

## Sensorteststand zur Evaluierung bildgebender Sensoren mit dynamisch-reproduzierbaren Störgrößen

### *Test bench for the evaluation of image-based sensors with dynamically reproducible noise sources*

Christian Scholz, Wolfram Strothmann, Fabian Lankenau, Daniel Schmunkamp,  
Fabian Sellmann, Arno Ruckelshausen

Hochschule Osnabrück, COALA, Sedanstr. 26, 49076 Osnabrück  
E-Mail: c.scholz@hs-osnabruek.de

**Zusammenfassung:** Es wurde ein förderbandgestützter, modularer Sensorteststand für die Evaluation bildgebender Sensoren unter dem Einfluss dynamischer Störgrößen aufgebaut. Hierdurch kann die Robustheit des Einsatzes bildgebender Sensoren unter Feldbedingungen – z.B. auf Landmaschinen – erhöht werden, weiterhin können Sensoren und deren Positionierungen hinsichtlich der anwendungsspezifischen Qualitätsanforderungen verbessert werden. Für die Simulation der Einsatzverhältnisse sind die mechanischen und elektrischen Schnittstellen in der vorliegenden Beispielanwendung für den autonomen Feldroboter BoniRob ausgelegt. Ein besonderes Merkmal des Teststandes ist die Höhen- und Winkelverstellung der Sensorhalterung durch 4 Aktoren, die eine bodenabhängige Höhen- und Winkelvariationen der Sensoranordnung über den Messobjekten (z. B. Pflanzen) simulieren. Mit einer ROS-basierten Softwarearchitektur können Überfahrten sowie dynamische Schwankungen unter Laborbedingungen reproduzierbar nachgestellt werden.

**Deskriptoren:** Bildgebende Sensortechnik, Dynamischer Sensorteststand, Störgrößen, ROS, autonome Feldroboter

**Abstract:** *For the evaluation of image-based sensors with dynamically reproducible noise sources a conveyor-based modular test bench was constructed. With this test bench the use of image-based sensor can be increased under field conditions (e.g. for agricultural machines). Furthermore sensors and their positioning can be improved in terms of application-specific quality requirements. In this work the mechanical and electrical interfaces of the application are designed for the autonomous field robot BoniRob. A special characteristic of the test bench reflects the height and angle adjustment of the sensor-mounting by 4 actuators that simulate a ground-based height and angle variations of the sensor arrangement to the measurement object (e.g. plants). With a ROS-based software architecture crossings and dynamic variations can be simulated reproducibly under laboratory conditions.*

**Keywords:** *Image-based sensors, dynamic test bench, noise sources, ROS, autonomous field robots*

## 1 Einleitung

Verschiedenste Störgrößen sind bei Evaluationen bildgebender Sensoren im praktischen Feldeinsatz allgegenwärtig (HEMMING *et al.* 2001). Beispielsweise schwanken die lokalen Feldbedingungen (z. B. Sorten, Boden) wie auch die Witterung (z. B. Sonneneinstrahlung, Nässe). Ein weiterer kritischer Punkt sind mechanische Schwankungen (Vibrationen, Schocks), die beim Einsatz von Sensoren auf Fahrzeugen auf dem Acker unvermeidbar sind. Weiterhin müssen die Bewegungsgeschwindigkeiten des Systems optimiert werden (STROTHMANN *et al.* 2015). Hierbei muss sichergestellt sein, dass das System wie geplant funktioniert. Gleichzeitig muss die Zeitdauer der Messungen aus Effizienzgründen minimiert werden, was i. d. R. eine möglichst hohe Geschwindigkeit erfordert.

