

# **Sensortechnik zur Tiefenmessung im Ackerbau**

Wieselburg, Dezember 2023

## **Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber:

HBLFA Francisco Josephinum Wieselburg

Schloss Weinzierl 1, 3250 Wieselburg

Autorinnen und Autoren: Dipl.-HLFL-Ing. Manfred Nadlinger

Fotonachweis: HBLFA Francisco Josephinum / Nadlinger

Wieselburg, Dezember 2023

**ISBN 978-3-902451-19-4**

## **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der HBLFA Francisco Josephinum Wieselburg und der Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [blt@josephinum.at](mailto:blt@josephinum.at).

# Inhalt

<b>1 Problemstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Methode .....</b>	<b>5</b>
2.1 Sensoren und Messmethoden für die Tiefenmessung .....	6
2.1.1 Tastende Arbeitstiefenmessmethode .....	6
2.1.2 Berührungslose Arbeitstiefenmessung.....	10
2.2 Messaufbau, Messwerterfassung und Verarbeitung .....	14
<b>3 Ergebnisse der Versuche .....</b>	<b>15</b>
3.1 Tastsensoren ohne Zusatzgewichte.....	15
3.2 Tastsensoren mit Zusatzgewichte.....	17
3.3 Messungen auf verschiedenen Untergründen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.....	21
3.4 Messungen auf künstlich angelegten Bahnen.....	29
3.5 Messungen auf den BLT-Testbahnen.....	31
3.6 Messungen auf einer gemulchten Fläche.....	34
3.7 Tiefenmessung auf unbearbeiteten und bearbeiteten Boden.....	44
3.8 Tiefenmessung beim Hackgerät.....	48
3.9 Radarsensoren auf Mähwerk vorne und hinten montiert .....	52
3.10 Radarsensor zur Vermessung von Bestandeshöhen auf 1,80 m über dem Boden montiert.....	56
3.11 Tiefenmessung beim Pflügen.....	59
<b>4 Zusammenfassende Bewertung aller Tiefenmessmethoden .....</b>	<b>66</b>
4.1 Tastende Tiefenmesssysteme:.....	66
4.2 Berührungslose Tiefenmesssysteme: .....	68
<b>5 Zusammenfassung.....</b>	<b>73</b>

# 1 Problemstellung

Im Ackerbau ist die Kenntnis der Bearbeitungstiefe eine der wichtigsten Regelgrößen. Viele Einstellparameter am Traktor und am Anbaugerät werden davon abgeleitet. In der Vergangenheit wurden verschiedene Methoden zur Tiefenmessung erprobt, die aber immer nur für den speziellen Anwendungsfall aussagekräftig waren. Aufgrund dieser großen Unsicherheit, wurde in der Praxis und bei Versuchsanstellungen, die klassische Methode der Stichprobenmessung mit dem Meterstab eingesetzt. Damit konnte ein einigermaßen realistischer Wert darstellen werden. Die kontinuierliche Messung einer praxisgerechten Bearbeitungstiefe, bei den unterschiedlichsten Bodenoberflächen und Bodenverhältnissen, war jedoch nicht so einfach umzusetzen. Daher wurden in diesem Projekt verschiedene Verfahren zur kontinuierlichen Messung der Arbeitstiefe auf ihre Praxistauglichkeit untersucht. Das Ziel war es, die Entwicklungen von Lösungen zur Messung der Bearbeitungstiefe bei verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren zu entwickeln, um gesicherte und valide Daten zu erhalten.

Die Fragestellung für die Untersuchung lautete: **Welches Messverfahren kann die Bearbeitungstiefe bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen am besten wiedergeben?**

## 2 Methode

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zwölf verschiedene Verfahren zur Messung der Arbeitstiefe von Bodenbearbeitungsgeräten entwickelt und getestet. Im Vorfeld waren Vorversuche notwendig, um die grundsätzliche Eignung der Sensoren für diesen Zweck zu testen. Dazu wurden die einzelnen Sensoren auf einen Rahmen montiert, der auf Stützrädern lief und am Dreipunkt des Traktors angebaut war (siehe *Abbildung 1*). Mit Hilfe dieses Rahmens wurden Versuchsfahrten mit verschiedenen Sensorkombinationen bei unterschiedlichen Bodenoberflächen, Bodenbeschaffenheiten und Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Dieser Rahmen war notwendig, um die Sensoren gleichzeitig unter verschiedenen Einsatzbedingungen gleichzeitig testen zu können. Zur Bestimmung des Referenzabstandes zum Boden wurde das Gespann (Traktor mit Rahmen), vor den Versuchsfahrten auf eine ebene Betonfläche gestellt. Somit bezog sich der Abstand aller Sensoren auf das gleiche Niveau (Nullniveau). Zur Bewertung und Beurteilung der einzelnen Messverfahren wurden die Abweichungen der Messwerte von diesem Nullniveau herangezogen. Da der Rahmen auf Stützrädern lief, wurden die Messwerte der Sensoren durch Relativbewegungen des Rahmens beeinflusst. Dies ist auch in der Praxis bei anderen Bearbeitungsgeräten der Fall. Die in den Vorversuchen am besten geeigneten Messmethoden wurden anschließend an verschiedenen Bodenbearbeitungsgeräten aufgebaut und im Praxiseinsatz an mehreren Geräten getestet.



*Abbildung 1: Messrahmen zur Befestigung der Tiefenmesseinrichtungen*

## 2.1 Sensoren und Messmethoden für die Tiefenmessung

Um diese Vielfalt an Bodenoberflächen und Bodenzuständen erfassen zu können, wurden berührende (tastende) und berührungslose Messmethoden bzw. Messeinrichtungen eingesetzt.

### 2.1.1 Tastende Arbeitstiefenmessmethode

Folgende tastende Messmethoden bzw. Systeme kamen zum Einsatz:

- „Tastrad\_Linearführung“ (Tastrad aus Kunststoff oder Metall)
- „Taster\_Linearführung“
- „Taststab\_Inkrementalgeber“
- „Taster\_Parallelogrammführung“ (schmäler oder breiter Taster)
- „Tastrad\_Parallelogrammführung“



Abbildung 2: Tastsysteme am Rahmen angebaut

#### 2.1.1.1 „Tastrad\_Linearführung“ (Tastrad aus Kunststoff)

Als Tastrad wurde ein Kunststoffrad mit Gummilauffläche, mit einem Durchmesser von 260 mm und einer Breite von 50 mm verwendet. Dieses Rad wurde mit einer Halterung auf dem Schlitten einer Linearführung befestigt. Der Schlitten hatte einen Verfahrweg von 600 mm

und war in seiner Drehung auf der Welle nicht begrenzt (siehe *Abbildung 3*). Der Abstand zwischen der Oberkante der Linearführung und dem Schlitten wurde mit einem Lasersensor gemessen.

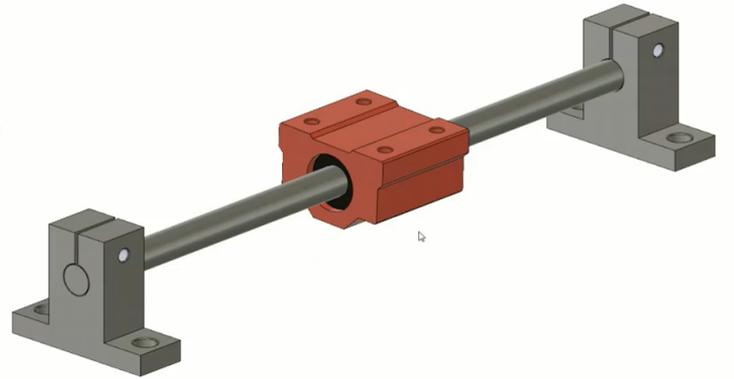


Abbildung 3: Linearführung für Tastradmontage (Fa. cnc-Discount)

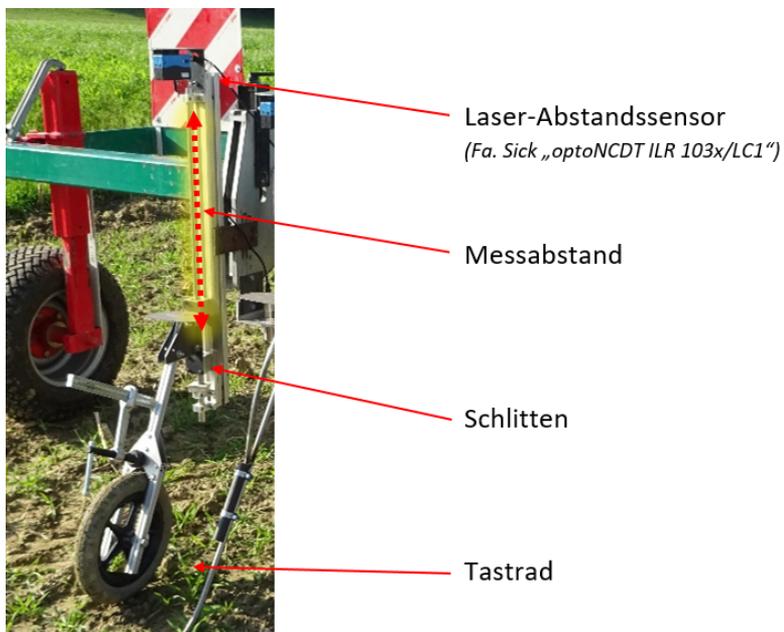
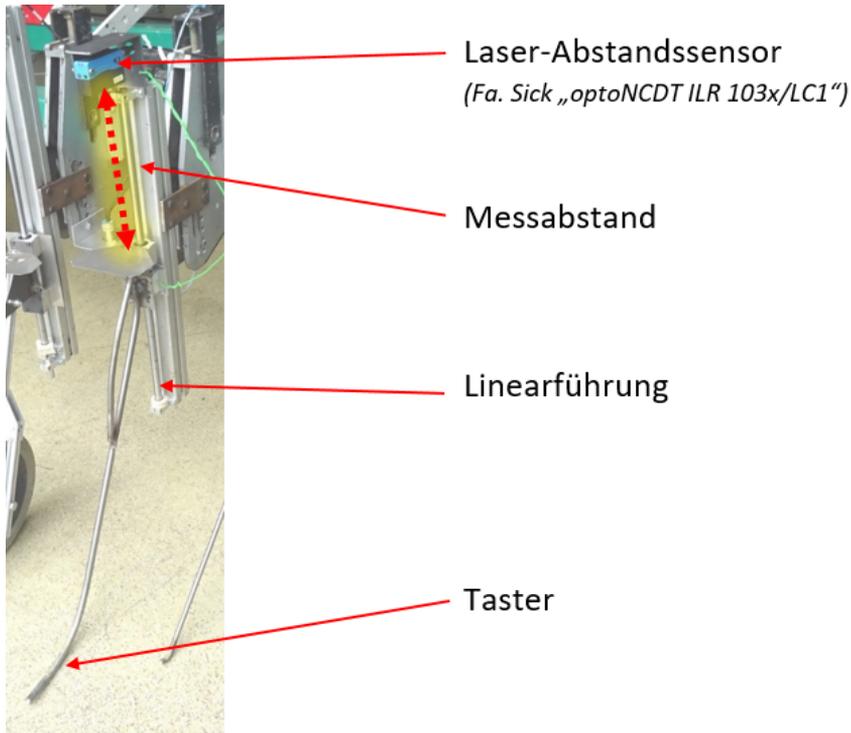


Abbildung 4: Tastrad aus Kunststoff auf einer Linearführung befestigt („Tastrad\_Linearführung“)

Die Bodenabstastung erfolgte mit dem Tastrad. Der Bodenabstand wurde durch einen Laserabstandssensor gemessen (Fa. Sick „optoNCDT ILR 103x/LC1“) gemessen.

### 2.1.1.2 „Taster\_Linearführung“

Die konstruktive Ausführung des „Taster\_Linearführung“ war identisch mit dem Sensor „Tastrad\_Linearführung“. Als Führungselement für den Taster wurde wiederum die Linearführung (siehe *Abbildung 3*) verwendet. Anstelle des Tastrades wurde ein Taster aus Rundstahl mit 12 mm Durchmesser an die Linearführung befestigt.



*Abbildung 5: Taster auf einer Linearführung befestigt  
„Taster\_Linearführung“*

Die Bodenabstastung erfolgte mit dem Taststab, die Distanzmessung wie bei der „Tastrad\_Linearführung“ mit einem Laser-Distanzsensor (Fa. Sick „optoNCDT ILR 103x/LC1“) gemessen.

### 2.1.1.3 „Taststab\_Inkremental“

Diese Messeinrichtung bestand aus einem 70 cm langen Taststab (Rundstahl 10 mm), der in einem Winkel von 30° auf dem Boden auflag und drehbar an einem Inkrementalgeber (Encoder) befestigt war. Der Taststab wurde bei diesem Versuchsaufbau über den Boden gezogen.

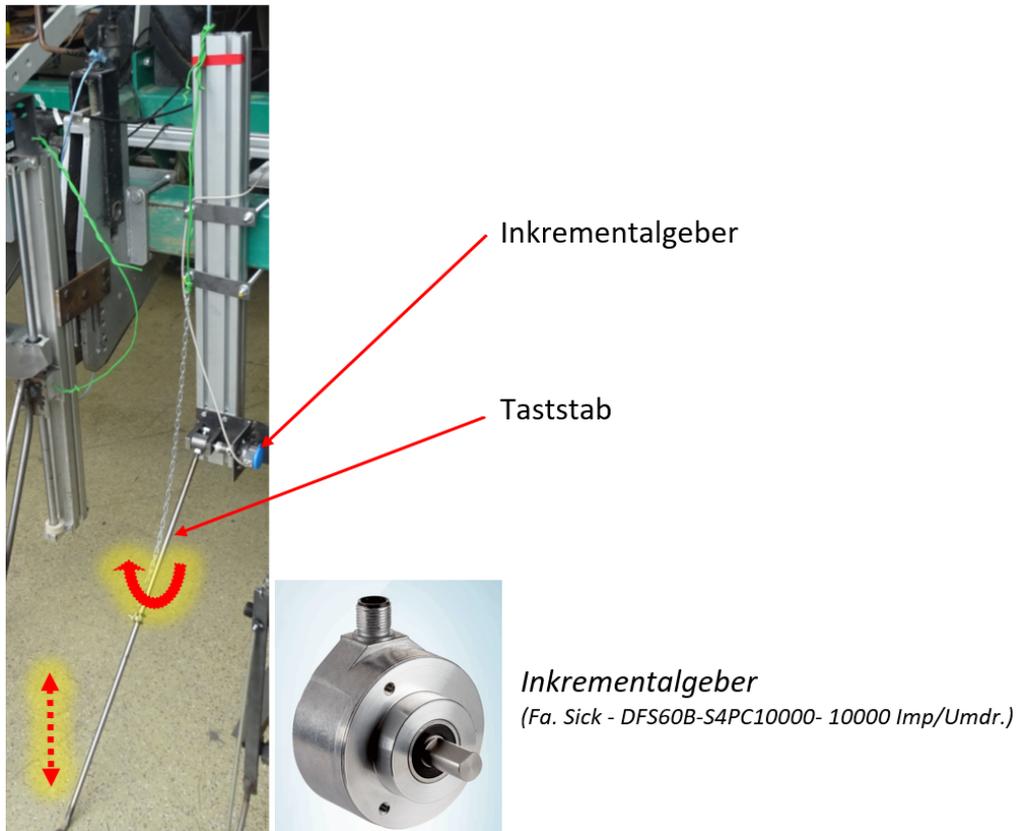


Abbildung 6: Taststab auf einem Inkrementalgeber befestigt „Taststab\_Inkrementalgeber“

#### 2.1.1.4 „Taster\_Parallelogrammführung“ bzw. „Tastrad\_Parallelogrammführung“

Mit einer Parallelogrammführung konnten drei verschiedene Tasterausführungen getestet werden. An der Parallelogrammführung konnten ein Tastbügel mit 8 mm Durchmesser, ein Tastschuh aus Flachstahl mit 50 mm Breite und ein Tastrad aus Metall ausgewechselt werden. Der Bodenabstand wurde mit zwei verschiedener Laserabstandssensoren gemessen. Zu Einsatz kamen ein Lichtlaufzeitlaser (Fa. Ifm - O1D120 - O1DLF3KG) und ein Triangulationslaser (Fa. Baumer - OM30-L0350.HV.YIN) wurden dabei eingesetzt. Mit dem schmalen und dem breiten Taster sowie dem Metallrad konnte für unterschiedliche Boden- bzw. Bodenoberflächenverhältnisse das geeignete Verfahren gefunden werden. Für einen unbearbeiteten Boden bzw. eine Bodenoberfläche mit Pflanzenbewuchs wurde der schmale 8 mm Taster und für einen fein bearbeiteten krümeligen Boden war der breite Taster mit 50 mm Taster bzw. das Tastrad vorgesehen.

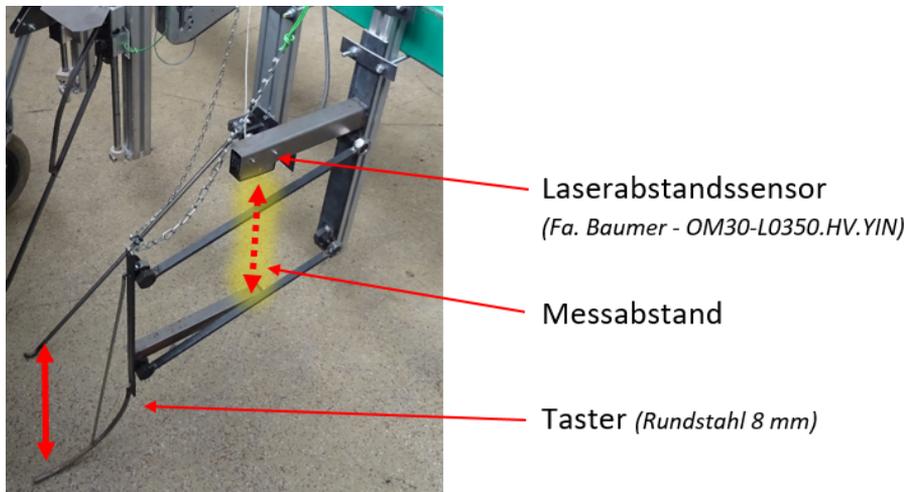


Abbildung 7: Taster aus Rundstahl mit 8 mm Durchmesser auf der Parallelogrammführung „Taster\_Parallelogrammführung“

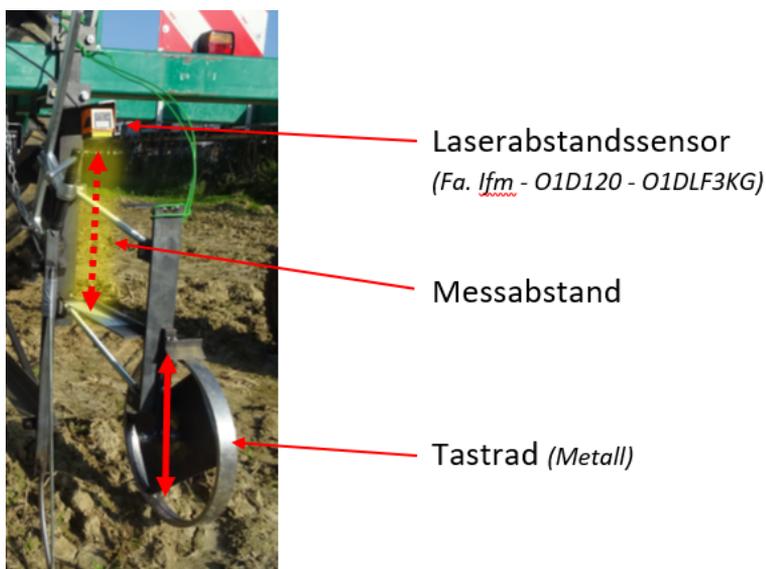


Abbildung 8: Tastrad aus Metall auf der Parallelogrammführung „Tastrad\_Parallelogrammführung“

### 2.1.2 Berührungslose Arbeitstiefenmessung

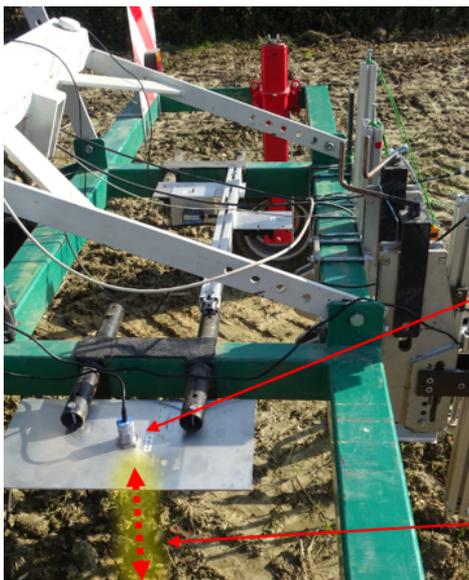
Für die Abstandsmessung wurde neben dem mechanischen Abtastverfahren auch berührungslose Messmethoden eingesetzt. Dabei wurde die Distanz nicht indirekt über eine Vorrichtung, sondern am Boden gemessen.

- „Ultraschallsensoren“ (Honeywell und Baumer)
- „Lasersensor\_direkt am Boden“ (Sick)

- „Lasersensor\_direkt am Boden600“ (Baumer)
- „Lasersensor\_direkt am Boden1500“ (Baumer)
- „Radarsensor“ (Baumer)

### 2.1.2.1 Ultraschall-Abstandssensoren

Die Sensoren wurden in einer Höhe von ca. 800 mm Höhe über dem Boden am Trägerrahmen befestigt und direkt auf den Boden ausgerichtet. Es wurden zwei Ultraschallsensoren (Fa. Baumer und Fa. Honeywell) unterschiedlicher Hersteller kamen bei den Versuchen zum Einsatz.



Ultraschallsensor  
(Fa. Honeywell – Ultrasonic Serie 940 / 150...1200 mm)

Messabstand

Abbildung 9: Ultraschallsensor direkt auf den Boden gerichtet  
„Ultraschallsensor“ (Honeywell)



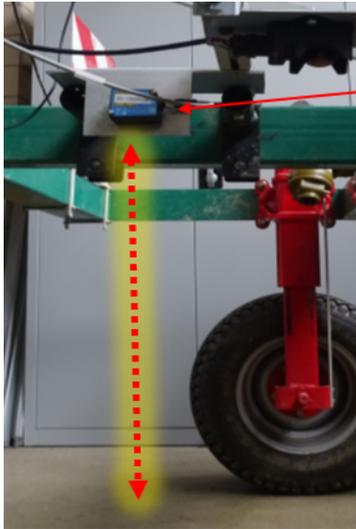
Ultraschallsensor  
(Fa. Baumer - UR18.DA0.2-11200642 / 70...1000 mm)

Messabstand

Abbildung 10: Ultraschallsensor direkt auf den Boden gerichtet  
„Ultraschallsensor“ (Baumer)

### 2.1.2.2 Laser-Abstandssensoren

Drei verschiedene Lasersensoren wurden in unterschiedlichen Höhen am Tragrahmen montiert und ihr Messtrahl direkt auf den Boden gerichtet.



Lasersensor

(Fa. Sick - DT35-B15551- Mid-Range-Distanzsensor / 50...12000 mm, 166Hz, 90 % Remission)



Abbildung 11: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet  
„Laser\_direkt am Boden“ (Sick)



Lasersensor

(Fa. Baumer - OM30-L0350.HV.YYIN / 100...600 mm, 5kHz)



Abbildung 12: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet  
„Laser\_direkt am Boden600“ (Baumer)

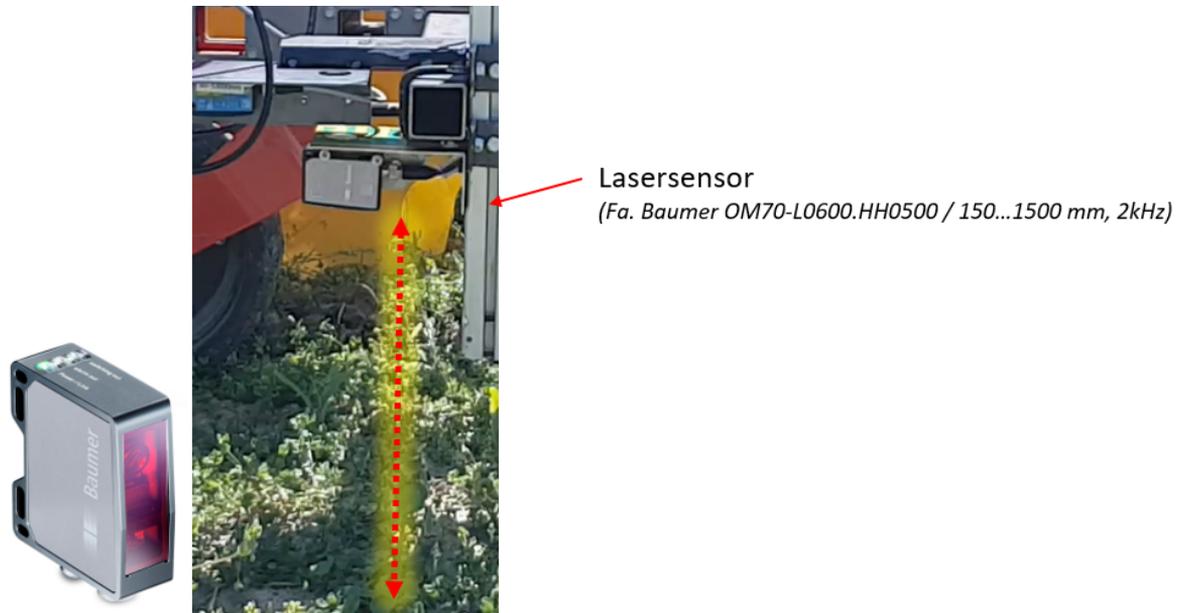


Abbildung 13: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet  
„Laser\_direkt am Boden1500 (Baumer)“

### 2.1.2.3 Radarsensoren (Off-Highway-Radarsensor)

Der Radarsensor ist ein sogenannter Multiobjektsensor mit zwei Signalausgängen. Ein Signalausgang misst den Abstand zur Bodenoberfläche. Dabei durchringt er den Pflanzenbestand bei geringer Bestandesdichte. Ein zweiter Signalausgang misst die Pflanzenhöhe bzw. die Höhe des Pflanzenbestandes.

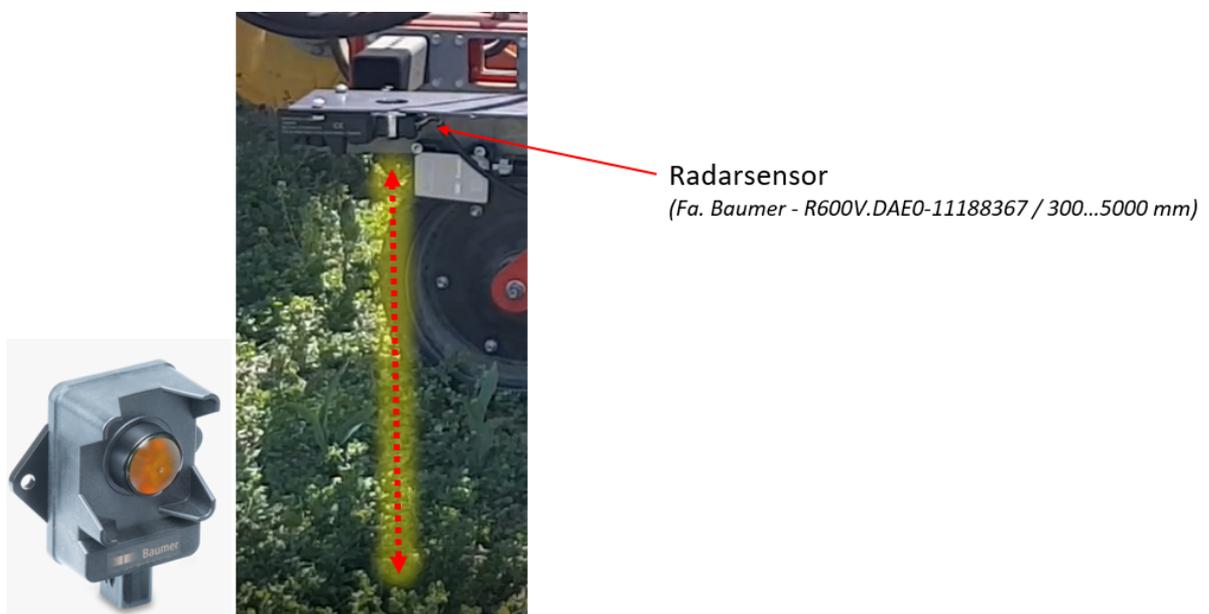


Abbildung 14: Radarsensor direkt auf den Boden gerichtet, zur Messung der Pflanzenhöhe und des Bodenabstandes „Radar\_Pflanzenhöhe“ und „Radar\_Bodenoberfläche“

## 2.2 Messaufbau, Messwerterfassung und Verarbeitung

Die verschiedenen Sensoren bzw. Messverfahren zur Erfassung der Bearbeitungstiefe wurden auf einem auf Stützrädern laufenden Montagerahmen montiert. Somit konnten alle Abstandsmesssysteme bzw. Tiefenmesssysteme gleichzeitig unter gleichen Einsatzbedingungen getestet werden. Da der Radarsensor nicht nur den Abstand zur Bodenoberfläche, sondern auch die Pflanzenhöhe bzw. Bestandeshöhe erfassen kann, wurde im Zuge dieser Versuche auch die Erfassung der Bestandeshöhe (Grünland und Grasbestände) in die Versuche integriert.

