

Kennfeldidentifikation eines Grubberwerkzeuges mit variabler Geometrie

Stefan Schwede, Thomas Herlitzius

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung von geometrischen Parametern auf den Zugkraftbedarf von Grubberwerkzeugen sind oftmals nur auf den getesteten Bodentyp und die zu dem Zeitpunkt herrschenden Witterungsverhältnisse anwendbar. In einem Forschungsprojekt wurde untersucht, ob über eine Echtzeitverstellung der Werkzeuggeometrie auf den Zugkraftbedarf Einfluss genommen werden kann. Die Grundlage für eine Optimierungsentwicklung und Gegenstand dieses Berichts ist die Kennfeldanalyse eines Grubberwerkzeuges mit variabler Geometrie in Labor- und Feldversuchen.

In den Laborversuchen zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Scharwölbung auf den Zugkraftbedarf. Die Ergebnisse der Feldversuche sind erwartungsgemäß heterogener. Hier zeigte sich eine Abhängigkeit bezüglich des Anstellwinkels. Hinsichtlich möglicher Optimierungsstrategien wird das Kennfeld variabel und ortsabhängig angenommen. Entsprechend ist eine kraftoptimierte Geometrie situationsabhängig einzustellen.

Schlüsselwörter

Bodenbearbeitung, Zugkraftbedarf, Anstellwinkel, Laborversuche, Feldversuch

In der Landwirtschaft stellt der Boden bzw. die Ackerkrume als Pflanzenstandort das wichtigste Produktionsmittel dar; daher müssen sie für ein optimales Pflanzenwachstum präpariert werden. Ebenso ist der Boden Fahrbahn für Fahrzeuge mit Radlasten über 10 t und unterliegt zum Teil starken Bodenverdichtungen (KELLER et al. 2019). Aus diesen Gründen ist eine den Anforderungen entsprechende Bodenbearbeitung notwendig. Unter den landwirtschaftlichen Tätigkeiten stellt die Bodenbearbeitung den Bereich mit dem höchsten Leistungsbedarf dar (FRÖBA 2018).

Die in dieser Arbeit zusammengetragenen Erkenntnisse wurden innerhalb eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts, HE 5738/2-2, gesammelt. Gesamtziel ist es, Kennfelder eines Grubberwerkzeuges mit veränderlicher Geometrie hinsichtlich des Kraftbedarfs und des Arbeitsergebnisses zu erstellen. Die grundlegenden Untersuchungen stellen die Datenbasis für die Auswahl von Strategien zur variablen Geometrieanpassung während des Arbeitsprozesses dar. Das Werkzeug soll so geregelt werden, dass es optimal auf die agrotechnischen Forderungen und zugleich auf wechselnde Bodenbedingungen reagieren kann. In diesem Bericht soll der Zwischenstand, eine Zusammenfassung über die Erkenntnisse aus Labor- und Feldversuchen in Hinblick auf den Kraftbedarf, zusammengetragen werden.

Vorüberlegung

Eine Weiterentwicklung von Werkzeugkonzepten, die die vielfältigen und durchaus leistungsfordern- den Aufgaben bewältigen, ist heute und wird auch in Zukunft Teil der Forschung sein. Neuere Be- streben im Bereich der Bodenwerkzeuge erfassen zum Beispiel die geometriediskrete Belastung von Grubberscharen (BÜHRKE et al. 2018). Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, Aussagen über Zonen unterschiedlichen Verschleißes festzustellen und daraufhin Werkzeuge zu entwickeln. Im Bereich des Zugkraftbedarfs von Werkzeugen wurden Modelle gefunden, die in Abhängigkeit von Geschwin- digkeit und Arbeitstiefe für diskrete Schargeometrien die Zugkraft vorhersagen (AL-NEAMA 2019). Eine Methode, um den Zugkraftbedarf des Bodens zu beeinflussen, ist die aktive Schwingungser- regung des Schares (KATTENSTROTH et al. 2011). Dabei wurden signifikante Zugkraftreduzierungen festgestellt. Allerdings sind zusätzliche aktive Elemente notwendig, deren Leistungsbedarf zum Teil die eingesparte Leistung überstiegen.

Mit einer der einflussreichsten Geometrieparameter auf den Zugkraftbedarf ist der Anstellwinkel des Schares (PALME 1976). Bei der Betrachtung des Anstellwinkels mit dem geringsten Zugkraftbe- darf werden in der Literatur verschiedene Werte angegeben. Söhnes Berechnungen vermuten ein Kraftminimum im Bereich von 11 bis 15°, während in seinen praktischen Untersuchungen der Wert mit ca. 20° etwas höher liegt (SÖHNE 1956). Andere bestätigen die Ergebnisse bzw. liegen in einem ähnlichen Bereich (VORNKAHL 1967, SIEMENS et al. 1965). In einigen Berichten werden zwei Berei- che angegeben, in denen der Zugkraftbedarf an das Arbeitsergebnis gekoppelt wird. So bewirkt ein niedriger Anstellwinkel im Bereich 15 bis 20° vor allen Dingen einen leichtzügigen Schnitt und ein Anstellwinkel im Bereich 20 bis 40° eine stärkere Lockerung und Krümelung des Bodens (SOUCEK et al. 1990, McKYES et al. 1984). Die stärkere Krümelung bei höheren Anstellwinkeln kann mit einem Wechsel des Bruchmodells von Zugversagen zu Scherversagen begründet werden (ELJAH et al. 1971, ALUKO et al. 2000). Durch das intensivere Aufeinanderabgleiten von Scherebenen bilden sich größere Bruchflächen aus und das Arbeitsergebnis ist feinkrümeliger. Infolge dessen ein höherer Zugkraftbe- darf zu erwarten ist.