Dabei ist festzustellen, dass beim Einsatz von bildgebenden Sensoren im Ackerbau deutlich höhere Anforderungen an die Robustheit von bildgebenden Sensoren und Bildverarbeitungsalgorithmen gestellt werden, als beispielsweise in industriellen Prozesslinien. Dies liegt darin begründet, dass die Schwankungsbreite und Vielfalt der auftretenden Störgrößen deutlich höher sind (RUCKELSHAUSEN 2014). Weiterhin sind Feldtests von bildgebenden Sensorsystemen stets mit erheblichem organisatorischem und logistischem Aufwand sowie Planungsunsicherheiten (Witterung, Wachstumsphasen) verbunden. Entsprechend sind diese im Vergleich zu Laborversuchen deutlich teurer. Dies bedingt die Erfordernis durch vorbereitende Validierungsmaßnahmen für den Feldeinsatz bestimmte Sensorsysteme schon vor dem Feldtest intensiv zu testen. Hierzu eignen sich zum einen Simulationstechniken (LINZ *et al.* 2014) und zum anderen können dynamische Teststände im Labor eingesetzt werden (MÖLLER *et al.* 2013). Hierdurch kann der Aufwand für Feldtests vorab verringert werden.

Ein weiteres Problem stellt die schwierige Reproduzierbarkeit von Störgrößen im Feldeinsatz dar. Dies führt dazu, dass eine Störgröße, welche bei einem Feldtest einen kritischen Einfluss hatte und das System zum Ausfall oder einem nicht zufriedenstellendem Verhalten gebracht hat, bei einem anderen Feldtest gar nicht auftreten muss. Somit ist eine Validierung von Verbesserungsmaßnahmen in Bezug auf die Handhabung dieser Störgröße durch weitere Feldeinsätze nicht zwingend überhaupt möglich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, auch Störgrößen, welche im Feldeinsatz auftreten können im Labor nachzustellen, um nach Feldtests durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen ebenfalls im Labor validieren zu können.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein dynamischer Teststand vorgestellt, mittels dessen der Einfluss von mechanischen Schwankungen (Vibrationen/Schocks) auf bildgebende Sensoren im Labor dynamisch-reproduzierbar getestet werden kann. Mechanische Schwankungen stellen im Feldeinsatz unvermeidbare Störgrößen dar. Zum einen sind

hierbei Sensoren zu betrachten, welche Pflanzen während der Überfahrt montiert auf einem Fahrzeug (z.B. Feldroboter) vermessen. Hierbei wird das gesamte Fahrzeug inkl. Sensorik stets Wankbewegungen unterliegen. Weiterhin sind auch Sensoren zu betrachten, welche innerhalb von Prozessen auf Maschinen verbaut sind und dort, z. B. vorbeigefördertes Erntegut beurteilen. Auch diese Sensoren sind aufgrund der bewegten Massen stets mechanischen Schwankungen ausgesetzt.

Weiterhin erlaubt der vorgestellte Teststand es, die simulierten Fahrgeschwindigkeiten mittels einer Programmierschnittstelle zu variieren. Dies erlaubt es das System bei verschiedenen Geschwindigkeiten automatisiert und reproduzierbar zu testen, um so die Maximalgeschwindigkeit bei der das System zuverlässig funktioniert vor dem Feldeinsatz im Labor ermitteln zu können.

**Abbildung 1** zeigt eine Feldmessung durch die Verwendung eines bildgebender Sensorsystems (hier MWLP-System) und des autonomen Feldroboters BoniRob (BANGERT *et al.* 2013).



