

Geometriediskrete Belastungsmessung an einem Grubberwerkzeug

Johannes Bürke, Florian Schramm, Ludger Frerichs

Zur Validierung analytischer und numerischer Berechnungen von bodenmechanischen Vorgängen in der Landtechnik sind detaillierte Informationen aus Versuchen notwendig. Es wird ein neuartiger Messaufbau zur Erfassung von geometriediskreten Teilkräften an einem Grubberwerkzeug vorgestellt. Innerhalb von reproduzierbaren Versuchen in einer Bodenrinne wurden die Einflüsse der Prozessparameter Bearbeitungstiefe und Bearbeitungsgeschwindigkeit untersucht. Die Ergebnisse zeigen die qualitativen und quantitativen Zusammenhänge der Prozessparameter auf Teil- und Gesamtkräfte am untersuchten Werkzeug. Zudem wird ein Ansatz zur Extrapolation der gemessenen Teillasten auf messtechnisch unerfasste Geometrieabschnitte des Messwerkzeugs vorgestellt und bewertet. Damit können Verläufe hoch und niedrig belasteter Geometrieabschnitte eines Grubberwerkzeugs deutlich detaillierter als bisher möglich beschrieben werden. Diese neuartigen Detailinformationen dienen der Validierung von Berechnungen und sind damit Grundlage für Untersuchungen zum Verschleiß oder zu Arbeitsprozessen.

Schlüsselwörter

Messtechnisches Lastprofil, geometriediskrete Werkzeugbelastung, landtechnische Bodenmechanik, Bodenwiderstand, Grubberzinken

Die Gründe, sich mit der landtechnischen Bodenmechanik zu beschäftigen, die besonders von den Arbeiten von SÖHNE (1956) geprägt ist, sind trotz des über die Jahre gewachsenen Wissens und des heutigen Technologiestands unverändert:

- die Prozesse bei der Interaktion von Maschine und Boden im Detail zu verstehen,
- physikalische Eigenschaften der Ackerböden und der auftretenden Kräfte, Spannungen, Verformungen des Ackerbodens unter dem Einfluss von Maschinen zu erforschen und
- diese Erkenntnisse auf den Entwurf von Landmaschinen anzuwenden.

Rechenintensive, computergestützte Simulationsverfahren, wie finite oder diskrete Elemente-Methoden werden in Wissenschaft und Technik bereits vielfach angewendet. Der Einsatz dieser Methoden und Werkzeuge ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Festigkeitsauslegung von Maschinen mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist relativ gut und weit verbreitet. Dagegen ist die Untersuchung und Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) im Kontext der landtechnischen Bodenmechanik noch weit weniger verbreitet. Um das vielversprechende Potenzial der landtechnischen Maschine-Boden-Simulation umfangreicher nutzen zu können, bedarf es weiterer intensiver Untersuchungen der komplexen Interaktionseigenschaften des Bodenmaterials. Ansätze wie die von UGGUL et al. (2014) zeigen einen aktuellen Stand dieser Forschungen.

Ziel aktueller Untersuchungen am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge in Braunschweig ist es, detailliertes Wissen über die Vorgänge beim Werkzeugeinsatz im Boden zu erhalten.

Am Beispiel eines Grubberwerkzeugs wird diese Anwendung an sich untersucht und gleichzeitig die Weiterentwicklung der Simulationsmethode betrieben. Die Ermittlung der Parameter und die Validierung geschehen mithilfe einer neuartigen Belastungsmessung während des realen Arbeitsprozesses.

Die messtechnische Erfassung von Belastungen an landtechnischen Bodenbearbeitungswerkzeugen ist ein üblicher Ansatz der Untersuchung von bodenmechanischen Bruch-, Strömungs-, oder Reibungsvorgängen. Forscher der 1950er und 1960er Jahre untersuchten beispielsweise grundlegende Aufbruchsformen unterschiedlicher Böden oder den Einfluss von Werkzeugabmessungen (Anstellwinkel, Werkzeugbreite) auf den Bodenwiderstand (SÖHNE 1956, SIEMENS et al. 1965, VORNKAHL 1967). Diese Untersuchungen basierten auf Zug- und Vertikal-Kraftmessungen der insgesamt auf das Werkzeug wirkenden Kräfte. Eine detaillierte Unterscheidung von Kräften, die in unterschiedlichen Bereichen des Werkzeugs wirken, erfolgte dabei nicht. Dennoch zeigte SÖHNE (1956) einen zweidimensionalen theoretischen Ansatz, um die Reaktionskräfte des Bodens auf einer gewölbten Fläche zu berechnen.

Zur Messung von Teillasten an Bodenbearbeitungswerkzeugen wurden an der Universität von Bologna Druckmessungen an ausgewählten Stellen eines Pflugkörpers durchgeführt (MATTETTI et al. 2015). Untersuchungen durch die AREEO (Agricultural Research Education and Extension Organization) im Iran widmeten sich der Messung von Bodenwiderständen an unterschiedlichen, horizontal durch den Boden bewegten Messspitzen (SHARIFI 2016).

Die Neuerung der vorliegenden Grundlagenuntersuchung besteht in der vollständigen mehrdimensionalen Untersuchung des Bodenwiderstandes über den gesamten Verlauf der Frontfläche eines Grubberzinkens und der quantitativen Identifizierung des Verlaufs von hoch und niedrig belasteten Geometrieabschnitten für unterschiedliche Prozessparameter.

Wiederholbare Versuche mit einem homogenen Boden in der Bodenrinne

Zur Untersuchung der Elementarvorgänge zwischen Werkzeug und Boden bedarf es reproduzierbarer Versuche mit einer ausreichenden Anzahl an Wiederholungen. Bei Untersuchungen auf Freiflächen entstehen große Messunsicherheiten durch Pflanzenrückstände und Bewuchs, aber auch durch Inhomogenität der Bodenart, Bodenfeuchte, Bodendichte und damit zusammenhängend der Bodenfestigkeit des gesetzten Bodens. Für die Untersuchungen und das Verständnis von Teilprozessen sind homogene Bodenverhältnisse daher vorteilhaft. Die Messungen wurden daher unter Laborbedingungen in einer Bodenrinne ohne Bewuchs (Boden ohne Humusanteile) und ohne Setzungs- oder Trocknungseffekte im Boden durchgeführt. Als Bodenart wurde ein, für große Teile des europäischen Kontinents, repräsentativer lehmiger Sand verwendet. Eine Bodenrinne hat den Vorteil einer homogenen Bodenstruktur und bietet die Möglichkeit, den Bodenwassergehalt zu steuern. In Tabelle 1 sind die gemessenen Bodeneigenschaften des untersuchten Bodens zu den jeweiligen Versuchseinstellungen aufgeführt. Die Feuchtrohdichte und der Wassergehalt des Bodens in der Bodenrinne wurden als wichtige Merkmale identifiziert und zwischen den Messungen stichpunktartig erfasst, um etwaige Eigenschaftsänderungen des Materials beobachten zu können.