Die Untersuchungen wurden meist mit Modellzinken durchgeführt. Entsprechend beruhen die Ergebnisse auf der Wirkung von geneigten Platten und nicht, wie bei realen Werkzeugen, von gewölb- ten Werkzeugen. Andererseits ist die Variabilität der Böden so hoch, dass die Vorhersagemodelle un- ter den getesteten Bedingungen zwar ausreichend genau sind, aber nicht präzise genug, um auch im praktischen Einsatz auf anderen Böden oder unter anderen Bedingungen ihre Gültigkeit zu behalten (GODWIN et al. 1977, SOUCEK et al. 1990).

Aufbau eines Grubberwerkzeuges mit veränderlicher Geometrie

Als Ausgangswerkzeug für das Versuchsmuster wurde ein Schmalschar der Firma Lemken GmbH & Co. KG verwendet. Dieses ist in zwei Elemente geteilt, der Scharspitze K12 P und dem Leitblech KL 10 S (Abbildung 1). Beide Werkzeugelemente sind auf einem Scharträger montiert, der in einem Drehpunkt am Scharhalm gelagert ist. Die Verstellung des Scharträgers erfolgt über einen Hydraulikzylinder mit integriertem Wegmesssystem. Dadurch kann der Scharträger um 20° gegenüber der Horizontalen gedreht werden. Aus der Drehung ergibt sich ein stufenlos verstellbarer Bereich des An- stellwinkels von $\alpha = 14$ bis 34°. Das Leitblech und damit die Scharwölbung ist über ein Stecksystem in drei Positionen variabel gestaltet. Die Gesamtbaugruppe wird nachfolgend als das Verstellchar bezeichnet.

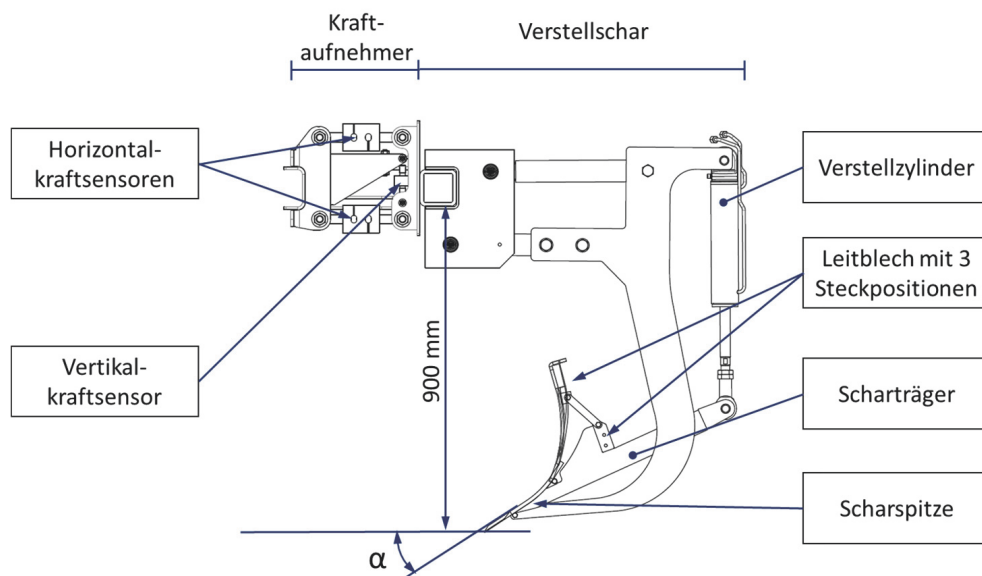


Abbildung 1: Verstellschar mit variabler Werkzeuggeometrie und vorgelagertem Kraftaufnehmer; Anstellwinkel $\alpha=34^\circ$; Leitblech in Position 1

Zur Messung der Kraftkomponenten wird ein Kraftaufnehmer der Professur Agrarsystemtechnik verwendet. In vertikaler Richtung wird die Kraft über einen HBM U9 (20 kN Messbereich) und in horizontaler Richtung über zwei HBM-S9-Kraftsensoren (50 kN Messbereich) gemessen. Die Auswertung der Kraftsensoren erfolgt über QuantumX-Messverstärker.