**Abbildung 1:** Links: Feldmessung BoniRob, Rechts: Detailansicht App

## 2 Material und Methoden

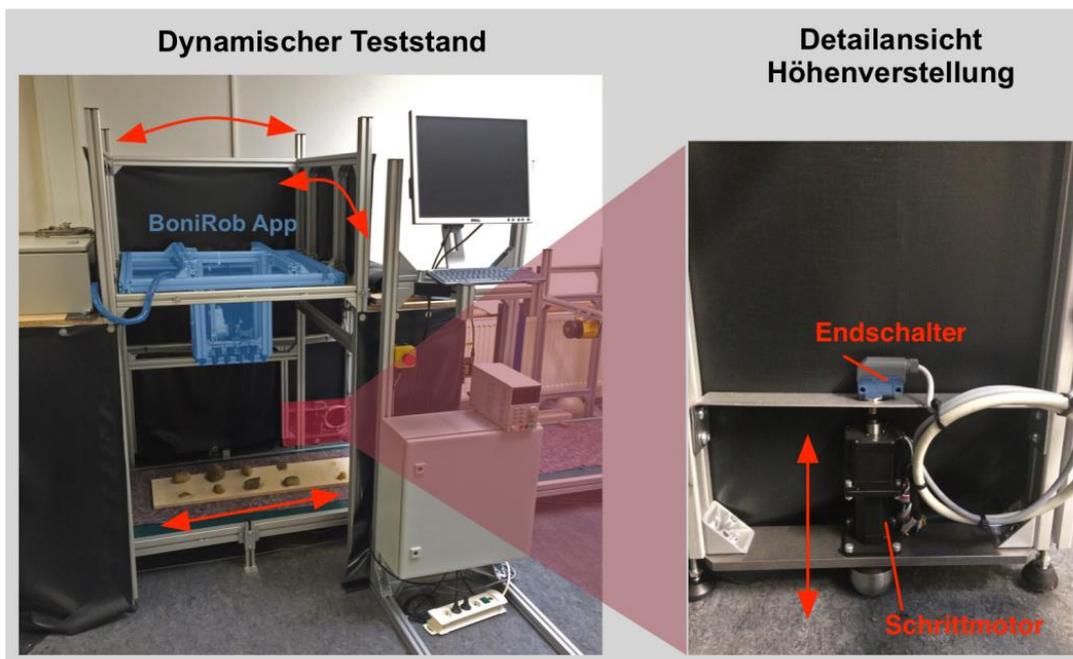
Nachfolgend wird auf Basis der beschriebenen Störgrößen die Konstruktion des dynamischen Teststandes mit den entsprechenden mechanischen, elektrischen und logischen Schnittstellen realisiert. Zusätzlich erfolgt die Beschreibung eines Laborversuchs, um ein entwickeltes Sensorsystem mit reproduzierbaren Störgrößen zu evaluieren.

## 2.1 Systemaufbau Teststand

Für eine konsistente Anwendung und Versuchsdurchführung sind die Schnittstellen (mechanisch, elektrisch und logisch) des Teststandes identisch zu den Schnittstellen des Feldroboters BoniRob. Hierdurch können entwickelte Applikationen für den BoniRob ohne Umbau in den Teststand implementiert und getestet werden. Zusätzlich können weitere Sensorsysteme durch die Verwendung eines Grundrahmens in den Teststand implementiert werden.

### 2.1.1 Hardwareaufbau

Die Konstruktion des Teststandes wurde mit Alu-Profilen durchgeführt. Hierbei sind die Maße zur Aufnahme der Sensor-/ Aktorapplikationen identisch mit der mechanischen Schnittstelle zum Feldroboter BoniRob. **Abbildung 2** zeigt links den mechanischen Aufbau des dynamischen Teststandes. Hierbei spiegelt der Bereich „BoniRob App“ (blau eingefärbt) die mechanische Schnittstelle zur Aufnahme der jeweiligen Applikation wider. Für eine Höhen- / Winkelverstellung sind vier Schrittmotoren an den Ecken des Teststandes implementiert. Die Linearbewegung erfolgt durch die Verwendung von Gewindespindeln. **Abbildung 2**, rechts zeigt eine detaillierte Ansicht eines Schrittmotors inklusive Gewindespindel, Encoder und Endschalter. Die Ansteuerung der Motoren erfolgt über RS485. Sämtliche elektrischen Komponenten sind in einem Schaltschrank zusammengeführt. Die Bedienung erfolgt durch die Verwendung eines Monitors sowie Maus und Tastatur. Für die Relativbewegung zwischen Sensorsystem und Objekt wird der Teststand über ein Förderband platziert, welches mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verfahren werden kann.