Tabelle 1: Messungen, Prozessparameter und Bodeneigenschaften der ausgewerteten Messdaten

Ifd. Nr.	Messungen		Prozessparameter (Faktoren)		Bodeneigenschaften	
	Anzahl Messschriebe	Anzahl ausgewerteter Wiederholungen pro Messschrieb	Stufen der Bearbeitungsgeschwindigkeit in m/s	Stufen der Bearbeitungstiefe in mm	Bodenwasser-gehalt in Massen-%	Feuchtrohdichte in g/cm ³
1	21 (n = 1)	4	0,1 / 0,5 / 1,0 / 1,5 / 2,0 / 2,5 / 3,0	50 / 100 / 150	4,75 (k = 6)	-
2	42 (n = 1)	4	0,1 / 0,5 / 1,0 / 1,5 / 2,0 / 2,5 / 3,0	50 / 100 / 150	3,74 (k = 9)	-
3	12 (n = 2)	5	0,3 / 1,0 / 2,0 / 3,0	100 / 140 / 180	8,16 (k = 12)	1,56 (k = 12)
4	12 (n = 2)	5	0,3 / 1,0 / 2,0 / 3,0	100 / 140 / 180	9,43 (k = 12)	1,59 (k = 12)
5	24 (n = 2)	5	0,3 / 1,0 / 2,0 / 3,0	100 / 140 / 180	4,19 (k = 9)	1,50 (k = 9)
6	24 (n = 2)	5	0,3 / 1,0 / 2,0 / 3,0	100 / 140 / 180	9,98 (k = 12)	1,60 (k = 12)

n: Anzahl der zugrundeliegenden Wiederholungen eines Messschriebs.

k: Anzahl der zugrundeliegenden Bodenproben.

In den ersten beiden Messungen betrug der gravimetrische Wassergehalt w des Bodens durchschnittlich 4,3% und ist damit als trockener Boden zu charakterisieren. Wohingegen der Boden der folgenden vier Messungen mit einem durchschnittlichen Bodenwassergehalt von 8,0% als feucht bezeichnet werden kann. Neben dem Bodenwassergehalt wurde stichpunktartig die Feuchtrohdichte ρ_F des Bodens mit einem Stechzylinder gemessen. Dabei wurde der Bodenzustand erfasst, auf den das Messwerkzeug trifft, und zwar jeweils nach vorausgehender Lockerung und Rückverfestigung des Bodens. Im Mittel kann für den feuchten Boden eine Feuchtrohdichte von 1,56 g/cm³ angenommen werden, die nach SOUCEK et al. (1990) mit natürlichen Bedingungen gut vergleichbar ist. Soucek ordnet die Feuchtrohdichte von Sanden zwischen 1,3 und 2,0 g/cm³ ein. Wobei der Bereich ab 1,7 g/cm³ für abgesetzte bis stark verdichtete Böden gilt. Damit sollen die synthetisch erzeugten Zustände in der Bodenrinne als gute Näherung an die in natürlichen Umgebungen vorkommenden Bodeneigenschaften gelten.

Des Weiteren zeigt Tabelle 1, welche Prozessparameter als wesentliche Faktoren variiert und in welchen Stufen diese eingeteilt wurden. Um auch nicht-lineare Effekte später identifizieren zu können, wurden pro Faktor mindestens drei Stufen festgelegt. Die vollfaktorielle Kombination dieser Stufen entspricht der Anzahl der Messschriebe. Bei den Messungen Nr. 3 bis 6 (bei feuchtem Boden) wurden zusätzlich alle Messschriebe zweimal ($n = 2$) in anderer Versuchsreihenfolge aufgezeichnet. Über die Anzahl der ausgewerteten Wiederholungen pro Messschrieb liegen den folgenden Untersuchungsergebnissen 248 ausgewertete Stichproben für trockenen Boden und 720 Stichproben für feuchten Boden zugrunde.

Zu jedem Messschrieb bzw. zu jeder Stichprobe innerhalb eines Messschriebes wurden insgesamt 14 unabhängige Belastungsgrößen aufgezeichnet und ausgewertet. Dazu zählen zum einen sechs an einem Kraftmessrahmen (KMR) wirkende Stabkräfte zur Identifizierung der Gesamlast auf das angeschlossene Werkzeug. Zum anderen wurden acht in einer piezo-elektrischen Messkette verarbeitete Kraftsignale zur geometriediskreten Auswertung von Teillasten mithilfe eines Messzinkens (MZ) aufgezeichnet.

Die Messung der Gesamtlast auf ein Bodenbearbeitungswerkzeug

Der verwendete Kraftmessrahmen dient der Messung von Zug-, Vertikal-, und Querkräften auf ein starr angebundenes Werkzeug. Darüber hinaus können die auftretenden Lastmomente um alle drei Raumachsen bestimmt werden. Damit besteht zusätzlich die Möglichkeit, eine Dynamie (oder Kraftschraube) der resultierenden Auflagerkraft des Rahmens zu berechnen.

Der in diesen Untersuchungen verwendete Kraftmessrahmen wurde eigens für die prognostizierten Belastungen ausgelegt und gefertigt. Im prinzipiellen Aufbau besteht dieser Kraftmessrahmen aus einem Ober- und einem Unterrahmen, die über sechs Kraftmessstäbe miteinander verbunden sind (Abbildung 1 a). Die Kraftmessstäbe verfügen an beiden Enden über Kugelgelenke, wodurch jeder Stab - reibungsfrei betrachtet - nur Zug- oder Druckkräfte leitet und in Summe alle sechs Stäbe den Ober- und Unter-Rahmen mechanisch-bestimmt miteinander verbinden. Die verwendeten Kraftmessstäbe sind auf Dehnmessstreifen (DMS) basierte Kraftmesselemente (TECSIS GMBH 2007) mit an die Einbaulage angepassten Nennwerten zwischen ± 1.000 und ± 10.000 N. Der kombinierte Fehler der Kraftmesselemente beträgt 0,2 % vom Messbereichsendwert und die zeitliche Abtastung der angeschlossenen Analog-Digital-Wandlung liegt bei 1 kHz.

