

Das Kreuzhackverfahren – Zweidimensionale mechanische Unkrautbekämpfung im Maisanbau durch Einzelkornsaat im spurübergreifenden quadratischen Verband

Matthias Rothmund¹, Georg Steinberger¹ und Hermann Auernhammer¹

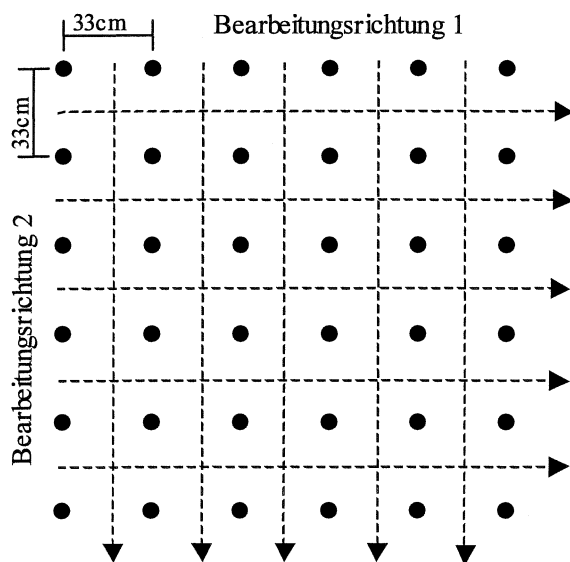
¹ Technische Universität München, Technik im Pflanzenbau, D-85354 Freising-Weihenstephan, Am Staudengarten 2, matthias.rothmund@wzw.tum.de

Einleitung und Problemstellung

Durch den starken Ausbau der Energieproduktion in der Landwirtschaft nimmt momentan der Maisanbau stark zu. Auch im Bereich der organischen Landwirtschaft gewinnt Mais in der Fruchtfolge neben der klassischen ökologischen Nahrungsmittelproduktion an Bedeutung. Der Mais als Reihenkultur bietet dabei die Chance des reduzierten Herbizideinsatzes durch Einsatz mechanischer Unkrautbekämpfung „zwischen den Reihen“. Im ökologischen Landbau bleibt dabei ein massives Unkrautproblem „in der Reihe“ bestehen. Aus der Möglichkeit einer mechanischen Unkrautbekämpfung auch zwischen den einzelnen Maispflanzen würde eine Minimierung des Herbizideinsatzes im integrierten bzw. ein stark verbessertes Unkrautmanagement im ökologischen Landbau resultieren. Einen Ansatz bildet die von WIEBRODT et al. (1999) vorgestellte Querhacke zur Unkrautregulierung in der Reihe. GRIEPENTROG (2005) hat in Verbindung damit den Einsatz von Feldrobotern in Reihenkulturen mit in der Reihe arbeitenden Hackwerkzeugen konzipiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem alternativen Lösungsansatz.

Lösungsansatz

Durch die Einzelkornsaat im exakten quadratischen Verband über einen gesamten Schlag hinweg, wird die „zweidimensionale“ mechanische Unkrautbekämpfung, im Folgenden als Kreuzhackverfahren (KHV) bezeichnet, ermöglicht. Das bedeutet, mit einer herkömmlichen Reihenhacke kann sowohl in Särichtung als auch im rechten Winkel dazu der Hackvorgang erfolgen (Abb. 1). Die nicht bearbeitete Fläche um die einzelne Maispflanze herum reduziert sich hierdurch deutlich im Vergleich zum herkömmlichen Reihensaatterfahren mit Reihenhacke in Särichtung.



Eine exakte Saat im quadratischen Verband ermöglicht die maschinelle Hackarbeit in zwei senkrecht aufeinanderstehende Richtungen. Im gezeigten Beispiel ergibt sich bei 33cm Abstand zwischen den Maispflanzen eine Bestandesdichte von 9 Pfl./m².

Abb. 1: Einzelkornsaat von Mais im quadratischen Verband und Kreuzhackverfahren (KHV) (schematisch).

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Bestandesdichten und erreichbarer Abstände der Hackorgane von den Einzelpflanzen (Pflanzenmitte) ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Anteile der durch die Hackarbeit erfassten Fläche.

Tab.1: Anteile der bearbeiteten Fläche im KHV bei unterschiedlichen Bestandesdichten und Hackabständen von den Einzelpflanzen

Bestandesdichte [Pfl./m ²]		8	10	12
Pflanzenabstand [cm]		35,4 x 35,4	31,6 x 31,6	28,9 x 28,9
Hackabstand Pflanze [cm]				
bearbeitete Fläche [%]	1	99,7	99,6	99,5
	2	98,7	98,4	98,1
	3	97,1	96,4	95,7
	4	94,9	93,6	92,3
	5	92,0	90,0	88,0

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, lässt sich bei einem geringen Abstand der Hackorgane von den Pflanzen bei der mechanischen Unkrautbekämpfung mit dem KHV nahezu die gesamte Fläche (z.B. mehr als 98 % bei einem Abstand von 2cm zur Pflanze in beide Richtungen) erfassen. Dies würde einen ausreichenden Bekämpfungserfolg sicherstellen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Präzision bei der Führung des gesamten Hackgeräts und der einzelnen Hackorgane sowie bei der Aussaat mit sinkendem Arbeitsabstand zu den Pflanzen stark an.

Im Zuge von früheren Untersuchungen zur „Gleichstandsart von Mais“ wurden bereits Einzelkornsäugeräte zur Saat von Mais im „Rechtecks-“ und „Dreiecksverband“ eingesetzt (DEM-MEL et al., 2000). Bei dem nun verfolgten Ansatz ist diese vorhandene Technik jedoch nicht ausreichend. Während bisher nur die Etablierung eines präzise verteilten Bestandes innerhalb einer Arbeitsspur realisiert werden konnte, erfordert das KHV eine exakte Saat im quadratischen Verband über die einzelne Maschinenarbeitsbreite hinaus. Es muss also eine präzise (zentimetergenaue) Synchronisierung des Säbeginns in jeder Spur und eine exakte Saatkornablage erfolgen (Abb. 2).

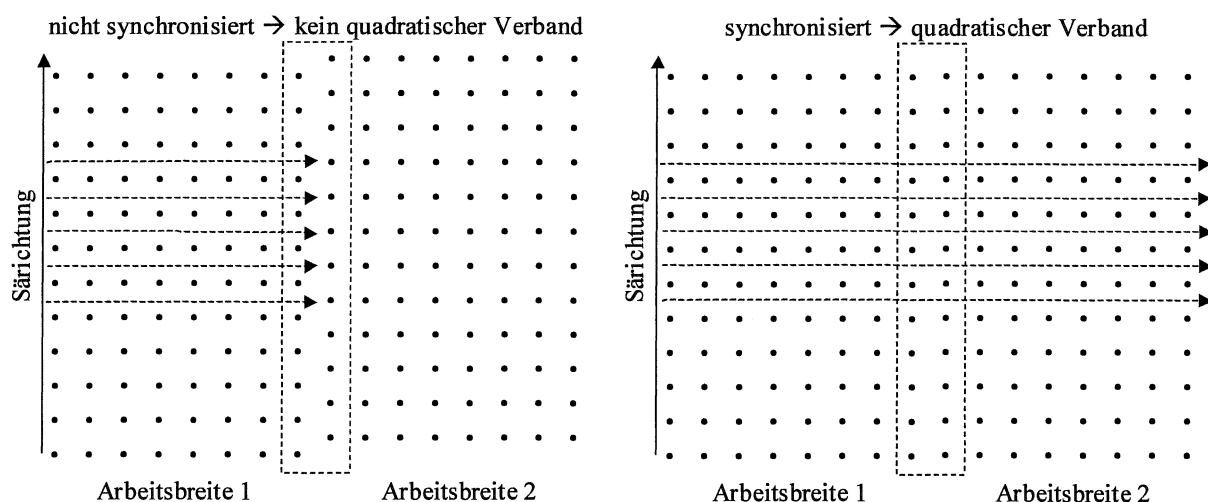


Abb. 2: Nicht-synchronisierte und synchronisierte Saat im quadratischen Verband

Versuchsbeschreibung

Um die bearbeitungstechnische Umsetzbarkeit des KHV zu prüfen, wurde auf der ökologisch bewirtschafteten Versuchsstation Viehhausen der TU München in der Saison 2006 ein Vorversuch durchgeführt. Auf einer Fläche von 25 x 20 Metern wurden Maiskörner im quadratischen Verband mit einem Abstand von 37,5 Zentimetern gesät. Die Aussaat erfolgte manuell. Dazu wurden in eine Bearbeitungsrichtung Spuren zur Orientierung mit dem später auch verwendeten Hackgerät gezogen. Mit Hilfe eines ausgelegten Maßbandes konnte der exakte Abstand für die Saatkornablage entlang dieser Spuren ermittelt werden. Senkrecht dazu wurden durch Spannen einer Schnur die Kreuzungspunkte beider Bearbeitungsrichtungen des KHV ermittelt und die Saatkörner an diesen abgelegt (Abb. 3). Durch den Saatabstand von 37,5cm ergibt sich eine Anzahl von nur 7,1 Maispflanzen pro Quadratmeter. Der Saatabstand wurde jedoch so gewählt, um ein vorhandenes Reihenhackgerät sowie die vorhandene Traktorbereifung am Betrieb einsetzen zu können. Bei üblichen Pflanzendichten von 8 bis 12 Pflanzen pro Quadratmeter müsste die eingesetzte Technik Reihen- und Pflanzenabstände von 35 bis 28 Zentimetern bewältigen können.



Abb. 3: Aussaat (13.06.2006) und Feldaufgang (3-Blatt-Stadium, 23.06.2006) des Versuchs

Es erfolgten zwei Arbeitsgänge mit der Reihenhacke (Abb. 4) jeweils in senkrecht zueinander stehenden Richtungen durch den quadratischen Pflanzenverband (KHV). Dabei wurden nahezu alle Unkräuter bis sehr dicht an die Maispflanzen heran von der Hackmaschine erfasst. Lediglich einzelne, direkt an einer Maispflanze gewachsene Unkräuter blieben stehen. Für stellenweise verstärkt auftretende Beschädigungen am Maispflanzenbestand gab es zwei unterschiedliche Ursachen: Zum einen der partiell ungenaue Pflanzenabstand nach der manuellen Aussaat, zum anderen die Drift des Traktors zwischen Hinter- und Vorderachse bei seitlicher Hangfahrt. Ersteres ist bei maschineller Saat auszuschließen, letzteres bedarf einer technischen Lösung.

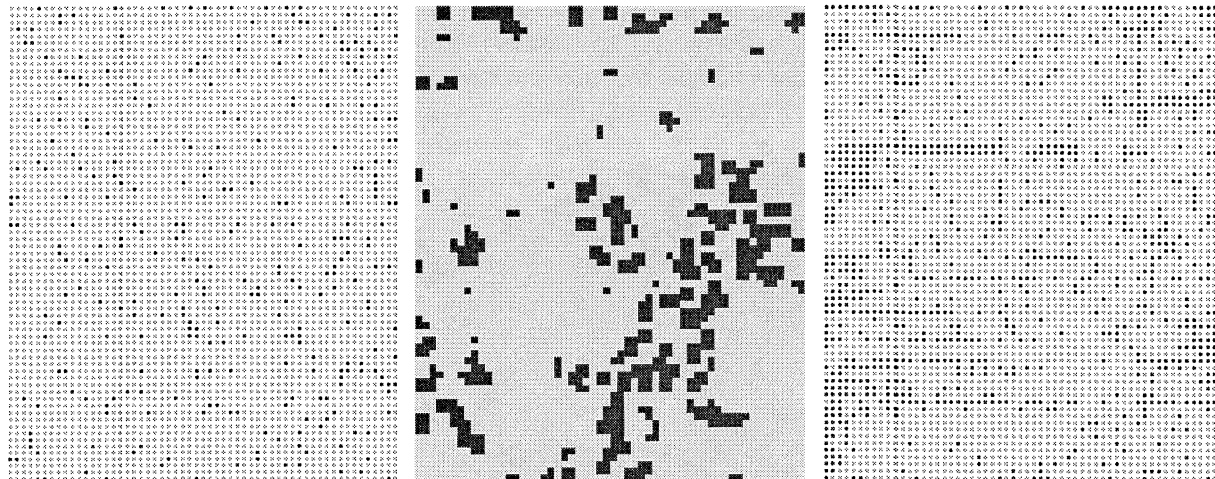


Abb. 4: KHV, Hackarbeit in zwei Richtungen (6-Blatt-Stadium, 03.07.2006)

Schadensbonitur

Vor dem Hackvorgang wurde eine Bonitur des Feldaufgangs und der Verunkrautung sowie nach dem Hacken eine Bonitur der verursachten Schäden vorgenommen. Die Anzahl der handgesäten Maiskörner betrug 69 Pflanzen pro Reihe in die eine und 57 Pflanzen in die andere Richtung des Versuchs, also insgesamt 3933 Pflanzen. Die Auszählung aller Pflanzen ergab eine Anzahl von 3621 und damit einen Feldaufgang von 92,3% (Abb.5 links).

Für die Unkrauterfassung direkt vor dem Hacken wurde ein gedachtes Quadrat von 37,5 cm Seitenlänge um jede Maispflanze gelegt. Befand sich in diesem eine Unkrautpflanze, wurde dieser Bereich als verunkrautet eingestuft. Abbildung 5 (Mitte) zeigt deutlich, dass sich ein teilflächenspezifisch unterschiedliches Bild ergab.



Bestandesbonitur nach Feldaufgang:
hell = Maispflanze vorhanden
dunkel = Maispflanze fehlt

Unkrautbonitur vor Hackvorgang:
hell = keine bis schwache Verunkrautung
dunkel = mittlere bis starke Verunkrautung

Bestandesbonitur nach Hackvorgang:
hell = Maispflanze vorhanden
dunkel = Maispflanze fehlt

Abb. 5: Ergebnisse der Feldaufgangs-, Unkraut- und Schadensbonituren

Da die Erfassung des Unkrauts durch die mechanische Hacke nach einer ersten Inaugenscheinnahme nahezu 100% betrug (siehe Abb. 4, rechts), konnte eine Unkrautbonitur nach dem Hacken entfallen. Von Bedeutung sind jedoch die durch den Hackvorgang verursachten Schäden. Die Auszählung ergab 3068 verbleibende Pflanzen. Das bedeutet, dass 15,5% des Bestandes beim Hackvorgang irreversibel geschädigt wurden und somit insgesamt noch 78% der ausgesäten Pflanzen vorhanden sind (Abb.5, rechts). Allerdings sind die Schäden nicht gleichmäßig über das Versuchsfeld verteilt. Es sind deutliche Strukturen in Form von Häufungen an bestimmten (ungenau gesäten) Stellen zu erkennen. Ein Einfluss der Hangneigung (unterschiedlich starke Abdrift des Traktors) ist hier weitgehend auszuschließen, da diese gleichmäßig schwach über das gesamte Versuchsrechteck ausgeprägt ist. Es ist zu erwarten, dass sich durch maschinelle Einzelkornsäat unter der Bedingung eines synchronisierten Anschlussfahrens der Anteil der Beschädigungen deutlich reduzieren lässt. Im Versuch war erkennbar, dass an Stellen mit korrekten Fluchtlinien in beide Richtungen kaum Schäden entstanden, obwohl die Reifenbreite des Traktors beim Hackvorgang nur um wenige Zentimeter unter dem Pflanzenabstand lag.

Arbeitswirtschaftliche Auswirkungen

Neben der umweltrelevanten Einsparung chemischer Pflanzenschutzmittel und möglichen positiven Effekten auf das Pflanzenwachstum durch das Hacken, müssen Auswirkungen auf Arbeitszeit und Kosten bei einer Substitution von chemischem durch mechanischen Pflanzenschutz betrachtet werden. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Unterschiede für vier unterschiedliche Schlaggrößen und Maschinensysteme, berechnet auf der Grundlage von KTBL-Faustzahlen (KTBL, 2000), dargestellt.

Der Arbeitszeitbedarf liegt für die zweimalige mechanische Unkrautbekämpfung mit dem KHV mit Werten von gut 1 bis fast 6 AKh pro Hektar deutlich über den Werten des einmal durchgeführten chemischen Pflanzenschutzes mit Werten von ca. 10 AKmin bis 0,5 AKh pro Hektar. Entsprechend liegen die Mehrkosten für die kalkulierten Arbeits- und veränderlichen Maschinenkosten für die mechanische Variante bei ca. 40 bis 120 €/ha. Allerdings müssen noch die Kosten für die Pflanzenschutzmittel einbezogen werden. Bei dem hier unterstellten Wert von 100 €/ha (einmalige Behandlung mit Zintan Gold Pack, 5 l/ha) ergeben sich bei den ersten beiden Mechanisierungsvarianten Mehrkosten für die mechanische Variante von 17 bzw. 10 €/ha. Falls nicht die Arbeitskraft den begrenzenden Faktor im Betrieb darstellt, ist bei den Mechanisierungsvarianten für größere Strukturen mit höheren Arbeitsbreiten (6 und 9 m) die mechanische Unkrautbekämpfung die vorzüglichere Variante mit Kostenvorteilen von ca. 35 bzw. fast 60 €/ha.

Tab. 2: Arbeitszeit- und Kostenvergleich bei chemischer und mechanischer Unkrautbekämpfung

Schlaggröße	1 ha	2 ha	5 ha	20 ha
Veränd. Kosten Traktor (€/h)	5,27 (35 kW)	8,35 (50 kW)	11,26 (75 kW)	12,90 (100 kW)
Kraftstoffbedarf (l/h)	4,4	6,5	10,2	12,4
Chemischer Pflanzenschutz				
Spritze (300 l/ha)	15 m; 1000 l	15 m; 1500 l	18 m; 2000 l	27 m; 4000 l
Arbeitszeitbedarf (AKh/ha)	0,45	0,28	0,25	0,16
Var. Traktorkosten o. Kraftst.(€/ha)	2,37	2,33	2,82	2,06
Kraftstoffkosten (€/ha) ¹⁾	1,98	1,82	2,55	1,93
Kosten m. A' o. PSM (€/ha) ^{2), 4)}	10,75	8,51	9,37	6,91
Mechanischer Pflanzenschutz (in zwei Richtungen)				
Hackmaschine	2,5 m	3 m	6 m	9 m
Arbeitszeitbedarf 1. Hacken (AKh/ha)	3,20	2,40	1,16	0,70
Arbeitszeitbedarf 2. Hacken (AKh/ha)	2,60	1,96	1,00	0,58
Arbeitszeitbedarf (AKh/ha)	5,80	4,36	2,16	1,28
Var. Traktorkosten o. Kraftst.(€/ha)	30,56	36,40	24,32	16,52
Kraftstoffkosten (€/ha) ¹⁾	25,52	28,34	22,04	15,88
Kosten m. A' (€/ha) ^{2), 5)}	127,78	119,16	74,38	49,86
Mehrarbeit mech. PS (AKh/ha)	5,35	4,08	1,91	1,12
Mehrkosten mech. o. PSM (€/ha)	117,03	110,65	65,01	42,95
Mehrkosten mech. m. PSM (€/ha) ³⁾	17,03	10,65	-34,99	-57,05

¹⁾ Kraftstoffpreis: 1 €/l

²⁾ Preis pro AKh: 12 €/AKh

³⁾ PSM-Kosten: 100 €/ha

⁴⁾ Variable Kosten Spritze: 1 €/ha

⁵⁾ Variable Kosten Hackmaschine: 2,10 €/ha

Dabei wird unterstellt, dass aufgrund des sehr guten beobachteten Bekämpfungserfolgs durch die Maschinenhacke in zwei Richtungen auf eine Herbizidbehandlung im Mais vollständig verzichtet werden kann. Außerdem fällt auf, dass sich durch die Kombination größerer Schläge mit höheren Maschinenarbeitsbreiten auch beim mechanischen Pflanzenschutz erhebliche Reduktionen der pro Hektar benötigten Arbeitszeit erzielen lassen. Nicht berücksichtigt wurde die mögliche Kombination von Herbizidbehandlungen im Mais mit eventuellen anderen chemischen Pflanzenschutzmaßnahmen. Es ist davon auszugehen, dass eine vorhandene Pflanzenschutzspritze im Betrieb verbleiben, ein Hackgerät jedoch angeschafft werden müsste. Für die in Tabelle 2 beschriebenen Mechanisierungsvarianten würden nach KTBL (2000) folgende Annuitäten bei Anschaffung eines für diese Arbeit vergleichbaren Rübenhackgerätes anfallen: 493 € (2,5 m AB), 641 € (3 m AB), 1159 € (6 m AB), 1616 € (9 m AB). Nicht berücksichtigt werden konnten bisher die Kosten für das noch zu entwickelnde Präzisionssägerät und für die benötigten Spurführungssysteme bei Sä- und Hackarbeit.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Als Ergebnis der durchgeführten Arbeiten kann festgehalten werden, dass die Umsetzung einer Saat im quadratischen Verband einen ökonomisch vertretbaren Ansatz darstellt, Herbizidbehandlungen im Maisanbau mit mechanischer Unkrautbekämpfung durch maschinelles Hacken zu substituieren. Interessant ist dies einerseits unter dem Gesichtspunkt stark ansteigender Maisanbauflächen für die Biomasseproduktion. Andererseits könnte so die Rentabilität des Maisanbaus im ökologischen Landbau gesteigert werden. In diesen ersten Berechnungen nicht berücksichtigt wurden dabei ein mögliches Ertragssteigerungs- bzw. Düngereduktionspotenzial durch den Hackvorgang (Bodenlockerung) und durch einen Wegfall der Wachstumsdepression nach Herbizidbehandlung.

Die benötigte Technik für das maschinelle Hacken ist dabei aus dem Mais- und Rübenanbau weitgehend bekannt. Bezüglich der geforderten geringeren Reihenabstände sind Modifikationen und Weiterentwicklungen nötig. Bei größeren Arbeitsbreiten bietet sich der Einsatz automatischer Lenksysteme auf der Basis von RTK-DGPS oder Sensoren zur Pflanzreihenabtastung an. Größere Traktoren müssten zur Verringerung der Bodenbelastung mit Zwillingsbereifung im Reihenabstand ausgerüstet werden.

Die größte technische Herausforderung zur Realisierung des beschriebenen Systems stellt die Entwicklung eines Säverfahrens mit synchronisierter Saatgutablage in nebeneinanderliegenden Maschinenarbeitsbreiten dar (siehe Abb. 2). Eine Lösung ist unter zwei Voraussetzungen denkbar: Zum einen durch die hochgenaue Positionierung (± 1 cm) des Einzelkornsägers bzw. des Säggregats im Feld. Hierbei besteht bei geneigten oder gewölbten Flächen bei Einsatz von GPS-Systemen die Notwendigkeit einer topographischen Korrektur der Position (EHRL et al., 2005). Zum anderen muss die punktgenaue Saatgutablage an der vorbestimmten Position durch das Säggregat unter Ausschluss eines Verrollens des Saatkorns gewährleistet sein. Aufgrund der positiven Ergebnisse der hier gezeigten Untersuchungen zum KHV sollen in weiteren Untersuchungen die Voraussetzungen für eine technische Umsetzung der benötigten Präzision bei Sä- und Hackarbeit geschaffen werden. Das Verfahren wäre dann auch auf andere Reihenkulturen sowie auf den Freilandgemüsebau anwendbar.

Zusammenfassung

Bei derzeit stark zunehmendem Umfang des Maisanbaus müssen die Möglichkeiten der mechanischen Unkrautbekämpfung in dieser Reihenkultur stärker beachtet werden. Bekannt sind die Ansätze einer kombinierten chemisch-mechanischen (Reihenhacke) sowie einer mechanischen Unkrautbekämpfung in der Reihe durch den Einsatz kleiner intelligenter Roboter. Nun wird hier als alternativer Lösungsansatz eine Einzelkornsaat im quadratischen Verbund mit anschließender mechanischer Unkrautbekämpfung in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen (zweidimensional) vorgestellt. Voraussetzung für dieses Kreuzhackverfahren (KHV) ist die Entwicklung eines Einzelkornsägers, das eine exakt synchronisierte Kornablage in nebeneinanderliegenden Arbeitsspuren ermöglicht. Im Vorfeld einer solchen Entwicklung wurde in einem Versuch die Umsetzbarkeit und Wirkung des KHV untersucht. Mit Handsaat wurde in beide Bearbeitungsrichtungen ein Pflanzenabstand von 33 cm und damit eine Bestandesdichte von 9 Pfl./m² realisiert. Bei der Hackarbeit wurden bis auf einige direkt an Maispflanzen stehende Exemplare nahezu alle Unkräuter erfasst. 15,5% der aufgelaufenen Maispflanzen wurden beim Hackvorgang irreversible beschädigt. Ein beträchtlicher Anteil des Schadens trat dabei jedoch aufgrund von Ungenauigkeiten in der Handsaat und zu breiter Reifen im Vergleich zum Pflanzenabstand auf. Wirtschaftlich ist eine Substitution der chemischen Unkrautbekämpfung durch Hackarbeit weitgehend kostenneutral, jedoch mit höherem Arbeitsaufwand verbunden. Nach den ersten Beobachtungen aus dem durchgeführten Versuch sind vor allem im ökologischen Landbau durch das KHV außerdem Ertragssteigerungen in Mais und anderen Reihenkulturen zu erwarten.

Summary

In respect of heavy increasing areas of Maize cultivation, possibilities of mechanical weed control have to be more considered. There are well known approaches of a combination of chemical (intra-row) and mechanical (inter-row) operations and of a intra-row weed control using small intelligent robots. In this paper an alternative approach is presented: In a quadratic plant network established by a precision seed drill, a mechanical hoeing operation is conducted in two perpendicular directions (two-dimensional). Developing a precision drill for an exactly synchronized seed positioning also in adjoining tracks is a precondition for this system. Before starting such a project it was the aim of this investigation to prove the feasibility and effectiveness of this two-dimensional hoeing operation (cross hoeing). Therefore a hand sowed Maize crop was grown with an inter-plant distance of 33 cm in both directions of operation. This results in a crop density of 9 plants/m². By the hoeing operation almost all weeds excepting some standing directly next to a Maize seedling could be removed. At this hoeing operation, 15.5% of the Maize crop was damaged irreversibly, but a considerable part of this damage was caused by imprecise hand sowing and too big tractor tires compared to the inter-plant distance. From an economical point of view substituting chemical by this kind of mechanical weed control is largely self-financing but more labor intensive. According to the first observations from the conducted experiment, especially in organic farming an increase in crop yield is expected again by using the cross hoeing operation for Maize and other row crops.

Literatur

DEMME M., HAHNENKAMM O., KORMANN G., PETERREINS M. (2000): Gleichstandsmaat bei Silomais. Landtechnik Heft 3, 55. Jahrgang, 210-211.

EHRL M., MENGLER J., AUERNHAMMER H. (2004): Influencing factors of guidance technology in difficult field conditions. VDI-MEG Tagung Landtechnik 2004 (Proceedings), Dresden, Germany, pp. 343.

GRIEPENTROG H. W. (2005): Weed Control by Autonomous Vehicle Systems. Workshop Precision Farming - Sensing and Robotics (Proceedings), 18.10.2005, Hohenheim, Germany, pp.6.

KTBL (Hrsg.) (2000): Taschenbuch Landwirtschaft 2000/2001. KTBL, Darmstadt, Germany.

WIBERODT E., GRIMM J., KEMPER M., KIELHORN A., KLEINE-HARTLAGE H., NARDMANN M., NÄSCHER J., TRAUTZ D. (1999): Gesteuerte Hacke zur Beikrautregulierung innerhalb der Reihe von Pflanzenkulturen. VDI-MEG Tagung Landtechnik 1999 (Proceedings), Braunschweig, Germany, pp.155.