Die Montage der einzelnen Messmethoden am Trägerrahmen erfolgte in der Mitte des Rahmens in unmittelbarer räumlicher Nähe. Somit hatten alle Sensoren annähernd gleiche Bedingungen und eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Messmethoden war gegeben.

Die Messwerterfassung erfolgte mit dem „Cronos SL“ der Fa. imc mit Messraten von 500 Hz und 1 kHz. Da die Messdaten häufig sehr große Ausreißer in beide Richtungen aufwiesen, wurde bei der Auswertung mit Hilfe der Auswertesoftware (imc „Famos“) eine Steilheitsbegrenzung der Messwerte durchgeführt. Dabei wurden Signale aus den Datensätzen herausgefiltert, die aufgrund der physikalisch begrenzten Änderungsgeschwindigkeit des Signals nicht gültig sein konnten. Anschließend erfolgte eine Tiefpassfilterung und daraus die Bildung eines gleitenden Mittelwertes, der für die nachfolgenden Darstellungen und Auswertungen der Versuche herangezogen wurde.



Abbildung 15: Sensoren auf dem Trägerrahmen montiert

## 3 Ergebnisse der Versuche

Die ersten Versuchsfahrten wurden ohne Zusatzgewichte an den Tastsensoren durchgeführt. Die Taster begannen bei dem Auftreffen auf Unebenheiten mehr oder weniger zu springen und den Bodenkontakt zu verlieren. Dieser Effekt wurde später durch das Anbringen von Zusatzgewichten auf den Tastern behoben bzw. stark abgeschwächt.



Abbildung 16: Tastende Sensoren ohne Zusatzgewichte

### 3.1 Tastsensoren ohne Zusatzgewichte

Die Fragestellung bei dieser Versuchsanstellung war, ob die Sensoren die Bodenoberfläche trotz dichter Vegetation und bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten erfassen können. Die Wiese wurde mit einer Fahrgeschwindigkeit von 3 und 8 km/h befahren. Der Grasbestand hatte eine Höhe von ca. 140 mm. Wie in Abbildung 17 zu sehen ist, konnten sowohl die tastenden als auch die berührungslosen Sensoren, aufgrund des dichten Grasbestandes die Bodenoberfläche nicht erfassen. Bei unterschiedlicher Grasdichte, wurden die tastenden Sensoren mehr oder weniger von den Grashalmen getragen. Die berührungslosen Sensoren konnten den Grasbestand nicht durchdringen. Die Höhe des Pflanzenbestandes wurde durch den Sensor „Radar\_Pflanzenhöhe“ sehr gut wiedergegeben.

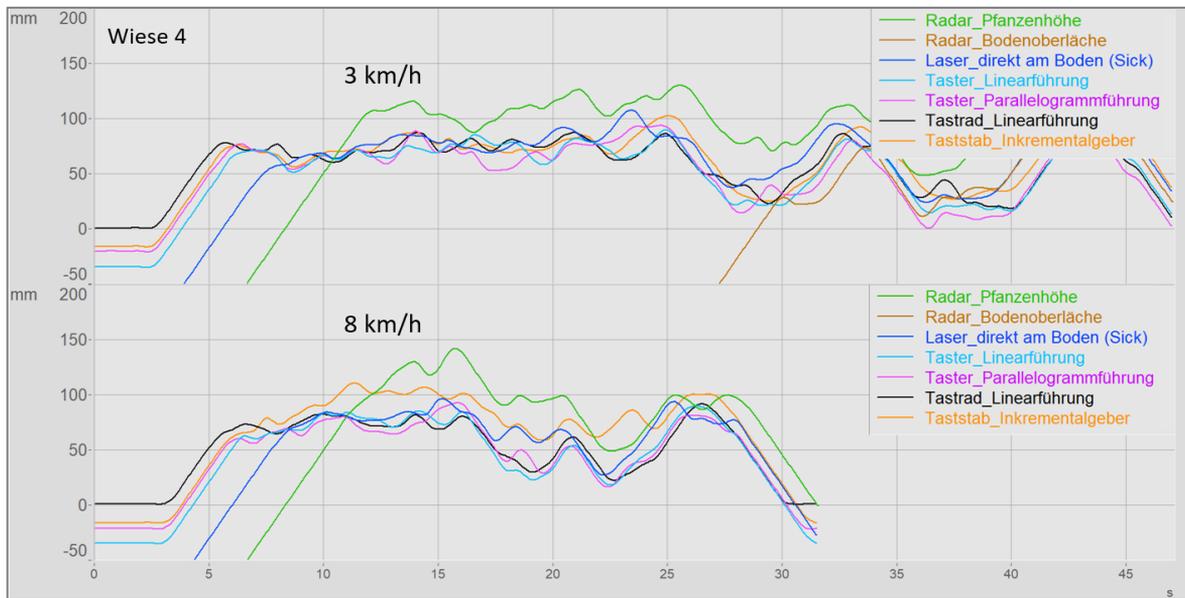


Abbildung 17: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 und 8 km/h

Bei einem weiteren Versuch in einem höheren Grasbestand (Abbildung 18), zeigte sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 17, dort wurde auf der gleichen Fahrspur mit 3 km/h in beide Fahrrichtungen gefahren.

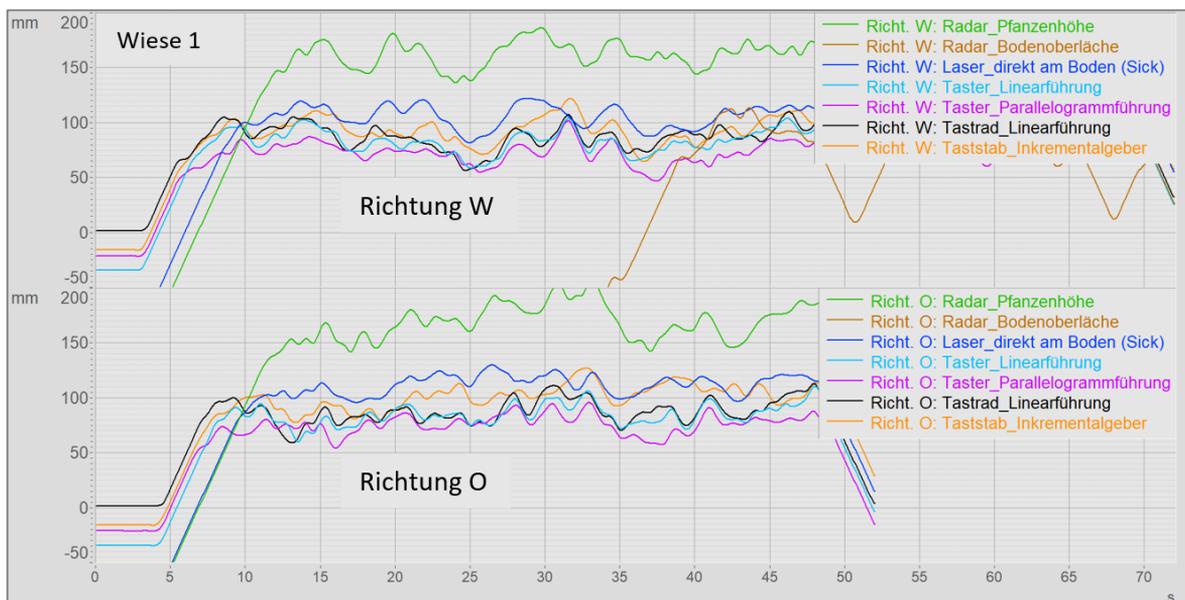


Abbildung 18: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 km/h (selbe Fahrspur)

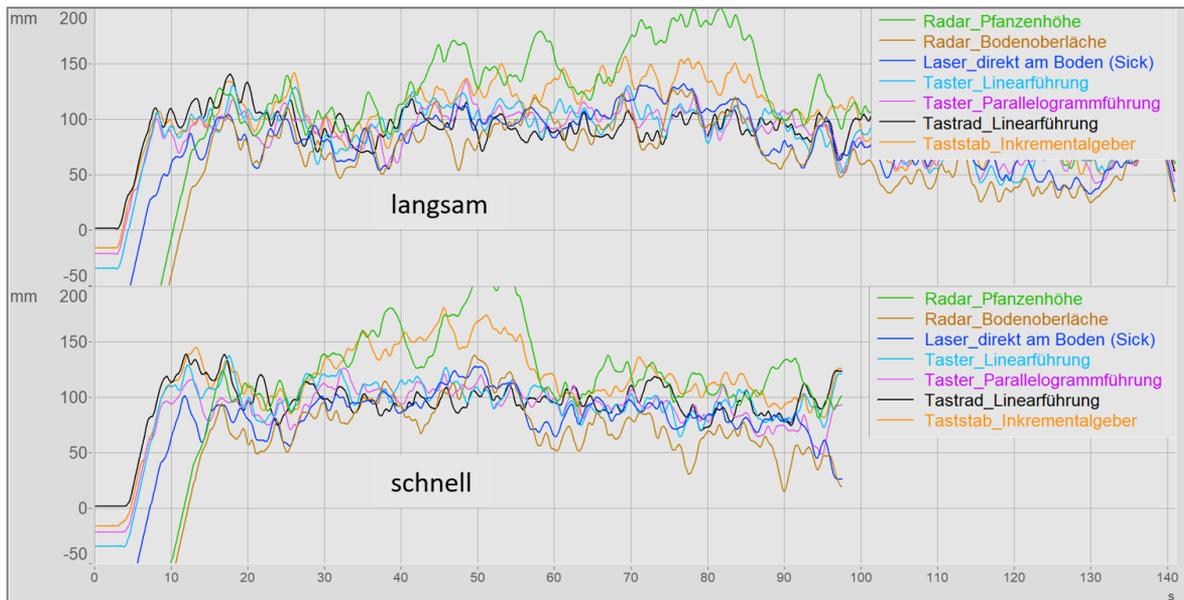


Abbildung 19: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einem abgeernteten Maisfeld (Silomais) mit 3 und 8 km/h

Die *Abbildung 19* zeigt die Fahrten über ein abgeerntetes Silomaisfeld, mit starken Unebenheiten, bei langsamer und schneller Fahrt. Die starke Anregung des Fahrgestells und der Sensoren durch den unebenen Boden ist deutlich zu erkennen. Tastende Messverfahren, ohne Zusatzgewichte sind hier für die Bodenabtastung nicht geeignet sind.

### 3.2 Tastsensoren mit Zusatzgewichte

Die starke Anregung der Taster (Springen) beim Auftreffen auf Unebenheiten konnte durch das Anbringen von Zusatzgewichten in Form von Metallstücken oder Schraubzwingen deutlich reduziert werden.

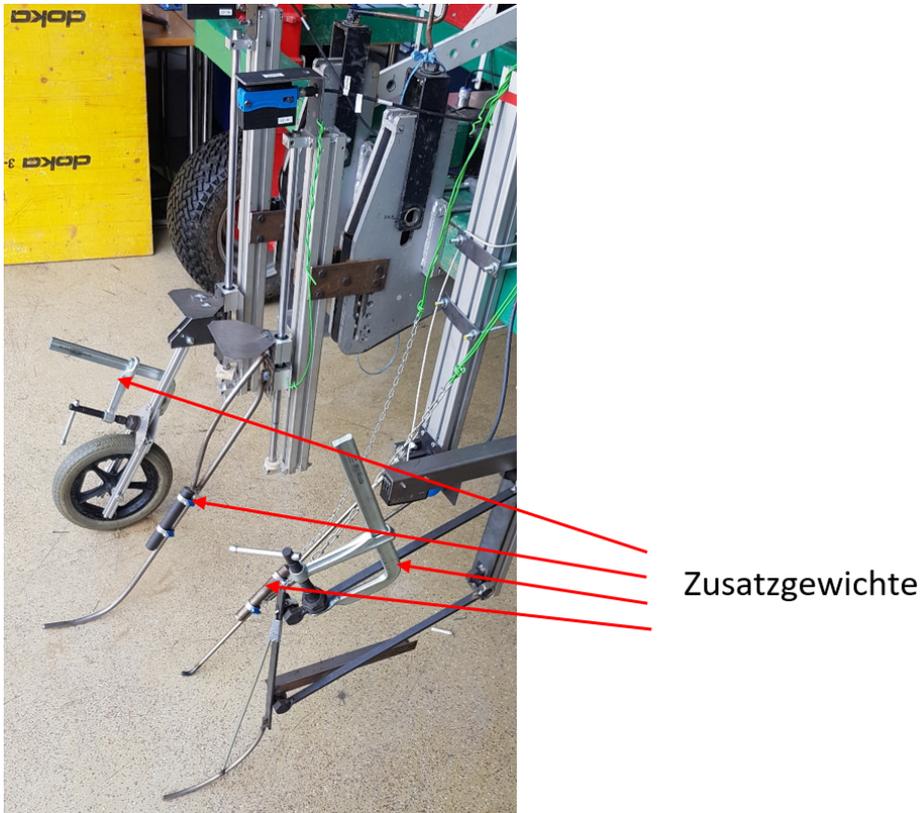


Abbildung 20: Tastende Sensoren mit Zusatzgewichte (Schraubzwingen, Metallstücke)

Die Versuchsfahrten wurden auf einer Wiese mit ca. 3 km/h durchgeführt. Der Versuch sollte zeigen, welchen Einfluss die schwereren Taster auf die Bodenangepassung bei dichtem Pflanzenbestand (Höhe 8 - 10 cm) haben.



Abbildung 21: Grasbestand für die Versuche mit den Zusatzgewichte auf den Tastern

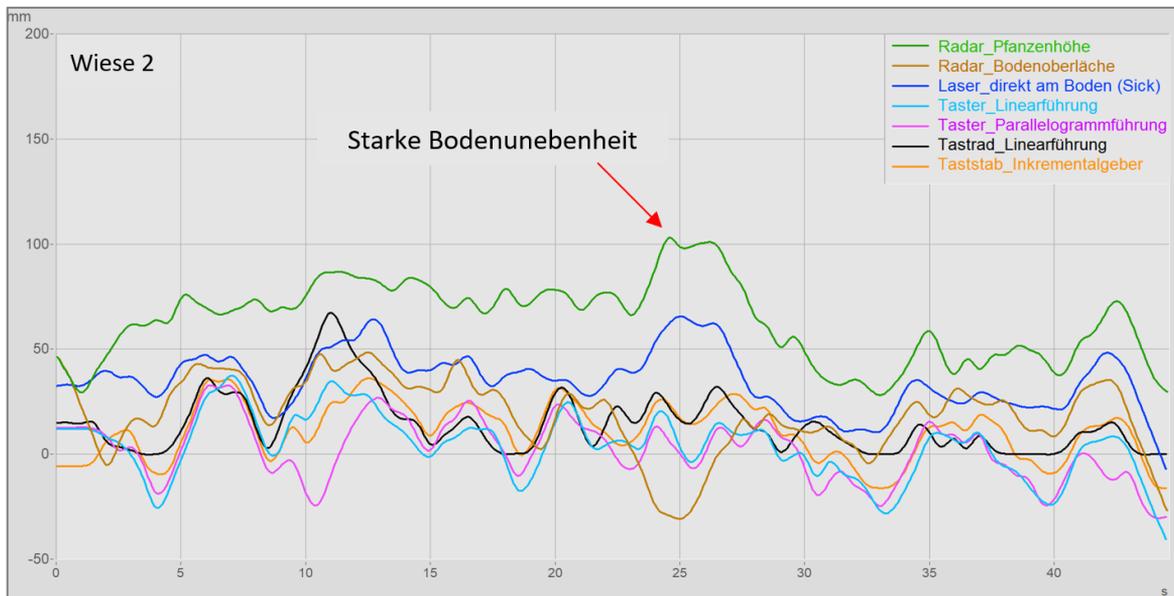


Abbildung 22: Tastende Systeme mit Zusatzgewichten auf der Wiese bei 3 km/h

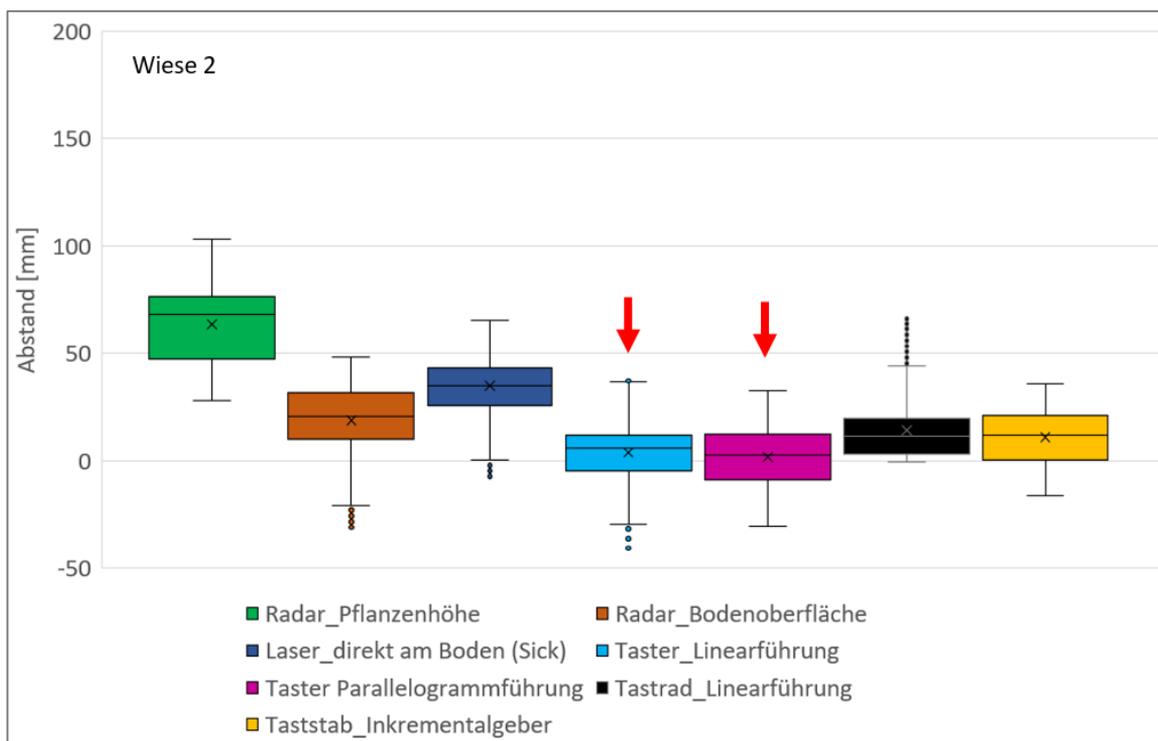
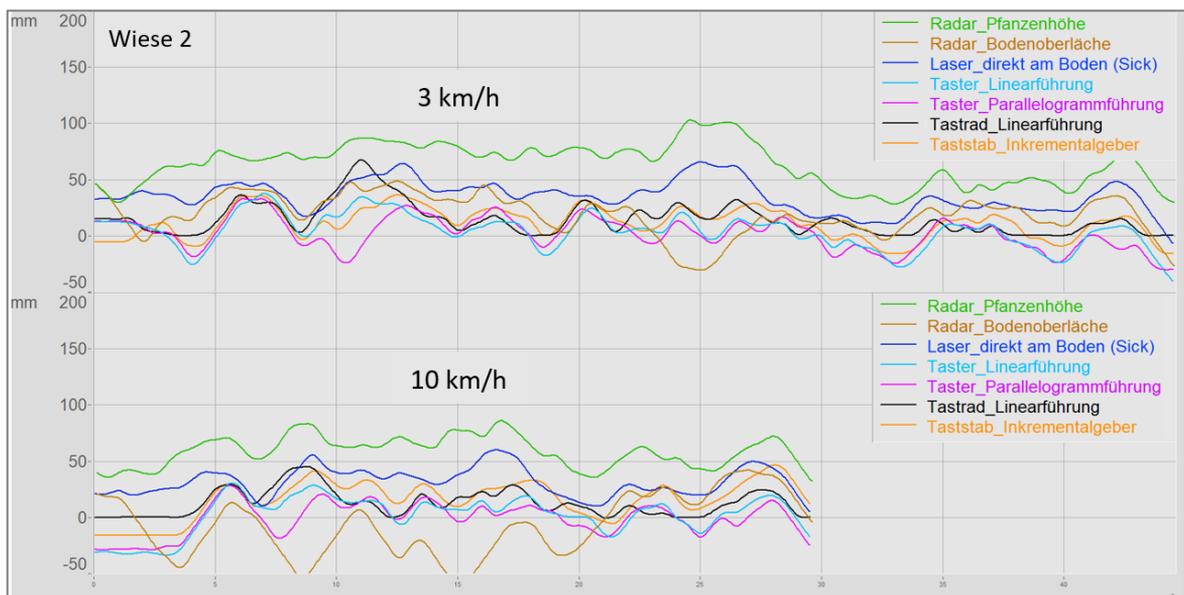


Abbildung 23: Tastende Systeme mit Zusatzgewichten auf der Wiese (Abbildung 22) bei 3 km/h

Durch die flächenhafte Abtastung des Radarsensors konnte die Pflanzenhöhe sehr gut abgebildet werden. Eine Durchdringung des Pflanzenbestandes mit dem Radarsignal „Radar\_Bodenoberfläche“, war bei dieser Bestandesdichte nicht möglich (siehe *Abbildung 23*). Ein ähnlicher Verlauf wie beim Sensor „Radar\_Pflanzenhöhe“, jedoch mit

einem Offset, lieferte der „Laser\_direkt am Boden“ (Sick). Da der Pflanzenbestand keine homogene Oberfläche darstellt und der Laserstrahl punktförmig misst, drang der Laserstrahl tiefer in den Pflanzenbestand ein und erfasste eine so genannte vermeintliche Pflanzenoberfläche. Aufgrund der höheren Eindringtiefe des Laserstrahls in den Pflanzenbestand war der Abstandsverlauf kleiner als bei „Radar\_Pflanzenhöhe“. Die Abstandswerte der Tastsensoren verliefen alle parallel zueinander. Sie konnten den Pflanzenbestand gut durchdringen und die Bodenoberfläche abbilden. Die besten Ergebnisse lieferten die tastenden Sensoren „Taster\_Linearführung“ und „Taster\_Parallelogrammführung“. Die berührungslosen Sensoren zur Erfassung der Bodenoberfläche, sind für Flächen mit dichtem Grasbewuchs nicht geeignet. Die großen Schwankungen der Messwerte sind auf die Anregung des Rahmens durch die Bodenunebenheiten zurückzuführen.

In *Abbildung 24* sind die Fahrten mit der Geschwindigkeit 3 km/h und 10 km/h dargestellt. Die höhere Fahrgeschwindigkeit hatte nur einen geringen Einfluss auf den Signalverlauf. Für den Sensor „Radarsensor\_Bodenoberfläche“ war die Geschwindigkeit von 10 km/h zu hoch. Die manuell gemessene Pflanzenhöhe betrug ca. 8 cm, was vom Sensor „Radar\_Pflanzenhöhe“ gut abgebildet werden konnte.



*Abbildung 24: Tastende Systeme mit Zusatzgewichte (3 und 10 km/h)*

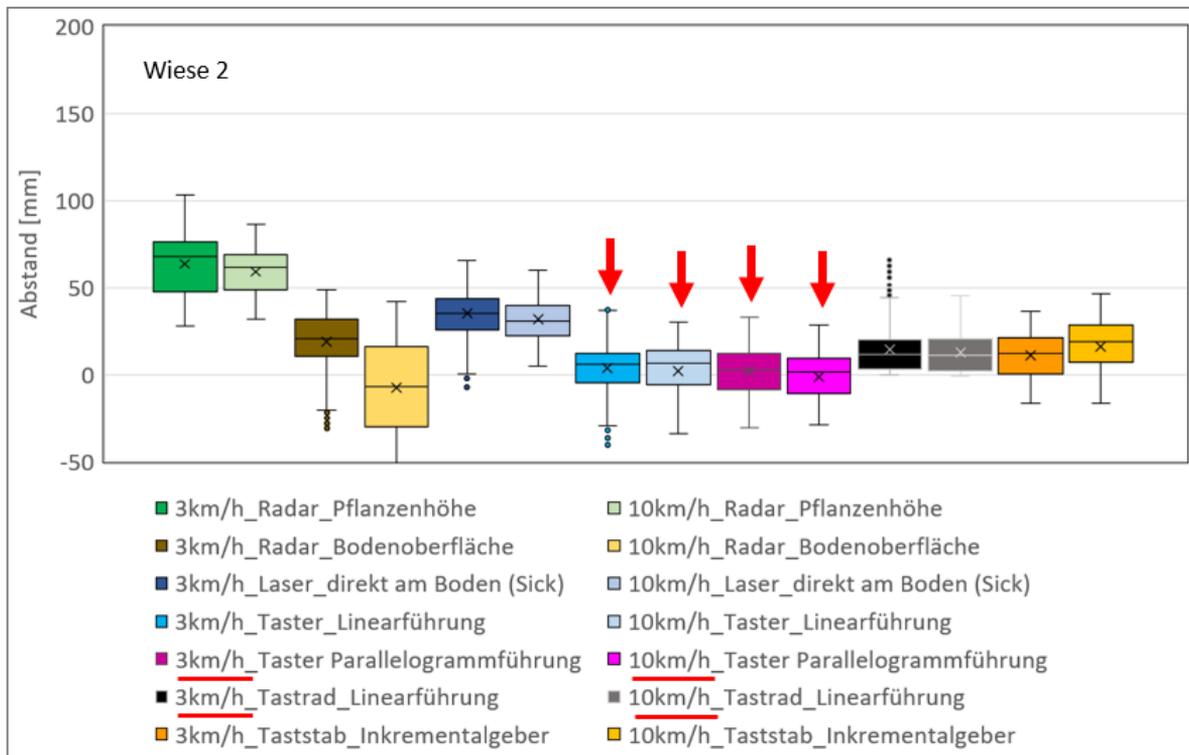


Abbildung 25: Tastende Systeme mit Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 und 10km/h

Die Sensoren „Taster\_Linearführung“ und „Taster\_Parallelogrammführung“ konnten die Bodenoberfläche am besten abbilden.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Versuche wurden die weiteren Versuche mit Zusatzgewichten durchgeführt.

### 3.3 Messungen auf verschiedenen Untergründen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten

Abbildung 26 fasst die Messungen auf einer Wiese bei 3 und 10 km/h zusammen. Auch hier zeigte das Radar die Bestandeshöhe bei beiden Fahrgeschwindigkeiten sehr realistisch an. Die Bodenoberfläche konnte bei 3 km/h mit „Tastrad\_Linearführung“, „Laser\_direkt am Boden (Sick)“, „Taster\_Linearführung“, „Taststab\_Inkrementalgeber“ (Taststab) und wenn auch nicht ganz so gut, mit Ultraschall gut dargestellt werden. Der „Ultraschall (Baumer)“, „Taster\_Parallelogrammführung“ und „Tastrad\_Parallelogrammführung Metallrad“ lagen überwiegend im negativen Bereich. Bei 10 km/h zeigten „Tastrad\_Linearführung“, „Taster\_Linearführung“ und „Taststab“ die besten Werte. Für „Ultraschall (Baumer)“, „Radar\_Bodenoberfläche“, „Laser\_direkt am Boden (Sick)“,

„Taster\_Parallelogrammführung“ und „Taster\_Parallelogramm Metallrad“ war 10 km/h zu schnell um verwertbare Daten liefern zu können.