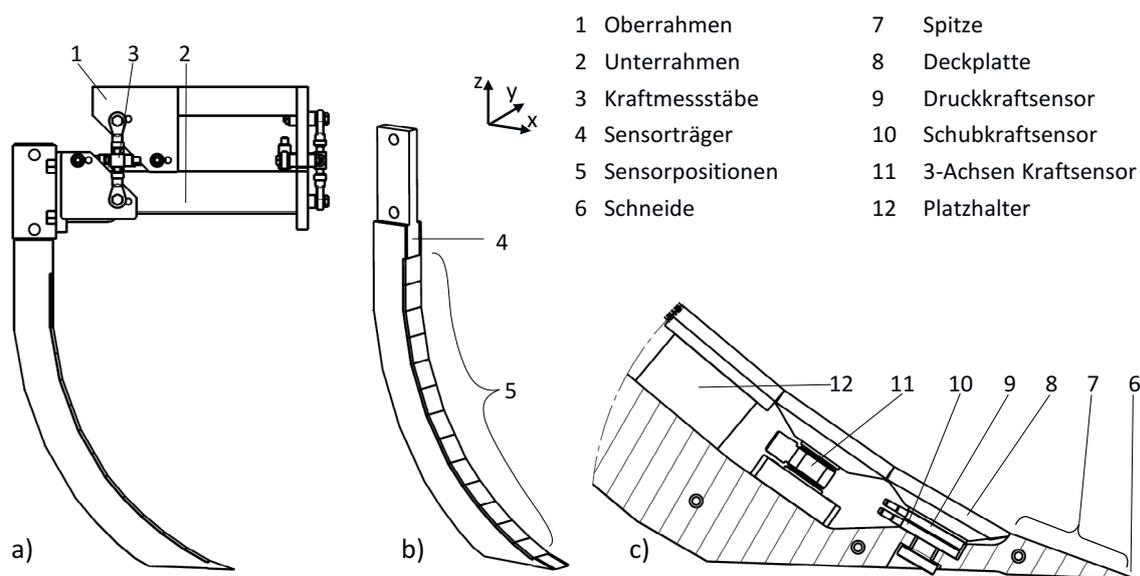


Abbildung 1: Aufbau der Kraftmesselemente, a) Seitenansicht Kraftmessrahmen und Messzinken, b) Sensorpositionen des Messzinkens, c) Detailansicht des Aufbaus der Zinkenspitze

Diese Informationen können verwendet werden, um beispielsweise die Zugkraftcharakteristik des Bodenbearbeitungswerkzeuges aufzuzeigen. Die in der Literatur gebräuchlichen Ansätze zur Beschreibung der Zugkräfte über der Bearbeitungstiefe oder der Geschwindigkeit werden im Wesentlichen über Polynome beschrieben (ASAE 2003, GORJACKIN 1968). Der Grad der Polynome und die Größe der Koeffizienten müssen werkzeug- und bodenabhängig versuchstechnisch bestimmt werden. Damit lassen sich beispielsweise unterschiedliche Werkzeug-Geometrien miteinander vergleichen. AL-NEAMA (2017) zeigte ein empirisches Regressionsmodell zur Vorhersage von Zugkräften auf Basis von Bodenmechanik und der Auswertung von Furchenprofilen.

Die Abbildung 2 zeigt die insgesamt am untersuchten Messzinken wirkende Zugkraft in Abhängigkeit der Prozessparameter Bearbeitungsgeschwindigkeit und Bearbeitungstiefe (im Nachfolgenden Zugkraftcharakteristik genannt). Der untersuchte Messzinken ist in der unteren rechten Ecke abgebildet. Die Zugkraft ist auf der dritten Achse aufgetragen und in Form von Iso-Linien gleicher Zugkraft abzulesen. Im grau gestrichelten Feld sind die Messdaten für den trockenen Boden dargestellt. Das schwarz umrandete Feld zeigt die Zugkräfte für den feuchten Boden. In beiden Fällen bildet sich ein Höhenprofil aus, das mit zunehmender Tiefe und Geschwindigkeit ansteigt. Der Gradient der Bearbeitungstiefe ist dabei größer als der Gradient der Geschwindigkeit. Neben der Darstellung der jeweils untersuchten Parameterräume ist gut ersichtlich, welchen erheblichen Einfluss der Bodenwassergehalt auf die am Werkzeug wirkenden Zugkräfte besitzt.

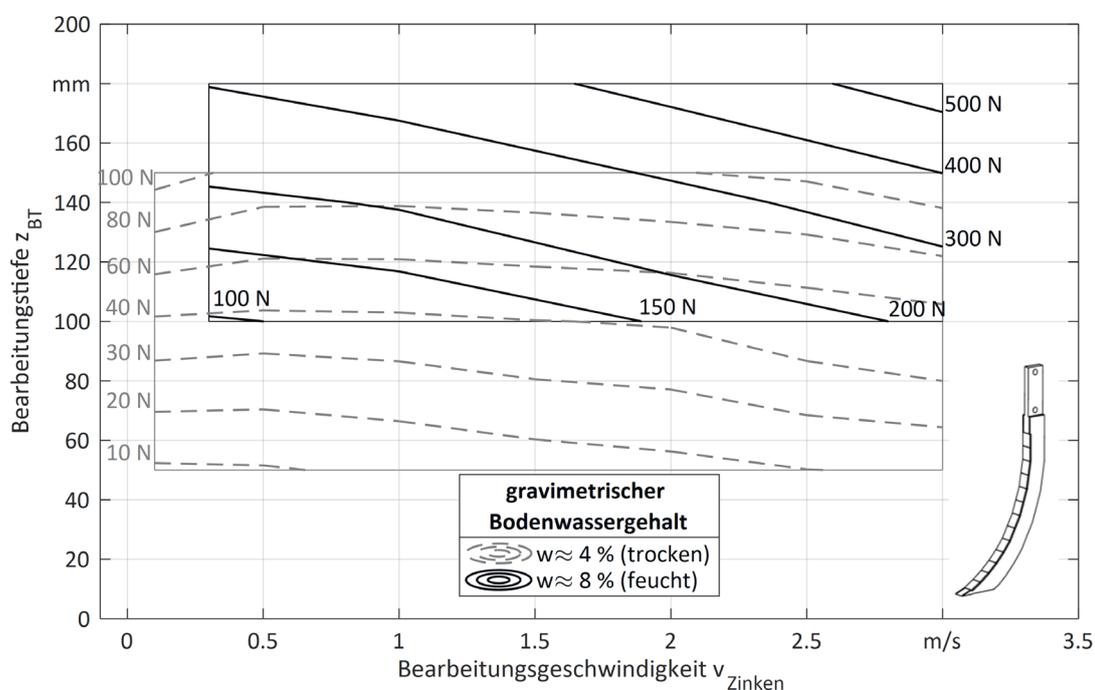


Abbildung 2: Gemessene Zugkraftcharakteristik des Messzinkens für trockenen und feuchten Boden (lehmgiger Sand)

Die Zugkraft des feuchten Bodens liegt in allen Prozesspunkten oberhalb der Werte für trockenen Boden. Die Zugkräfte für trockenen Boden erstreckten sich am einzelnen Zinken über einen Bereich von 10 bis 120 N. Die Zugkräfte im betrachteten Bereich des feuchten Bodens liegen im Bereich von 100 bis 500 N. Ein Vergleich bei identischen Prozessparametern zeigt, dass der feuchte Boden in etwa doppelte bis vierfache Zugkräfte am Werkzeug erzeugt. Bei der Anhebung des Bodenwassergehaltes von ca. 4 auf 8% zeigten sich auch erhebliche Unterschiede im Fluss bzw. Bruchverhalten des Bodens. Die stärkeren kohäsiven Kräfte des Bodens führten zu höheren Zugkräften am Werkzeug und zu größeren Bruchkörpern im Bodengefüge.