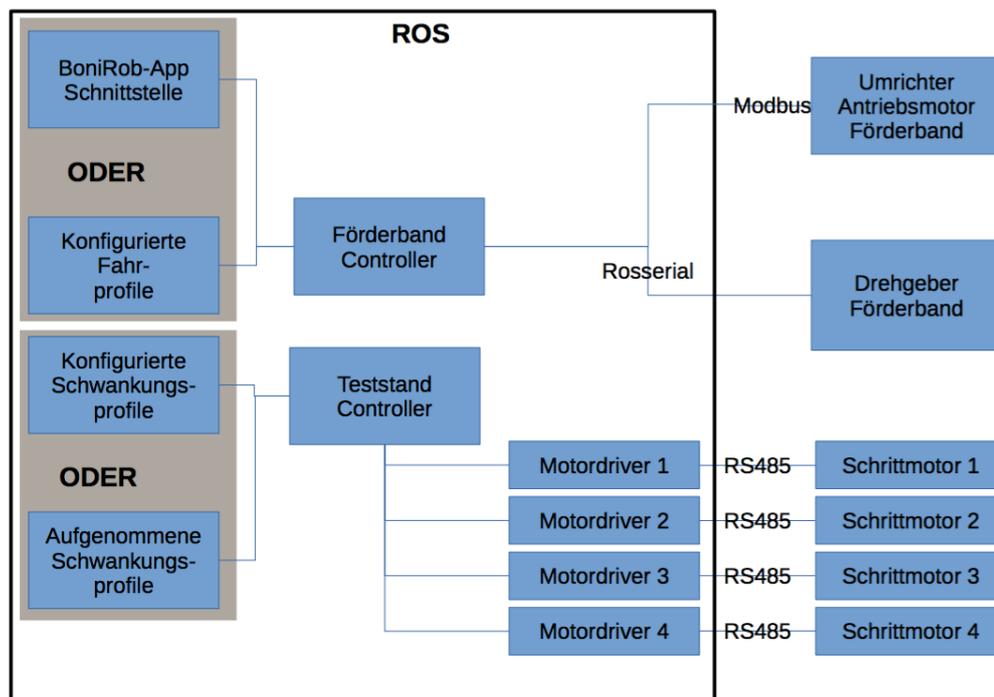


**Abbildung 2:** Links: Aufbau Teststand, Rechts: Detailansicht Höhenverstellung

### 2.1.2 Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur des Teststandes nutzt das Robotikframework ROS (www.ros.org), damit können einerseits die Systemintegration (Hardware und Simulation) und andererseits die Umsetzung auf reale Maschinen umgesetzt werden. Der Umrichter für den Antriebsmotor des Förderbandes ist via Modbus angebunden, der Drehgeber des Förderbandes über einen Arduino Microcontroller und rosserial. Die Schrittmotoren des Teststandes sind über RS485 mit dem steuernden PC verbunden. Für die Schnittstellen zu beiden Hardwareteilen sind separate ROS Knoten implementiert, die als Treiber/Controller Schnittstelle fungieren. Dies erlaubt es beiden Teilsystemen durch verschiedene Quellen von Bewegungsanforderungen über entsprechende ROS Topics zu verbinden.