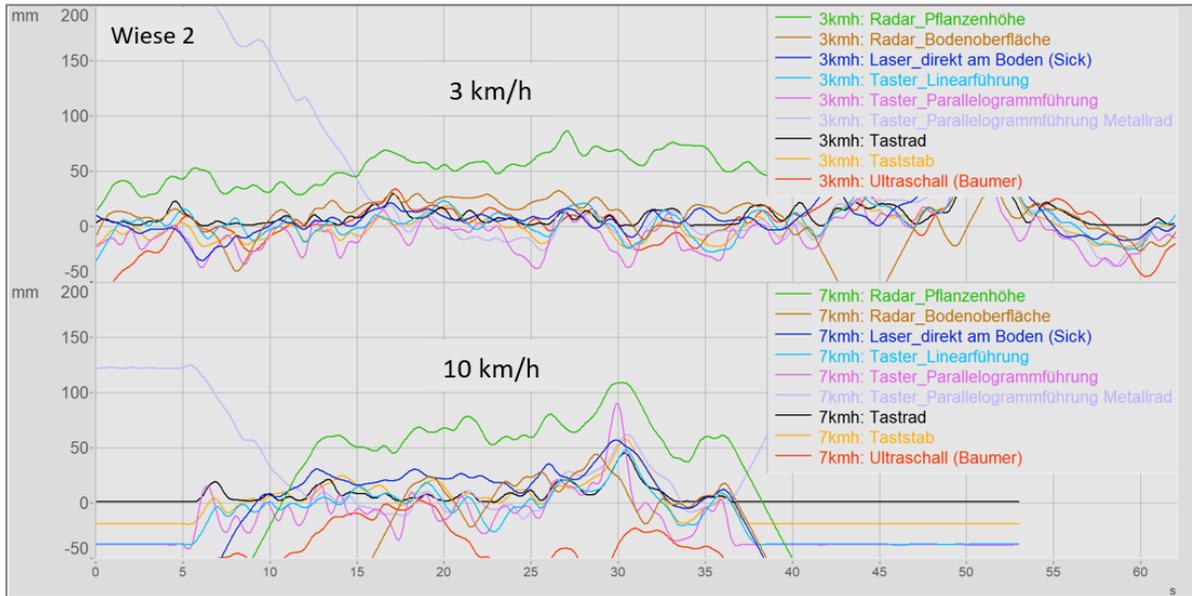


Abbildung 26: Alle Sensoren auf einer Wiese mit 3 und 10 km/h

Abbildung 27 zeigt die Versuchsfahrt auf sehr unebenen Wiesenboden. Die Anregung durch die Stützräder am Fahrwerk war sehr stark (siehe Pfeile). Trotzdem lieferten die tastenden Sensoren bei diesem Versuch die besten Ergebnisse.

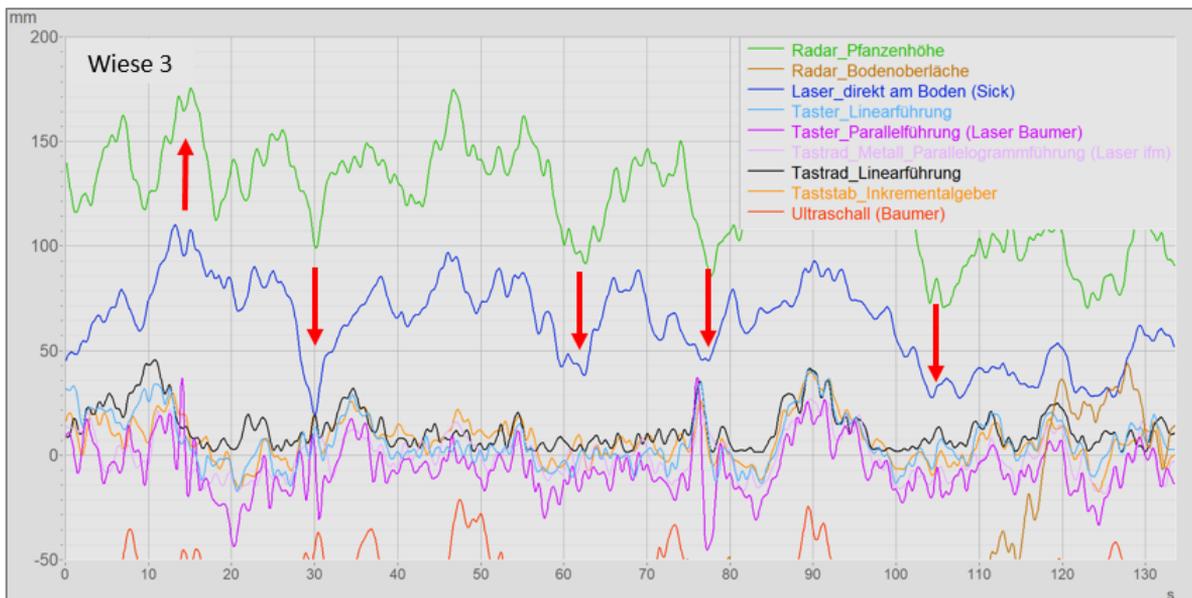


Abbildung 27: Alle Sensoren auf einer Wiese (4 km/h)

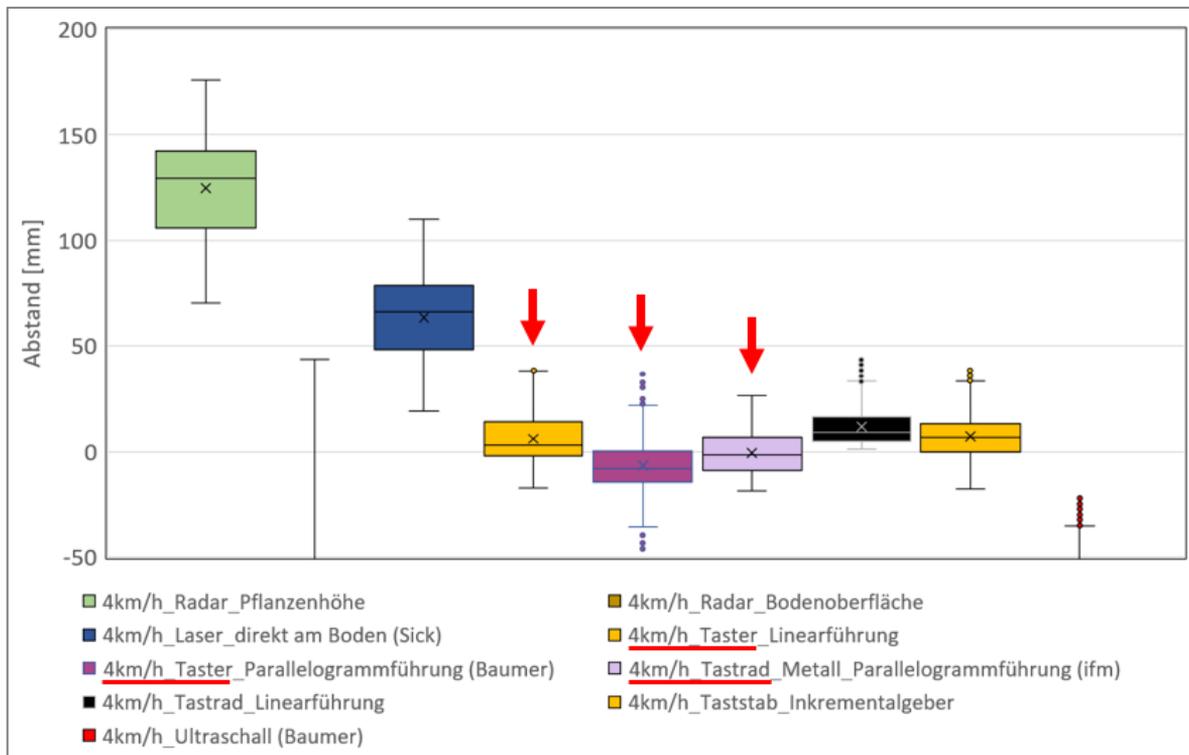


Abbildung 28: Fahrt über eine Wiese mit 4 km/h

Der „Taster\_Parallelogrammführung (Baumer) war mit einem Trilaterationslaser und das „Tastrad\_Metall\_Parallelogrammführung (ifm)“ war mit einem Lichtlaufzeitlaser ausgestattet. Mit Ausnahme von „Laser\_direkt am Boden“ (Sick) konnten alle Sensoren die Bodenoberfläche sehr gut abbilden. Ein weiterer Versuch auf der gleichen Spur mit 10 km/h zeigte ähnliche Ergebnisse wie bei 4 km/h (Abbildung 28).

Bei einer Messung auf einem gegrubberten Feld (Abbildung 29) waren durch den Regen die Erdschollen gut zerfallen, der Boden hatte eine konstante Rauigkeit mit leichtem Pflanzenbewuchs. Dadurch lagen fast alle Sensoren im Abstandsbereich 0 - 3 cm (siehe Abbildung 30 und 31).



Abbildung 29: Fahrt über ein gegrubbertes Feld, nach dem Auflauf

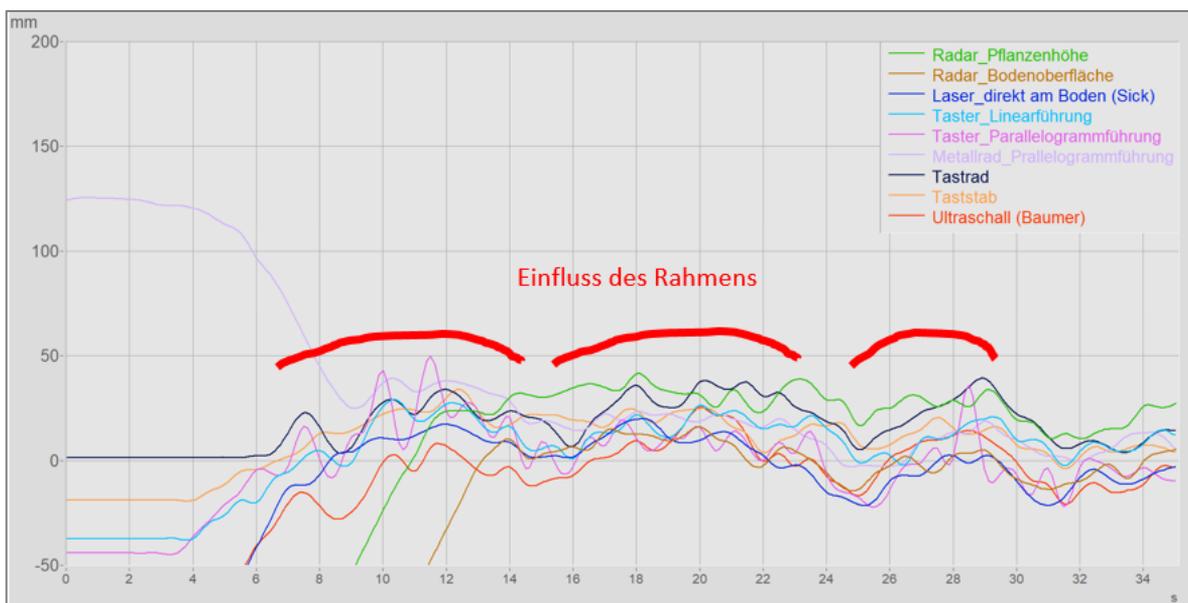


Abbildung 30: Feld gegrubbert, nach dem Auflauf

Bei Bodenbearbeitungsgeräten, die auf Stützrädern (Fahrrahmen) laufen, können die Stützräder einen großen Einfluss auf die Tiefenmessung haben (siehe Abb. 30).

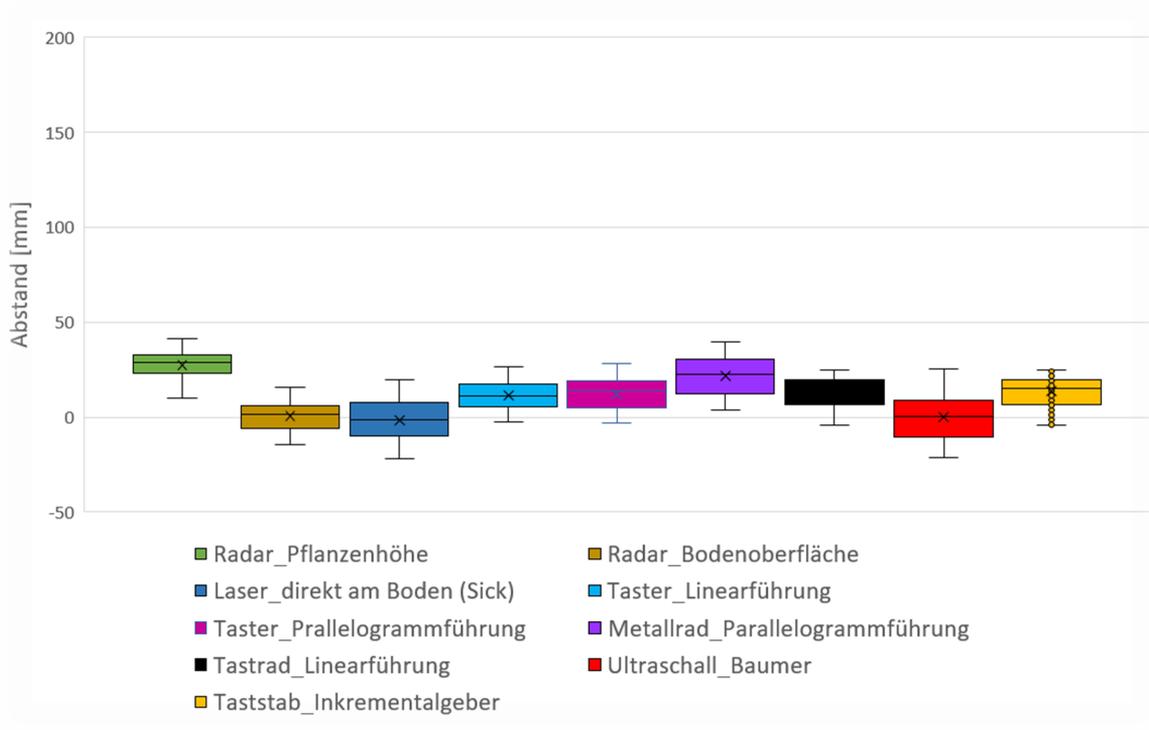


Abbildung 31: Feld gegrubbert, nach dem Auflauf (Auswertung über die Messzeit 16 bis 34 Sek (siehe Abbildung 30))

Bei den in den *Abbildungen 32 und 33* zusammengefassten Versuchen lieferten „Ultraschall\_Honeywell“ und „Radar\_Bodenoberfläche“ keine vernünftigen Messwerte. Sie waren deutlich negativ und sind daher in *Abbildung 33* nicht sichtbar. Die Bestandeshöhe (100 - 150 mm) wurde vom „Radar\_Pflanzenhöhe“ gut erfasst, der „Laser\_direkt am Boden (Sick)“ drangen stärker in den Pflanzenbestand ein. Die Durchdringung des Pflanzenbestandes war jedoch abhängig von der Bestandesdichte. Daher ist der Laser für die Erfassung der Bestandeshöhe nicht geeignet. Der „Taststab\_Inkrementalgeber“ gleitet je nach Bestandesdichte mehr oder weniger auf dem Pflanzenbestand und ist für diese Anforderung nicht geeignet. Die tastenden Sensoren „Taster\_Parallelogrammführung“, „Taster\_Linearführung“ und „Tastrad\_Linearführung“ konnten die Bodenoberfläche trotz des Pflanzenbestandes relativ gut erfassen.

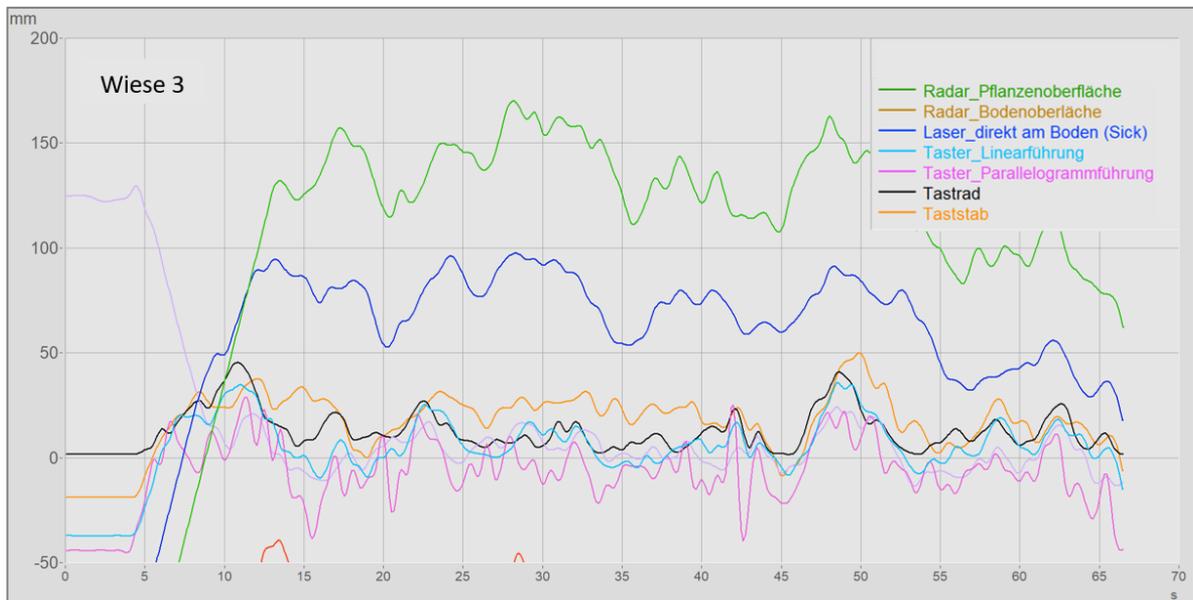


Abbildung 32: Fahrt über die Wiese mit 10 km/h

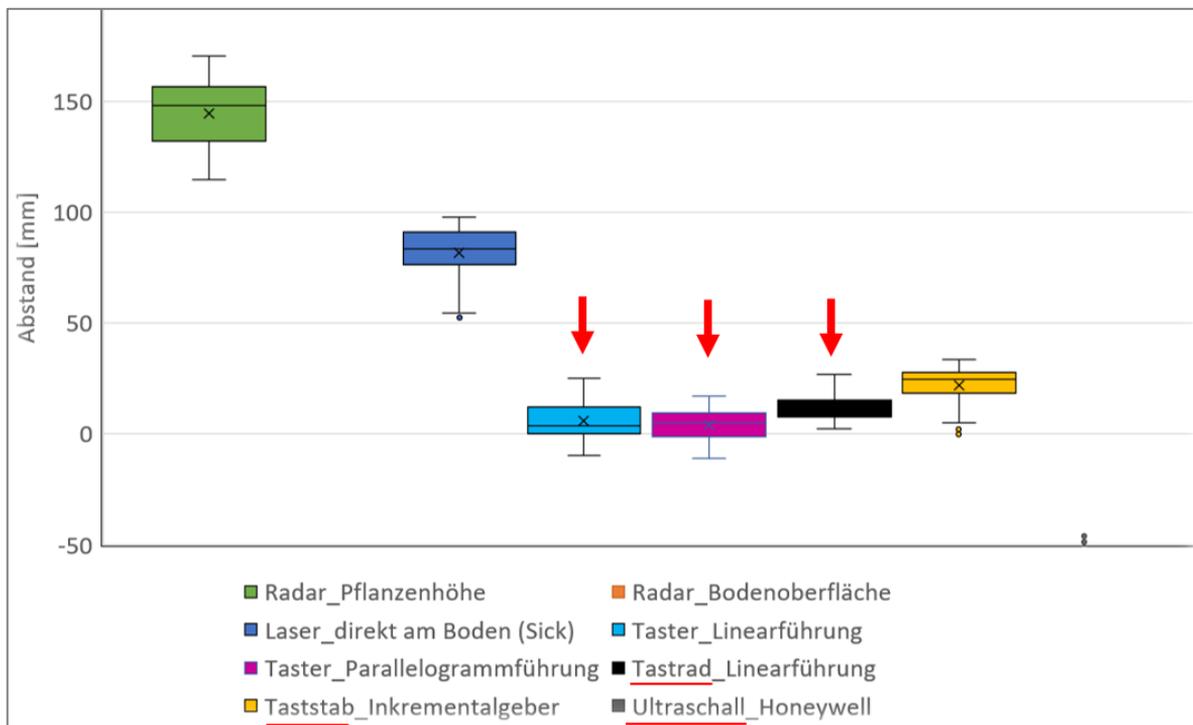
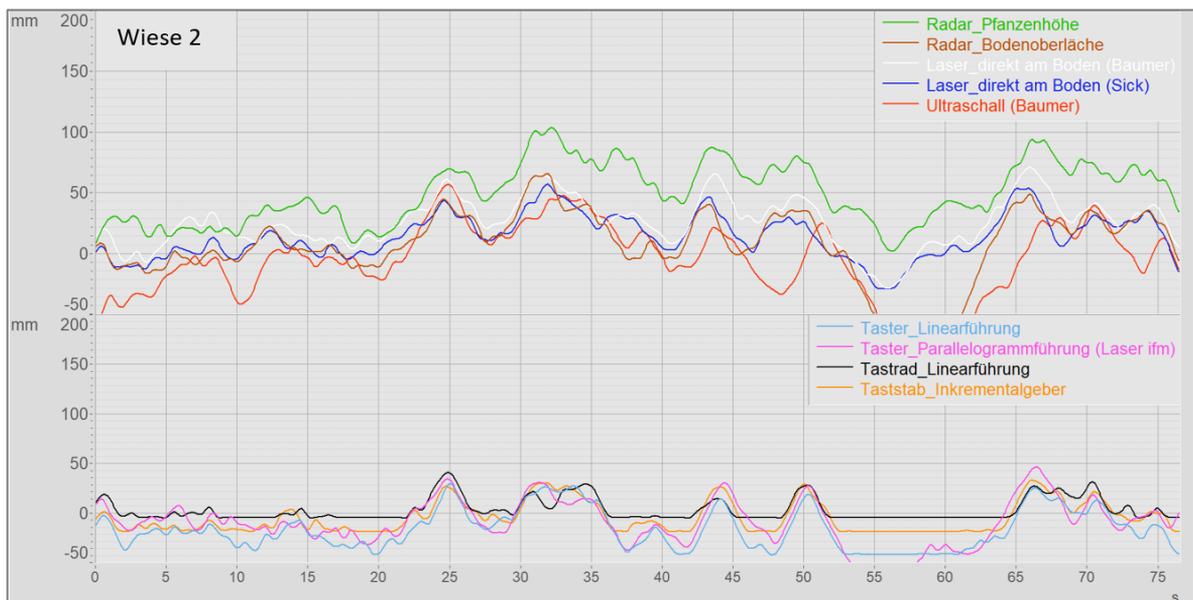


Abbildung 33: Wiese 10 km/h (Auswertung über die Messzeit 10 bis 45 Sek (siehe Abbildung 32))

Wiese 2 wurde zwei Wochen nach der ersten Versuchsfahrt erneut befahren, die in *Abbildung 26* zusammengefasst ist. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 34* getrennt nach berührungslosen (oberer Teil der *Abbildung*) und tastenden Sensoren (unterer Teil der *Abbildung*) dargestellt. Aufgrund der sich ändernden Bestandeshöhe, war eine hohe Dynamik, mit identischem Verlauf der berührungslosen Sensoren zu erkennen. Die tastenden Sensoren verliefen, mit Ausnahme des „Tastrad\_Linearführung“ verliefen häufig unterhalb der Nulllinie. Dies wurde durch die beiden Stützräder des Rahmens verursacht, die auf dem Grasaufwuchs etwas höher liefen. Im kurzen Gras drangen die Taster gut in die Grasanbe ein.



*Abbildung 34: Fahrt über Wiese 2 mit 3 km/h*

Die *Abbildung 35 und 36* zeigen auch die Ergebnisse bei einem kurzen Grasbestand (ca. 8 cm), bei der die Tastsensoren die Bodenoberfläche sehr gut abbilden konnten. Die berührungslosen Sensoren wurden durch den Grasbestand stark abgelenkt.

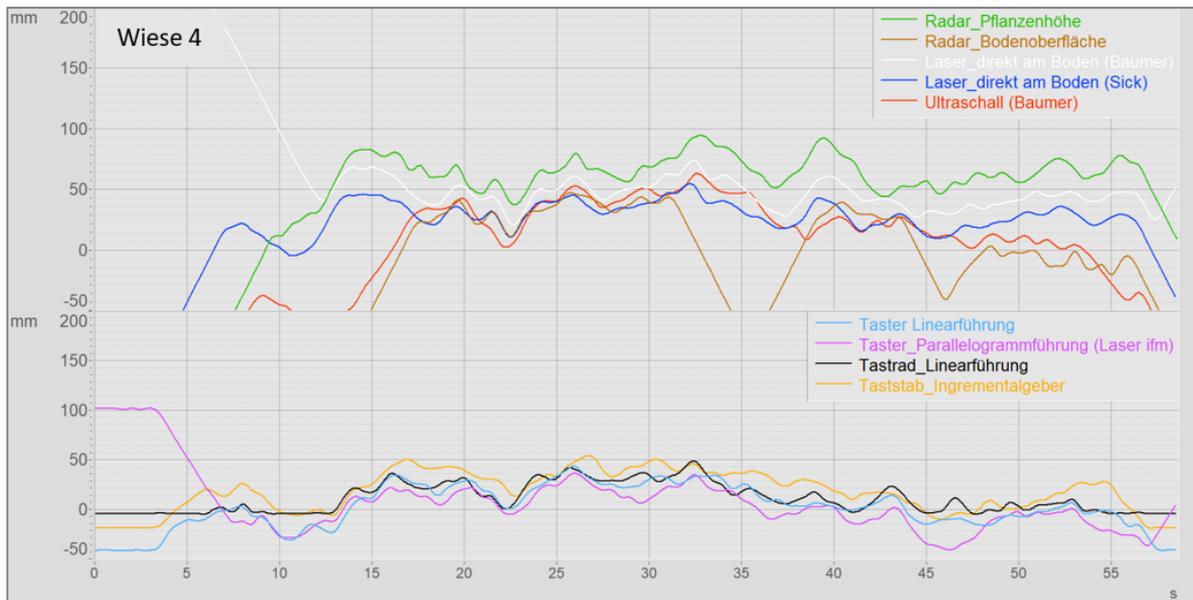


Abbildung 35: Fahrt über eine Wiese mit 8 km/h

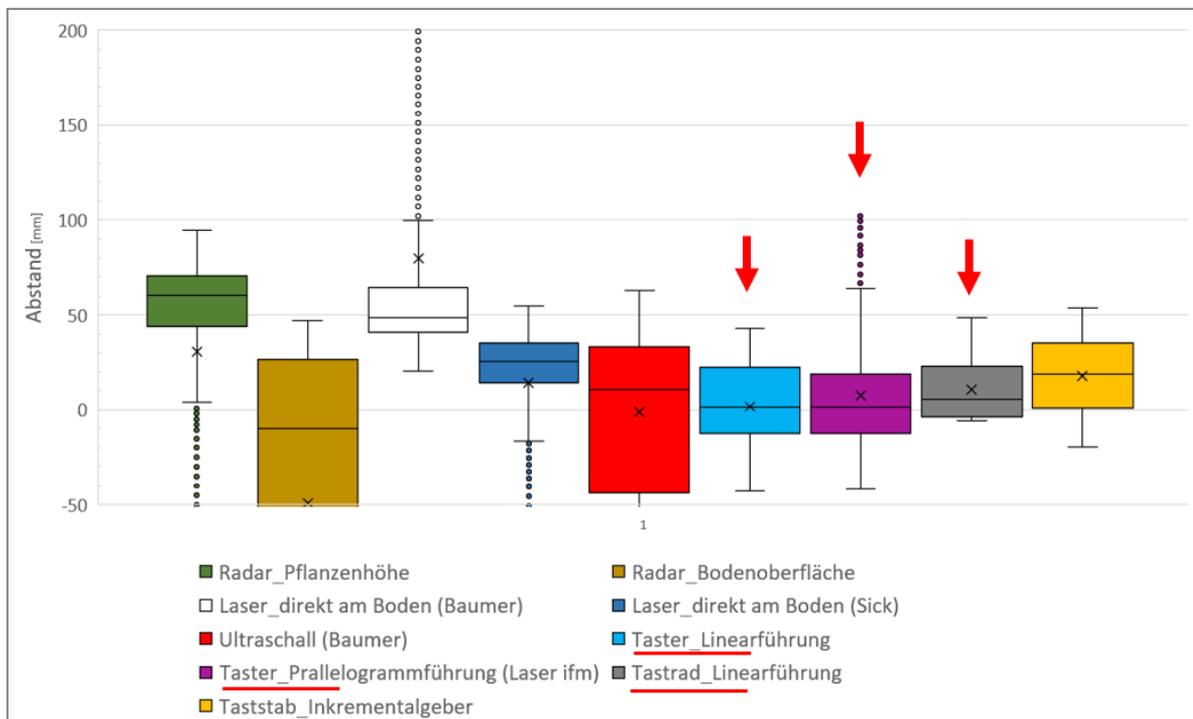


Abbildung 36: Wiese 8 km/h



Taster\_Parallelogrammführung  
(Laser Fa. ifm)

Taster\_Parallelogrammführung  
(Laser Fa. Baumer)

Abbildung 37: Sensoren auf einer Wiese im Einsatz

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die tastenden Sensoren „Tastrad\_Linearführung“, „Taster\_Linearführung“ und die „Taster\_Parallelogrammführung“ mit Zusatzgewichten die Konturen der Bodenoberfläche sehr gut abbilden konnten. Der „Taster\_Inkrementalgeber“ wird durch Bodenunebenheiten stark angeregt und ist daher nicht geeignet. Er kann nur auf sehr homogenen ebenen Flächen eingesetzt werden.

### 3.4 Messungen auf künstlich angelegten Bahnen

Um den Einfluss der Relativbewegungen des Rahmens zu eliminieren, wurde auf einer Betonfläche eine Fahrbahn mit künstlichen Unebenheiten verlegt (siehe Abbildungen 38 und 39). Auf dieser künstlichen Fahrbahn wurden die Sensoren mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten überfahren und die Reaktion der Sensoren auf die Unebenheiten aufgezeichnet. Die Stützräder des Fahrgestells liefen neben den Hindernissen.



Abbildung 38: Künstlich angelegte Bahn mit definierten Unebenheiten

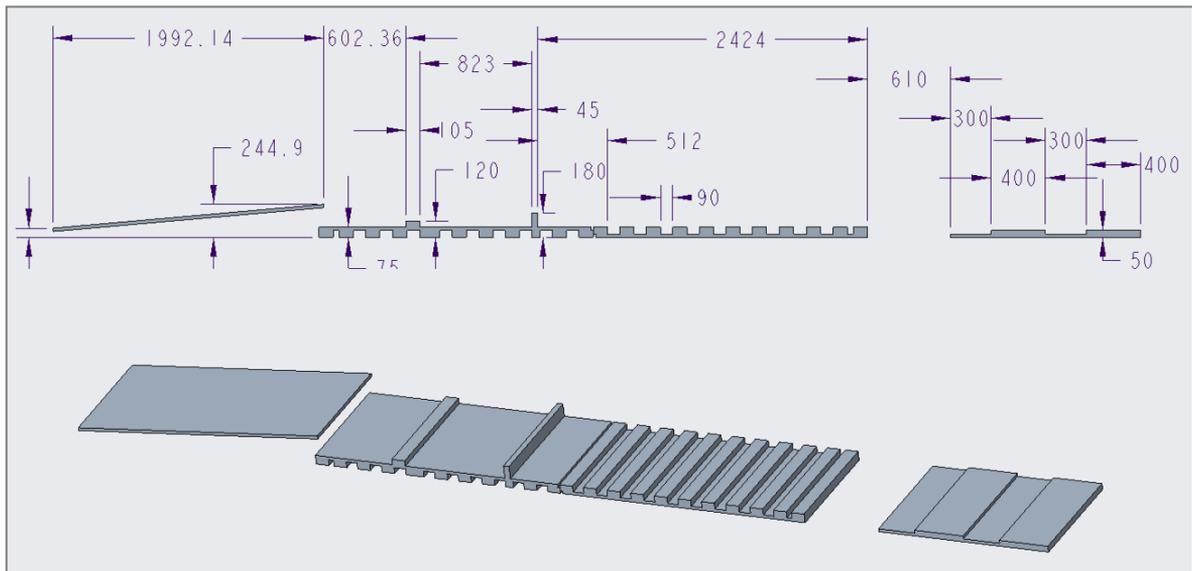


Abbildung 39: Abmessungen der künstlichen Bahn

In *Abbildung 40* sind die Ergebnisse einer Überfahrt mit 1 km/h und 4 km/h dargestellt. Bei 1 km/h konnten mit Ausnahme des „Taster\_Linearführung“, alle Sensoren dem Profil der Unebenheiten auf der Kunstbahn sehr gut folgen. Auch bei 4 km/h war die Abtastgenauigkeit noch hoch. „Taster\_Linearführung“ fiel wegen eines Defektes aus. Testfahrten mit höheren Geschwindigkeiten als 4 km/h brachten keine aussagekräftigen Ergebnisse.

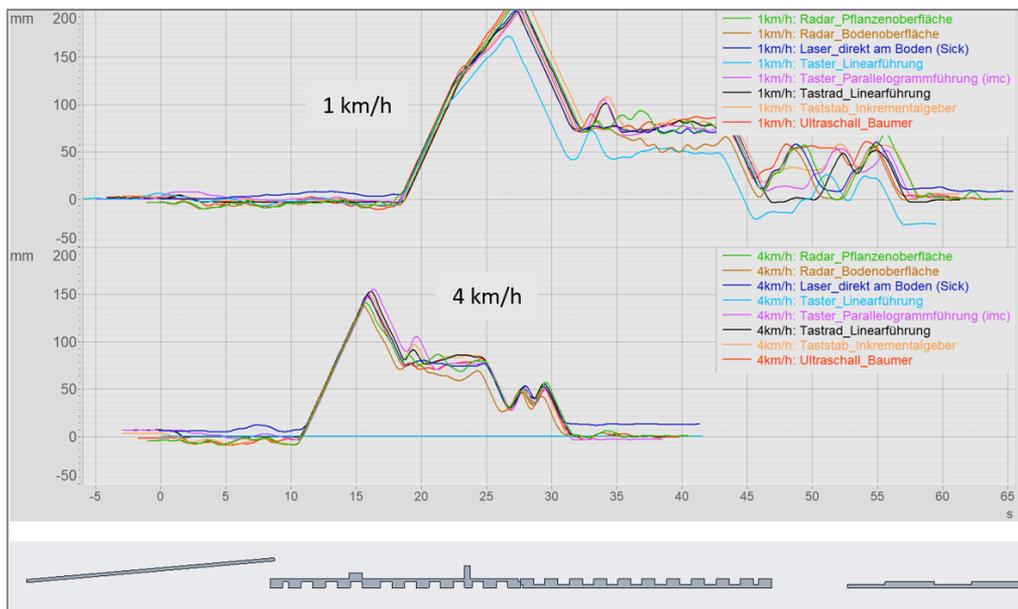


Abbildung 40: Verlauf der Messwerte auf der Kunstbahn bei 1 und 4 km/h

### 3.5 Messungen auf den BLT-Testbahnen

Ein weiterer Versuch um den Einfluss des Rahmens auszuschließen, wurde auf den Versuchstrecken der BLT durchgeführt. Der Vorteil in dieser Versuchsanordnung lag darin, dass der Trägerrahmen für die Sensoren ebenfalls auf einer ebenen Betonfahrbahn (ohne Unebenheiten) lief. Dadurch konnten die Relativbewegungen, die im Feldeinsatz das Ergebnis beeinflussen ausgeschlossen werden.

Die Sensoren wurden in einer Reihe (hintereinander) am Trägerrahmen angeordnet:

- „Radar\_Pflanzenhöhe“
- „Radar\_Bodenoberfläche“
- „Laser\_direkt am Boden“ (Sick)
- „Laser\_direkt am Boden1500“ (Baumer)
- „Laser\_direkt am Boden600“ (Baumer)
- „Taster\_Parallelogrammführung“ (ifm)
- „Ultraschall“ (Baumer)



Abbildung 41: Profil der 35-m-Testbahn

Die Testbahnen sind aus unterschiedlich hohen Holzbalken, die in einem Abstand von ca. 2-3 cm zueinander angeordnet sind aufgebaut. Der Rahmen mit den Sensoren fuhr neben der Testbahn auf der Betonoberfläche. Die Sensoren überfahren die Testbahn. Die Überfahrt erfolgte entgegen der normalen Fahrtrichtung, in der die Strecke bei den Schwingungsmessungen befahren wird (Abfahrt in Auffahrtsrichtung).

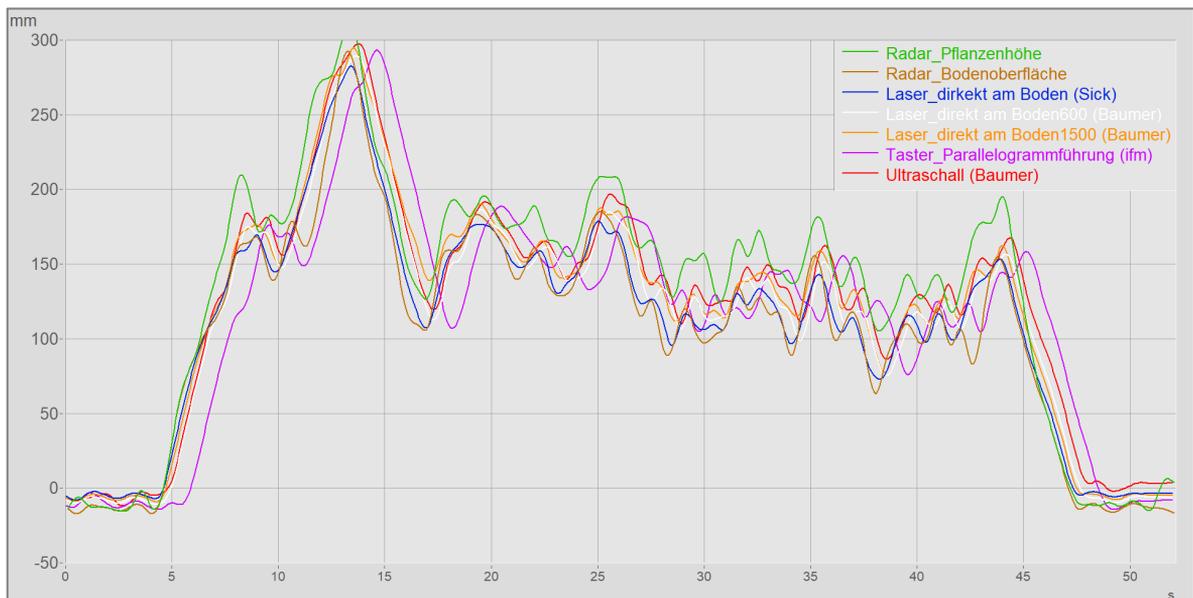


Abbildung 42: Signalverläufe über die 35-m-Testbahn (3 km/h)

Auf der 35-m Testbahn (Abb. 42) zeigen alle Sensoren eine sehr genaue Abtastung der Unebenheiten.



*Abbildung 43: 100-m-Testbahn mit 5 cm Abstand zwischen den Holzbalken*

In *Abbildung 44* zeigt die Ergebnisse der Messungen auf der 100 m Testbahn dargestellt. Eine besondere Herausforderung für die Sensoren war der Abstand der Holzbalken von ca. 50 mm (siehe *Abbildung 43*). Die Sensoren „Radar\_Bodenoberfläche“, „Laser\_direkt am Boden (Sick)“ und „Laser\_direkt am Boden600“ (Baumer) waren mit diesen Versuchsbedingungen überfordert.

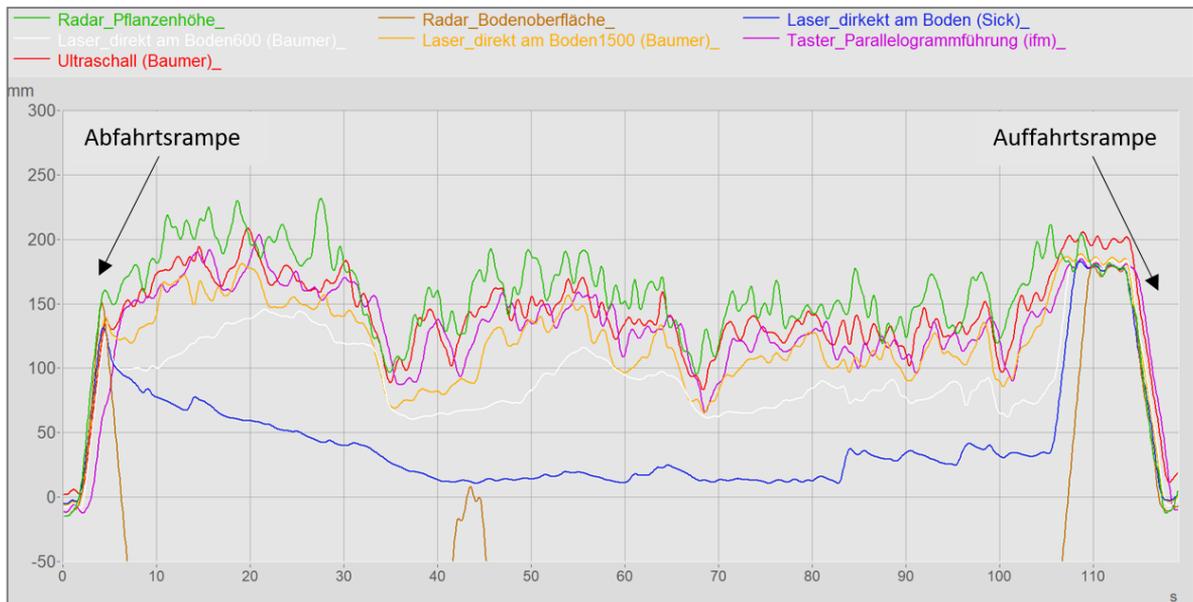


Abbildung 44: Fahrt über die 100-m-Testbahn (5 km/h)

### 3.6 Messungen auf einer gemulchten Fläche

Um die Variationsbreite zu erhöhen, wurden Versuche hinter dem BLT-Gelände (Halle 3), auf einer Wiese der BVW-Rottenhaus, Versuchsfahrten durchgeführt. Die Höhe des Grasbestandes auf dieser Wiese betrug ca. 6 - 12 cm. Der Bestand war einige Wochen zuvor geschlegelt und mit Pflanzenresten bedeckt (siehe Abbildung 45).



Abbildung 45: Bestandeshöhe der Wiese 6-8 cm

In den folgenden *Abbildungen 46 bis 55* sind die Messergebnisse der Sensoren auf der selben Fahrspur bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 und 10 km/h einzeln dargestellt.

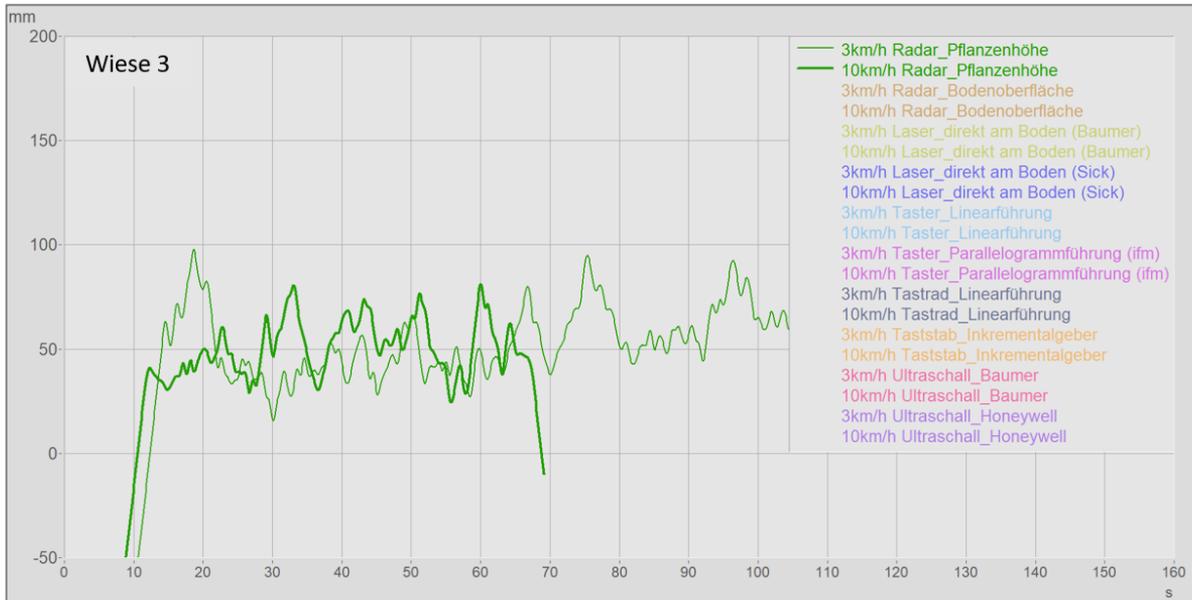


Abbildung 46: „Radarsensor\_Pflanzenhöhe“ bei 3 und 10 km/h

Durch die Pflanzenreste vom Schlegeln war die Pflanzendecke relativ dicht (siehe Abb. 46). Der Sensor „Radarsensor\_Pflanzenhöhe“ konnte daher bei 3 und 10 km/h die Pflanzenoberfläche gut erfassen.

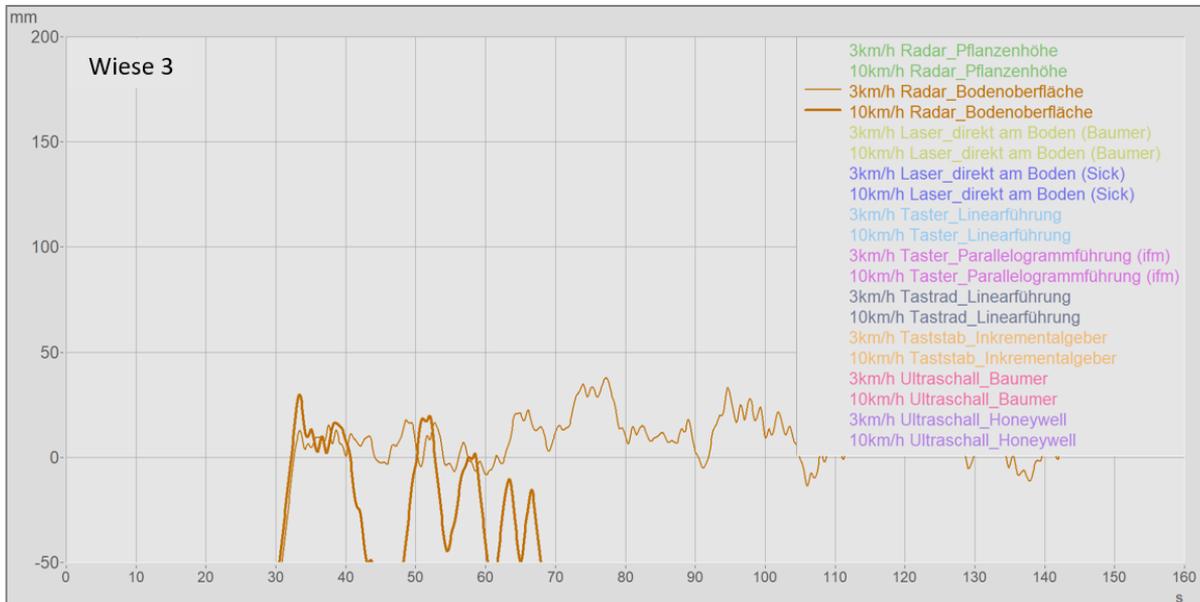


Abbildung 47: „Radar\_Bodenoberfläche“ bei 3 und 10 km/h

Der Sensor „Radar\_Bodenoberfläche“ konnte aufgrund der durch das Schlegeln entstandenen Pflanzenreste den Bestand nicht durchdringen (siehe *Abbildung 47*). Daher

war der Verlauf bei 3 km/h ähnlich wie beim Sensors „Radar\_Pflanzenhöhe“ (siehe *Abbildung 46*). Mit 10 km/h konnte der Sensor den Verlauf nicht darstellen.

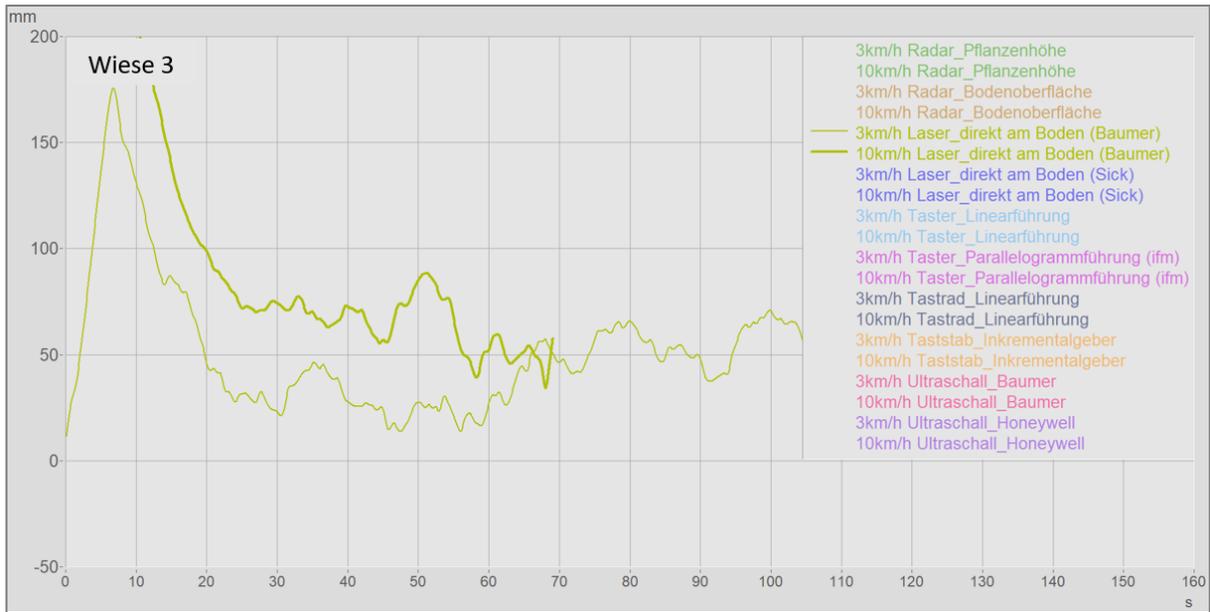


Abbildung 48: „Lasersensor\_direkt am Boden“ (Baumer) 3 und 10 km/h

Auch der „Laser\_direkt am Boden“ (Baumer) konnte den Pflanzenbestand nicht durchdringen (siehe *Abbildung 48*).

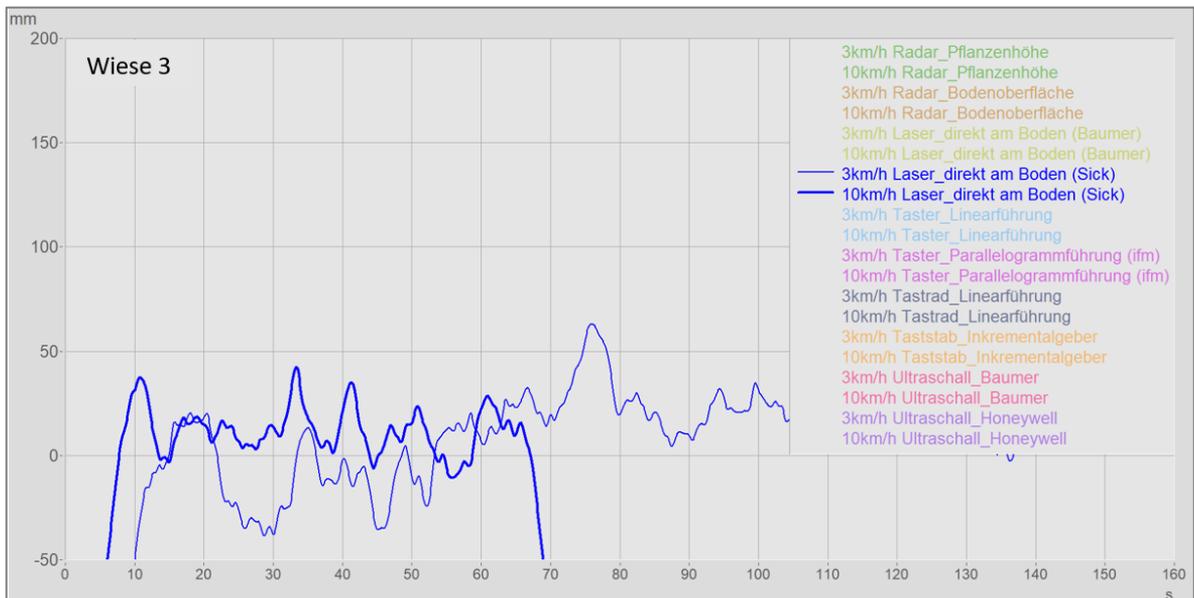
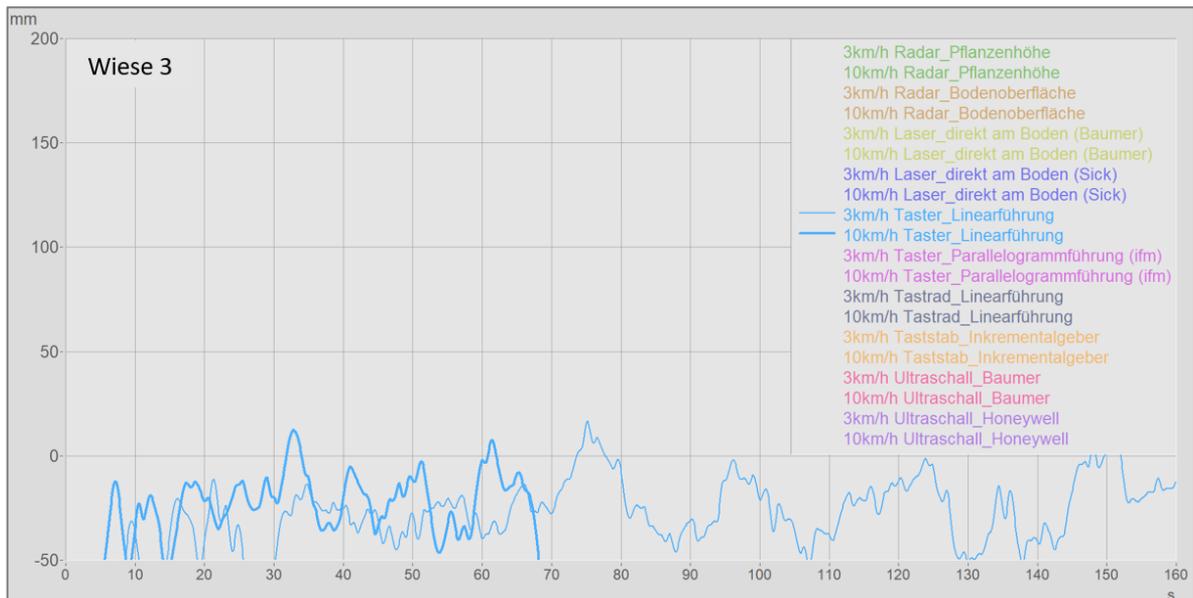


Abbildung 49: „Lasersensor direkt am Boden (Sick)“ 3 und 10 km/h

Der Lasersensor der Fa. Sick wurde ca. 1 m über dem Boden am Trägerrahmen montiert und durchdrang den Bestand deutlich besser, aber für eine exakte Erfassung nicht zufriedenstellend (siehe *Abbildung 49*).

Der „Taster\_Linearführung“ liegt mit einem Winkel ca. 30 Grad auf dem Boden auf. Durch diese Schrägstellung liegt er aggressiver und mit mehr Anpressdruck auf dem Boden auf und kann dadurch den Pflanzenbestand besser verdrängen. Die Messwerte (*Abbildung 50*) liegen deshalb unter der Nulllinie, weil der Rahmen über seine Räder vom Pflanzenbestand getragen wird und dadurch höher liegt als der Taster, auf dem Boden aufliegt.



*Abbildung 50: „Taster\_Linearführung“ 3 und 10 km/h*

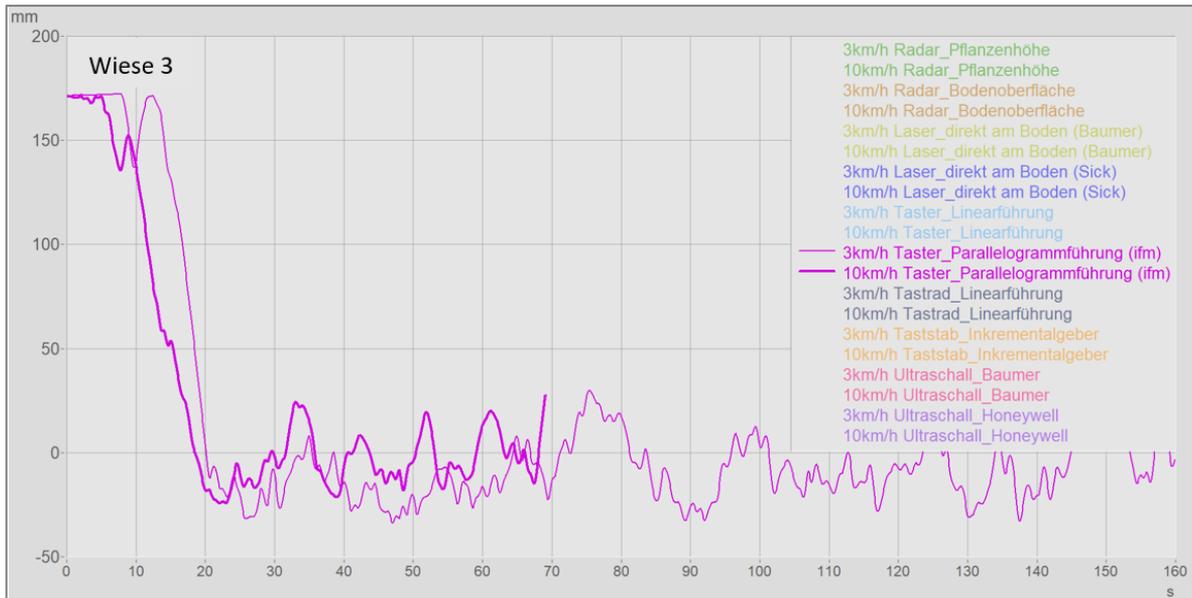


Abbildung 51: „Taster\_Parallelogrammführung“ 3 und 10 km/h (Rundstahl 8 mm)

An der Parallelogrammführung war der Taster aus Rundstahl mit einem Durchmesser von 8 mm befestigt. Der Taster wurde durch den Grasbestand gezogen, hatte eine ähnliche Form wie der „Taster\_Linearführung“ und konnte den Grasbestand ebenfalls gut durchdringen (Abbildung 51).