Material und Methoden Laborversuch

Die Laborversuche sind in der Bodenrinnenanlage der Professur Agrarsystemtechnik an der Technischen Universität Dresden durchgeführt worden (technische Details: KALK 1971). Die Anlage ist 28 m lang und gefüllt mit lehmigem Sand (9 % Ton, 30 % Schluff, 61 % Sand). Die Bodenfeuchte kann über ein Bewässerungssystem eingestellt werden. Ist die angestrebte Bodenfeuchte eingestellt, muss der natürliche Trocknungsvorgang über die Versuchstage hinweg kontrolliert und ausgeglichen werden. Der elektrohydraulisch betriebene Zugwagen besitzt einen quer zur Fahrtrichtung verfahrbaren Drei-Punkt-Anbauraum. An diesem ist das Verstellschar, mit zwischengeschaltetem Kraftaufnehmer, an das Fahrzeug gekoppelt. In Tabelle 1 sind die für die Laborversuche eingestellten Parameter aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht Einstellparameter für Laborversuche.

	Variable	Einheit	Abstufung
Arbeitstiefe	AT	cm	10; 20; 30
Gravimetrische Bodenfeuchte	BF	% (bez. auf Trockenmasse)	8; 13
Geschwindigkeit	V	km/h	4; 8; 12
Anstellwinkel	AW	°	14; 24; 34
Leitblechposition	LB	-	1 (starke Wölbung; oberes Steckloch) 2 (mittlere Wölbung; mittleres Steckloch) 3 (flache Wölbung; unteres Steckloch)

Aufgrund des hohen Vorbereitungsaufwands wurde für die Laborversuche ein statistischer Versuchsplan ausgearbeitet, der es erlaubt, den Testumfang abweichend vom vollfaktoriellen Versuchsplan auf eine vorgegebene Zahl von Versuchen zu reduzieren und dennoch Aussagen über die Abhängigkeiten der Parameter bestmöglich wiederzugeben (SIEBERTZ et al. 2017). Der so entstandene D-optimale Versuchsplan umfasst einen vorgegebenen Umfang von 58 Einstellkombinationen, welche dreifach durchgeführt wurden.

Material und Methoden Feldversuch

Für die Feldversuche wurde das Verstellchar zweimal vervielfältigt und mit jeweils einem Kraftaufnehmer ausgestattet. Der Tragrahmen ist als Drei-Punkt Traktoranbaugerät ausgeführt (Abbildung 2). Der Tragrahmen ist seitlich klappbar, sodass drei Schare parallel und jeweils außerhalb der Traktorspur gemessen werden können. Damit die Arbeitstiefe exakt eingestellt werden kann und unabhängig von der Stauchung der Traktorräder ist, sind zusätzliche Stützräder vorhanden. Als Versuchsfläche stand ein Feld in Wölkau bei Heidenau/Dresden zur Verfügung. Die Versuchsreihe wurde im August 2020 nach der Getreideernte durchgeführt. Der Boden ist als mittelschwerer sandiger Lehm einzuordnen und wies am Testtag, nach einer längeren Trockenperiode, eine Bodenfeuchte von $BF = 11\%$ auf.



Abbildung 2: Feldversuchsaufbau mit drei Grubberwerkzeugen

Für die Feldversuche wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan erarbeitet. Die Bodenfeuchte ist durch die Witterungsverhältnisse vorgegeben und kann nicht verändert werden. Entsprechend verringern sich die variablen Parameter auf Anstellwinkel, Leitblechposition, Tiefe und Geschwindigkeit. Nach den Abstufungen aus Tabelle 1 umfasst der Feldversuch 81 Versuchskombinationen. Im Gegensatz zum Labortest ist im Feld mit Störgrößen wie zum Beispiel Boden- und Bewuchsunterschieden zu rechnen (WILBOIS et al. 2010). Um den Einfluss auf die Versuche zu minimieren, wird eine randomisierte Versuchsanlage mit drei Parzellen angelegt. In den Parzellen sind die Einstellkombinationen jeweils einmal zu wiederholen, dementsprechend ist jede Einstellung insgesamt dreimal auf der Versuchsfläche gefahren. Während einer Messfahrt sind die Leitblechpositionen zufällig auf die drei Schare verteilt und die Geschwindigkeit stufenweise erhöht. Die Parameter Arbeitstiefe und Anstellwinkel sind zufällig den Messfahrten der Parzellen zugeordnet und während einer Messfahrt konstant gehalten. Die Messlänge einer Einstellkombination wurde in Abhängigkeit der Feldgröße auf 50 m festgelegt.