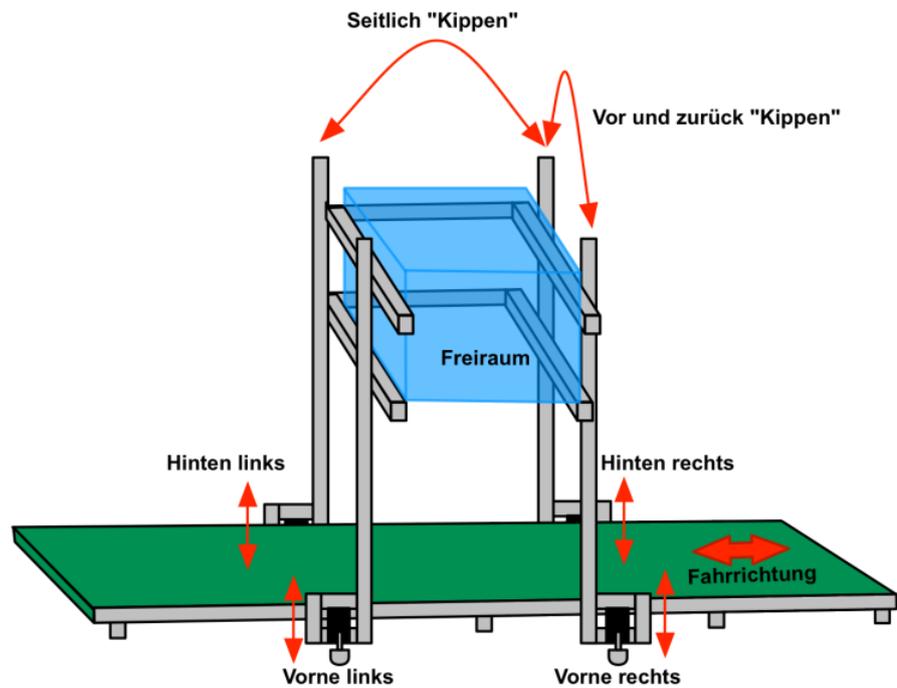
Die Ansteuerung des Förderbandes kann durch die manuelle Eingaben oder konfigurierte Fahrprofile erfolgen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Ansteuerung die BoniRob-App-Schnittstelle zu nutzen. Diese bietet die Möglichkeit, dass Apps – vergleichbar mit dem Tractor-Implement-Management (TIM) – die Steuerung über das Fahrverhalten des BoniRobs in gewissen Situationen übernehmen (BANGERT *et al.* 2013). Dieses ist hier nachgestellt, indem die App über die gleiche Schnittstelle die Förderbandbewegung ansteuern kann. Weiterhin wird die App ebenfalls über die gleiche Schnittstelle mit (emulierten) Odometriedaten vom Förderband – basierend auf den Drehgeberwerten – versorgt. Die Ansteuerung des Teststandes kann durch konfigurierte Schwankungsprofile erfolgen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, im Feldeinsatz aufgenommene Schwankungsprofile (z. B. mit Abstandssensoren am Fahrzeug oder IMU) über die entsprechende Topic auf dem Teststand abzuspielen und so im Labor zu reproduzieren. **Abbildung 3** zeigt schematisch die beschriebene Softwarearchitektur.



**Abbildung 3:** Schematische Übersicht der Softwarearchitektur

### 2.1.3 Bewegungsprofile

Durch die Verwendung von vier Schrittmotoren (vorne links, hinten links, vorne rechts und hinten rechts), platziert in den jeweiligen Ecken des Teststandes, sind vielfältige Bewegungsprofile möglich. Ein Auszug der Profile kann aus **Abbildung 4** entnommen werden. Bei einer gleichzeitigen Ansteuerung aller Schrittmotoren mit der identischen Amplitude (Höhe) wird ein gleichzeitiger Hub durchgeführt und der Teststand bewegt sich gleichmäßig hoch und runter. Bei einer Ansteuerung der Schrittmotoren „vorne links“ und „hinten links“ sowie „vorne rechts“ und „hinten rechts“ kann der Teststand seitlich gekippt werden. Für ein „vor und zurück kippen“ werden die Schrittmotoren „vorne links“ und „vorne rechts“ sowie „hinten links“ und „hinten rechts“ angesteuert. Zusätzlich ist die Kombination der angegebenen Profile möglich, was weitere Anpassungen an die Beschaffenheit von Ackerböden und Vibrationen/ Schocks innerhalb von Prozessen garantiert.



		Motorenposition für Höhen/ Winkelverstellung			
		Vorne links 	Hinten links 	Vorne rechts 	Hinten rechts 
Bewegungsart	gleichzeitiger Hub	●	●	●	●
	Seitlich "Kippen"	●	●	●	●
	Vor/ Zurück "Kippen"	●	●	●	●

Abbildung 4: Übersicht der Höhen-/Winkelverstellungen

## 2.2 Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein MWLP-Sensorsystem zur Klassifizierung von Kartoffeln und Steinen/Kluten während eines Erntevorgangs simuliert (STROTHMANN *et al.* 2014). Als Anwendung wird die Unterscheidung zwischen Kartoffeln und Steinen/Kluten innerhalb der Maschine betrachtet. Hierbei werden unterschiedliche Vibrationsstärken (Oszillations-Amplituden) und Geschwindigkeiten anhand des dynamischen Teststandes reproduzierbar dargestellt, um das Sensorsystem zu evaluieren. Das MWLP-System wird zur Versuchsdurchführung in den Freiraum des Teststandes montiert und mit den definierten elektrischen und logischen Schnittstellen verbunden (siehe **Abbildung 2**).