Auch das „Tastrad\_Linearführung“ war für diese Versuchsanwendung gut geeignet (Abbildung 52). Die Hubbegrenzung nach unten, wurde durch einen Anschlag am unteren Ende der Linearführung verursacht.

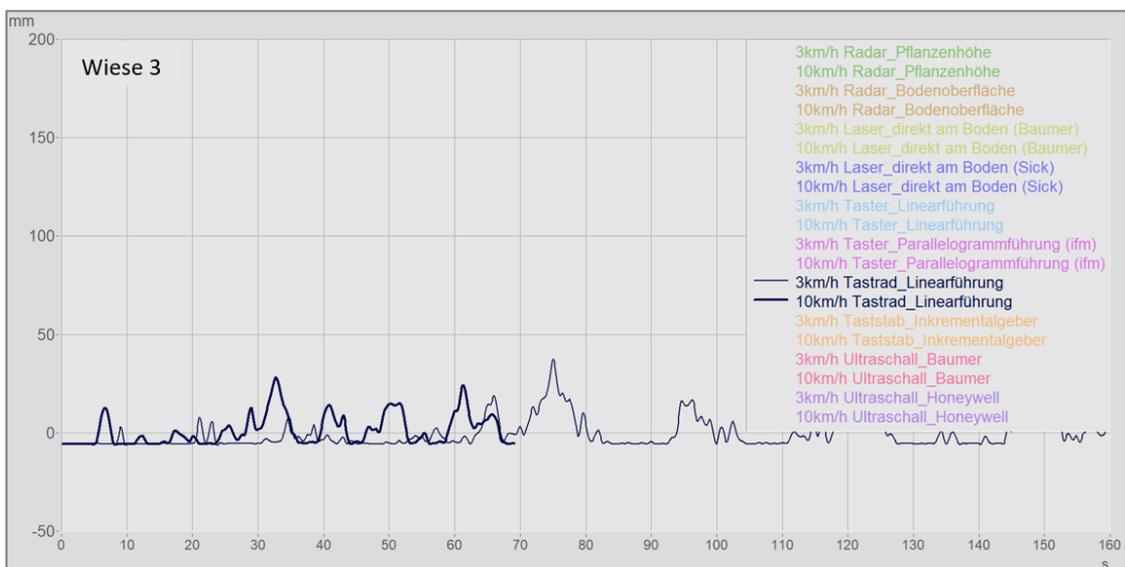


Abbildung 52: „Tastrad\_Linearführung“ 3 und 10 km/h (Tastrad aus Kunststoff)

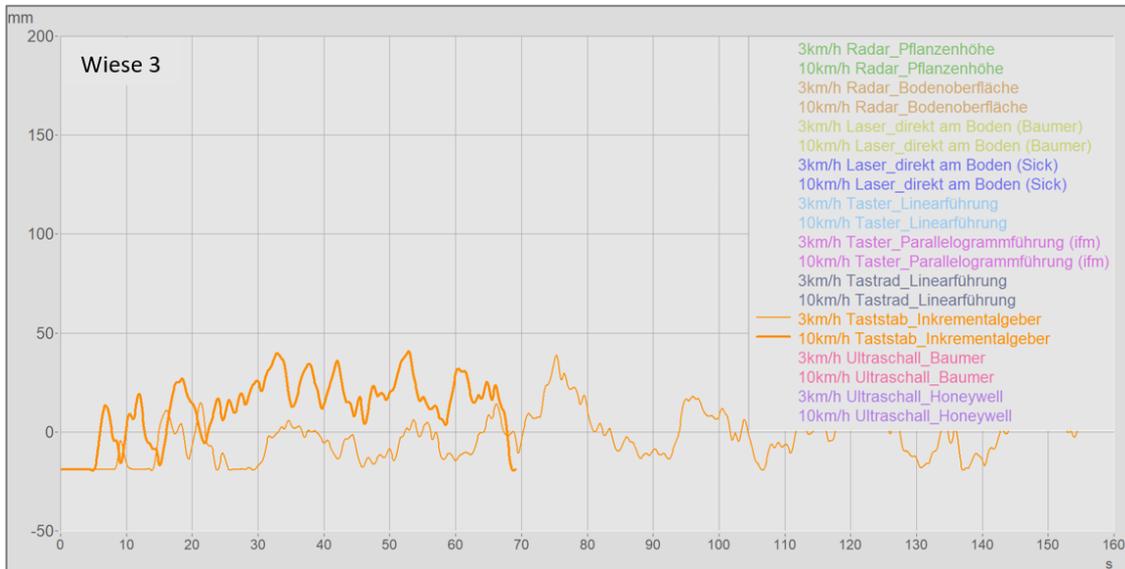


Abbildung 53: „Taststab mit Inkrementalgeber“ 3 und 10 km/h

Durch das Gewicht am Taststab und den kurzen Grasbestand, konnte der Taster bei 3 km/h den Bestand relativ gut durchdringen, bei 10 km/h wurde er durch den Grasbestand getragen (Abbildung 53).

Die beiden Ultraschallsensoren waren im Verlauf sehr unregelmäßig und ungenau. Sie sind für diese Bodenverhältnisse ungeeignet (Abbildung 54 und 55).

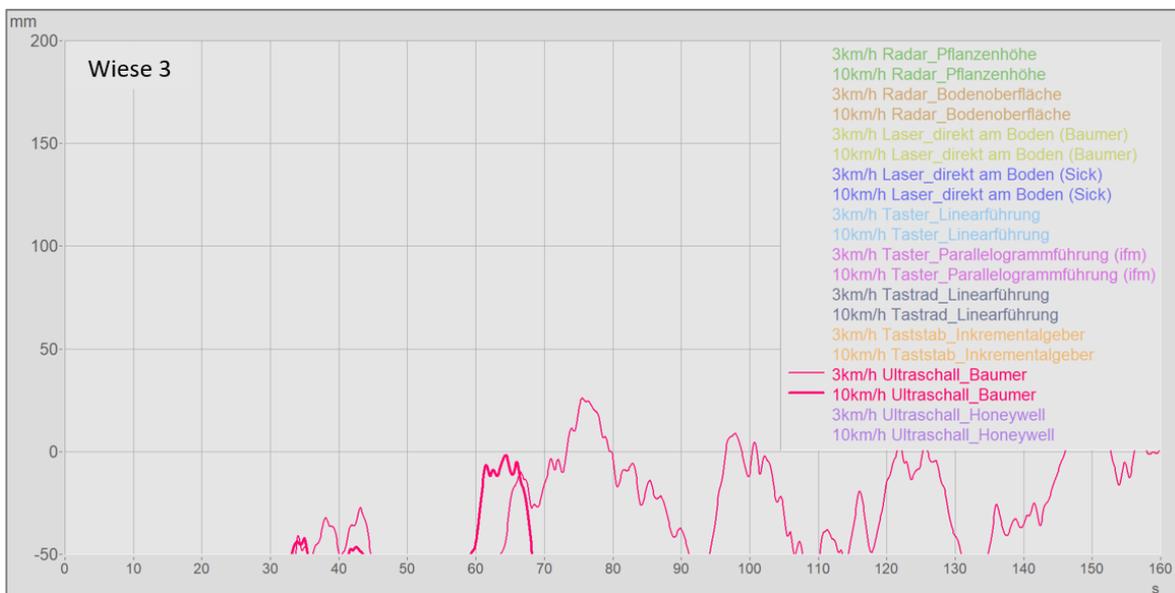


Abbildung 54: „Ultraschallsensor“ (Baumer) 3 und 10 km/h

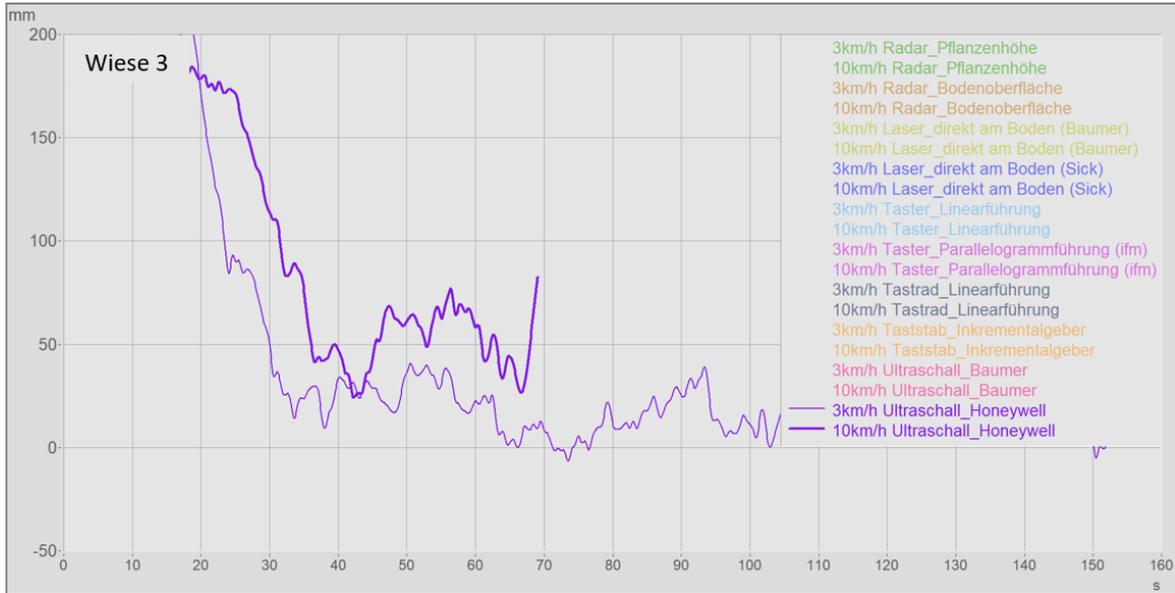


Abbildung 55: „Ultraschallsensor“ (Honeywell) 3 und 10 km/h

In der folgenden *Abbildung 56* ist der Verlauf aller berührungslosen Sensoren und in *Abbildung 57* der Verlauf aller tastenden Sensoren zusammenfassend dargestellt.

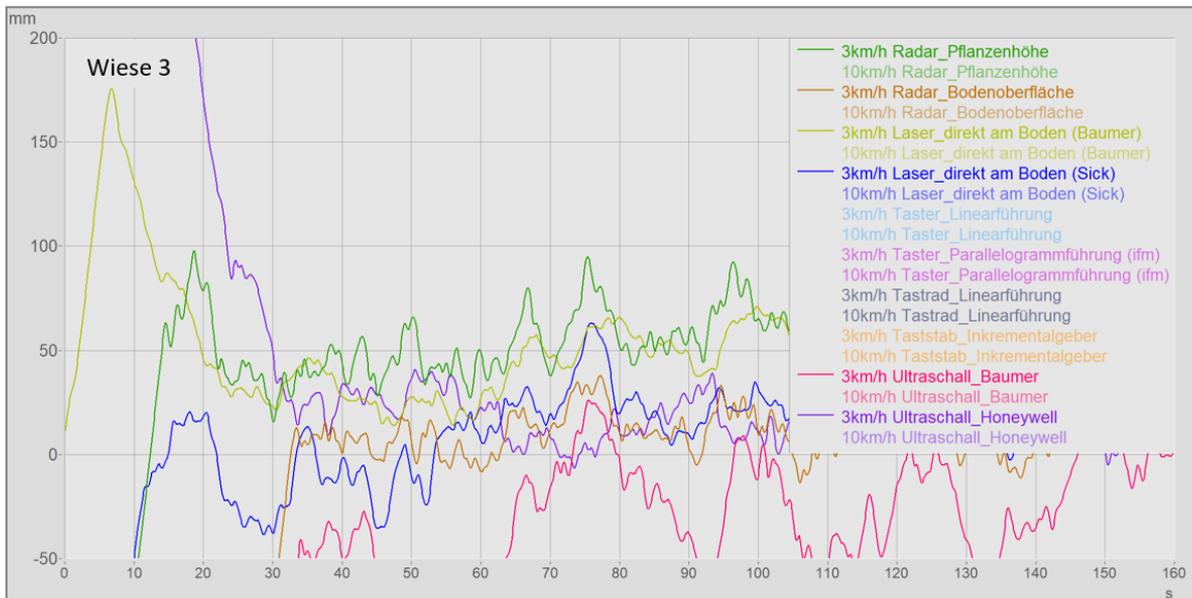


Abbildung 56: Berührungslose Sensoren bei 3 km/h

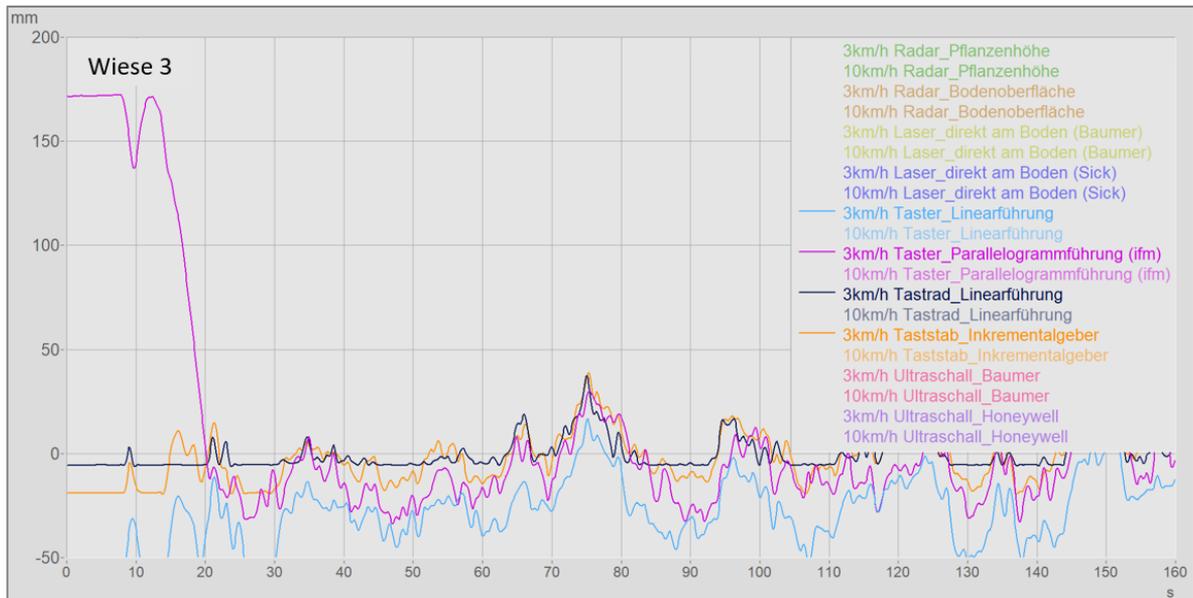
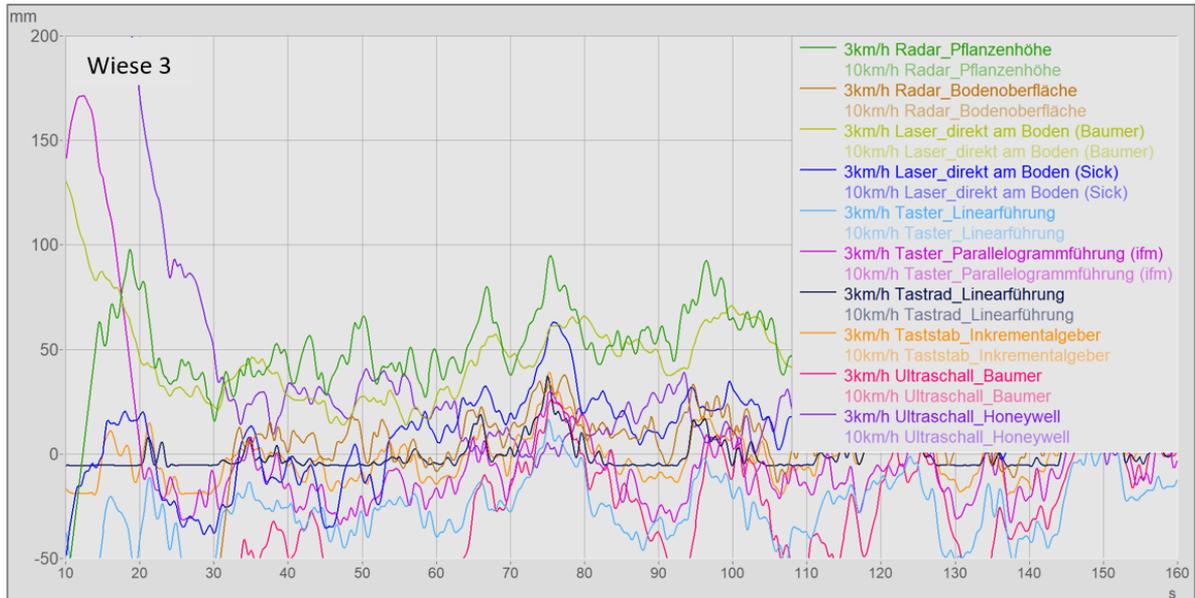


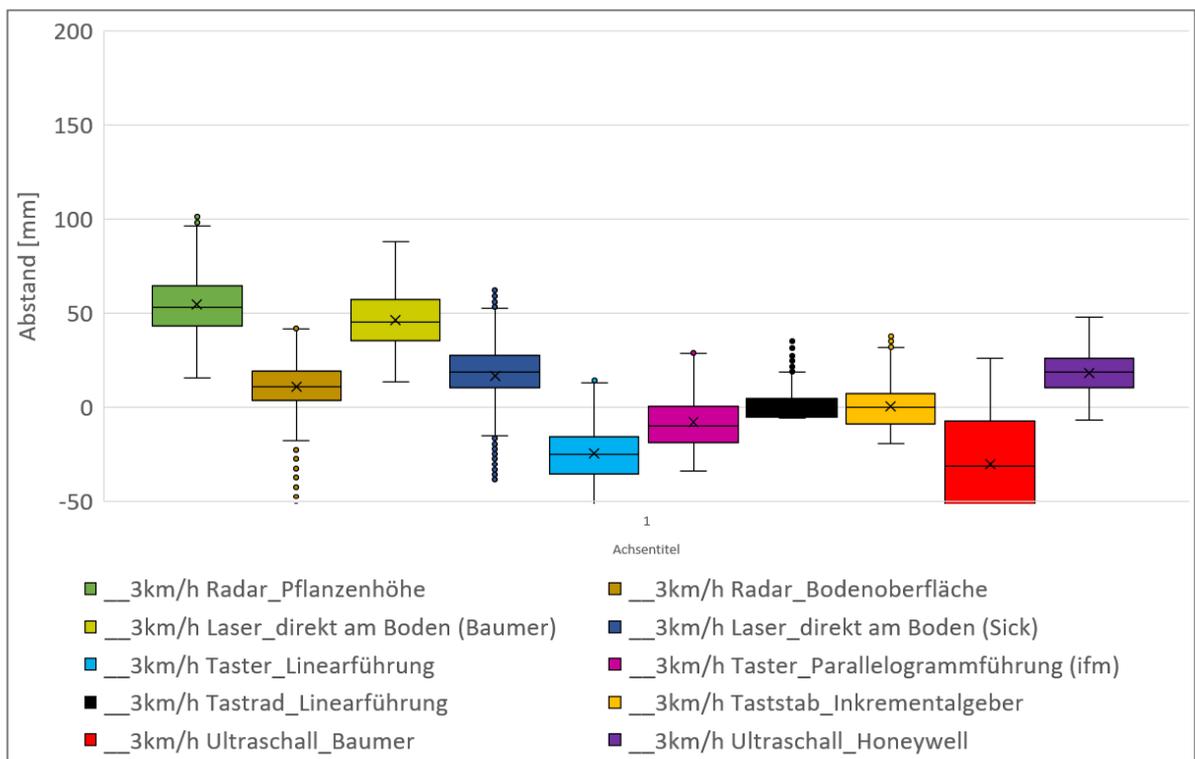
Abbildung 57: Tastende Sensoren bei 3 km/h

(8) 07112022\_Wiese hi. Halle 3 bei Weg Richtung O, 3 km/h gleiche Spur

In *Abbildung 58* sind die Verläufe der tastenden und berührungslosen Sensoren gemeinsam bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h zusammen dargestellt. Diese Abbildung wird durch *Abbildung 59* ergänzt, in der die Daten zu Box-Whisker-Plots zusammengefasst sind.

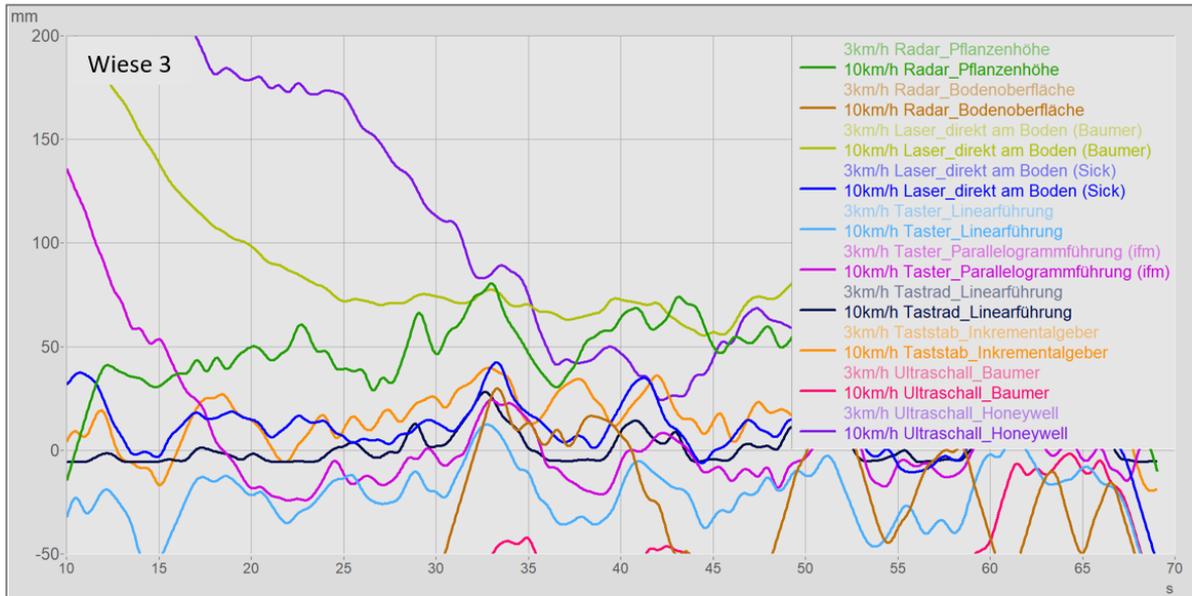


*Abbildung 58: Tastende Sensoren bei 3 km/h*

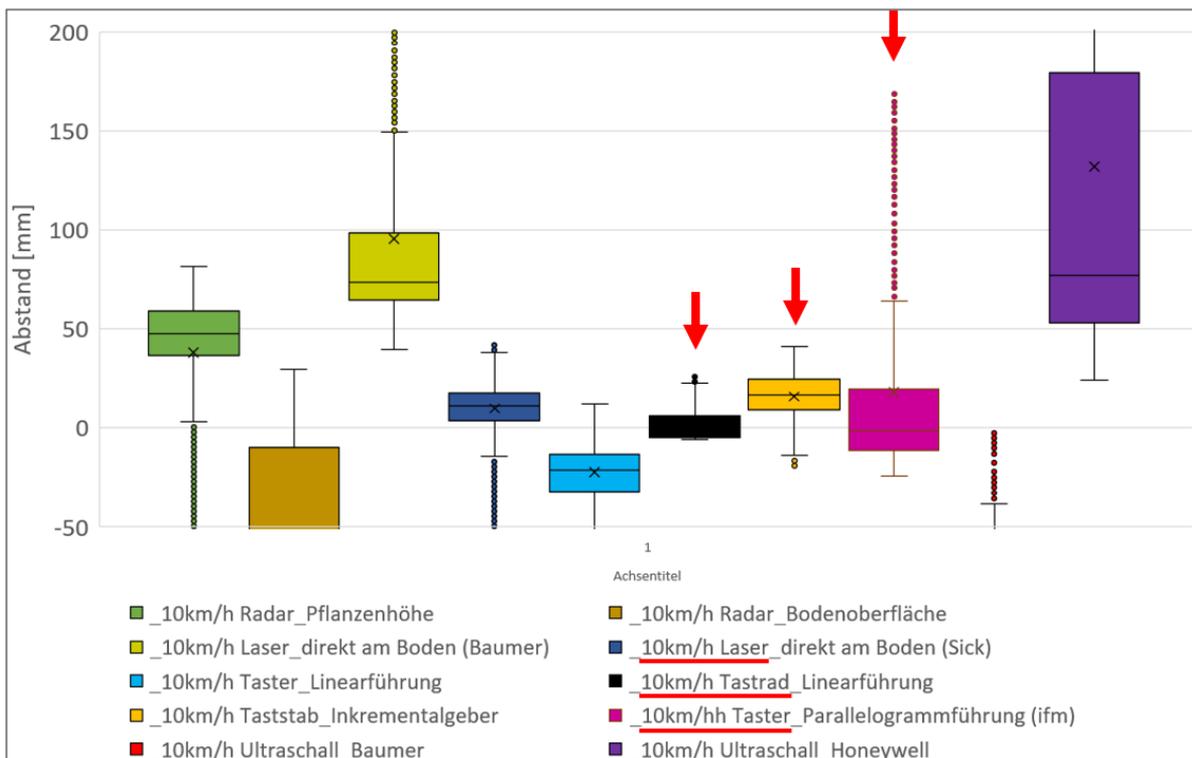


*Abbildung 59: Alle Sensoren bei 3 km/h*

Die *Abbildung 60* und *61* fassen die Ergebnisse bei einer Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h zusammen. Die Unterschiede zwischen den Sensoren werden größer.



*Abbildung 60: Alle Sensoren bei 10 km/h*



*Abbildung 61: Alle Sensoren bei 10 km/h*

### 3.7 Tiefenmessung auf unbearbeiteten und bearbeiteten Boden

Der Boden nach der Kreiselegge war fein, krümelig und locker (siehe *Abbildung 62*). Vor der Kreiselegge war der Boden härter und unebener.



*Abbildung 62: Versuchsfahrt vor und nach der Kreiselegge*

Auf der bearbeiteten Fläche sind die Räder des Sensorträgers ca. 3 cm in den Boden eingedrungen, der „Taster\_Linearführung“ sank noch tiefer ein (siehe *Abbildung 63 und 64*). Der Sensor „Taster\_Linearführung“ ist daher für diese Bodenbeschaffenheit nicht geeignet. Die Sensoren „Radar\_Bodenoberfläche“, „Taster\_Parallelogrammführung“ (Flachstahl 50 mm als Taster) und „Tastrad\_Linearführung“, waren für diese Verhältnisse am besten geeignet. Der „Ultraschall“ (Baumer) ist bei diesem Versuch ausgefallen.