Neben der Untersuchung der Zugkraftcharakteristik dient der Kraftmessrahmen als Referenz zu den Teillastmessungen mit dem Messzinken. Die Referenz stellt dabei der resultierenden Gesamtkraftvektor auf den Zinken dar. Dieser Gesamtkraftvektor kann mathematisch als Dynam oder Kraftschraube der vektoriell am Kraftmessrahmen wirkenden Stabkräfte berechnet werden. Im An-

satz wird die Anwendung dieses Verfahrens auf ein Bodenbearbeitungswerkzeug von RÖHRS und WILKENS (1984) beschrieben. Die verwendete Messkette ist dabei in der Lage, Richtung und Größe der resultierenden Kraft auf das Werkzeug in allen drei Raumrichtungen zu berechnen (Koordinatensystem Abbildung 1 b). Über die Kenntnis der zugrundeliegenden Zinkengeometrie und der Wirklinie der Kraftschraube kann zusätzlich ein Durchstoß- oder Kraftangriffspunkt auf der Zinkoberfläche ermittelt werden. Im nachfolgenden Vergleich werden im Wesentlichen die Richtung und die Lage der Wirklinie der resultierenden Kraftschraube betrachtet.

Der Messzinken: Ein stilisiertes Bodenbearbeitungswerkzeug zur Messung von Lastprofilen

Im Fokus dieser Untersuchung steht die Messung von Normal- und Schub-Kräften auf diskrete Geometrieabschnitte während der Werkzeug-Bodeninteraktion eines Grubberzinkens. Die Entwicklung und Umsetzung dieses Messzinkens erfolgte nach Vorschlägen von KATTENSTROTH et al. (2015) und nach Erkenntnissen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes (KATTENSTROTH et al. 2011, HARMS 2010). Aus fertigungstechnischen Gründen wurde der Messzinken in der unstetigen (nicht stetig gekrümmten) Kontur gefertigt. Der aus planaren Elementen zusammengesetzte Messzinken bildet ein reales Werkzeug in Form und Größe ab (Abbildung 1).

Der Messzinken ist als Schraubverbindung mehrerer Fräsbauteile ausgeführt. Im Wesentlichen kann zwischen dem Sensorträger (4) und den darin eingelassenen piezoelektrischen Sensoren unterschieden werden. Hinter den Deckplatten (8), der insgesamt 13 diskret verteilten Sensorpositionen (5), können wahlweise piezoelektrische Kraftmesssensoren (9, 10, 11) oder Platzhalter (12) montiert werden. Der Verlauf, der in x-z-Ebene entstehenden Oberfläche des Zinkens, bildet sich durch die ebenen Deckplatten entsprechend unstetig aus, nähert sich einer realen Geometrie aber sehr gut an.

Für die Untersuchung standen insgesamt zwei 3-axiale Kraftmesssensoren vom Typ 9017C (KISTLER GRUPPE 2015). Beide Sensoren wurden fest mit einem Dehnbolzen zwischen einer Deck- und Fußplatte vorgespannt. Diese vorgespannten Sensoreinheiten können dann in den oberen 12 Sensorpositionen installiert werden. Die untere Sensorposition stellt, wie in Abbildung 1 c zuerkennen, aufgrund des begrenzten Bauraumes der eng zulaufenden Spitze eine Ausnahme dar. Um auch die Belastung so weit wie möglich im vorderen Abschnitt der Zinkengeometrie sensieren zu können, wurde hier mit zwei sehr flachen, übereinander gestapelten Sensorelementen gearbeitet. Mittels einer Deckplatte (8) wurden hier ein 1-axialer Druckkraftsensor (9), Typ 9015B, und ein 1-axialer Schubkraftsensor (10), Typ 9145B, direkt auf dem Sensorträger (4) vorgespannt (KISTLER GRUPPE 2009, 2010). Im Gegensatz zu den 3-axialen Sensoren kann hier nicht die Schubkraft in Querrichtung gemessen werden. Die Deckplatten aller Sensorpositionen besitzen die identische, ebene Quadratfläche von 50 x50 mm². Auch die ohne Sensorik ausgestattete Oberseite der Spitze (7) folgt dem stilisierten unstetigen Verlauf und verfügt über diese Geometrieabmessungen.

Mit diesem Messwerkzeug wurden für den trockenen Boden die Sensorpositionen 2 bis 7 und für den feuchten Boden die Einbaupositionen 1 bis 7 mit Sensoren untersucht. Da die Positionen 2 bis 7 durch die beiden 3-axialen Kraftmesssensoren abgedeckt werden müssen, ergeben sich also drei Einbauzustände zur lückenlosen Belegung. Für jeden der drei Einbauzustände wurden dann die in Tabelle 1 beschriebenen Prozessparameter angefahren. Die nachfolgend dargestellten Messwerte über der Zinkengeometrie (Einbaulage oder Position) zeigen somit immer die aus drei Messungen superpositionierten Belastungen am Messzinken.

Da bei unterschiedlichen Prozessparametern ein geometriefester Sensor in unterschiedlichen Wirtktiefen arbeitet bzw. eine unterschiedliche Anströmung erfährt, soll zunächst ein geometriefestes Zinken-Koordinatensystem sowie ein bodenfestes Boden-Koordinatensystem eingeführt werden. Abbildung 3 a zeigt die geometriefeste, von der Zinkenspitze vertikal nach oben gerichtete Zinken-Koordinate z_{Zinken} . Die Abbildung zeigt einen vereinfachten Verlauf des am Zinken entlangströmenden Bodens. Auf Höhe der Bodenoberfläche ist die Bearbeitungstiefe z_{BT} eingezeichnet. Von der Bodenoberfläche ausgehend und ebenfalls vertikal positiv ausgerichtet, liegt die bodenfeste Koordinatenachse z_{Boden} . Die Nummerierung der Sensorpositionen beginnt an der Zinkenspitze mit $P = 1$ und steigt ebenfalls in z -Richtung bis $P = 13$. Die auf die Sensoren wirkenden Normal- und Schub-Kräfte ergeben, bezogen auf die Deckplatten-Fläche, den jeweils normal wirkenden Druck p_N und die tangential wirkende Schubspannung p_S (Abbildung 3 b).