Für die benötigten Vibrationen werden die beschriebenen Bewegungsprofile in **Abbildung 4** durch eine Zufallsauswahl ausgeführt, um die realen Gegebenheiten auf dem Acker während des Ernteprozesses deutlicher abzubilden. Zusätzlich zu den Bewegungsprofilen des Teststandes wird die Geschwindigkeit des Förderbandes schrittweise erhöht, um eine Erhöhung der Erntegeschwindigkeit zu simulieren. **Tabelle 1** zeigt die verwendeten Oszillations-Amplituden (Oscillation amplitude [mm]) für die Bewegungsprofile des Teststandes und die Geschwindigkeiten des Förderbandes (Conveyor speed [m/s]).

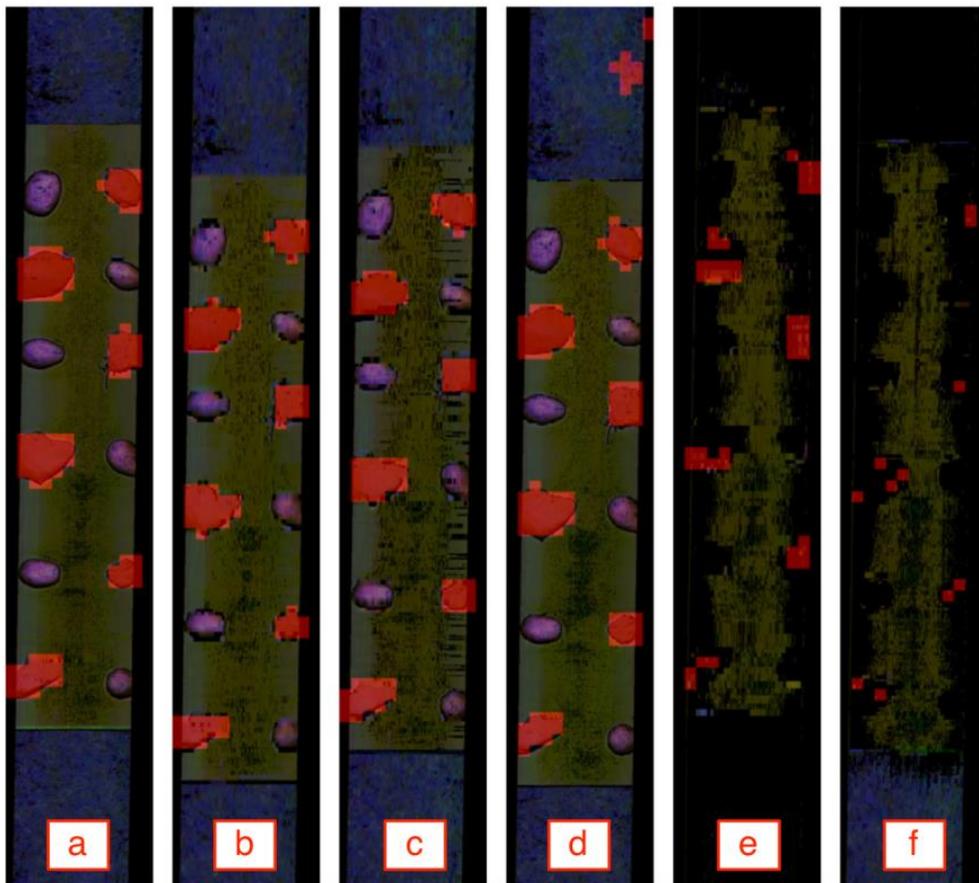
**Tabelle 1:** Parameter für Versuchsdurchführung

Oscillation amplitude [mm]	Conveyor speed [m/s]
0	0,12
3	0,21
5	0,39
10	0,74
15	1,09
20	
25	

Für die Versuchsdurchführung wird für jede Amplitude die Geschwindigkeit des Förderbandes schrittweise erhöht und die Ergebnisse der Klassifizierung evaluiert. Die Messobjekte – Kartoffeln und Steine/Kluten - sind für die Durchführung auf ein Brett geklebt und unterhalb des Sensorsystems auf dem Förderband platziert (siehe **Abbildung 2**). Innerhalb der Klassifizierung werden die Objekte, welche als Steine/Kluten vom Sensorsystem detektiert werden, rot eingefärbt. Für die Anwendung innerhalb der Maschine könnte ein nachgelagerter Prozess diese Bereiche, durch entsprechende Maßnahmen (z.B. mechanischer Ausstoß), bearbeiten. Die Ergebnisse, unter diesen reproduzierbaren Bedingungen, sollen die Grenze der mechanischen Schwankung zeigen, ab deren eine Anwendung nicht mehr möglich ist.

### 3 Ergebnisse

**Abbildung 5** zeigt einen Auszug der durchgeführten Klassifizierung bei unterschiedlichen Amplituden und Geschwindigkeiten. In **Abbildung 5a** beträgt die Amplitude 0 mm und die Geschwindigkeit des Förderbandes 0,12 m/s. Für diese Störgrößen sind alle Steine/Kluten erkannt worden. **Abbildung 5b** spiegelt die Ergebnisse der Klassifizierung bei einer Amplitude von 0 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s wider. Auch in diesem Fall wurden alle Objekte erkannt. In **Abbildung 5c** erfolgte die Klassifizierung bei einer Amplitude von 10 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s. Bei diesen Parametern wurden ebenfalls alle Objekte erkannt. Innerhalb von **Abbildung 5d**, mit einer Amplitude von 15 mm und einer Geschwindigkeit von 0,39 m/s, werden alle Objekte erkannt. Zusätzlich wurden Bereiche detektiert in denen sich kein Objekt befindet (im Bild oben). **Abbildung 5e** zeigt die Ergebnisse der Klassifizierung bei einer Amplitude von 20 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s. Eine manuelle Identifikation der Objekte ist in diesem Fall schwierig, jedoch wurden die Objekte vom Sensorsystem richtig klassifiziert. Im letzten Fall in **Abbildung 5f** bei einer Amplitude von 25 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s wurde ein Objekt (im Bild oben rechts) nicht erkannt.



**Abbildung 5:** Darstellung der Klassifizierung für unterschiedliche Amplituden und Geschwindigkeiten

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Klassifizierung für Kartoffeln und Steine/Kluten bei unterschiedlichen Amplituden und Geschwindigkeiten

Oscillation amplitude [mm]	Conveyor speed [m/s]	Potatoes [N objects]		Residuals [N objects]		Background [N grid cells]
		Scanned	With treating	Scanned	With treating	Treatings
0	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
3	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
5	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	24	0	24	24	0
10	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	1
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
15	0.12	18	0	18	18	13
	0.21	18	0	18	18	10
	0.39	18	0	18	18	22
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	5
20	0.12	18	1	18	17	0
	0.21	18	0	18	18	10
	0.39	18	0	18	17	4
	0.74	18	0	18	17	3
	1.09	18	0	18	18	0
25	0.12	18	0	18	17	4
	0.21	18	2	18	18	4
	0.39	18	0	18	17	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	36	0	36	35	28

**Tabelle 2** zeigt die gesamte Versuchsdurchführung. Die ersten beiden Zeilen geben die definierten Amplituden (Oscillation amplitude [mm]) und die Geschwindigkeiten des Förderbandes (Conveyor speed [m/s]) an. Die zwei folgenden Spalten spiegeln die Anzahl der gescannten Kartoffeln und die Anzahl wie viele von diesen Kartoffeln in der Klassifizierung als Steine/Kluten erkannt wurden. Die nächsten zwei Spalten zeigen die gescannten Steine/Kluten und die Anzahl wie viele in der Klassifizierung als Steine/Kluten erkannt wurden. Die letzte Spalte zeigt die Anzahl der erkannten Objekte innerhalb der Hintergrunds (siehe hierzu **Abbildung 5e**).