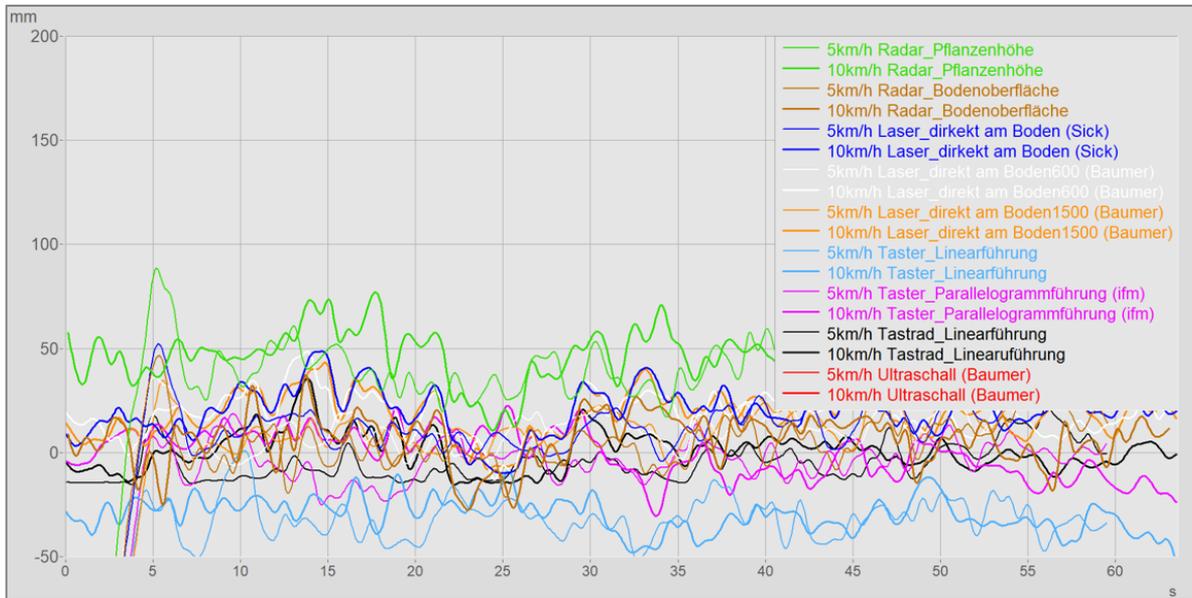


Abbildung 63: Fahrt nach der Kreiselegge 5 und 10 km/h (ohne Pflanzenreste)

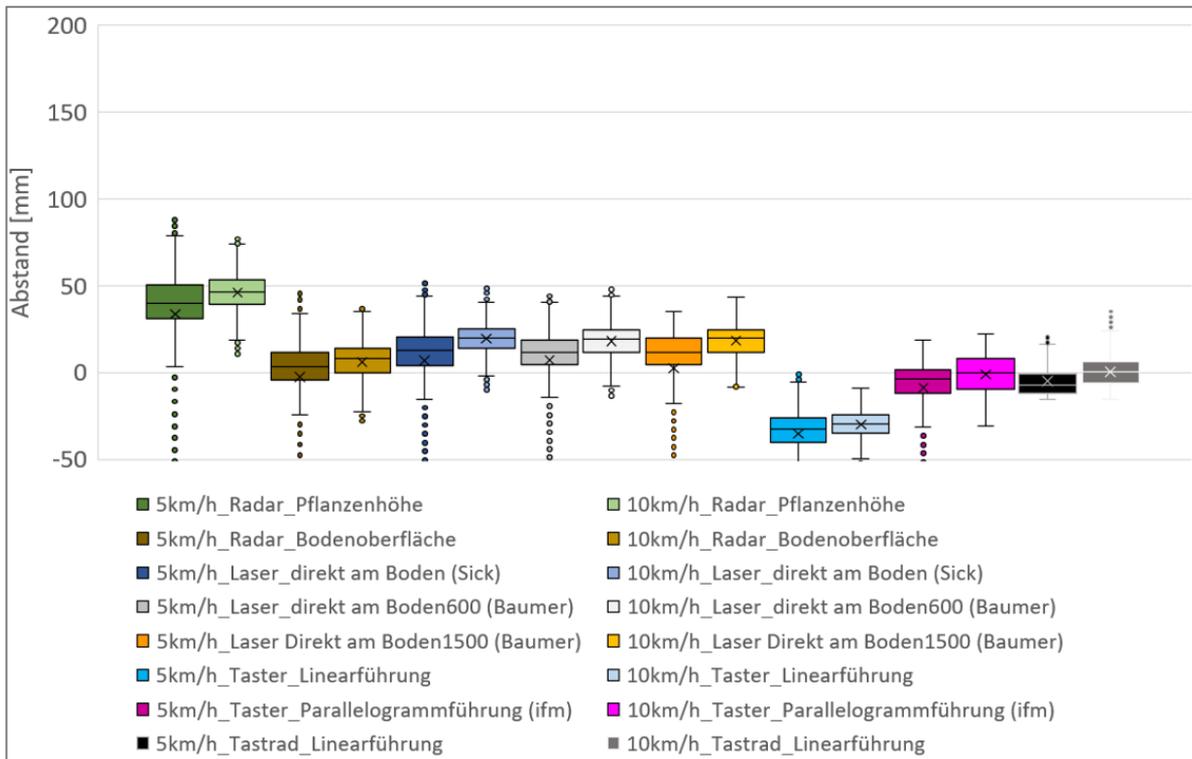
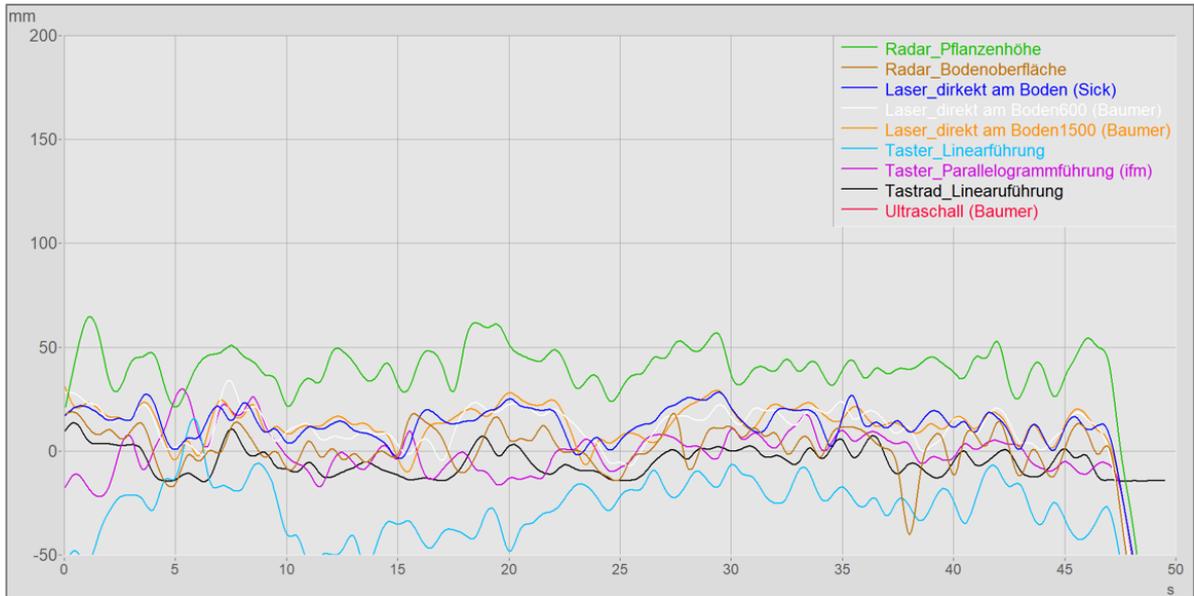
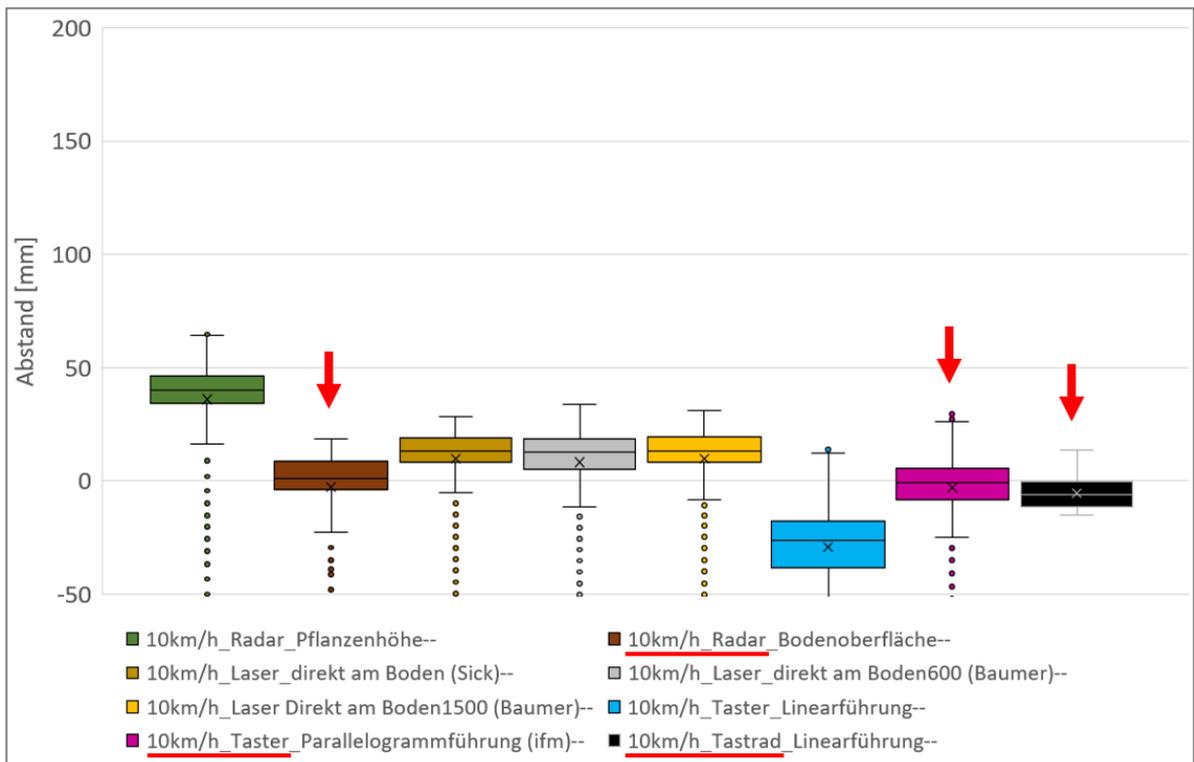


Abbildung 64: Fahrt nach der Kreiselegge 5 und 10 km/h (ohne Pflanzenreste)

Bei der Messung vor der Bearbeitung mit der Kreiselegge bei 10 km/h Fahrgeschwindigkeit haben die Sensoren „Tastrad\_Linearführung“, „Radar\_Bodenoberfläche“ und „Taster\_Parallelogrammführung“ am besten abgeschnitten (siehe *Abbildung 65 und 66*).



*Abbildung 65: Fahrt vor der Kreiselegge mit Pflanzenresten 10 km/h*



*Abbildung 66: Fahrt vor der Kreiselegge mit Pflanzenresten 10 km/h*

Leichter Bewuchs mit Wurzelpflanzen, wie in Abbildung 67 zu sehen, teilte für die Sensoren bei den Versuchen vor der Kreiselegge kein Problem dar.



Abbildung 67: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzenbestand

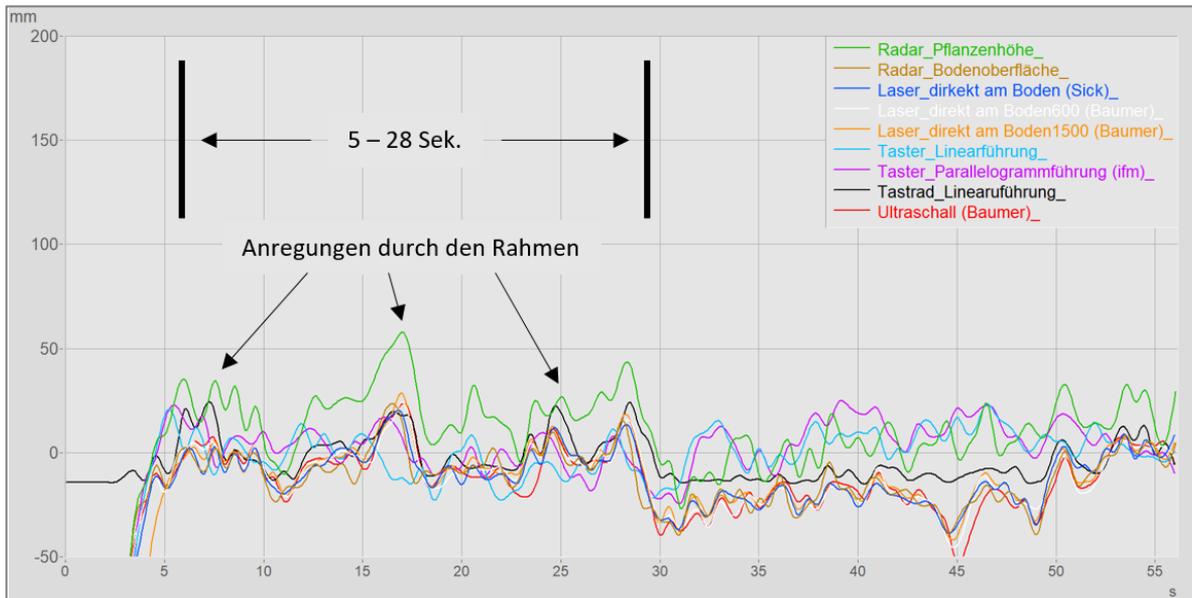


Abbildung 68: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzenbestand 6 km/h

Wie ein Vergleich der *Abbildungen 65 und 66* mit den *Abbildungen 68 und 69* zeigt, hat die Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit von 10 auf 6 km/h zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse geführt.

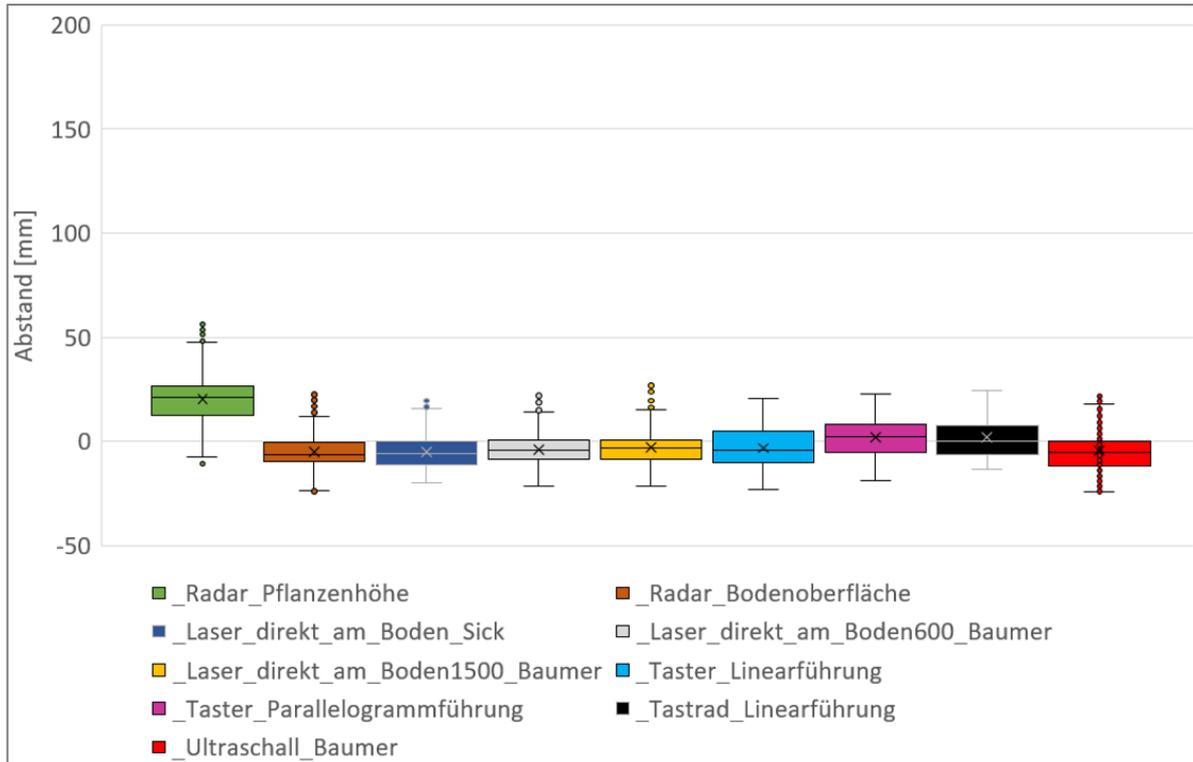


Abbildung 69: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzbestand 6 km/h (Ausschnitt in Abbildung 68 von 5 bis 28 Sek.)

### 3.8 Tiefenmessung beim Hackgerät

Bei dieser Versuchsanordnung wurden die Sensoren an einem Hackelement des Hackgerätes montiert.



Abbildung 70: Versuchsfahrt beim Hacken von Mais



Abbildung 71: Sensoren auf unbearbeiteten Boden beim Maishacken

Wie in Abbildung 71 am Hackgerät dargestellt, zeigten die Sensoren „Radar\_Bodenoberfläche“ und „Tastrad\_Linearführung“ die tatsächliche Arbeitstiefe (40 - 50 mm) auf dem unbearbeiteten Boden am besten an (siehe Abbildung 72 und 73). Die berührungslosen Sensoren „Laser\_direkt am Boden (Sick)“, „Laser\_direkt am Boden600“ (Baumer) und „Laser\_direkt am Boden1500“ (Baumer) drangen stärker in die Vertiefungen

der Bodenoberfläche ein und lagen daher etwas tiefer.

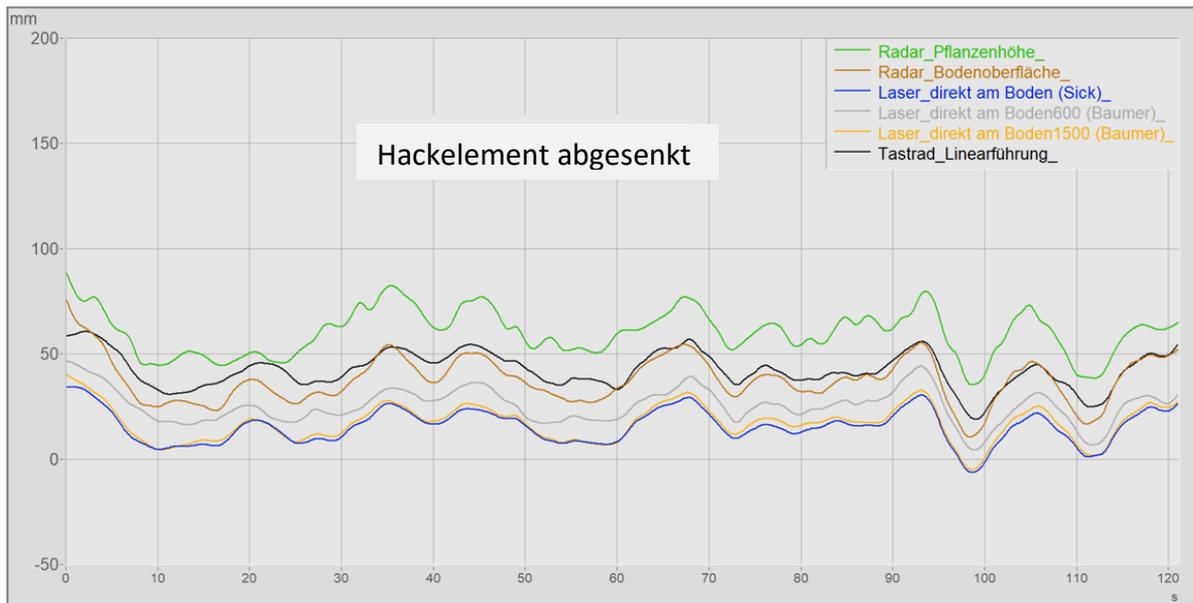


Abbildung 72: Sensoren auf unbearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch1)

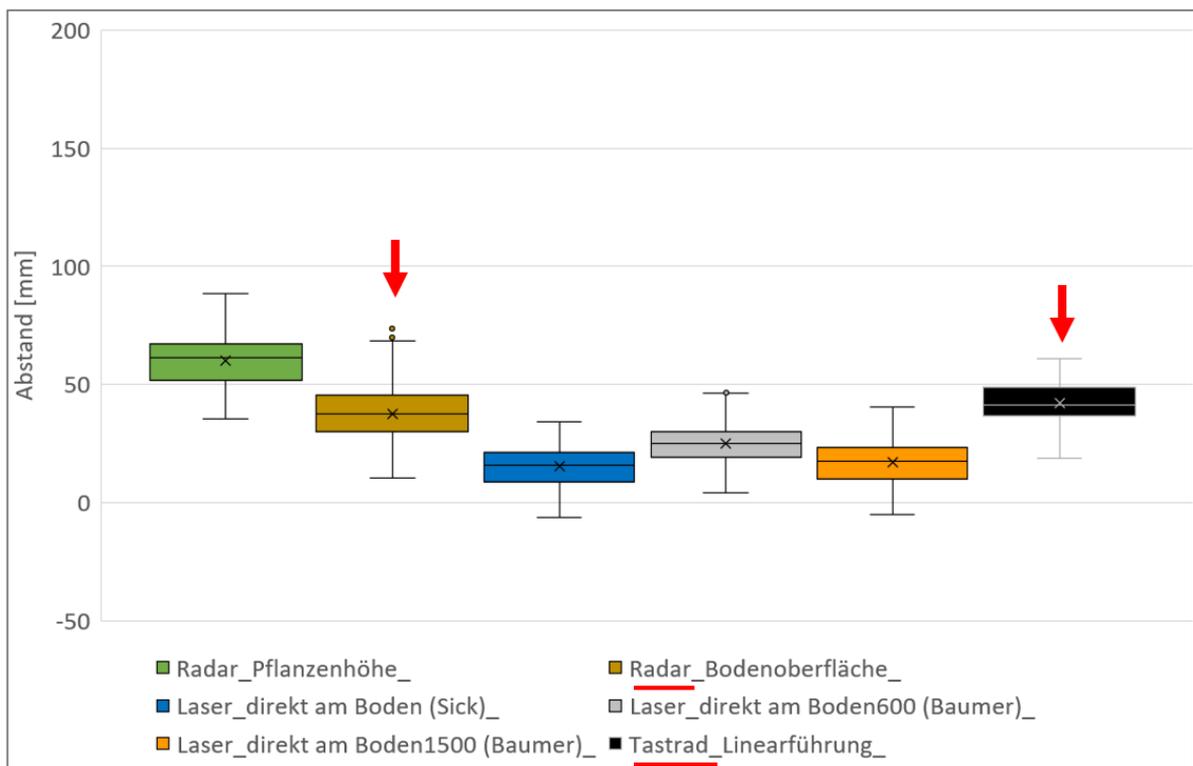


Abbildung 73: Sensoren auf unbearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch1)

Bei den in *Abbildung 74 und 75* zusammengefassten Versuchen wurde auf den bearbeiteten Boden gemessen. Die Sensoren lieferten einen ähnlichen Verlauf wie bei *Abbildung 72*. Die Sensoren „Radar\_Bodenoberfläche“ und „Tastrad\_Linearführung“ konnten die Arbeitstiefe der Hackwerkzeuge realistisch wiedergeben. Der Sensor „Radar\_Pflanzenhöhe“ erfasste die

Pflanzenhöhe. Die Sensoren „Laser\_direkt am Boden (Sick)“ und „Laser\_direkt am Boden“ (Baumer) drangen zwischen den Schollen tiefer in den Boden ein.

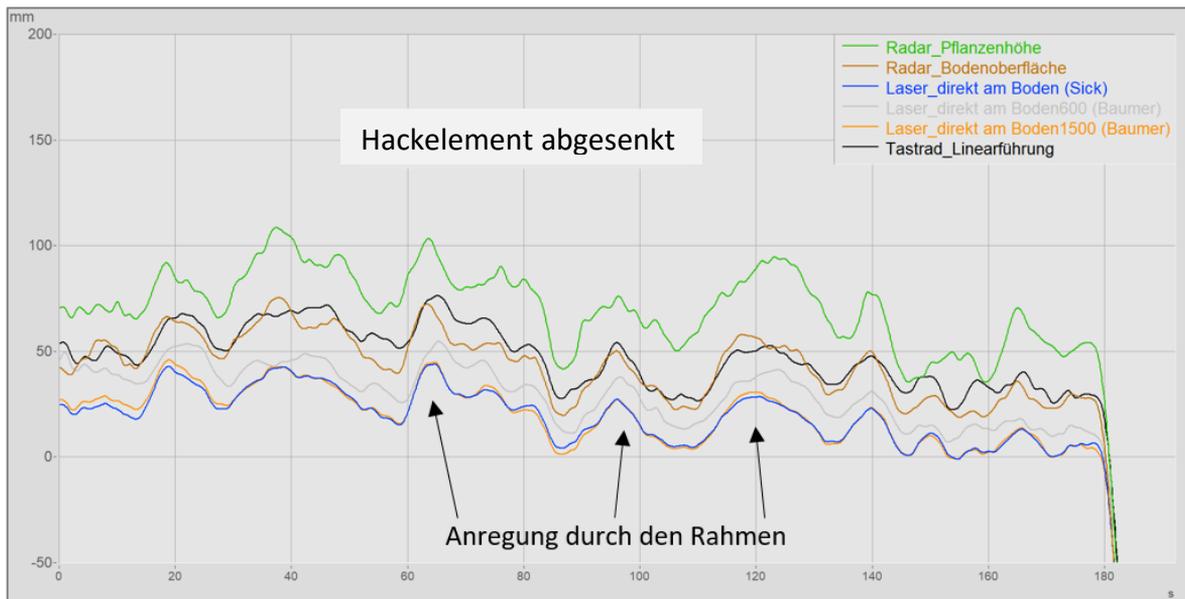


Abbildung 74: Sensoren auf bearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch2)

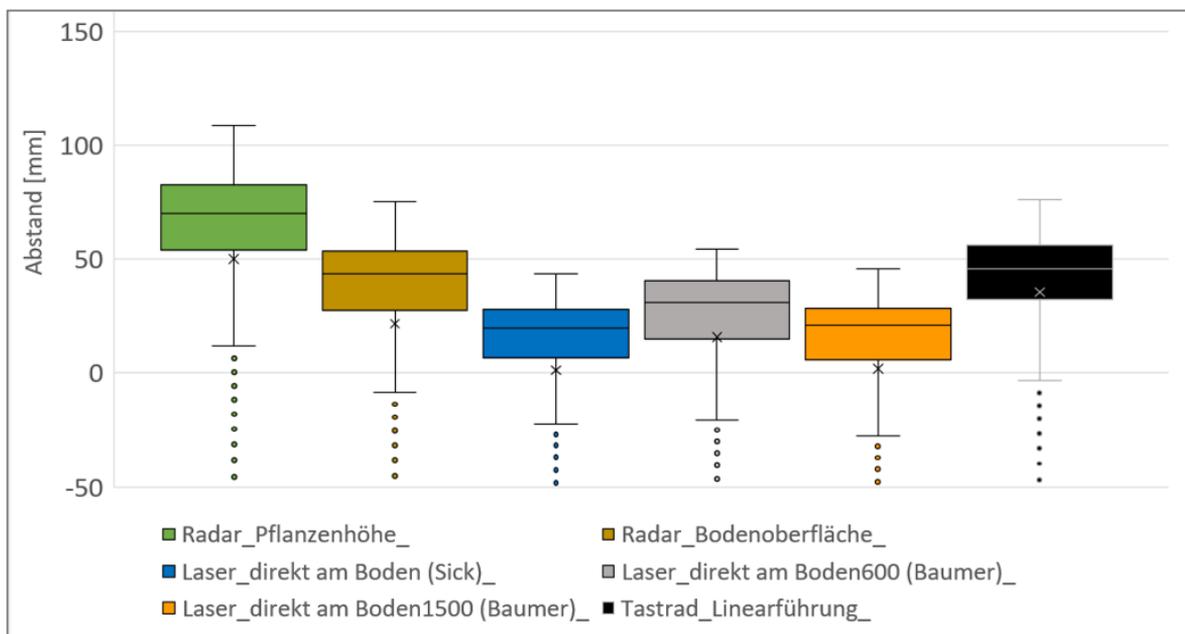


Abbildung 75: Sensoren auf bearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch2)

### 3.9 Radarsensoren auf Mähwerk vorne und hinten montiert

Zwei Radarsensoren wurden auf einem Mähwerk montiert (siehe *Abbildung 76*), um die Höhe des Grünlandbestandes zu erfassen. Radar 1 war vorne (ca. 80 cm zum Boden) und Radar 2 war hinten (ca. 60 cm über den Boden) der Mähwerksabdeckung montiert. Das Mähwerk über den Boden gezogen, ohne eingeschaltet zu werden. Der Grasbestand vor dem Mähwerk war unberührt, der Grasbestand hinter dem Mähwerk wurde durch die Mähscheiben niedergedrückt. Beide Sensoren lieferten jeweils einen Messwert für die Pflanzenhöhe und den Abstand zur Bodenoberfläche.



*Abbildung 76: Radarsensoren vorne und hinten am Mähwerk befestigt*

*Abbildung 77* zeigt den Bestand, in dem die in *Abbildung 78 und 79* dargestellten Messergebnisse ermittelt wurden. Die beiden Sensoren „Radar\_Pflanzenhöhe“ (vorne und hinten) lieferten im Mittel den gleichen Wert. Die Grashalme wurden vom Mähbalken zwar niedergedrückt, standen aber danach gleich wieder auf. Die Messwerte wurden dadurch nicht beeinflusst. Das gleiche Bild auch beim Abstand zum Boden „Radar\_Bodenoberfläche“ (siehe *Abbildung 78*). Die Durchdringung des Pflanzenbestandes war bei 5 km/h noch gegeben. Bei 10 km/h wurde der Grasbestand durch das Mähwerk stärker niedergedrückt und stand danach nicht mehr auf. Die Radarsignale „Radar\_Bodenoberfläche“ hinten konnten den schräg stehenden Grasbestand schlechter durchdringen, was sich auch im Signalverlauf äußerte (siehe *Abbildung 79*). Wie stark der Pflanzenbestand durch den

Mähbalken niedergedrückt wurde, hing sehr stark von der Fahrgeschwindigkeit sowie der Höhe und Art des Grasbestandes ab.