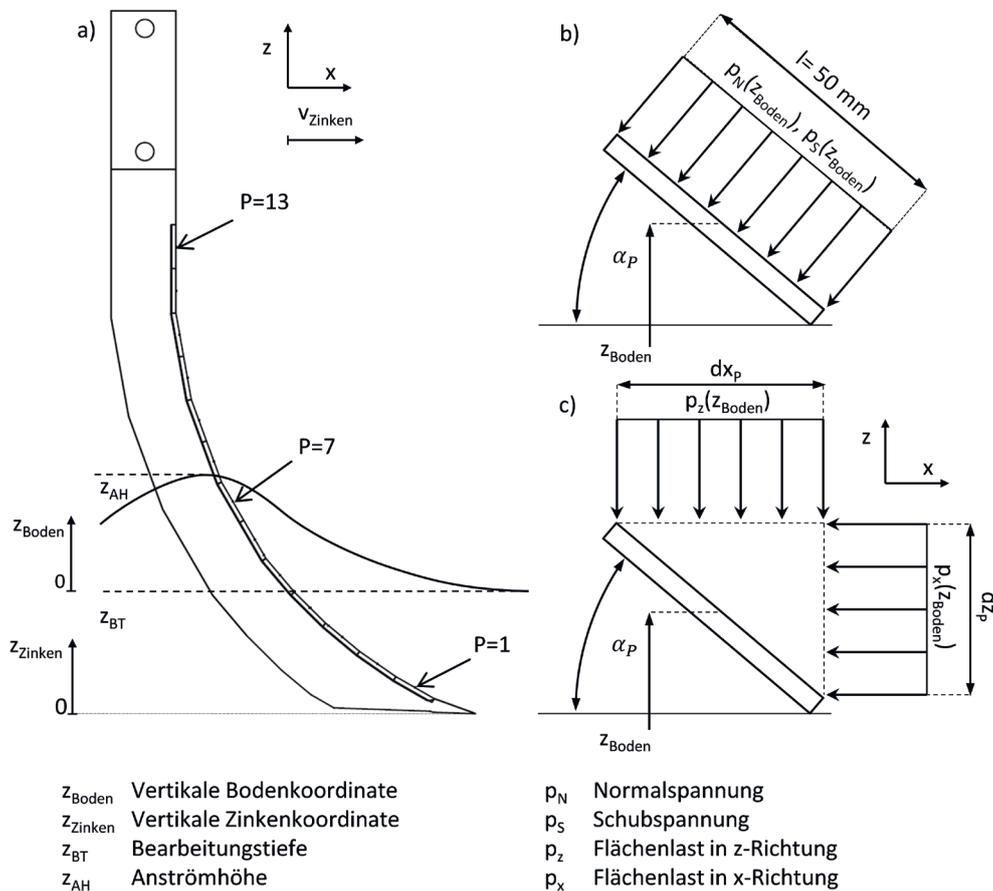


Abbildung 3: a) Geometrie- und bodenfestes Koordinatensystem, b) Normal- und Schub-Belastung der Deckplatten, c) Vertikale und horizontale Belastung der Deckplatte

Abbildung 4 zeigt Normaldruck- und Schubspannungs-Profile für die Bearbeitungstiefe $z_{BT} = 180$ mm in feuchtem Boden. Es ist zu erkennen, dass sowohl der Normaldruck, als auch die Schubspannung nicht gleichmäßig entlang der Tiefe z_{Boden} verlaufen. Es zeigt sich, dass die Belastungen in Normal- und Schub-Richtung mit zunehmender Tiefe ansteigen und sich bei $z_{Boden} = -150$ mm die größten Messwerte einstellen. Eine Betrachtung der eingezeichneten Kurvenschare zeigt, dass diese Lastverteilung gleichermaßen bei unterschiedlichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu beob-

achten ist. Die Lage der Lastprofile in Abhängigkeit von der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{Zinken} kann anhand der eingezeichneten Kurvenschare abgelesen werden. Wie auch die Kräfte auf das Gesamtwerkzeug, steigen mit zunehmender Geschwindigkeit die Belastungen auf einzelne Geometrieabschnitte. Die Abbildung verdeutlicht also die steigende Belastung auf den Grubberzinken in Richtung der Werkzeugspitze und zeigt, wie sich diese Verteilung in Abhängigkeit von der Bearbeitungsgeschwindigkeit quantitativ ausprägt. Diese Beobachtungen decken sich auch qualitativ mit den theoretisch für einen zweidimensionalen Fall von bestimmten Bodenreaktionskräften einer gewölbten Ebene (SÖHNE 1956).

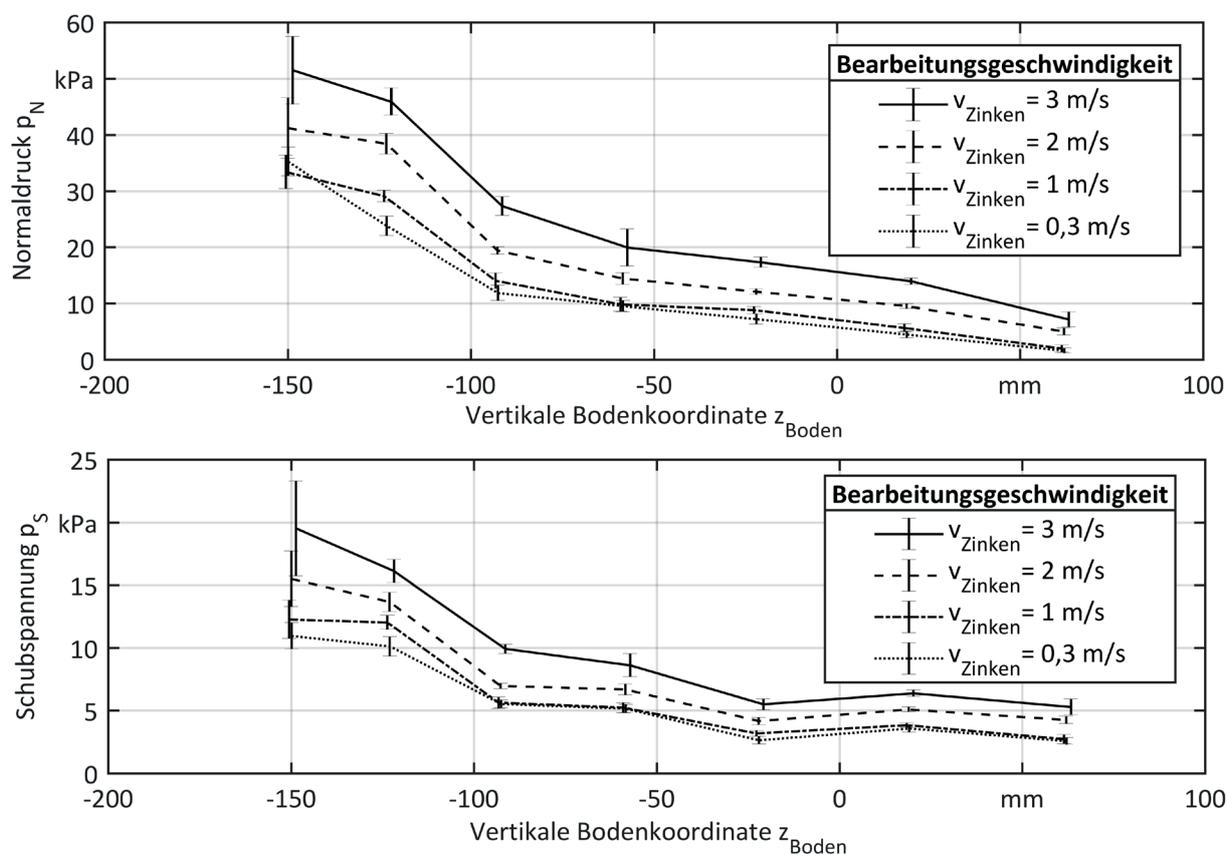


Abbildung 4: Lastprofile als Normaldruck- und Schubspannungsprofile unterschiedlicher Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_{Zinken} für feuchten Boden bei einer Bearbeitungstiefe $z_{BT} = 180$ mm

Die dargestellten Fehlerbalken der Lastprofile zeigen die ermittelte Standardabweichung der Messwerte ($\pm \sigma$). Diese Messunsicherheiten können auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden: Schwankungen in der Bearbeitungstiefe, Unterschiede im Bodenwassergehalt und sich damit ändernde Kohäsion des Bodens, Schwankungen der Feuchtrohdichte sowie systematische Fehler bei der Installation und Kalibrierung der einzelnen Sensoren. Ein weiterer Aspekt ist der Bodenaufbruch von kohäsivem Boden an sich. Da kohäsiver Boden in zusammenhängenden Bodenkluten bricht, verläuft die Belastung des Werkzeugs entsprechend dem periodischen Aufbrechen und Abgleiten der Bodenkluten. Diese Periodizität wurde im Rahmen dieser Messungen zeitlich gemittelt.

