortal, 2016
- [SON16] Sontheim, F.: Automatisierung von Arbeitsbewegungen eines Hydraulikbaggers; Zeitschriftenband: ATZoffhighway, 2016

---

Prof. Dr.-Ing. Alfred Ulrich  
Köln, 11.01.2016



### 3 Quellenverzeichnis

#### Literatur

- [BEI92] Beisteiner, F.; Messerschmidt, D.; Zielbauer, U.: Verschleißuntersuchungen am Grabgefäß im Felshaufwerk arbeitender Hydraulikbagger – Messung von Grabkräften und Grabbewegungen; Zeitschriftenband: Baumaschine + Bautechnik BMT, Heft 1, S. 9-13, 1992
- [BEN12] Bennett, N.; Schindler, C.; Bach, P.: Model-Based Observation of the Stability of Excavators during Operation; Tagungsschrift: 2. Commercial Vehicle Technology Symposium, S. 395-406, Kaiserslautern, 2012
- [BER80] Bergmann, H.; Misch, P.: Baubetrieb und Baumaschinen; Sammelwerk: Heft 1, Berlin, 1980
- [DOM67] Dombrowski, N.G.; Ignatjew, A. F.: Bau- und Gleisbaumaschinen; Verlag 'Transport', Moskau, 1967 (Russisch)
- [DUD78] Dudczak, A.: Kinetostatik des Lösevorgangs bei hydraulischen Universalbaggern; Zeitschriftenband: Baumaschine + Bautechnik BMT, Heft 11, S. 571-580, 1978
- [KOM15] Komatsu America Corp.: PC210LCi-10; Datenblatt, Stand 05/2015
- [KUN02] Kunze, G.; Göhring, H.; Jacob, K.: Baumaschinen; Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- [LEE09] Lee, C.; Kim, K. Y.; Bae, J.; Hong, D.: System Identification of the Pressure transducer and the Force sensor on Intelligent Excavator; Tagungsschrift: ICROS-SICE International Joint Conference, S. 2200-2205, Fukuoka (Japan), 2009
- [MIE12] Mieth, S.: Bestimmung von Prozesslasten mobile Arbeitsmaschinen; Tagungsschrift: 5. Fachtagung Baumaschinentechnik, S. 406-417, Dresden, 2012
- [PAJ79] Pajer, G.; Kurth, F.; Pfeifer, M.; Hojdar, J.: Tagebaugroßgeräte und Universalbagger; VEB Verlag Technik Berlin, Berlin, 1978
- [SAK06] Sakaida, Y.; Chugo, D.; Kawabata, K.: The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator; Tagungsschrift: 23<sup>rd</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction, S. 543-547, Tokio (Japan), 2006
- [SAK08] Sakaida, Y.; Chugo, D.; Yamamoto, H.: The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator; Tagungsschrift: SICE Annual Conference, S. 538-542, Tokio (Japan), 2008
- [SON08] Sontheim, F.: Entwicklung eines bionischen Ansatzes zur Optimierung der Festigkeit eines Aufreißzahns; Hochschulschrift: Fachhochschule Köln, Institut Landmaschinentechnik und Regenerative Energien, Diplomarbeit, 2008
- [SPR10] Sprenger, C.: Löffel ist nicht gleich Löffel. Neue Erkenntnisse bei der Entwicklung von Tieflöffeln; Zeitschriftenband: Baumaschinendienst, Heft 4, S. 24-33, 2010

- [VOI12] Voigt, S.; Mieth, S.; Kunze, G.: Bedienerinfluss auf Leistungszyklen mobiler Arbeitsmaschinen; Sammelband: Wissensportal Bau- und Baustoffmaschinen, Ausgabe 1, Dresden, 2012
- [ZSE01] ZSE Electronic GmbH: Dehnungsmessstreifen und Zubehör; Produktkatalog, Stand: 03.01.2001

### Normen

- [DIN474] DIN EN 474-5: Erdbaumaschinen - Sicherheit - Teil 5: Anforderungen für Hydraulikbagger; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [DIN9245] DIN ISO 9245: Erdbaumaschinen - Leistung der Maschinen - Begriffe, Formelzeichen und Einheiten; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- [ISO376] DIN EN ISO 376: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung; Beuth Verlag GmbH, Stand: September 2011
- [ISO6015]
- [ISO7451] ISO 7451: Earth-moving machinery - Volumetric ratings for hoe-type and grab-type buckets of hydraulic excavators and backhoe loaders; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [ISO10567] ISO 10567: Earth-moving machinery - Hydraulic excavators - Lift capacity; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007

### Internetquellen

- [BAT13] Batarow Sensorik GmbH: Messbolzen am Hydraulikzylinder; URL <http://batarow.com/anwendungen-messbolzen/kraft-am-hydraulikzylinder>, Abruf am 22.07.2013
- [SUN13] SCHUNK GmbH & CO. KG: Technische Daten Force-Torque-Modul FTM 115; URL <http://mobile.schunk-microsite.com/de/produkte/produkte/force-torque-modul-ftm-115.html>, Abruf am 22.07.2013
- [TRI15] Trimble Loadrite: Trimble LOADRITE L2180 Loader Scales – Operator Training; URL: <http://loadritescales.com/newmedia/loadriteonboardweighing-video.html>, Abruf am 20.07.2015
- [TUB13] Technische Universität Braunschweig: Sensorintegration in die HSC-Bearbeitung; URL <https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup/ft/forschung/mts>, Abruf am 22.07.2013

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung einer Analysiereinrichtung zur Charakterisierung von Arbeitsfunktionen bei mobilen Arbeitsmaschinen, gezeigt am Beispiel eines Hydraulikbaggers - MoMa	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Ulrich, Alfred Sontheim, Florian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Hochschule Köln (ehemals Fachhochschule Köln) Gustav-Heinemann-Ufer 54 50968 Köln	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03FH072PX2
	11. Seitenzahl 57
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 7
	15. Abbildungen 49
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Momentan liegt die Verantwortung für das Erfüllen einer Arbeitsaufgabe und somit die Effizienz einer mobilen Arbeitsmaschine beim bedienenden Personal. Zur Optimierung der Arbeitsabläufe ist aus diesem Grund ein modellbasiertes Mess- und Informationssystem für einen Hydraulikbagger entwickelt worden, welches den Anwender bei seiner Arbeitsaufgabe unterstützt. Dem Anwender werden hierzu alle für den Arbeitsprozess relevanten Prozessgrößen visuell zur Verfügung gestellt. Größtenteils sind diese Prozessgrößen mit dem heutigen Stand der Technik an einem Hydraulikbagger nicht verfügbar. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem es möglich wird, die Prozesskräfte für jedes Anbauwerkzeug zu messen. Dieses Messsystem ist auch für den Einsatz unter rauen Baustellenbedingungen konzipiert. Durch einen modellbasierten Ansatz, der als Eingangsrößen die genannten Kräfte sowie die Werkzeugposition nutzt, sind infolgedessen bisher unbekannte Größen des Prozesses ermittelbar.  Zudem wurde in diesem Projekt ein Baggerprüfstand entwickelt, mit dem neu entwickelte Ansätze für unterschiedliche automatisierte Arbeitsaufgaben unter gleichbleibenden realen Bedingungen getestet werden können. Mit Hilfe des Prüfstands wurden ebenso unterschiedliche Konzepte zur automatisierten Arbeitsbewegung eines hydraulisch betätigten Baggerauslegers untersucht und entwickelt.	
19. Schlagwörter Mobile Arbeitsmaschinen, Automatisierung, Prozessoptimierung, Sensorentwicklung	
20. Verlag	21. Preis