Abbildung 77: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk, Fahrspur bei 5 und 10 km/h, re. neben Weg



Abbildung 78: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk 5 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet)

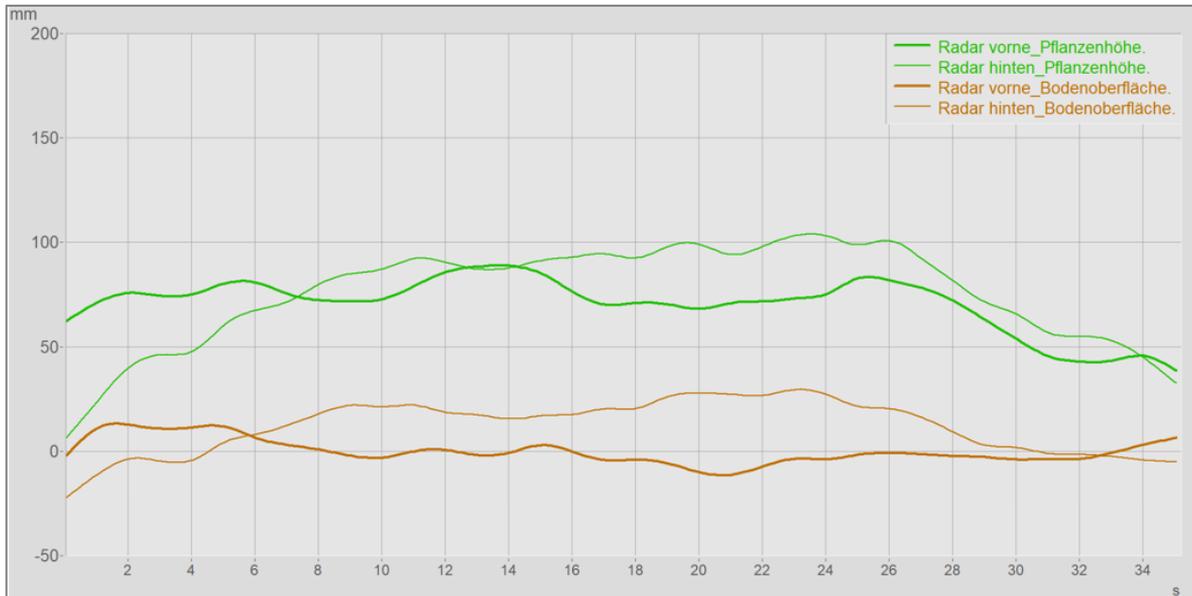


Abbildung 79: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk 10 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet)



Abbildung 80: Fahrspur mit dem Mähwerk 5 und 10 km/h

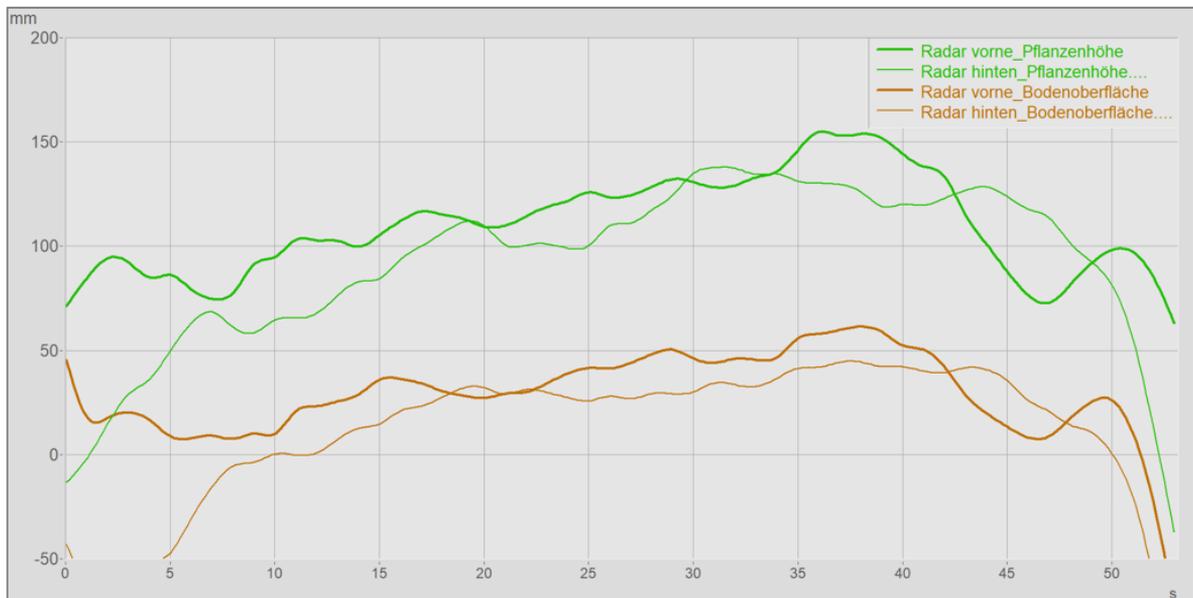


Abbildung 81: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 5 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet)

Abbildung 83 zeigt die Messwerte bei der Fahrt auf einem sehr dichten Wiesenbestand (siehe Abbildung 82). Die Pflanzenhöhe konnte sehr gut erfasst werden, jedoch konnte der Pflanzenbestand vom „Radar\_Bodenoberfläche“ nur schlecht durchdrungen werden, so dass die Bodenoberfläche nur ungenau erfasst wurde.



Abbildung 82: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 6 km/h auf dichten Grasbestand (Mähwerk nicht eingeschaltet)

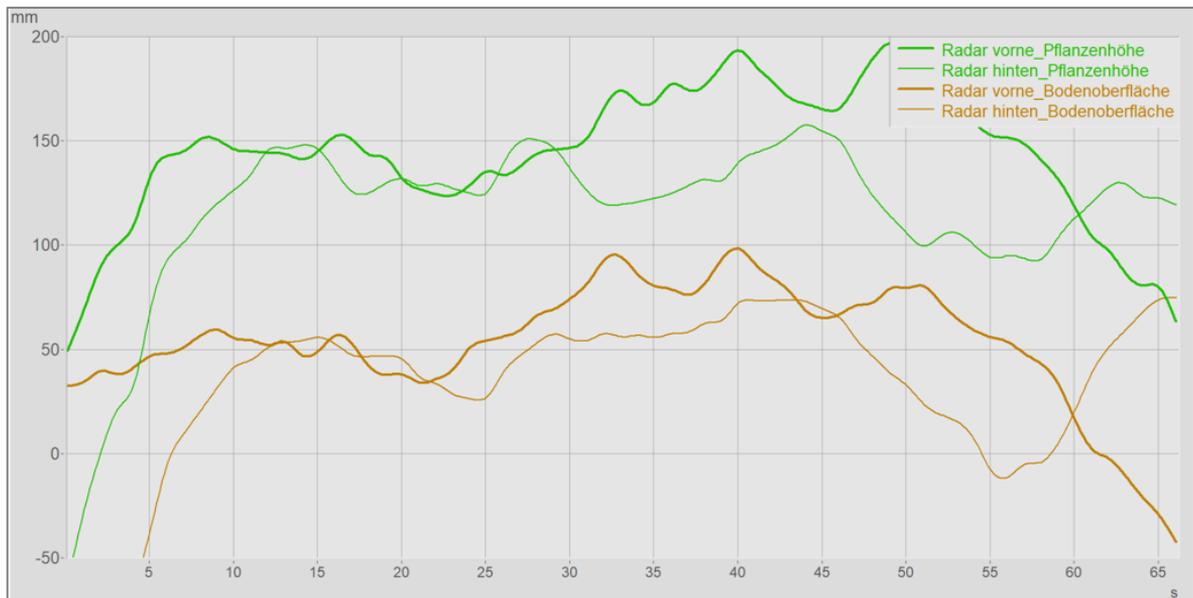


Abbildung 83: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 6 km/h auf dichten Grasbestand (Mähwerk nicht eingeschaltet)

### 3.10 Radarsensor zur Vermessung von Bestandeshöhen auf 1,80 m über dem Boden montiert

Um auch höhere Pflanzenbestände messen zu können, wurde in diesem Versuchsaubau ein Radarsensor in einer Höhe von 1,80 m über dem Boden auf einem Balken eines N-Sensors montiert. Der N-Sensor diente dabei nur als Führung und Halterung für den Radarsensor. Dadurch konnte auch der Abstand zum Boden variiert werden.



Abbildung 84: Radarsensoren im Abstand 1,80 m zum Boden montiert

Abbildung 85 zeigt die Fahrten mit dem Radarsensor im Abstand von 0,80 m und 1,80 m über dem Boden. Der Verlauf Pflanzenoberfläche konnte durch die Sensorhöhe von 0,80 m am besten wiedergegeben werden.

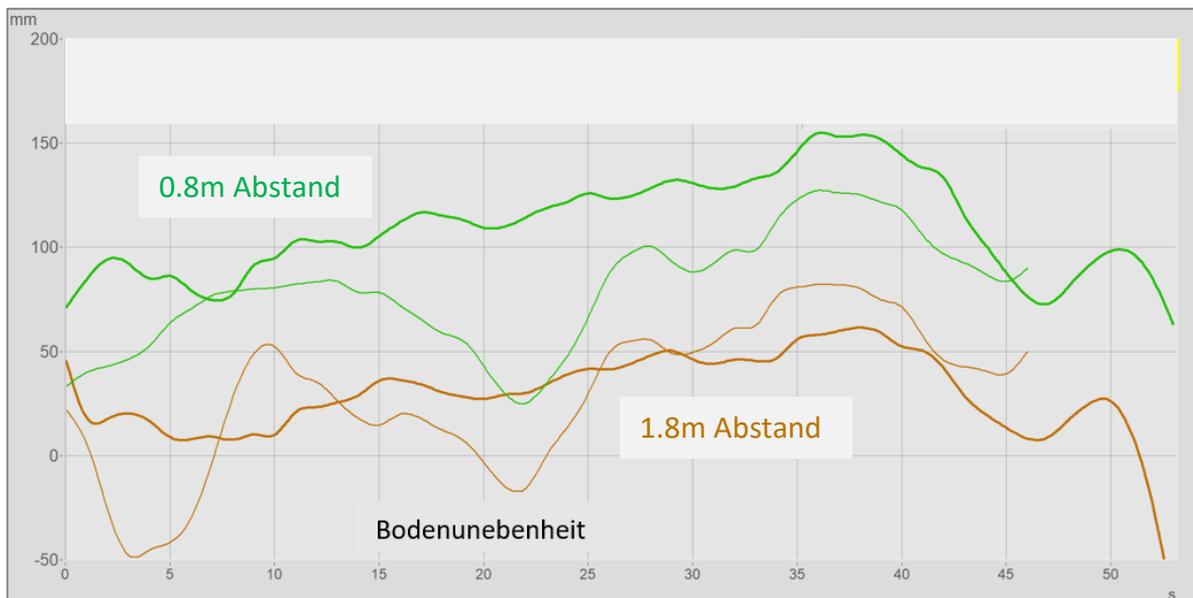


Abbildung 85: Radarsensoren im Abstand 1,80 m und 0,80 m zum Boden montiert (gleiche Fahrspuren)

In *Abbildung 86* wurde abwechselnd über eine kahle Bodenfläche und über einen Weizenbestand gefahren um die Reaktion des Radarsensors auf die wechselnden Bedingungen zu erfassen.

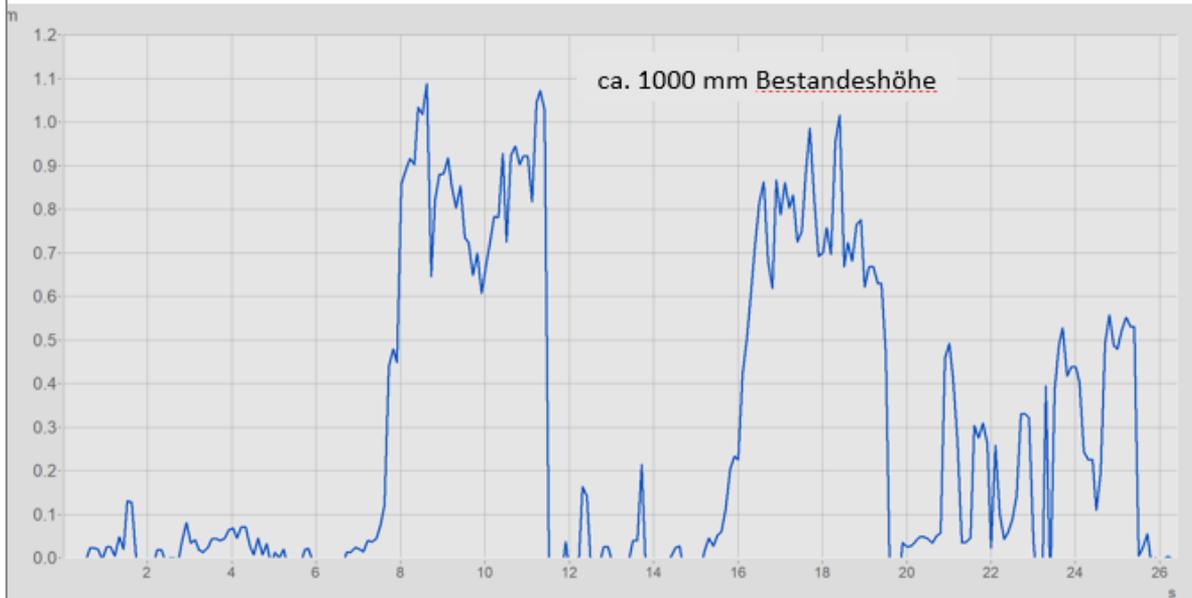


Abbildung 86: Fahrt über einen Weizenbestand - Radarsensoren auf N-Sensor montiert (Sensorabstand zum Boden 1,80 m)



Abbildung 87: Fahrt über Mais – unbearbeiteten Boden – Soja

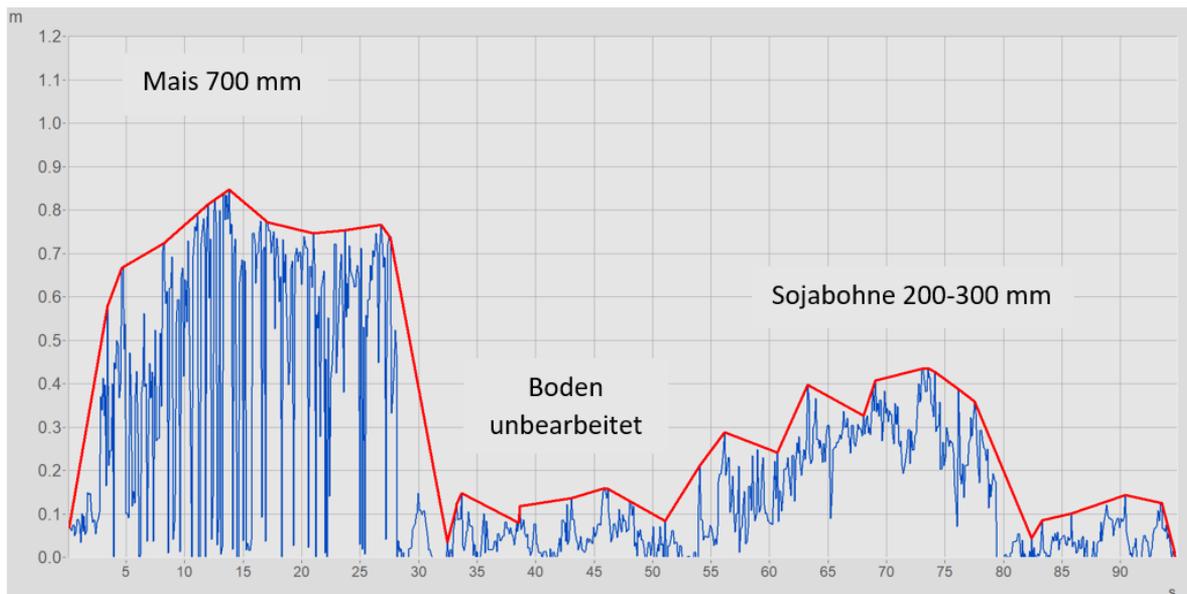


Abbildung 88: Fahrt über Maisbestand – unbearbeiteten Boden – Sojabestand - Radarsensoren auf N-Sensor montiert (Sensorabstand zum Boden 1,80 m)

Abbildung 88 zeigt die gemessenen Bestandeshöhen von Soja und Mais im Vergleich zum unbearbeiteten Boden.

### 3.11 Tiefenmessung beim Pflügen

Die Sensoren wurden, wie in *Abbildung 89* dargestellt, vorne und in der Mitte des Pfluges angebracht.

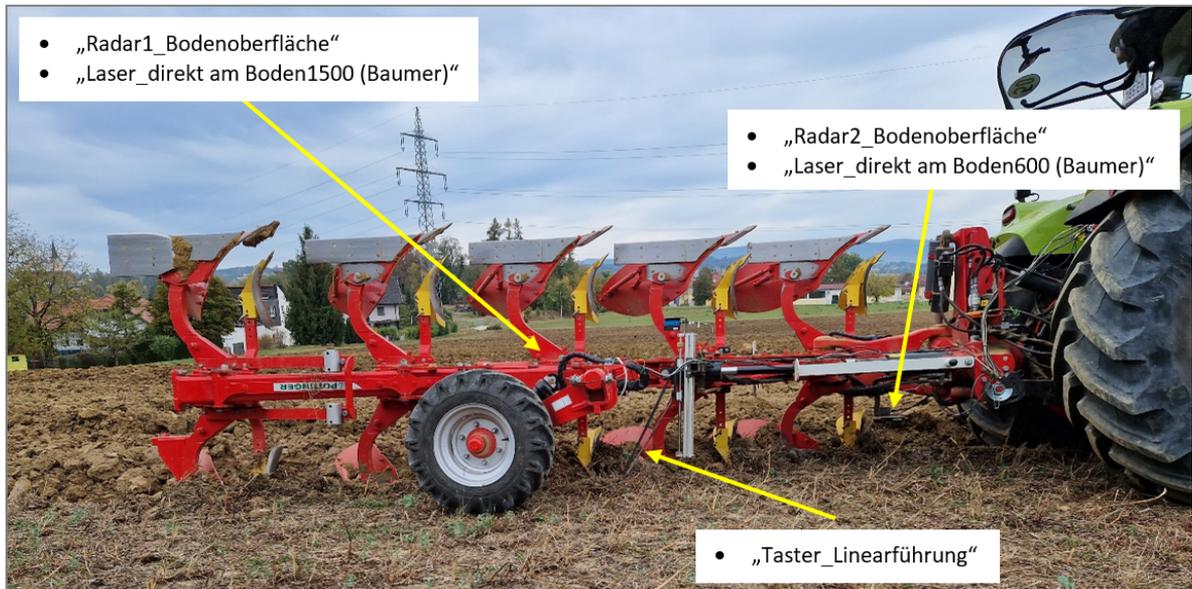


Abbildung 89: Anordnung der Sensoren am Pflug vorne und hinten (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“)



Abbildung 90: „Radar2\_Bodenoberfläche“ und „Laser\_direkt am Boden600“ (Baumer) am Pflug vorne montiert



Abbildung 91: „Taster\_Linearführung“ in der Pflugmitte montiert



Abbildung 92: „Radar1\_Bodenoberfläche“ und „Laser\_direkt am Boden1500“ (Baumer) neben dem Stützrad montiert

Bei den Versuchen wurden bewusst falsche Pflugeinstellungen in der Arbeitstiefe vorgenommen. Der Pflug wurde bei den Versuchsfahrten absichtlich vorne höher und hinten absichtlich tiefer eingestellt, um einen signifikanten Unterschied in der Tiefenmessung (vorne ca. 25 cm, hinten ca. 35 cm) feststellen zu können. Aufgrund der extreme Trockenheit war es schwierig die vorgegebene Arbeitstiefe des Pfluges einzuhalten.

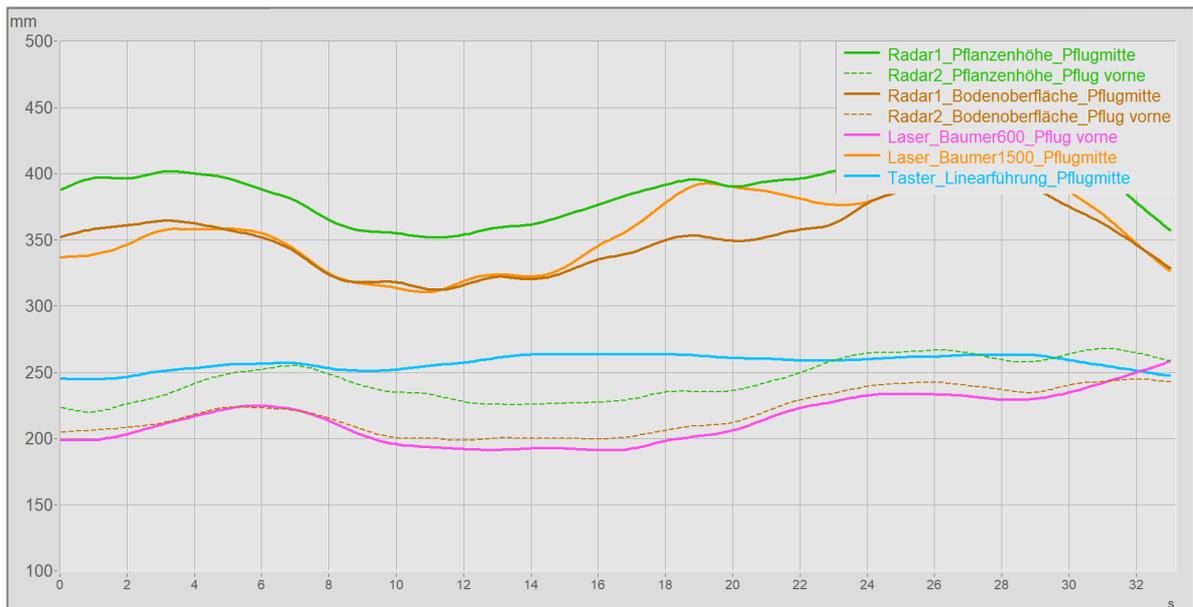


Abbildung 93: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“), Pflugtiefe vorne 20-25 cm, Pflugmitte 30-35 cm (4 km/h)

Die Signalausgänge von „Radar1\_Pflanzenhöhe“ und „Radar2\_Pflanzenhöhe“ wurden gemessen, um festzustellen, wie sich dieser Sensor verhält, wenn die Bodenoberfläche mit Pflanzenresten bedeckt ist. Wie in *Abbildung 93* zu sehen ist, konnte der Sensor die Höhe der Pflanzenreste von ca. 5 cm als Differenz zu „Radar1\_Bodenoberfläche“ und „Radar2\_Bodenoberfläche“ sehr gut wiedergeben. Die Sensoren „Radar1\_Bodenoberfläche\_Pflugmitte“ und „Laser\_Baumer1500\_Pflugmitte“ konnten die eingestellte Arbeitstiefe sehr gut wiedergeben. Auch die Signalausgänge des Radar2 zeigten sehr genau die eingestellte Arbeitstiefe des Pfluges. Der Sensor „Taster\_Linearführung“ war aufgrund der am Boden liegenden Pflanzenreste, für diese Versuchsbedingungen nicht geeignet. Durch das Schleifen des Tasters am Boden sammelten sich Pflanzenreste und der Taster konnte nicht mehr bis zur Bodenoberfläche vordringen.

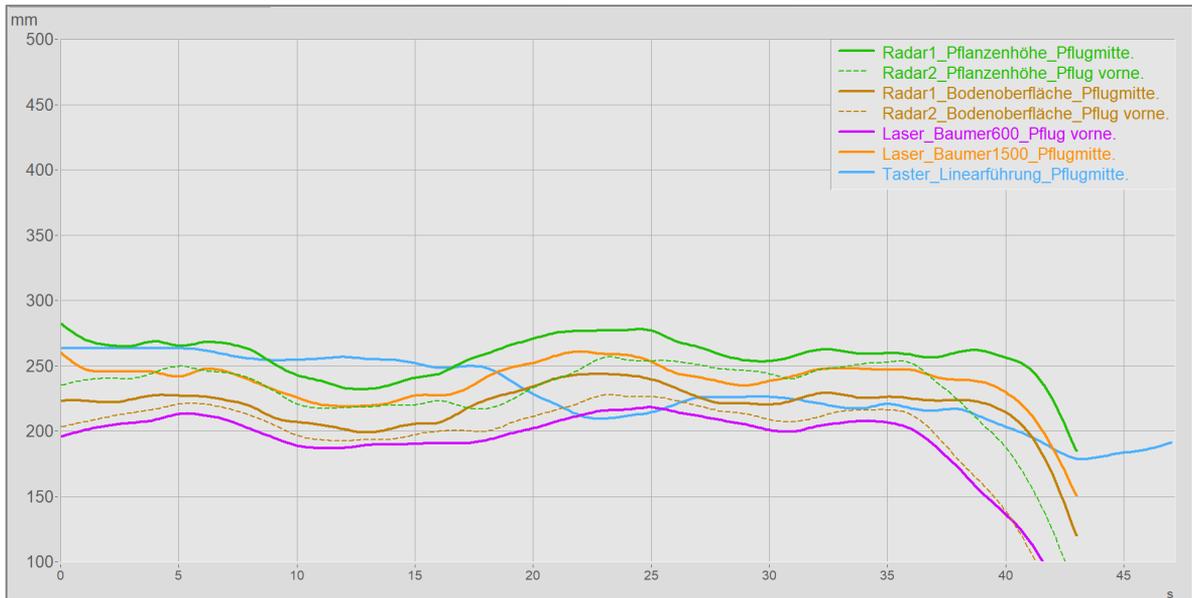


Abbildung 94: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) 4 km/h, Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm

Wie in Abbildungen 93 und 94 zeigen, werden die am Pflug eingestellten Arbeitstiefen von den Sensoren sehr gut wiedergegeben. Die Messwerte wurden auch mauell mit dem Meterstab auf dem Feld nachgemessen und bestätigt.

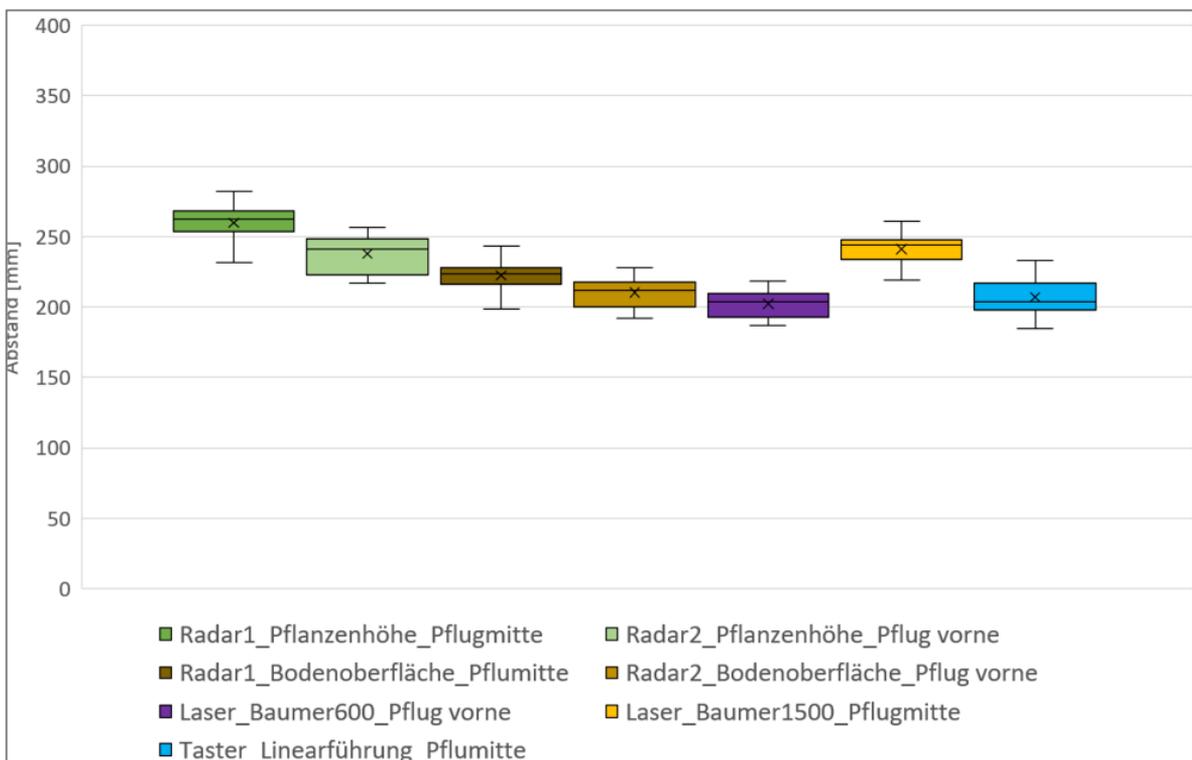


Abbildung 95: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca.20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (4 km/h)

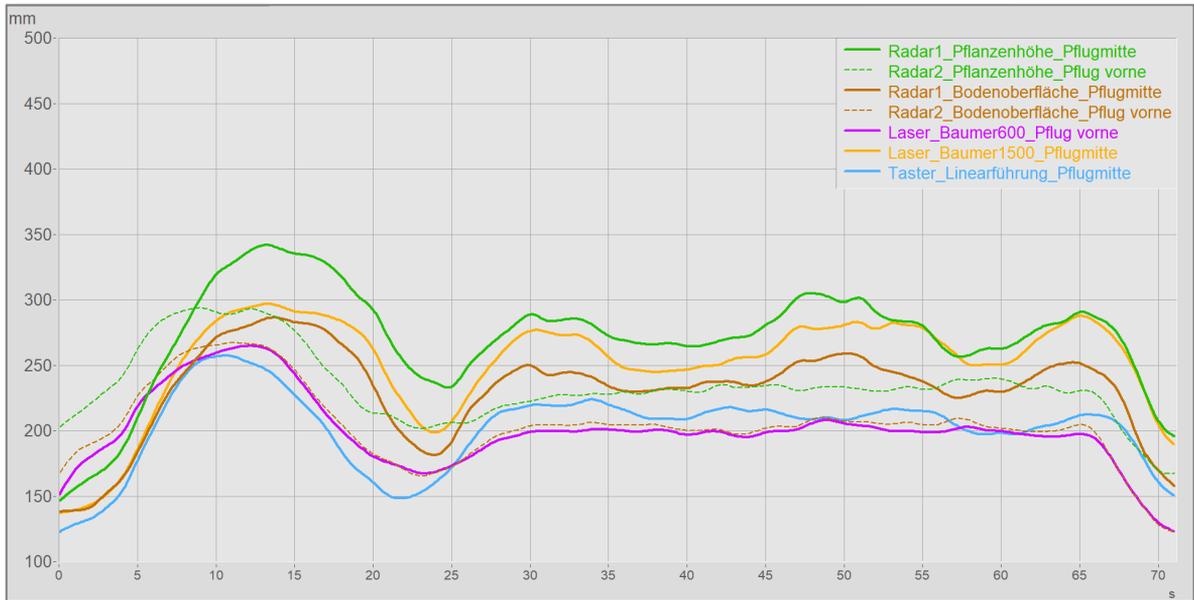


Abbildung 96: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (8 km/h)

Wie die Abbildungen 96 und 97 zeigen, waren die Sensoren auch bei 8 km/h in der Lage, die Arbeitstiefe realistisch wiederzugeben.

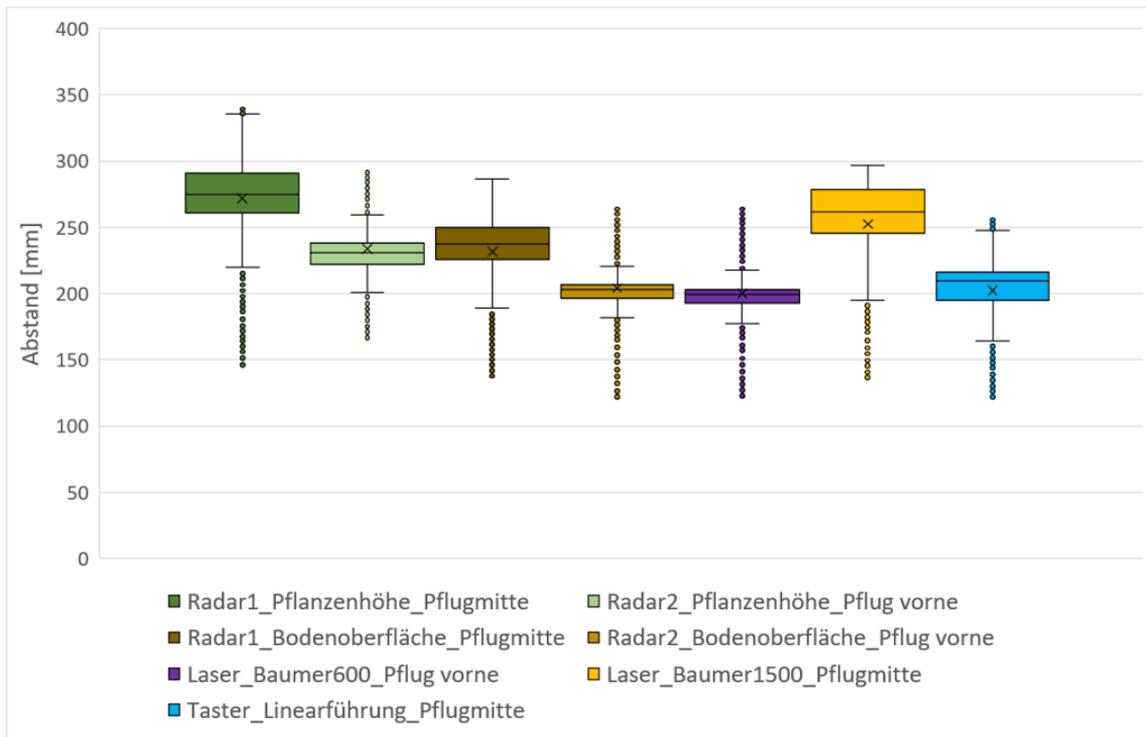


Abbildung 97: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (8 km/h)

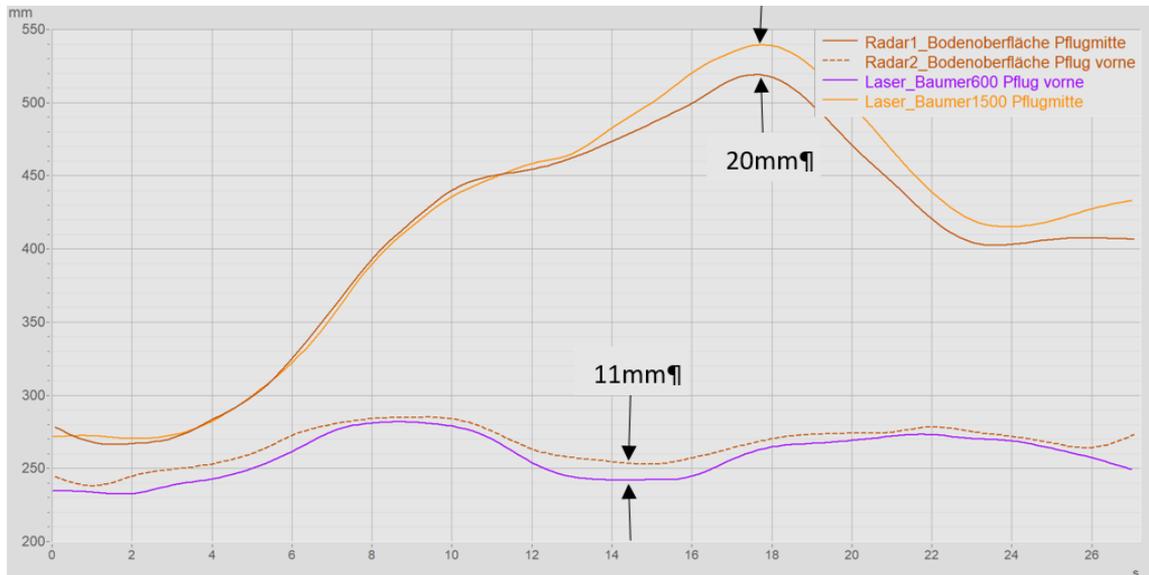


Abbildung 98: Vorne höher und hinten tiefer Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“)

Bei dem Versuch in Abbildung 98 wurde die Arbeitstiefe vorne und hinten mit einem hydraulischen Oberlenker während der Fahrt absichtlich verändert. Die Messmethoden „Radar\_Bodenoberfläche“, „Laser\_Baumer600“ und „Laser\_Baumer1500“ konnten die Veränderung der Pflugeinstellung sehr gut wiedergeben.

# 4 Zusammenfassende Bewertung aller Tiefenmessmethoden

## 4.1 Tastende Tiefenmesssysteme:

„**Tastrad\_Linearführung**“ (Tastrad aus Kunststoff, befestigt an einer Linearführung)

Vorteile:

- Gute Boden Anpassung auf bearbeiteten, feinkrümeligen Böden und auf unbearbeiteten Böden
- Gute Boden Anpassung bei Bodenbedeckung mit liegenden und stehende Pflanzenreste (bei nicht zu dicker Pflanzendecke)

Nachteile:

- Aufgrund der Baugröße ist ein Aufbau bei beengten Platzverhältnissen nur bedingt möglich
- Bei starken Bodenunebenheiten wäre eine stärkere Ausführung der Linearführung erforderlich, um den Belastungen stand zu halten.

„**Tastrad\_Parallelogrammführung**“ (Tastrad aus Metall)

Vorteile:

- Gute Boden Anpassung auf bearbeitetem und unbearbeitetem Boden, wenn die Krümelung des Bodens nicht zu fein ist
- Auch bei starken Bodenunebenheiten gut geeignet
- Robuste Konstruktion

Nachteile:

- Schwere ausladende Konstruktion
- Wegen der Größe und Gewichte ist ein Aufbau nicht überall möglich
- Metallrad begünstigt das Ankleben der Erde bei feuchtem Boden
- Nicht geeignet für feinkrümelige Böden (Rad sinkt ein)

### **„Taster\_Parallelogrammführung“** (Taster ist ein Rundstahl mit 8 mm Durchmesser)

#### Vorteile:

- Gute Bodenadaptation bei Bodenbedeckung mit liegenden Pflanzenresten und stehender Vegetation
- Gutes Eindringen in Pflanzenbestand
- Auch für grobe Bodenunebenheiten geeignet
- Robuste Bauweise

#### Nachteile:

- Nicht geeignet für lockere und bearbeitete Böden (dringt tiefer in den Boden ein)
- Schwere ausladende Konstruktion
- Wegen Größe und Gewicht ist ein Aufbau nicht überall möglich

### **„Taster\_Parallelogrammführung“** (Taster bzw. Tastschuh ist ein Flachstahl mit 50mm Breite)

#### Vorteile:

- Durch die Wahl unterschiedlicher Tasterbreiten ist eine Anpassung an die Beschaffenheit der Bodenoberfläche möglich
- Auch für grobe Bodenunebenheiten geeignet
- Robuste Konstruktion

#### Nachteile:

- Aufgrund der Größe und des Gewichts nicht überall montierbar
- Schwere ausladende Konstruktion

### **„Taststab\_Linearführung“** (Taststab befestigt auf einer Linearführung)

#### Vorteile:

- Gute Bodenadaptation auf unbearbeitetem Boden, auch bei stehenden Pflanzenbestand
- Gute Durchdringung dichter Vegetation

#### Nachteile:

- Nicht geeignet für Böden mit losen Pflanzenresten (werden mitgeschleift)

- Nicht geeignet für lockere und bearbeitete Böden (dringt tiefer in den Boden ein)

**„Taststab\_Inkrementalgeber“** (Taststab an der Achse eines Inkrementalgebers befestigt)

Vorteile:

- Gute Bodenanpassung bei unbearbeitetem Boden ohne Bewuchs
- Feinfühliges Abtasten des Bodens
- Geeignet für Böden mit geringen Rauigkeitsunterschieden
- Auch für leichte und krümelige Böden geeignet
- Leichte und platzsparende Bauweise

Nachteile:

- Taster springt bei starker Anregung durch Unebenheiten
- Nicht geeignet für Böden mit Pflanzenbewuchs und Pflanzenresten (Taster gleitet auf den Pflanzenresten)

## 4.2 Berührungslose Tiefenmesssysteme:

**„Laser\_direkt am Boden (Sick)“** (Laserstrahl ist direkt auf den Boden gerichtet)

Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Verhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht
- Für große Entfernungen einsetzbar (bis 6 m)
- Gut geeignet für Bodenabtastung ohne Pflanzenbewuchs
- Geeignet für leichte, feinkrümelige, bearbeitete Böden

Nachteile:

- Nicht geeignet bei dichter Vegetation
- Bei Pflanzenresten auf dem Boden nicht geeignet
- Bei grobscholligen Böden nicht geeignet

**„Laser\_direkt am Boden1500 (Baumer)“** (Laserstrahl ist direkt auf den Boden gerichtet)

Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht
- Abstandserfassung bis 1500 mm
- Gut geeignet für Bodenabtastung ohne Bewuchs
- Geeignet für leichte, feinkrümelige, bearbeitete Böden

Nachteile:

- Nicht geeignet bei dichter Vegetation
- Bei Pflanzenresten auf dem Boden nicht geeignet
- Bei grobscholligen Boden nicht geeignet

**„Laser\_direkt am Boden (Baumer600)“** (Laserstrahl ist direkt auf den Boden gerichtet)

Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht
- Abstandserfassung bis 600 mm
- Gut geeignet für Bodenabtastung ohne Bewuchs
- Geeignet für leichte, feinkrümelige, bearbeitete Böden

Nachteile:

- Nicht geeignet bei dichter Vegetation
- Bei Pflanzenresten auf dem Boden nicht geeignet
- Bei grobscholligen Boden nicht geeignet

### **„Ultraschall (Baumer)“** (Laserstrahl ist direkt auf den Boden gerichtet)

#### Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht

#### Nachteile:

- Messwertdrift bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen und hohen Fahrgeschwindigkeiten

### **Ultraschall (Honeywell)**

#### Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht

#### Nachteile:

- Messwertdrift bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen und hohen Fahrgeschwindigkeiten

### **„Radar\_Bodenoberfläche“** (Sensor direkt auf den Boden gerichtet)

#### Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht
- Flächige und nicht punktuelle Abtastung des Bodens
- Gute Erfassung des Bodenabstandes bei den meisten Bodenverhältnissen
- Durchdringt Vegetation

#### Nachteile:

- Nicht geeignet bei sehr dichtem Pflanzenbestand
- Nicht geeignet für hohe Fahrgeschwindigkeiten > 8 km/h

## „Radar\_Pflanzenhöhe“ (Sensor direkt auf den Boden gerichtet)

### Vorteile:

- Wenig Platz für die Montage
- Gut geeignet bei beengten Platzverhältnissen
- Einfache Montage
- Geringes Gewicht
- Flächige und nicht punktuelle Abtastung des Pflanzenbestandes
- Gute Erfassung der Höhe eines Pflanzenbestandes

### Nachteile:

- Nicht geeignet für hohe Fahrgeschwindigkeiten  $> 8$  km/h

		Funktion der Tiefenmessmethoden bei verschiedenen Einsatzbedingungen									
Tiefenmessmethode		Boden unbearbeitet ohne Pflanzenreste	Boden unbearbeitet mit liegenden Pflanzenresten	Boden unbearbeitet mit wenig Pflanzenbestand	Boden unbearbeitet mit dichte Pflanzenbestand	Boden bearbeitet feinkrümelig ohne Pflanzenrest	Boden bearbeitet feinkrümelig mit Pflanzenrest	Boden bearbeitet grobschollig ohne Pflanzenreste	Boden nach Getreide ohne Stroh	Boden nach Getreide mit Stroh geschlegelt	
1	Tastrad (Kunststoff) mit Linearführung										
2	Tastrad (Metall) mit Linearführung										
3	Taststab mit Linearführung										
4	Taststab mit Inkrementalgeber										
5	Taster (Rundstahl 8mm) mit Parallelgrammführung										
6	Taster (Flachstahl 50mm) mit Parallelgrammführung										
7	Laser direkt am Boden (Sick)										
8	Laser direkt am Boden600 (Baumer)										
9	Laser direkt am Boden1500 (Baumer)										
10	Radar Bodenoberfläche (Baumer)										
11	Ultraschall (Baumer)										
12	Ultraschall (Honeywell)										
	gut										
	mittelmäßig										
	schlecht										

Tabelle 1: Funktion bzw. Bewertung der Abstandsmessmethoden bei verschiedenen Einsatzbedingungen

# 5 Zusammenfassung

Durch den Trend zur flachen Bodenbearbeitung, einer exakten Ablagetiefe des Saatgutes und der Notwendigkeit Kraftstoffkosten zu sparen, wird in der Praxis die kontinuierliche Messung einer möglichst genauen Arbeitstiefe in der Praxis immer wichtiger. Derzeit gibt es noch kein Verfahren, das diese Anforderungen erfüllt. In dieser Untersuchung wurden Sensoren bzw. Verfahren zur Tiefenmessung an Bodenbearbeitungsgeräten unter verschiedenen Einsatzbedingungen getestet. Dazu wurden die Sensoren auf einen Tragrahmen montiert, der auf Stützrädern läuft und am Dreipunkt des Traktors angebaut wird. Die Montage der Sensoren auf dem Rahmen war notwendig, um für alle Sensoren gleichzeitig die gleichen Einsatzbedingungen zu gewährleisten. Bei den für die Versuche verwendeten Sensoren handelt es sich um handelsübliche Industriesensoren. Für die Versuche zur Arbeitstiefenmessung wurden berührungslose und tastende Abstandsmessverfahren eingesetzt. Zusätzlich zur Tiefenmessung wurde auch ein Radarsensor zur Erfassung der Pflanzen- bzw. Bestandeshöhe eingesetzt. Mit diesem Sensor war es möglich die Höhe aller Pflanzenbestände (Grünland, Getreide, Hackfrüchte...) zu erfassen. Die Messung der Pflanzen- oder Bestandeshöhe ist vor allem im Feldfutterbau, im Getreidebau oder bei Hackfrüchten von Interesse. Der Rahmen wird über die Stützräder, durch Bodenunebenheiten mehr oder weniger stark angeregt. Diese stochastischen Anregungen durch den Untergrund, sind auch in den Messsignalen der Sensoren zu erkennen. Die Genauigkeit der Erfassung der Arbeitstiefe hängt sehr stark von den Einsatzbedingungen auf dem Feld (Bodenbedeckung, Rauheit, Fahrgeschwindigkeit, Krümelung ...) und dem verwendeten Tiefenmessverfahren ab. Für unterschiedliche Bodenverhältnisse wie, feinkrümelige Böden, grobschollige Böden, bewachsene Böden usw. gibt es unterschiedliche Tiefenmessverfahren, die jeweils am besten geeigneten sind. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass die Genauigkeit einer kontinuierlichen Tiefenmessung sehr stark von den Bodenverhältnissen und dem verwendeten Tiefenmessverfahren abhängt. Messgenauigkeiten im wenigen Zentimeterbereich sind unter Praxisbedingungen nur schwer zu erreichen. Genauigkeiten von +/- 2 cm sind nur bei sehr homogenen Bodenoberflächenverhältnissen (kein Pflanzenbestand, geringe Bodenrauhigkeit) möglich. Für alle anderen Anwendungen ist diese Messgenauigkeit nicht realisierbar. Die optimale Messmethode wird somit durch die Einsatzbedingungen bestimmt. Aus Platzgründen oder wegen fehlender Anbaumöglichkeiten für Sensoren kann auch nicht jede Tiefenmessvariante an jedes Gerät angebaut werden. Ein einziges Tiefenmessverfahren für alle Bodenbearbeitungsgeräte und Einsatzbedingungen ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht realisierbar.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messrahmen zur Befestigung der Tiefenmesseinrichtungen.....	5
Abbildung 2: Tastsysteme am Rahmen angebaut.....	6
Abbildung 3: Linearführung für Tastradmontage (Fa. cnc-Discount) .....	7
Abbildung 4: Tastrad aus Kunststoff auf einer Linearführung befestigt („Tastrad_Linearführung“) .....	7
Abbildung 5: Taster auf einer Linearführung befestigt „Taster_Linearführung“ .....	8
Abbildung 6: Taststab auf einem Inkrementalgeber befestigt „Taststab_Inkrementalgeber“ .....	9
Abbildung 7: Taster aus Rundstahl mit 8 mm Durchmesser auf der Parallelogrammführung „Taster_Parallelogrammführung“ .....	10
Abbildung 8: Tastrad aus Metall auf der Parallelogrammführung „Tastrad_Parallelogrammführung“ .....	10
Abbildung 9: Ultraschallsensor direkt auf den Boden gerichtet „Ultraschallsensor“ (Honeywell) .....	11
Abbildung 10: Ultraschallsensor direkt auf den Boden gerichtet „Ultraschallsensor“ (Baumer).....	11
Abbildung 11: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet „Laser_direkt am Boden“ (Sick) .....	12
Abbildung 12: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet „Laser_direkt am Boden600“ (Baumer).....	12
Abbildung 13: Lasersensor direkt auf den Boden gerichtet „Laser_direkt am Boden1500 (Baumer)“ .....	13
Abbildung 14: Radarsensor direkt auf den Boden gerichtet, zur Messung der Pflanzenhöhe und des Bodenabstandes „Radar_Pflanzenhöhe“ und „Radar_Bodenoberfläche“ .....	13
Abbildung 15: Sensoren auf dem Trägerrahmen montiert.....	14
Abbildung 16: Tastende Sensoren ohne Zusatzgewichte .....	15
Abbildung 17: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 und 8 km/h .....	16
Abbildung 18: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 km/h (selbe Fahrspur) .....	16
Abbildung 19: Tastende Systeme ohne Zusatzgewichte auf einem abgeernteten Maisfeld (Silomais) mit 3 und 8 km/h .....	17
Abbildung 20: Tastende Sensoren mit Zusatzgewichte (Schraubzwingen, Metallstücke) ..	18

Abbildung 21: Grasbestand für die Versuche mit den Zusatzgewichte auf den Tastern.....	18
Abbildung 22: Tastende Systeme mit Zusatzgewichten auf der Wiese bei 3 km/h.....	19
Abbildung 23: Tastende Systeme mit Zusatzgewichten auf der Wiese (Abbildung 22) bei 3 km/h .....	19
Abbildung 24: Tastende Systeme mit Zusatzgewichte (3 und 10 km/h) .....	20
Abbildung 25: Tastende Systeme mit Zusatzgewichte auf einer Wiese mit 3 und 10km/h .....	21
Abbildung 26: Alle Sensoren auf einer Wiese mit 3 und 10 km/h.....	22
Abbildung 27: Alle Sensoren auf einer Wiese (4 km/h) .....	22
Abbildung 28: Fahrt über eine Wiese mit 4 km/h.....	23
Abbildung 29: Fahrt über ein gegrubbertes Feld, nach dem Auflauf.....	24
Abbildung 30: Feld gegrubbert, nach dem Auflauf .....	24
Abbildung 31: Feld gegrubbert, nach dem Auflauf (Auswertung über die Messzeit 16 bis 34 Sek (siehe Abbildung 30) .....	25
Abbildung 32: Fahrt über die Wiese mit 10 km/h.....	26
Abbildung 33: Wiese 10 km/h (Auswertung über die Messzeit 10 bis 45 Sek (siehe Abbildung 32) .....	26
Abbildung 34: Fahrt über Wiese 2 mit 3 km/h.....	27
Abbildung 35: Fahrt über eine Wiese mit 8 km/h.....	28
Abbildung 36: Wiese 8 km/h .....	28
Abbildung 37: Sensoren auf einer Wiese im Einsatz.....	29
Abbildung 38: Künstlich angelegte Bahn mit definierten Unebenheiten .....	30
Abbildung 39: Abmessungen der künstlichen Bahn .....	30
Abbildung 40: Verlauf der Messwerte auf der Kunstbahn bei 1 und 4 km/h.....	31
Abbildung 41: Profil der 35-m-Testbahn.....	32
Abbildung 42: Signalverläufe über die 35-m-Testbahn (3 km/h).....	32
Abbildung 43: 100-m-Testbahn mit 5 cm Abstand zwischen den Holzbalken.....	33
Abbildung 44: Fahrt über die 100-m-Testbahn (5 km/h).....	34
Abbildung 45: Bestandeshöhe der Wiese 6-8 cm .....	34
Abbildung 46: „Radarsensor_Pflanzenhöhe“ bei 3 und 10 km/h Durch die Pflanzenreste vom Schlegeln war die Pflanzendecke relativ dicht (siehe Abb. 46). Der Sensor „Radar_Pflanzenhöhe“ konnte daher bei 3 und 10 km/h die Pflanzenoberfläche gut erfassen. ....	35
Abbildung 47: „Radar_Bodenoberfläche“ bei 3 und 10 km/h .....	35
Abbildung 48: „Lasersensor_direkt am Boden“ (Baumer) 3 und 10 km/h .....	36
Abbildung 49: „Lasersensor direkt am Boden (Sick)“ 3 und 10 km/h.....	36
Abbildung 50: „Taster_Linearführung“ 3 und 10 km/h .....	37

Abbildung 51: „Taster_Parallelogrammführung“ 3 und 10 km/h (Rundstahl 8 mm).....	38
Abbildung 52: „Tastrad_Linearführung“ 3 und 10 km/h (Tastrad aus Kunststoff).....	39
Abbildung 53: „Taststab mit Inkrementalgeber“ 3 und 10 km/h.....	39
Abbildung 54: „Ultraschallsensor“ (Baumer) 3 und 10 km/h .....	40
Abbildung 55: „Ultraschallsensor“ (Honeywell) 3 und 10 km/h .....	40
Abbildung 56: Berührungslose Sensoren bei 3 km/h.....	41
Abbildung 57: Tastende Sensoren bei 3 km/h (8) 07112022_Wiese hi. Halle 3 bei Weg Richt. O 3 km/h gleiche Spur .....	41
Abbildung 58: Tastende Sensoren bei 3 km/h .....	42
Abbildung 59: Alle Sensoren bei 3 km/h .....	42
Abbildung 60: Alle Sensoren bei 10 km/h .....	43
Abbildung 61: Alle Sensoren bei 10 km/h .....	43
Abbildung 62: Versuchsfahrt vor und nach der Kreiselegge .....	44
Abbildung 63: Fahrt nach der Kreiselegge 5 und 10 km/h (ohne Pflanzenreste) .....	45
Abbildung 64: Fahrt nach der Kreiselegge 5 und 10 km/h (ohne Pflanzenreste) .....	45
Abbildung 65: Fahrt vor der Kreiselegge mit Pflanzenresten 10 km/h.....	46
Abbildung 66: Fahrt vor der Kreiselegge mit Pflanzenresten 10 km/h.....	46
Abbildung 67: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzenbestand .....	47
Abbildung 68: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzenbestand 6 km/h .....	47
Abbildung 69: Fahrt auf unbearbeiteter Fläche, vor der Kreiselegge mit vereinzelt Pflanzenbestand 6 km/h (Ausschnitt in Abbildung 68 von 5 bis 28 Sek.) .....	48
Abbildung 70: Versuchsfahrt beim Hacken von Mais .....	49
Abbildung 71: Sensoren auf unbearbeiteten Boden beim Maishacken .....	49
Abbildung 72: Sensoren auf unbearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch1).....	50
Abbildung 73: Sensoren auf unbearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch1).....	50
Abbildung 74: Sensoren auf bearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch2).....	51
Abbildung 75: Sensoren auf bearbeiteten Boden 6 km/h (Versuch2).....	51
Abbildung 76: Radarsensoren vorne und hinter am Mähwerk befestigt .....	52
Abbildung 77: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk, Fahrspur bei 5 und 10 km/h, re. neben Weg.....	53
Abbildung 78: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk 5 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet) .....	53
Abbildung 79: Radarsensoren vorne und hinter dem Mähwerk 10 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet) .....	54
Abbildung 80: Fahrspur mit dem Mähwerk 5 und 10 km/h .....	54

Abbildung 81: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 5 km/h (Mähwerk nicht eingeschaltet) .....	55
Abbildung 82: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 6 km/h auf dichten Grasbestand (Mähwerk nicht eingeschaltet) .....	55
Abbildung 83: Radarsensoren vor und hinter dem Mähwerk 6 km/h auf dichten Grasbestand (Mähwerk nicht eingeschaltet) .....	56
Abbildung 84: Radarsensore im Abstand 1,80 m zum Boden montiert .....	57
Abbildung 85: Radarsensoren im Abstand 1,80 m und 0,80 m zum Boden montiert (gleiche Fahrspuren) In Abbildung 86 wurde abwechselnd über kahle eine Bodenfläche und über einen Weizenbestand gefahren um die Reaktion des Radarsensors auf die wechselnden Bedingungen zu erfassen. ....	57
Abbildung 86: Fahrt über einen Weizenbestand - Radarsensoren auf N-Sensor montiert (Sensorabstand zum Boden 1,80 m) .....	58
Abbildung 87: Fahrt über Mais – unbearbeiteten Boden – Soja.....	59
Abbildung 88: Fahrt über Maisbestand – unbearbeiteten Boden – Sojabestand - Radarsensoren auf N-Sensor montiert (Sensorabstand zum Boden 1,80 m).....	59
Abbildung 89: Anordnung der Sensoren am Pflug vorne und hinten (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“).....	60
Abbildung 90: „Radar2_Bodenoberfläche“ und „Laser_direkt am Boden600“ (Baumer) am Pflug vorne montiert .....	60
Abbildung 91: „Taster_Linearführung“ in der Pflugmitte montiert.....	61
Abbildung 92: „Radar1_Bodenoberfläche“ und „Laser_direkt am Boden1500“ (Baumer) neben dem Stützrad montiert.....	61
Abbildung 93: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“), Pflugtiefe vorne 20-25 cm, Pflugmitte 30-35 cm (4 km/h) .....	62
Abbildung 94: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) 4 km/h, Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm .....	63
Abbildung 95: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca.20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (4 km/h).....	64
Abbildung 96: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (8 km/h).....	64
Abbildung 97: Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) Pflugtiefe vorne ca. 20 cm, Pflugmitte ca. 25 cm (8 km/h).....	65
Abbildung 98: Vorne höher und hinten tiefer Pflügen (Pöttinger 5-Schar „Servo 4000 Plus“) .....	65



**Francisco Josephinum Wieselburg**  
Schloss Weinzierl 1, 3250 Wieselburg  
josephinum.at

ISBN 978-3-902451-19-4