Da die Messungen auf einer hohen Anzahl von Messpunkten beruhen, kann eine entsprechende statistische Sicherheit angenommen werden. Im Folgenden sollen eine weitere Analyse und eine

Bilanzierung der Teillasten vorgenommen sowie ein Vergleich zu den am Kraftmessrahmen gemessenen Gesamtkräften gezeigt werden.

Bilanzierung der Teillasten zu resultierenden Werkzeugkräften

Eine Bilanzierung aller an der Werkzeug-Oberfläche angreifenden Einzelkräfte muss der insgesamt auf das Werkzeug wirkenden Gesamtkraft entsprechen. Bei der Anwendung einer derartigen Bilanzierung auf die gezeigten Messergebnisse müssen zwei Umstände beachtet werden. Eine Bilanz der Teillasten erfolgt immer für einen konstanten Prozesspunkt, bestehend aus Bearbeitungsgeschwindigkeit und Tiefe. Dies ist insbesondere aufgrund der Superposition der Teillasten zu erwähnen. Zudem können mit dem vorliegenden Messzinken nicht alle an der Oberfläche wirkenden Teillasten einzeln aufgelöst erfasst werden.

Um die Teilkräfte eines Prozesspunktes bilanzieren zu können, ist es notwendig, die normal und tangential auf die Deckplatten wirkenden Kräfte zunächst in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. Die Transformation erfolgt dabei mittels des Neigungswinkels an jeder Position P und in globalen x-, y-, z-Zinkenkoordinaten (Abbildung 3 b, 3 c). Als Ortsvektoren dienen die Flächenschwerpunkte der Deckplatten. Abbildung 5 a zeigt diese gemessenen Teillasten in vektorieller Darstellung über der Zinkegeometrie bei einer Bearbeitungstiefe von $z_{BT} = 180 \text{ mm}$ und einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $v_{Zinken} = 2 \text{ m/s}$ in feuchtem Boden.

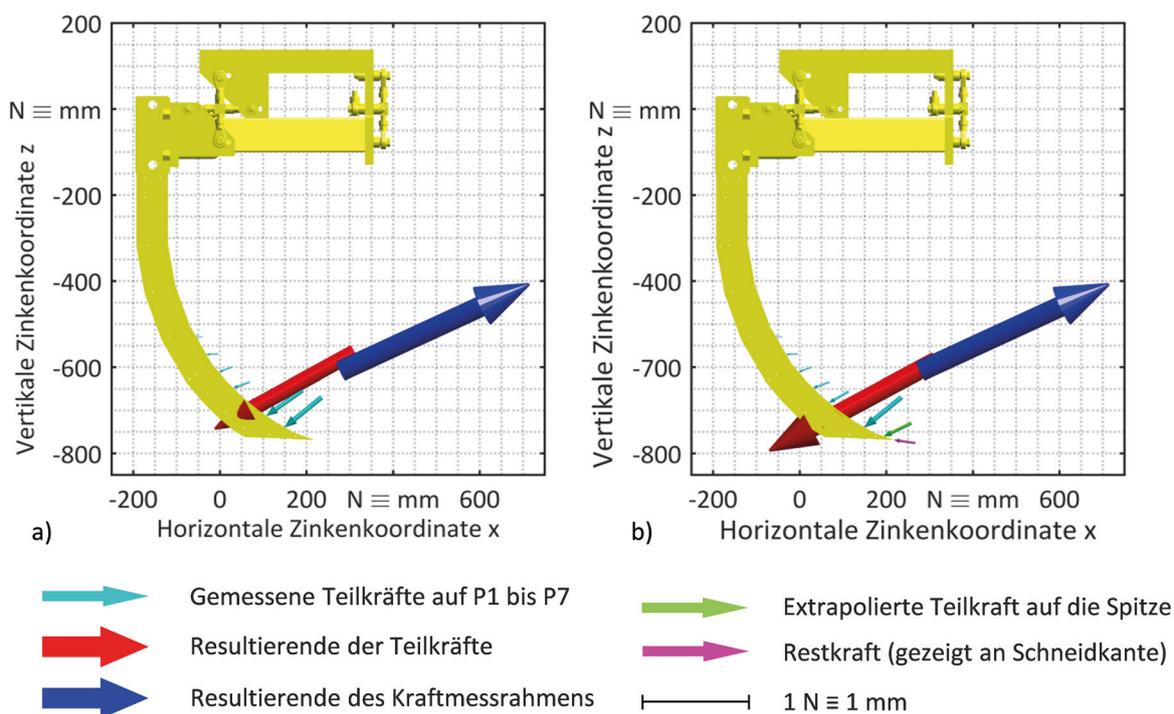


Abbildung 5: Belastung des Messzinkens für feuchten Boden bei einer Bearbeitungstiefe $z_{BT} = 180 \text{ mm}$ und einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_{Zinken} = 2 \text{ m/s}$, a) Gemessene Kräfte an Kraftmessrahmen und Messzinken, b) Extrapoliertes Lastprofil des Messzinkens unter Einbeziehung der nicht erfassten Kräfte, insbesondere an der Scharfspitze

Alle Kraftvektoren in Abbildung 5 sind als Pfeile dargestellt ($1 \text{ N} \cong 1 \text{ mm}$). Die türkisfarbenen kürzeren Pfeile sind die gemessenen Teilkräfte. Außerdem wurde eine resultierende Kraftschraube aus diesen Teilkräften berechnet, die durch den roten Pfeil dargestellt wird. Zum Vergleich ist die aus

den am Kraftmessrahmen wirkenden Stabkräften berechnete Kraftschraube in blau dargestellt. Diese Resultierende der Stabkräfte ist der Kraftschraube der Teillasten entgegengerichtet. Die sich ergebenden Wirklinien beider Kraftschrauben liegen an der Werkzeugoberfläche ca. 50 mm auseinander. Ein Vergleich der Vektorlängen ergibt eine Kraftdifferenz zwischen der Messung am Messzinken und der Messung am Kraftmessrahmen für alle Prozessparameter. Im abgebildeten Fall beträgt die Kraftdifferenz 114 N (24 % der resultierenden Gesamtkraft). Da die resultierende Kraftschraube der Teillasten kleiner ist als die resultierende Gesamtkraft des Kraftmessrahmens, wird angenommen, dass diese Differenz in den nicht erfassten Geometrieabschnitten bzw. Kräften begründet ist.