Die Ergebnisse in **Tabelle 2** zeigen, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit auf 1,09 m/s keinen großen Einfluss auf die Qualität der Klassifizierung hat. Bei einer Erhöhung der Amplituden auf 15 mm kommt es zu vereinzelt Fehlklassifizierungen innerhalb des Hintergrunds (siehe hierzu **Abbildung 5d**). Ab einer Amplitude von 20 mm kommt es zu einer Fehlklassifizierung von Kartoffeln und Steinen/Kluten.

Für die Anwendung des MWLP-Sensorsystems unter Feldbedingungen wird somit eine mechanische Sensoraufnahme innerhalb der Maschine benötigt, die keine Amplituden von mehr als 15 mm zwischen Maschine und Sensorsystem erzeugt.

## 4 Diskussion

Die Vorteile des dynamischen Teststandes für Evaluationen von bildgebenden Sensoren zeigen sich anhand der durchgeführten Versuchsreihe. Unter den reproduzierbaren Störgrößen – Amplitude und Geschwindigkeit – konnte die Qualität der Klassifizierung für das verwendete MWLP-Sensorsystem evaluiert werden, ohne das zeitliche- und kostenintensive Feldversuche durchgeführt werden mussten.

Der modulare Aufbau des Teststandes ermöglicht in Zukunft vielfältige Anwendungen hinsichtlich der Auswahl bildgebender Sensoren, der Abbildung von Fahrzeugmodellen, der Variabilität von Bodeneigenschaften sowie der Integration weiterer Störgrößen (z.B. variabler Lichteinfluss).

## Literaturverzeichnis

- BANGERT W., KIELHORN A., RAHE F., ALBERT A., BIBER P., GRZONKA S., HAUG S., MICHAELS A., MENTRUP D., HÄNSEL M., KINSKI D., MÖLLER K., RUCKELSHAUSEN A., SCHOLZ C., SELLMANN F., STROTHMANN W., TRAUTZ D. (2013):** Field-Robot-Based Agriculture: "RemoteFarming.1" and "BoniRob-Apps", 71. Tagung LAND.TECHNIK - AgEng 2013, pp. 439-446, ISBN 978-3-18-092193-8
- HEMMING J., RATH T.(2001):** Computer-vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78 (3), 2001, S.223–243
- LINZ A., HERTZBERG J., RUCKELSHAUSEN A., WUNDER E. (2014):** Autonomous Service Ro-bots For Orchards And Vineyards: 3D Simulation Environment Of Multi Sensor-Based Navigation And Applications. In 12th International Conference on Precision Agriculture, ISPA International Society of Precision Agriculture, Ed., Sacramento, CA, USA

- MÖLLER K., SCHOLZ C., WUNDER E., RUCKELSHAUSEN A. (2013):** Sensorteststand zur Entwicklung von Sensorsystemen unter dynamisch-reproduzierbaren Testbedingungen; 33. GIL-Jahrestagung, Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Potsdam 2013, Tagungsband, ISBN 978-3-88579-605-3, S. 203-206
- RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen - ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. *Journal für Kulturpflanzen*, 66(2):73–79
- STROTHMANN W., TSUKOR V., RUCKELSHAUSEN A. (2015):** "In-Field-Labeling-HMI für automatische Klassifizierung bei der Pflanzen- und Erntegutcharakterisierung mittels bildgebender Sensordaten", in: RUCKELSHAUSEN A., SCHWARZ H.-P., THEUVSEN B. (Hsrg.): *Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL Jahrestagung*, 23.-24. Februar 2015, Geisenheim, S. 177-180, ISBN 978-3-88579-632-9
- STROTHMANN W., RUCKELSHAUSEN A., HERTZBERG J. (2014):** "Multiwavelength laser line profile sensing for agricultural crop characterization", *Proc. SPIE 9141, Optical Sensing and Detection III*, 91411K (May 15, 2014); <http://dx.doi.org/10.1117/12.2052009>