Zugkraftauswertung der Laborergebnisse

Um den geometrieabhängigen Kraftverlauf bei reduziertem Versuchsplan darzustellen ist es sinnvoll, die durchgeführten Laborversuche in Form einer Regression zusammenzufassen und so den Kraftverlauf auch über nicht durchgeführte Versuche zu visualisieren. Zur Analyse hinsichtlich des Kraftkennfeldes wurden verschiedene Modelle in Annäherung an BÖGEL (2016), bestehend aus Polynomkombinationen von linearen, gemischten und quadratischen Termen, verglichen. Für die Laborversuche wurde die Kombination aus linearen und gemischten Termen gewählt, da bei diesem Modell ein hohes Bestimmtheitsmaß bei minimaler Anzahl an Koeffizienten erreicht wird. Die vollständige Regressionsgleichung mit den in Tabelle 1 vorgestellten Parameter ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 F_{Horizontal} = & c0 + c1 \cdot AW + c2 \cdot AT + c3 \cdot BF + c4 \cdot V + c5 \cdot LB \\
 & + c6 \cdot AW \cdot AT + c7 \cdot AW \cdot BF + c8 \cdot AW \cdot V + c9 \cdot AW \cdot LB \\
 & + c10 \cdot AT \cdot BF + c11 \cdot AT \cdot V + c12 \cdot AT \cdot LB + c13 \cdot BF \cdot V \\
 & + c14 \cdot BF \cdot LB + c15 \cdot V \cdot LB
 \end{aligned}$$

In Abbildung 3 sind die Mittelwerte der Wiederholungen der in den Laborversuchen gemessenen Horizontalkraftwerte und die durch das Regressionsmodell vorhergesagten Kraftwerte dargestellt. Das Regressionsmodell weist ein Bestimmtheitsmaß von ca. 99 % auf. Für das korrigierte Bestimmtheitsmaß wird ein Wert von 97 % berechnet und liegt ca. 2 Prozentpunkte darunter, ist aber dennoch in einem zufriedenstellenden Bereich. An der Stelle wird auf eine tiefere statistische Auswertung verzichtet, da das Modell die Versuchsdaten der Bodenrinnenversuche ausreichend gut beschreiben kann. Die Regressionskoeffizienten der oben beschriebenen Gleichung sind in Tabelle 2 angegeben. Während die Koeffizienten des linearen Modells entsprechend der Erwartung positiv und bei der Leitblechposition negativ mit der Horizontalkraft korrelieren, wird das verwendete Modell zum Teil mit negativen Vorzeichen berechnet, die durch die Werkzeug-Boden-Interaktion nicht begründet werden können. Das kann damit erklärt werden, dass die Effekte der anderen Variablen überschätzt und ausgeglichen werden müssen.

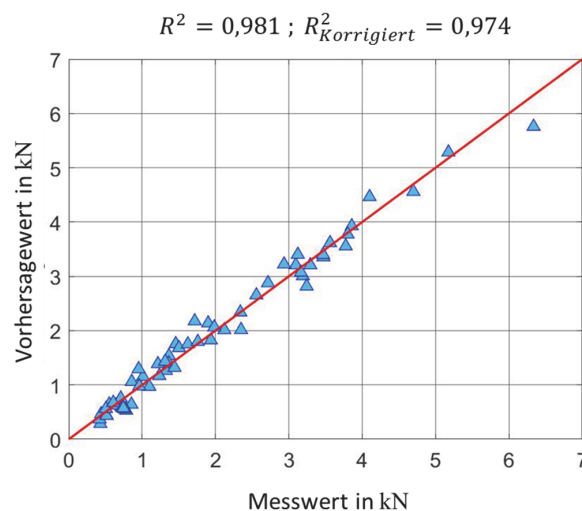


Abbildung 3: Streudiagramm des Regressionsmodells der Laborversuche

Tabelle 2: Koeffizienten des Regressionsmodells der Laborversuche

Koeffizient	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>
Wert	-0,8674	0,0019	0,0040	-0,0192	-0,1046	0,7268	0,0006	-0,0003
Koeffizient	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>	<i>c11</i>	<i>c12</i>	<i>c13</i>	<i>c14</i>	<i>c15</i>
Wert	0,0003	-0,0050	0,0079	0,0081	-0,0155	0,0114	-0,0236	-0,0255

In Abbildung 4 sind exemplarisch für $BF = 13\%$ Kurvenschare für Kraftverläufe über der Geschwindigkeit für zwei verschiedene Arbeitstiefen dargestellt. Während die Tiefe in der Darstellung jeweils konstant ist, sind Geschwindigkeit, Anstellwinkel im Arbeitsprozess bzw. die Leitblechposition veränderlich.

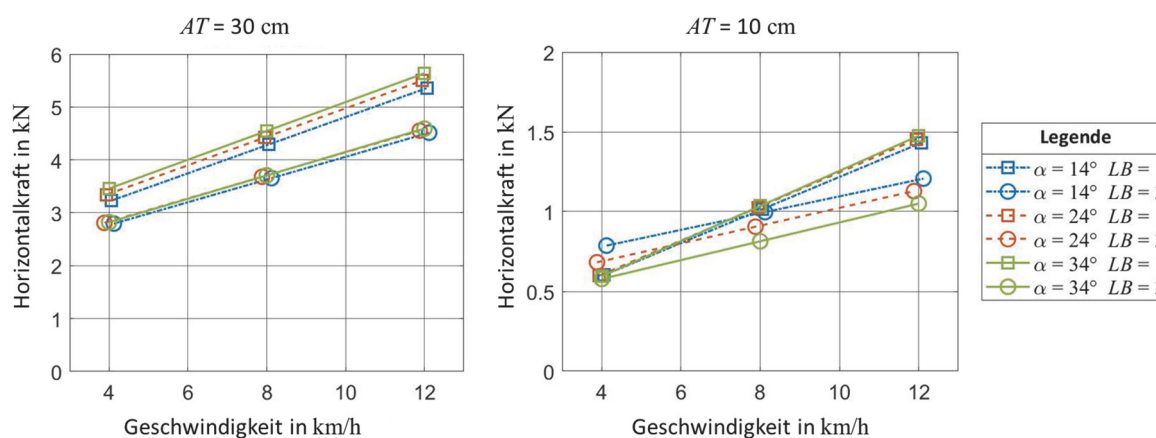


Abbildung 4: Regressionskurven der Laborversuche für $BF = 13\%$

In Abbildung 4 links können die Verläufe in zwei Gruppen eingeteilt werden. Charakterisiert ist die Gruppierung durch einen starken Einfluss der Leitblechposition bzw. der Scharwölbung. Die Änderung des Anstellwinkels innerhalb einer Leitblechposition spielt in dieser Arbeitstiefe eine untergeordnete Rolle. Es zeigt sich aber, dass der Kraftbedarf von $\alpha = 14^\circ$ auf $\alpha = 34^\circ$ leicht steigend ist. Das Verhalten ist bei einer Arbeitstiefe von $AT = 20\text{ cm}$ ebenfalls beobachtbar, während bei $AT = 10\text{ cm}$, siehe Abbildung 4 rechts, für $LB = 1$ ein leicht stärkerer Kraftanstieg über der Geschwindigkeit zu sehen ist. Bei flacher Arbeitstiefe und vor allen Dingen bei langsamer Fahrt steigt das Bodenmaterial nur knapp bis zum Leitblech auf, wodurch an der Stelle kaum Kraftauswirkung zu erwarten ist. Hingegen wird bei höherer Geschwindigkeit das Bodenmaterial über das Leitblech geleitet und erhöht den Kraftbedarf für die Leitblechposition $LB = 1$.

Durch die Geometrieänderung des Grubberwerkzeuges wird deutlich, dass bei der Variation von Anstellwinkel und Leitblechposition ein Kraftband entsteht. In Tabelle 3 werden aus den Regressionsdaten die Maximal-, Minimal- und Differenzwerte des Kraftbandes für drei Arbeitstiefen und einer Geschwindigkeit von 12 km/h gegenübergestellt.

Tabelle 3: Breite des Kraftbandes für $V = 12 \text{ km/h}$ und drei Arbeitstiefen

Arbeitstiefe	Maximalkraft	Minimalkraft	Kraftdifferenz
10 cm	1,48 kN	1,05 kN	0,43 kN
20 cm	3,56 kN	2,82 kN	0,74 kN
30 cm	5,63 kN	4,51 kN	1,12 kN

Zugkraftauswertung der Feldversuche

Während der Feldversuche wurden 72 Kombinationen getestet. Technisch bedingt konnte die Messfahrt bei $AT = 30 \text{ cm}$ und $\alpha = 14^\circ$ bzw. die Messung für $AT = 20 \text{ cm}$, $\alpha = 14^\circ$ und $LB = 2$ nicht durchgeführt und nachträglich nicht reproduziert werden. In Abbildung 5 sind die Feldversuchsergebnisse, analog zu den Kurvenscharen der Laborversuche, dargestellt.

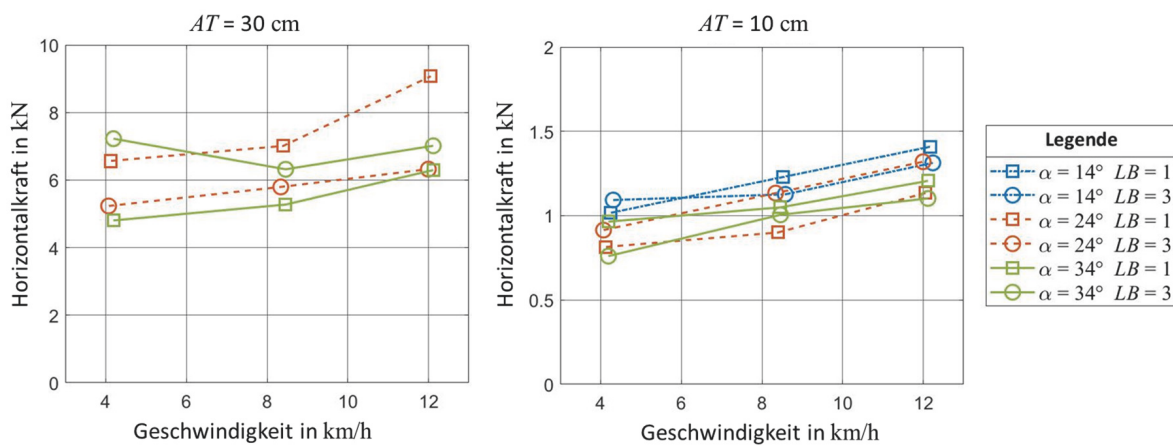


Abbildung 5: Horizontalkraftkurven der Feldversuche für $AT = 30 \text{ cm}$ und für $AT = 10 \text{ cm}$

Wie zu erwarten, sind die Ergebnisse aus dem Feldversuch heterogener als in den Laborversuchen. Das Übereinanderlegen von Kurven zeigt im Vergleich zu den Laborversuchen keine Gruppierung nach der Leitblechposition. In Abbildung 6.1 und 6.2 ist daher die Kraft in Abhängigkeit vom Anstellwinkel für einen Teil der gefahrenen Arbeitsgeschwindigkeiten und Arbeitstiefen dargestellt. Aufgetragen ist der Mittelwert mit der dazu gehörigen Standardabweichung. Die Standardabweichung beschreibt die Abweichung zwischen den Wiederholungen. Der Effekt von Anstellwinkel und Scharwölbung kann einzeln unter sonst konstanten Parametern betrachtet werden.

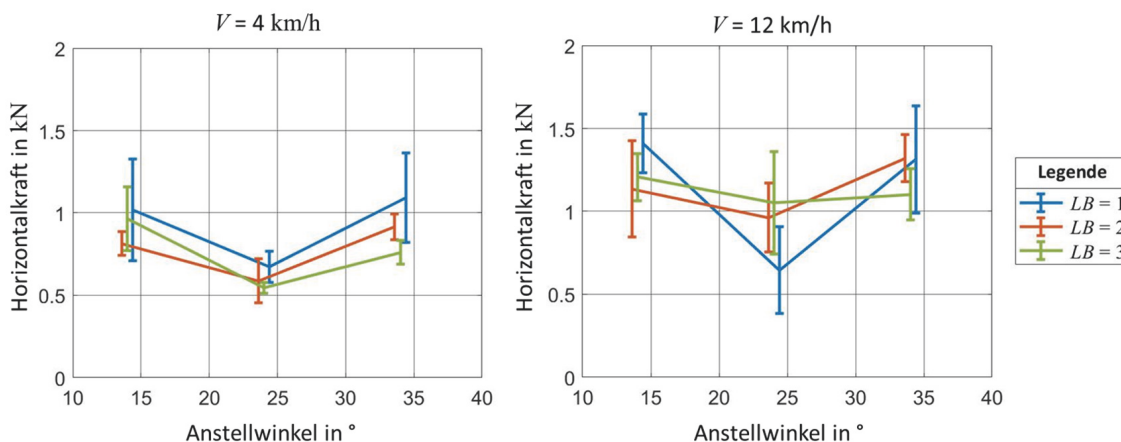


Abbildung 6.1: Horizontalkraftkurven der Feldversuche; aufgeteilt nach Geschwindigkeit für $AT = 10\text{ cm}$

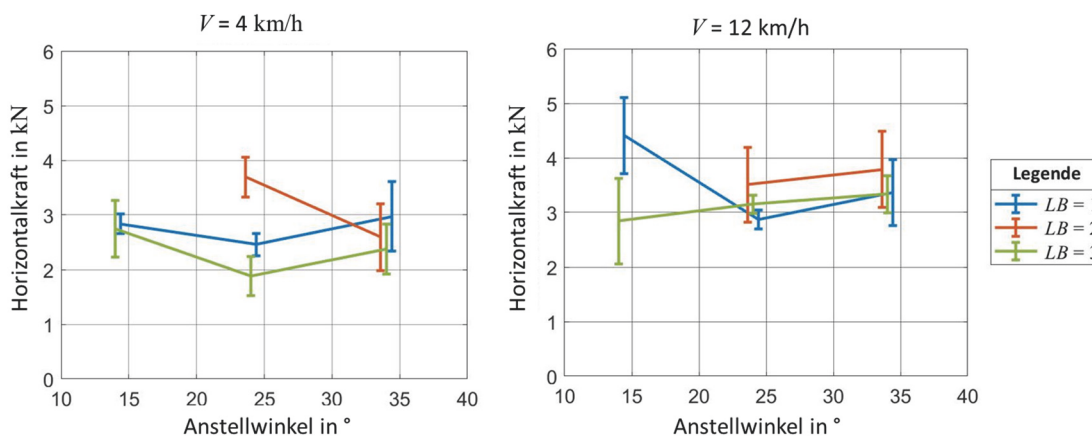


Abbildung 6.2: Horizontalkraftkurven der Feldversuche; aufgeteilt nach Geschwindigkeit für $AT = 20\text{ cm}$

Die Wirkung der Scharwölbung ist, im Vergleich zu den Laborversuchen, nicht einheitlich ausgeprägt. Sich qualitativ wiederholende Verläufe sind in der Tiefeneinstellung $AT = 10\text{ cm}$ und Teilen von $AT = 20\text{ cm}$ zu erkennen. Hier bildet sich ein Kraftminimum um den Anstellwinkel $\alpha = 24^\circ$ aus. An anderer Stelle wurden Kraftminima in den Verstellgrenzen bei $\alpha = 14^\circ$ (Abbildung 6.2: $V = 12\text{ km/h}$; $LB = 3$) bzw. $\alpha = 34^\circ$ (Abbildung 6.1: $V = 12\text{ km/h}$; $LB = 3$) gemessen.

Aus der Variation und Streuung der Kraftverläufe unter Praxisbedingungen kann die These aufgestellt werden, dass sich die kraftoptimale Winkeleinstellung innerhalb einer kurzen Strecke ändert. Um diese Aussage zu verdeutlichen, wurde eine Messreihe aus den Feldversuchen ausgewählt. Als Datengrundlage dienen drei Messungen, die mit den drei Anstellwinkelstufen unter sonst gleichen Bedingungen ($AT = 10\text{ cm}$, $LB = 2$, V aufsteigend 4 km/h , 8 km/h , 12 km/h) in der gleichen Parzelle gefahren wurden. Dementsprechend liegen für jeden Messungsschritt Wertepaare aus drei Horizontalkräften und drei dazugehörigen Anstellwinkeln vor. Aus den Wertepaaren wurde eine Parabelfunktion und deren Extremstelle berechnet. Interpretiert wird die Minimalstelle als der Anstellwinkel mit dem niedrigsten Kraftbedarf. Die Zuordnung der Minimalstellen zur zurückgelegten Wegstrecke ergibt den in Abbildung 7 dargestellten Verlauf.

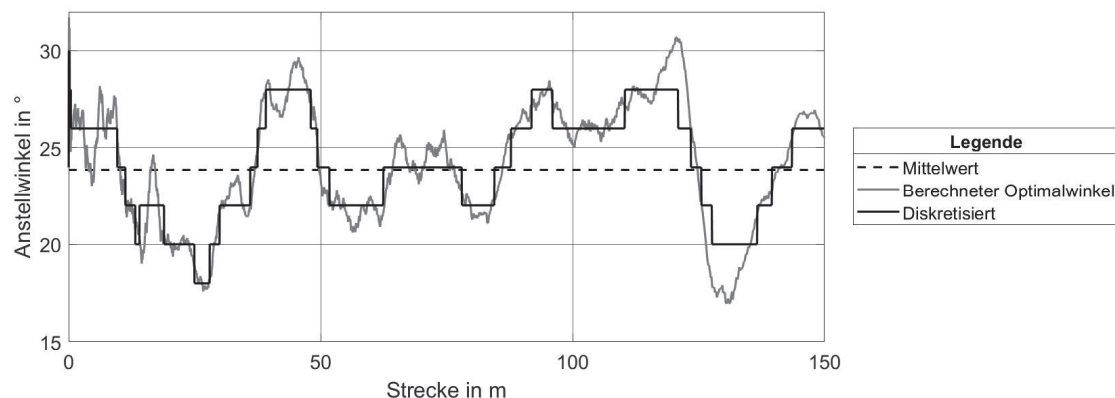


Abbildung 7: Simulierter Verlauf des zugkraftoptimalen Anstellwinkels

Obwohl der Anstellwinkel mit dem geringsten Kraftbedarf im Durchschnitt bei $\alpha = 24^\circ$ liegt, zeigt sich, dass sich der berechnete Optimalwinkel innerhalb des Durchlaufs über einen Streckenabschnitt von zum Teil 25 m unter, als auch über dem Mittelwert befindet. Für die Feldversuche kann zum aktuellen Forschungsstand die These aufgestellt werden, dass der Optimalwinkel kein fester Wert, sondern veränderlich ist. Der Sachverhalt ist in weiteren Untersuchungen noch zu verifizieren.

Schlussfolgerung

In den Labor- und Feldversuchsergebnissen ist eine Geometrieabhängigkeit erkennbar. Die Laborversuche zeigen im höheren Kraftbereich, dass die Horizontalkraft deutlich von der Leitblechposition und weniger vom Anstellwinkel abhängt. Hier führt ein flaches gekrümmtes Werkzeug zu niedrigeren Kraftwerten. Die Kraftverläufe der Feldversuche weisen in etwa der Hälfte der Versuche den qualitativen Verlauf auf, dass sich ein Kraftminimum bei einem Anstellwinkel um 24° einstellt, was sich mit den Ergebnissen der in den Vorüberlegungen beschriebenen Literatur deckt. Allerdings weist die andere Hälfte einen unregelmäßigen Verlauf auf. Die unterschiedlichen Ergebnisse aus Feld- und Laborversuchen stehen nicht im Widerspruch zur bereits bekannten Literatur, sondern unterstreichen nochmals die Aussage, dass die Ergebnisse stark von den Testbedingungen abhängig sind und ein allgemeines Vorhersagemodell noch nicht gefunden ist.

Zum jetzigen Forschungsstand wird für eine kraftoptimierte Regelung der Geometrie ein örtlich variierendes Kennfeld angenommen. Für die kraftoptimierte Regelung ist demnach ein Algorithmus zu entwerfen, der permanent eine Entscheidung über die Richtung des Kraftminimums bestimmt. Des Weiteren muss ein Kompromiss zwischen schnellstmöglicher Erkennung von Bodenänderungen und der Filterung von Einzelstörungen wie Fahrspuren oder Steinen gefunden werden.

Mit der Geometrieänderung während des Prozesses ist davon auszugehen, dass der Materialfluss beeinflusst wird. Neben der Betrachtung der Zugkraft ist zusätzlich das Arbeitsergebnis miterfasst. Zu untersuchen ist, in welchem Maß sich Merkmale wie zum Beispiel das Einmischungs- und Krümelungsverhalten ändern.

Literatur

- Al-Neama, A.K.A. (2019): Evaluation of performance of selected tillage tines regarding quality of work. Berlin, Springer Verlag GmbH
- Aluko, O.B.; Seig, D.A. (2000): An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil & Tillage Res.* 57(3), pp. 143–157, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00156-2)
- Bögel, T. (2016): Identifikation von Parametern auf die Wechselwirkung von Arbeitsfunktion und Zugkraftbedarf passiver, keilförmiger Werkzeuge. Vortrag VDI-MEG Tagung Landtechnik, Köln
- Bührke, J.; Schramm, F.; Frerichs, L. (2018): Geometriediskrete Belastungsmessung an einem Grubberwerkzeug. *LANDTECHNIK* 73(2), S. 39–51, <https://doi.org/10.15150/LT.2018.3181>
- Elijah, D.L.; Weber, J. A. (1971): Soil Failure and Pressure Patterns for Flat Cutting Blades. *Trans. ASAE* 14(4), pp. 781–785, <https://doi.org/10.13031/2013.38389>
- Fröba, N. (2018): III Maschinen, Anlagen und Gebäude – Leistungsbedarf. In: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 15. Auflage
- Godwin, R.J.; Spoor, G. (1977): Soil failure with narrow tines. *J. Agric. Eng. Res.* 22(3), pp. 213–228, [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(77\)90044-0](https://doi.org/10.1016/0021-8634(77)90044-0)
- Kalk, W.D. (1971): Die neue Bodenrinnenanlage der TU Dresden. *Deutsche Agrartechnik* 21(7), S. 337–338
- Kattenstroth, R.; Harms, H.-H.; Lang, T.; Wurpts, W.; Twiefel, J.; Wallaschek, J. (2011): Reibkraftreduktion mittels Ultraschallanregung in der Bodenbearbeitung. *Landtechnik* 66(1), S. 10–13, <https://doi.org/10.15150/lt.2011.341>
- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R.; Or, D. (2019): Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Res.* 194, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- McKyes, E.; Desir, F. (1984): Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. *Soil & Tillage Res.* 4(5), pp. 459–470
- Palme, J. (1976): Betrachtungen zum Schnittprozeß im Boden. *Wiss. Ztg. TU Dresden* 25(5/6), S. 1227–1230
- Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T. (2017): *Statistische Versuchsplanung*. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, S. 54–57, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>
- Siemens, J.C.; Weber, J.A.; Thombum, T.H. (1965): Mechanics of Soil as Influenced by Model Tillage Tools. *Trans. ASAE* 8(1), pp. 1–7
- Söhne, W. (1956): Einige Grundlagen für eine Landtechnische Bodenmechanik. *Grundlagen der Landtechnik – Konstrukteurhefte* (7), S. 11–27, <https://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Konstrukteur/article/view/1373>
- Soucek, R.; Pippig, G. (1990): *Maschinen und Geräte für die Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat, Reihe Landmaschinentechnik*. Verlag Technik Berlin
- Vornkahl, W. (1967): Beitrag zur Gestaltung von zinkenartigen Bodenbearbeitungswerkzeugen. *Grundlagen der Landtechnik* 17(3), S. 95–98, <https://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Grundlagen/article/view/812>
- Wilbois, K.-P.; Schwab, A.; Fischer, H.; Bachinger, J.; Palme, S.; Peters, H.; Dongus, S. (2010): Leitfaden für Praxisversuche. Frankfurt a.M., FiBL Deutschland e.V.

Autoren

Stefan Schwede (Dipl.-Ing.) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr. Thomas Herlitzius** ist Leiter der Professur für Agrarsystemtechnik der TU Dresden, Bergstraße 120, 01062 Dresden. E-Mail: stefan.schwede@tu-dresden.de