Zur Abschätzung der messtechnisch nicht erfassten Kräfte sollen folgende Annahmen bzw. Erläuterungen gelten: Durch eine ideale, symmetrische Anströmung treten keine resultierenden Kräfte in Querrichtung auf. Die Reibung an den Seitenflächen des Werkzeugs wird vernachlässigt. Die wesentliche, messtechnisch nicht erfasste Belastung herrscht oberhalb der in Abbildung 1 c dargestellten Spitze (7) bzw. auf der Schneide (6).

Zur Abschätzung der Kräfte, die auf die Oberseite der Spitze wirken, soll eine Extrapolation der gemessenen Belastungen erfolgen. Es wird angenommen, dass sich der Verlauf der Belastung in Richtung der Spitze fortsetzt. Folgende Extrapolation wird angesetzt: Die gemessenen Normal- und Schubkräfte werden über die Transformation um den Neigungswinkel in horizontale und vertikale Komponenten zerlegt. Dies entspricht dem zuvor beschriebenen Vorgehen für die Bilanzierung und Berechnung der Kraftschraube. Für die Extrapolation werden die Kräfte nun in flächenspezifische Lasten in x- und z-Richtung überführt. Dabei werden die Kräfte auf die Projektionsfläche in x- bzw. in y-Richtung bezogen (Abbildung 3 c). Da die Neigungswinkel zur Spitze hin flacher werden, ergibt sich eine Art Gewichtung der Last für beide Richtungen. Abbildung 6 zeigt z. B. für den oben gezeigten Prozesspunkt den Verlauf der gemessenen Drücke p_x und p_z über der vertikalen Bodenkoordinate z_{Boden} .

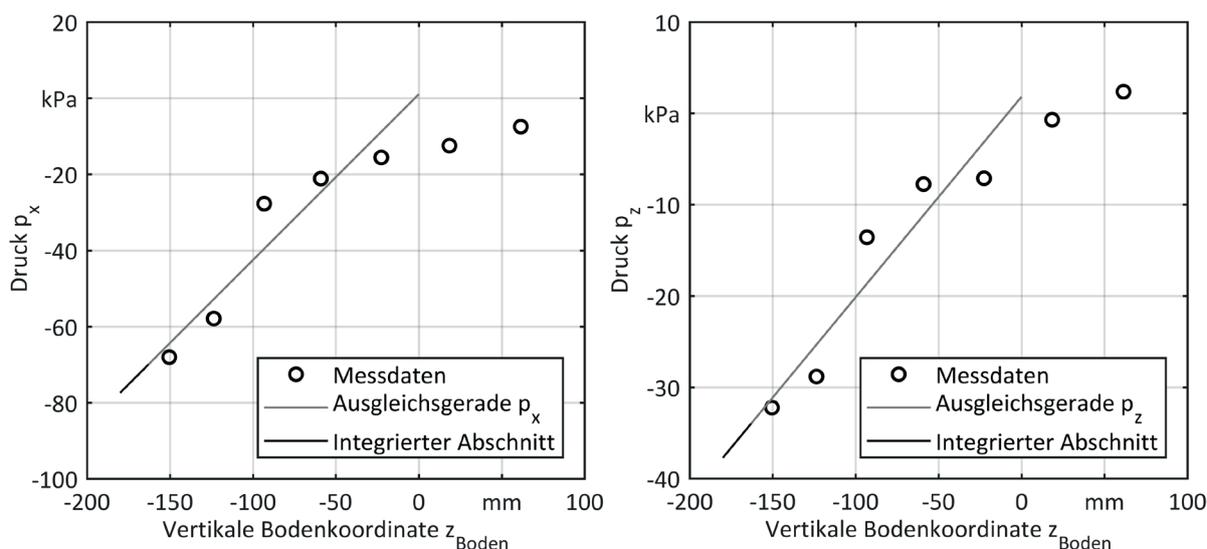


Abbildung 6: Horizontal und vertikal wirkende Drücke p_x und p_z für feuchten Boden bei einer Bearbeitungstiefe $z_{\text{BT}} = 180 \text{ mm}$ und einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_{\text{Zinken}} = 2 \text{ m/s}$

In Anlehnung an die Untersuchungen mit einem Messwerkzeug aus horizontal angeordneten Penetrometern (SHARIFI 2016) wurde angenommen, dass der Druck in Fahrtrichtung (p_x) linear mit der Tiefe z_{Boden} verläuft. Ebenso wurde der vertikal lastende Druck als linear ansteigend angenommen. Beide linearen Verläufe galten dabei jeweils nur unterhalb der Bodenoberfläche, also für $z_{\text{Boden}} < 0$. Abbildung 6 zeigt die für beide Verläufe ermittelten Ausgleichsgeraden und die Messdaten. Nun konnten die ermittelten linearen Zusammenhänge $p_x(z_{\text{Boden}})$ und $p_z(z_{\text{Boden}})$ über z_{Boden} innerhalb der Wirktiefe der Spitze (hier: -162,9 bis -180 mm) integriert werden. Multipliziert mit der konstanten Breite $b= 50$ mm des Zinkens, ergeben sich die Kräfte F_x und F_z auf der Oberseite der Spitze:

$$F_x = b \cdot \int_{z=-162.9}^{z=-180} p_x(z_{\text{Boden}}) dz$$

$$F_z = b \cdot \int_{z=-162.9}^{z=-180} p_z(z_{\text{Boden}}) dz$$

Der grüne Vektorpfeil in Abbildung 5 b zeigt diese, auf dem Flächenschwerpunkt der Spitze aufgetragen, extrapolierten Kraftkomponenten. Unter Berücksichtigung dieses extrapolierten Vektors entsteht eine neue resultierende Gesamtkraft des Messzinkens, der in Abbildung 5 b rot dargestellte Kraftvektor. Es ist nun zu sehen, dass die Wirklinien der resultierenden Kraftschrauben des Kraftmessrahmens und des Messzinkens enger zusammenliegen und, dass auch die Länge der Vektoren besser übereinstimmen. In diesem Beispiel unterscheidet sich der Betrag der resultierenden Vektoren (Kraftdifferenz) in der x-z-Ebene um lediglich 49 N (10 % der resultierenden Gesamtkraft). Der Abstand der Wirklinien beträgt an der Werkzeugoberfläche ca. 10 mm.

Die verbleibenden Kraftdifferenzen (Differenzen zwischen der resultierenden Gesamtkraft des extrapolierten Lastprofils und den resultierenden Gesamtkräften des Kraftmessrahmens in x-z-Ebene) können damit erklärt werden, dass die Messunsicherheiten bei geringen Kräften deutlich zunehmen und dass bei der Extrapolation sowie in der Kraftbilanz die oben beschriebenen Geometrieoberflächen unberücksichtigt bleiben. Eine Übersicht der absoluten und relativen Restkraft gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Absolute und relative Restkraft mit Extrapolation des Lastprofils

		Bearbeitungsgeschwindigkeit in m/s			
		0,3	1	2	3
Bearbeitungstiefe in mm	100	29 N (29%)	23 N (21%)	28 N (17%)	34 N (15%)
	140	40 N (21%)	39 N (18%)	45 N (15%)	48 N (13%)
	180	42 N (12%)	43 N (12%)	49 N (10%)	50 N (8%)

Absolute Restkraft: Betrag des Restkraftvektors in x-z-Ebene.

Relative Restkraft: Betrag des Restkraftvektors bezogen auf den Betrag des Gesamtkraftvektors ermittelt am Kraftmessrahmen in der x-z-Ebene.

Eine Betrachtung der Restkraft ohne Extrapolation zeigt Werte zwischen 38 und 130 N bzw. zwischen 21 und 40% der Gesamtkraft. Es ist zu erkennen, dass durch die Extrapolation durchweg geringere Restkräfte verbleiben. Eine Betrachtung der Restkräfte inklusive der extrapolierten Kraftkomponente an der Oberseite der Spitze ergibt folgendes Bild: Die Restkraft liegt zwischen 23 und 50 N.

Dies entspricht relativen Werten von 8 bis 29% der Gesamtkraft. Es ist zu sehen, dass die Restkraft bei den Prozessparametern geringer Größe (geringe Bearbeitungstiefe und kleine Bearbeitungsgeschwindigkeit) einen größeren Anteil besitzt als bei höheren Werten der Prozessparameter. Die gemessenen Kräfte bei den geringen Bearbeitungstiefen und Geschwindigkeiten liegen am unteren Ende des Messbereiches der Kraftsensoren und auch unterhalb prozessbedingt üblicher Geschwindigkeitswerte.

Das Ziel einer möglichst vollständigen, geometriediskreten Belastungsuntersuchung und damit der Ermittlung von Belastungsprofilen über der Werkzeuggeometrie wird also bei unterschiedlichen Prozessparametern unterschiedlich gut erreicht.

Schlussfolgerungen

Die in der vorgestellten Untersuchung eingesetzte Messeinrichtung zur Ermittlung von geometriespezifischen Lasten und Belastungsprofilen an einem Bodenbearbeitungswerkzeug während der Bodeninteraktion stellt eine Neuerung für die in Wissenschaft und Technik bislang bekannten Methoden dar. Es konnte qualitativ und quantitativ gezeigt werden, wie sich Druck- und Schubspannungen über der Zinkengeometrie entwickeln. Als Ergebnis liegen die Lastprofile für die wichtigsten Prozessparameter Bearbeitungsgeschwindigkeit und Bearbeitungstiefe bei zwei untersuchten Bodenwassergehalten vor. Die Methode und die Daten dienen als wichtige Grundlage aufbauender Untersuchungen zur Gestaltung von Bodenbearbeitungswerkzeugen. Besonders im Hinblick auf die Weiterentwicklung und die Untersuchungen mit DEM-Simulationsverfahren sind diese Erkenntnisse von besonderem Interesse. Zur Parametrierung von Bodenmodellen und nicht zuletzt zur Validierung von Simulationsergebnissen kann auf die Messmethodik und auf die erzielten Ergebnisse zugegriffen werden.

Literatur

- Al-Neama, A. K. A.; Herlitzius, T. (2017): Draft forces prediction model for standard single tines by using principles of soil mechanics and soil profile evaluation. *Landtechnik* 72(3), <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2017.3161>
- American Society of Agricultural Engineers ASAE (2003): ASAE Standards 2003 (ASAE D497.4), ASAE D497.4, pp. 372–380
- Djatschenko, G. (1972): Zur Untersuchung des Scharschneidenwinkels von Grubberwerkzeugen für hohe Arbeitsgeschwindigkeiten. *Deutsche Agrartechnik* 22(1), S. 22–25
- Gorjackin, W. P. (1968): *Sobranie socinenij. Gesammelte Werke, Bd. 2.* Moskau, Verlag Kolos
- Harms, H.-H. (2010): Reibkraftreduzierung durch hochfrequente Schwingungsanregung am Beispiel der Bodenbearbeitung. Projektnr. 83596685, DFG-Abschlussbericht HA 1100/36-1
- Kattenstroth, R.; Harms, H.-H.; Wallaschek, J. (2015): Hochfrequente Werkzeugschwingung zur Zugkraftreduktion bei der Bodenbearbeitung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag GmbH
- Kattenstroth, R.; Harms, H.-H.; Lang, T.; Wurpts, W.; Twiefel, J.; Wallaschek, J. (2011): Reibkraftreduktion mittels Ultraschallanregung in der Bodenbearbeitung. *Landtechnik* 66(1), <https://doi.org/10.1515/lt.2011.341>
- Kistler Gruppe (2009): Betriebsanleitung, Typ 9135B21. SlimLine Sensoren (SLS) Typ 9130B... bis 9137B
- Kistler Gruppe (2010): Betriebsanleitung, Typ 9145B21. SlimLine Sensoren (SLS) Schubkraft Typ 9143B... bis 9147B
- Kistler Gruppe (2015): Betriebsanleitung, Typ 9017C. Piezoelektrischer 3-Komponenten- Kraftsensor Typ 9017C, 9018C, 3-Komponenten- Kraftsensor Typen 9027C, 9016C4
- Mattetti, M.; Varani, M.; Molari, G. (2015): Measurement of the soil pressure on a plough. In: *Land.Technik AgEng 2015, 73rd International Conference on Agricultural Engineering „innovations in agricultural engineering for efficient farming“* in Hannover, 06–07 November 2015, Düsseldorf, VDI-Verl., pp. 487–491

- Röhrs, W.; Wilkens, D. (1984): Kraftmessungen an Bodenbearbeitungsgeräten. *Grundlagen der Landtechnik* 34(3), S. 117–125
- Sharifi (2016): Comparison of cone and prismatic tips for measuring soil mechanical resistance by a horizontal sensor. *CIGR Journal* 18(2), pp. 66–72
- Siemens, J. C.; Weber, J. A.; Thornburn, T. H. (1965): Mechanics of Soil as Influenced by Model Tillage Tools. *Transactions of the ASAE* 8(1), pp. 1–7, <https://doi.org/10.13031/2013.40412>
- Söhne, W. (1956): Einige Grundlagen für die Landtechnische Bodenmechanik. *Grundlagen der Landtechnik – Konstrukteurhefte* 7, S. 11–27
- Soucek, R.; Pippig, G. (1990): *Maschinen und Geräte für Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat*. Berlin, Verlag Technik
- tecsis GmbH (2007): *Betriebsanleitung Zug-/Druckkraftaufnehmer F2301/F23C1*. Offenbach am Main, tecsis GmbH
- Ucgul, M.; Fielke, J. M.; Saunders, C. (2014): 3D DEM tillage simulation. Validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil. *Soil and Tillage Research* 144, pp. 220–227, <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.003>
- Vornkahl, W. (1967): Beitrag zur Gestaltung von zinkenartigen Bodenbearbeitungswerkzeugen. *Grundlagen der Landtechnik* 17(3), S. 95–98

Autoren

Johannes Bührke (M.Sc.) und **Florian Schramm (M.Sc.)** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Institutsleiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: johannes.buehrke@tu-braunschweig.de.

Hinweise

Das vorgestellte Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert.