

Entwicklung eines Direkteinspeisungssystems ohne Verzögerungszeiten zur Pflanzenschutzmittelapplikation

Mathias Krebs, Dirk Rautmann, Henning Nordmeyer, Jens Karl Wegener

Systeme mit Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) genügten in der Vergangenheit den Anforderungen der Praxis aufgrund von Verzögerungszeiten zwischen Mitteldosierung und -ausbringung sowie Problemen bei der Reinigung nicht. Zur Lösung dieser Probleme wurde der Prototyp eines Feldspritzengeräts mit Direkteinspeisung zur Teilflächenapplikation von Pflanzenschutzmitteln konzipiert, gebaut und getestet. Dieser Prototyp hat drei separate Düsenleitungen mit jeweils eigener Direkteinspeiseeinheit, die mit einem separaten Wasser-Pflanzenschutzmittel-Gemisch vorgeladen werden können, sodass keine Verzögerungszeiten bei der Applikation auftreten. Die theoretisch möglichen Arbeitsbreiten, welche mit den verwendeten Direkteinspeisedosierpumpen möglich sind, wurden berechnet. Zur Überprüfung der Dosiergenauigkeit erfolgten Prüfstandsmessungen. Die Ergebnisse zeigen, dass in den unterschiedlichen Dosierstufen gute Dosiergenauigkeiten erzielt werden. Zu beachten ist dabei der Arbeitsbereich der Dosierpumpen. Die Resultate zeigen, dass auf den entwickelten Prototyp aufbauend praxistaugliche Systeme zur verzögerungsfreien Direkteinspeisung möglich sind und damit Pflanzenschutzmittel zielgenauer und teilflächenspezifisch angewendet werden können.

Schlüsselwörter

Direkteinspeisung, Feldspritzengeräte, Pflanzenschutzmittel, Precision Farming, teilflächenspezifische Anwendung

Bei der heute praxisüblichen Verwendung von Tankmischungen bei heterogenem Schaderregervorkommen ist der Verbrauch an PSM vergleichsweise hoch, wenn die Schadschwelle in der Teilfläche unterschritten wird und somit keine Applikation indiziert ist. Durch die Verwendung von Direkteinspeisungssystemen bei der Applikation können einzelne PSM gezielt teilflächenspezifisch angewendet und damit ihr Verbrauch reduziert werden, ohne dass Ertragsdepressionen zu erwarten sind. Die Wirtschaftlichkeit des Pflanzenbaus wird durch die Einsparung von PSM gesteigert und die Belastung der Umwelt reduziert (WARTENBERG 2000).

Unter teilflächenspezifischer Applikation wird zum einen die Anpassung der Aufwandmenge (Wirkstoffmenge) und zum anderen die Behandlung auf einer Teilfläche (ja/nein = Behandlung bzw. keine Behandlung) verstanden. Um Überfahrten einzusparen, werden bisher üblicherweise Tankmischungen mit mehreren Pflanzenschutzmitteln eingesetzt. Diese Strategie macht eine teilflächenspezifische Applikation einzelner PSM unmöglich. Hier sind Alternativen wie die Direkteinspeisung oder Mehrkammerspritzengeräte gefragt, bei denen jedes Mittel in einer eigenen Kammer angemischt wird. GERHARDS (2004) berichtet über Versuchsergebnisse mit einer GPS-gesteuerten Dreikammerspritze mit Teilbreitenschaltung (3 m), mit der Herbizide selektiv und ortsgenau appliziert wurden.

So wurden 2003 an verschiedenen Standorten mit dieser Technik in Getreide, Zuckerrüben und Mais Unkräuter und Ungräser teilflächenspezifisch bekämpft und Einsparungen an PSM von bis zu 96 % im Getreide, bis zu 61 % in Mais und bis zu 64 % in Zuckerrüben erzielt. Dies zeigt, welches Potenzial im teilflächenspezifischen Pflanzenschutz steckt. Allerdings vergrößert sich mit Mehrkammerspritzgeräten das Restmengenproblem und die erzielbare Flächenleistung verringert sich, sodass die Weiterentwicklung der Cerberus-Feldspritze von Rau, welche mit drei Kammern ausgestattet ist, eingestellt wurde (HOLTMANN 2010).

Die Idee der Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln ist schon über 30 Jahre alt. Ein erstes Gerät wurde bereits 1989, nach mehrjähriger Entwicklungsarbeit, vom Schweizer Unternehmen Ciba-Geigy in Zusammenarbeit mit dem Dosierpumpenhersteller MSR vorgestellt (NEUNABER 1989). Dieses System konnte sich aber wegen mangelnder Praxistauglichkeit am Markt nicht durchsetzen. Ein funktionierendes System zur Direkteinspeisung wird von Praxis und Beratung aber immer wieder gefordert (GARRELTS 2013, RIMPAU 2006). Anlässlich der Agritechnica 2007 wurde der Hersteller Lechler für seine Entwicklung eines Direkteinspeisesystems für die Dosierung von PSM-Aufwandmengen von 0,2 bis 5,0 l/ha mit einer Silbermedaille ausgezeichnet (EIKEL 2007). Die Weiterentwicklung dieses Systems wurde aber wieder eingestellt. An der Entwicklung und Verbesserung von Direkteinspeisesystemen wird auch bei verschiedenen Herstellern außerhalb Deutschlands weiter gearbeitet. Der Hersteller Berthoud aus Frankreich bekam beispielsweise den „SIMA Innovation Awards 2013“ für die Entwicklung eines Zyklonenmischers zur Direkteinspeisung von bis zu drei verschiedenen Pflanzenschutzmitteln in den Wasserstrom (BERTHOUD 2013). Auch wenn das System bisher noch nicht auf dem Markt angeboten wird, zeigt sich dadurch, dass viele Hersteller das Thema Direkteinspeisung bearbeiten und dass es eine Nachfrage am Markt nach praxistauglichen Systemen gibt bzw. diese von vielen Herstellern erwartet wird. In Nord- und Südamerika werden von renommierten Herstellern wie AGCO (RoGator) und John Deere bereits ab Werk Feldspritze mit Direkteinspeisesystemen angeboten (WEHRSPANN 2013). In Europa ist das dagegen bei den genannten Herstellern nicht der Fall. Es gibt in Nordeuropa Hersteller wie Kyndestoft oder Danfoil, bei denen Direkteinspeisesysteme ab Werk angeboten werden (KYNDESTOFT 2015, DANFOIL 2015). Deren Marktanteil ist aber gering. Bei den bisher entwickelten Direkteinspeisesystemen waren entweder die Dosiergenauigkeit, die Reinigung oder die zu langen Verzögerungszeiten problematisch.

Wird ein Pflanzenschutzmittel per Direkteinspeisung zentral in den Wasserstrom dosiert, dauert es bei den in der Vergangenheit verfügbaren Systemen zu lange, bis sich am Düsenausgang die gewünschte Sollkonzentration einstellt. Diesen Effekt beschreibt der Hersteller Lechler auch in der Bedienungsanleitung für das Lechler VarioInject-System (LECHLER 2007). Ursache für die Verzögerung ist, dass der Einspeiseort des PSM in die Düsenleitung zu weit von den Düsen entfernt ist und sich die Leitungslängen zu den einzelnen Düsen zudem deutlich unterscheiden. Dadurch tritt der in Abbildung 1 dargestellte Schmetterlingseffekt auf: Das durch die Direkteinspeisung entstehende Wasser-PSM-Gemisch liegt nicht sofort an allen Düsen an, sondern baut sich erst verzögert über die gesamte Arbeitsbreite auf.

VONDRICKA und SCHULZE LAMMERS (2009) sprechen bei der zentralen Einspeisung in die Düsenleitung von einer Verzögerung von mehr als 20 Sekunden. Weitere Probleme, die bereits in der Vergangenheit bei der Prüfung von unterschiedlichen Direkteinspeisesystemen auftraten, betrafen die Abhängigkeit der Dosiergenauigkeit von den rheologischen Eigenschaften (Elastizität, Viskosität, Plastizität) des Pflanzenschutzmittels bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen, sowie die Reinigung

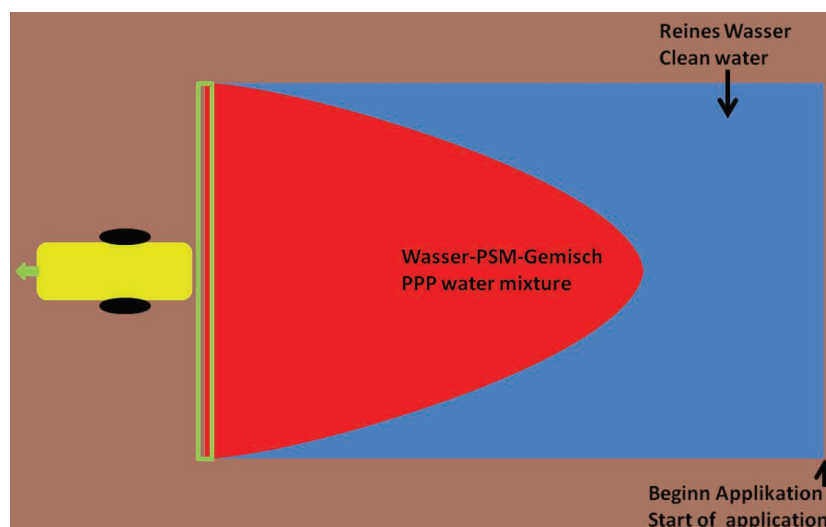


Abbildung 1: Schema Schmetterlingseffekt bei der Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln ohne Vorladen

des Systems und den Umgang mit dem dabei anfallenden Spülwasser. Zur Lösung dieser bekannten Probleme wurde ein Verbundprojekt zwischen der Firma Herbert Dammann GmbH und dem Julius Kühn-Institut (Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz und Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland) initiiert und ein neuartiger Feldspritzgeräte-Prototyp mit Direkteinspeisung entwickelt, gebaut und getestet. Bei den ersten Untersuchungen wurde zwei Versuchsfragen nachgegangen:

- Dosieren die Direkteinspeisepumpen bei unterschiedlichen Dosiermengen innerhalb des vom Hersteller angegebenen Arbeitsbereichs mit einer Genauigkeit von $\pm 7\%$ um den Sollwert?
- Welche Arbeitsbreiten (Teilbreiten) können durch die beiden für die Direkteinspeisung verwendeten Pumpengrößen in Abhängigkeit von der PSM-Aufwandmenge bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 6, 8, 10 und 12 km/h abgedeckt werden?

Lastenheft

Zu Beginn des Projektes wurde analysiert, wo bei bisherigen Direkteinspeisesystemen die Probleme liegen, die dazu führen, dass in der landwirtschaftlichen Praxis in Europa bis heute kaum Feldspritzgeräte mit Direkteinspeisung im Einsatz zu finden sind. Wie bereits erwähnt sind die Hauptursachen in den langen Reaktionszeiten, der ungenauen Dosierung und der Reinigungsproblematik zu sehen. Darüber hinaus sind die bisher angebotenen Geräte für den Benutzer wesentlich aufwendiger in der Bedienung. Das zukünftige System sollte daher in der Lage sein, mindestens drei verschiedene Pflanzenschutzmittel voneinander unabhängig per Direkteinspeisung ohne Verzögerungszeiten, teilflächenspezifisch zu applizieren. Dabei sollte die Dosiergenauigkeit im Bereich von max. $\pm 7\%$ vom Sollwert liegen. Die Bedienbarkeit sollte praxistauglich gestaltet werden und die Reinigung des Gesamtsystems effektiv möglich sein.

Pflichtenheft

Da die Verzögerungszeiten bei bisherigen Systemen zur zentralen Direkteinspeisung durch den vom Düsenausgang zu weit entfernten Einspeisepunkt entstanden, gab es nur zwei Möglichkeiten zur Lösung: Eine Einspeisung möglichst direkt an der Düse oder das „Vorladen“ der Düsenleitung. Die dezentrale Einspeisung in unmittelbarer Nähe der Düse wurde verworfen. Arbeiten an der Universität Bonn haben gezeigt, dass die genaue Dosierung unterschiedlich viskoser PSM in sehr kleinen Mengen, wie sie für einzelne Düsen erforderlich sind, mit maximalen Abweichungen von $\pm 7\%$ vom Sollwert technisch derzeit nicht realisierbar sind (WALGENBACH 2014). Aus diesem Grund wurde der Prototyp mit einer eigenen Düsenleitung für jedes der drei Direkteinspeisesysteme ausgestattet. Jede Düsenleitung kann also mit einem individuellen Wasser-PSM-Gemisch betrieben werden. Die Vorteile werden im Abschnitt „Vorladen“ später im Detail beschrieben.

Zu Projektbeginn musste ein Zulieferer für die Dosierpumpen zur Direkteinspeisung ausgewählt werden. Es gibt international Anbieter von Direkteinspeisesystemen, die vor allem in den USA zu finden sind, z. B. die Firmen TeeJet und Raven Industries. Die Evaluierung der Systeme erfolgte parallel zur Konzeption des Prototyps und führte zu dem Ergebnis, dass die Firma Raven Industries mit dem Produkt Sidekick ausgewählt wurde.

Konzeptvarianten

In der Konzeptionsphase gab es für die Auslegung der verschiedenen Baugruppen bzw. Funktionsbereiche, wie Trägerflüssigkeitstank, PSM-Tank, Tankreinigung, Pumpen und Antrieb, Düsenleitungen am Gestänge und Düsenanordnung, PSM-Mengensteuerung, Ort der PSM-Einspeisung usw. mehrere Varianten. Für jede Baugruppe bzw. für jeden Funktionsbereich wurden die Vor- und Nachteile zusammengestellt. Aus der Abwägung der herausgearbeiteten Punkte wurde dann der erste Entwurf des Prototyps erstellt.

Aufbau Prototyp

Der realisierte Prototyp (Abbildung 2) hat eine maximale Arbeitsbreite von 27 m und besteht aus einem Hauptbehälter, der in fünf einzelne Tanks unterteilt ist. Drei Tanks mit unterschiedlichem Fassungsvermögen versorgen die Spritzsysteme (System I mit 4.500 Liter, System II mit 1.500 Liter, System III mit 500 Liter). Der Wassertank von System I ist zusätzlich mit einem Rührwerk und Reinigungsdüsen ausgestattet, sodass hier auch die Möglichkeit besteht, neben der Direkteinspeisung konventionell mit einer Tankmischung zu arbeiten. Das Gerät ist für diesen Zweck mit einer Einspülschleuse ausgerüstet. Somit können auch fest formulierte PSM in System I verwendet und appliziert werden. Die Tanks von System II und System III führen nur Wasser und sind nicht mit Reinigungsdüsen ausgestattet. Die weiteren Tanks sind ein Frischwassertank mit 500 Liter und ein Spülflüssigkeitsauffangtank, der dem Auffangen des Wassers aus der Ringspüleleitung beim Vorladen und der Reinigungsflüssigkeit bei der Reinigung der Direkteinspeisung vor der Endreinigung dient. Er verfügt über ein Fassungsvermögen von 200 Litern und – wie der Tank von System I – auch über Reinigungsdüsen. Am Gestänge befinden sich drei parallele Düsenleitungen. Jeder Düsenleitung ist eine Direkteinspeiseeinheit, bestehend aus PSM-Behälter und Dosierpumpe, sowie je eine eigene hydraulisch angetriebene Kolbenmembranpumpe zur Förderung der Trägerflüssigkeit zugeordnet.



Abbildung 2: Feldspritzgeräteprototyp mit Direkteinspeisung (Foto: M. Krebs)

Aus diesem Ansatz ergeben sich drei Applikationssysteme auf einem Fahrgestell, die voneinander unabhängig voll funktionstüchtig sind. Außerdem sind im Prototyp noch zwei weitere hydraulisch angetriebene Pumpen verbaut, die zur Förderung des Reinigungswassers und zum Abpumpen der Spülflüssigkeiten notwendig sind.

Direkteinspeisepumpen

Das System speist das Pflanzenschutzmittel unmittelbar vor eine in der Düsenleitung verbaute Mischkammer in den Trägerflüssigkeitsstrom ein. Abbildung 3 zeigt schematisch das Funktionsprinzip bei dem verwendeten System der Firma Raven.

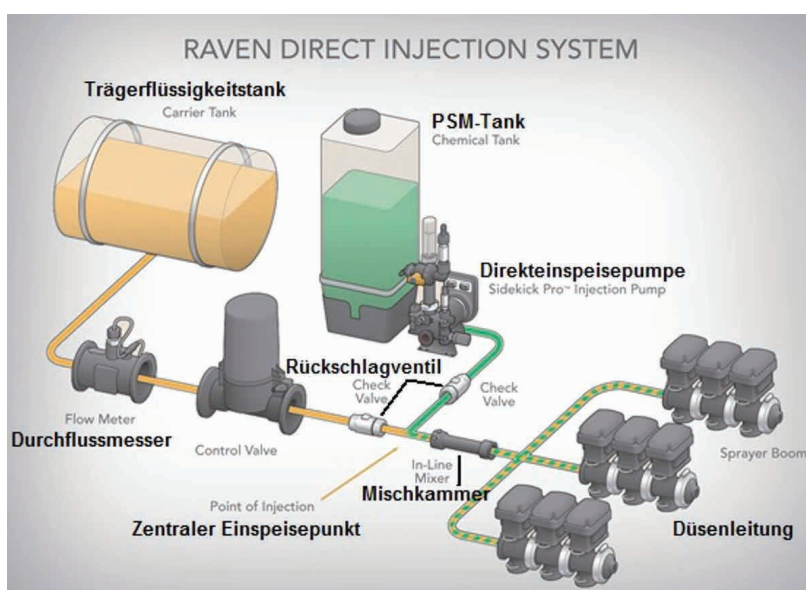


Abbildung 3: Funktionsschema Raven Direkteinspeisung, verändert (RAVEN 2015b)

Die Systemsteuerung bekommt vom Durchflussmesser der Trägerflüssigkeit die Information über die aktuelle Durchflussmenge und dosiert je Liter Trägerflüssigkeit die in Deziliter eingestellte Menge PSM hinzu. Fließt keine Trägerflüssigkeit, erfolgt auch keine PSM-Dosierung.

Für System I und II werden Direkteinspeisepumpen mit einem Arbeitsbereich von 0,15–5,9 Liter/min verwendet. Abbildung 4 zeigt die beiden Dosiereinheiten, die jeweils mit einem 90 Liter fassenden PSM-Tank auf der rechten Seite der Feldspritze installiert sind. Die großen PSM-Behälter haben den Vorteil, dass ausreichend Pflanzenschutzmittel für eine hohe Flächenleistung mitgeführt werden kann. Nachteil ist, dass diese keine Wechselbehälter sind. So sind bei Mittelwechsel Restmengen an PSM wieder zurück in das Originalgebinde zu führen und die Behälter zu reinigen. Dafür wurden beim Prototyp beide PSM-Tanks mit einer Reinigungsdüse nachgerüstet.

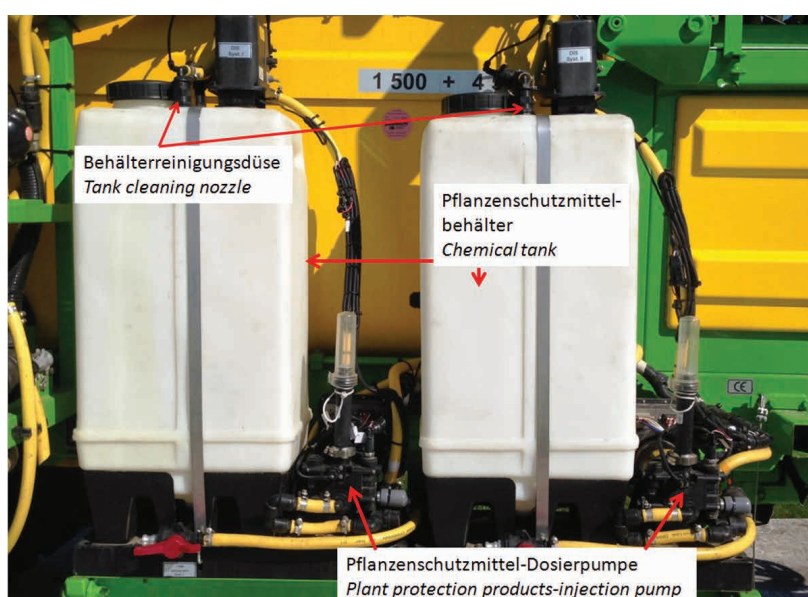


Abbildung 4: Pflanzenschutzmittelbehälter und Dosierpumpen von System I und II (Foto: M. Krebs)

Für System III, welches auf dem Vorbau der Feldspritze installiert ist, wurde eine kleinere Direkteinspeiseeinheit der Firma Raven mit einem Arbeitsbereich von 0,03–1,18 Liter/min ausgewählt (Abbildung 5). Der PSM-Tank ist hier ein 28 Liter fassender Wechselbehälter der Firma TeeJet. Im Gegensatz zu den PSM-Tanks von System I und II ist der Tank von System III nicht mit einer Reinigungsdüse ausgestattet. Hintergrund für diese Lösung ist, dass dieser Behälter nur für ein PSM verwendet wird und nach der Anwendung von der Feldspritze entnommen und im Pflanzenschutzmittelager aufbewahrt wird. Durch verschiedene Wechselbehälter lässt sich so in der Praxis sehr schnell ein Mittelwechsel realisieren.

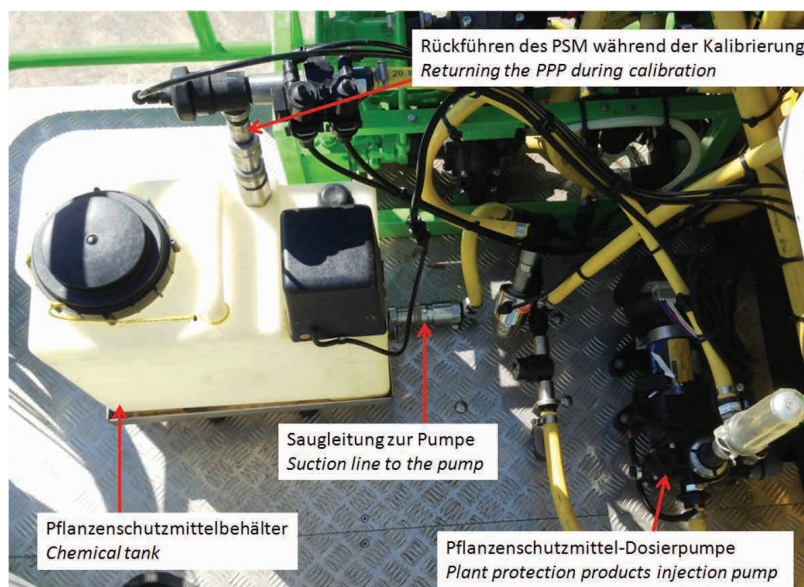


Abbildung 5: Pflanzenschutzmittelbehälter und Dosierpumpen von System III (Foto: M. Krebs)

Kalibrierung Direkteinspeisepumpen

Bei allen drei Direkteinspeisepumpen handelt es sich um elektrisch angetriebene Kolbenpumpen, die kalibriert werden können, ohne dass der Bediener in Kontakt zum PSM kommt. Abbildung 6 zeigt den Kalibrierungsvorgang aus der Bedienungsanleitung der Firma Raven: Die Förderung der Einspeisepumpe ist auf Rückführung in den PSM-Tank gestellt. Der Benutzer schraubt die durchsichtige Kappe mit der Kalibrierungsmarkierung ab und drückt den Kalibrierungskolben nach unten. Anschließend wird die Kappe wieder aufgeschraubt. Als nächstes wird am Bedienterminal der Kalibrierungsvorgang gestartet. Bleibt der Kalibrierungskolben innerhalb der Markierung auf der Kappe stehen, ist die Pumpe richtig kalibriert. Wenn nicht, kann der Kalibrierungswert am Bedienterminal angepasst und der Vorgang wiederholt werden, bis der Kolben im Bereich der Markierung steht (RAVEN 2015a). Die benötigte Zeit für die Kalibrierung ist sehr gering und kann beispielsweise beim Nachfüllen von Wasser mit erledigt werden.

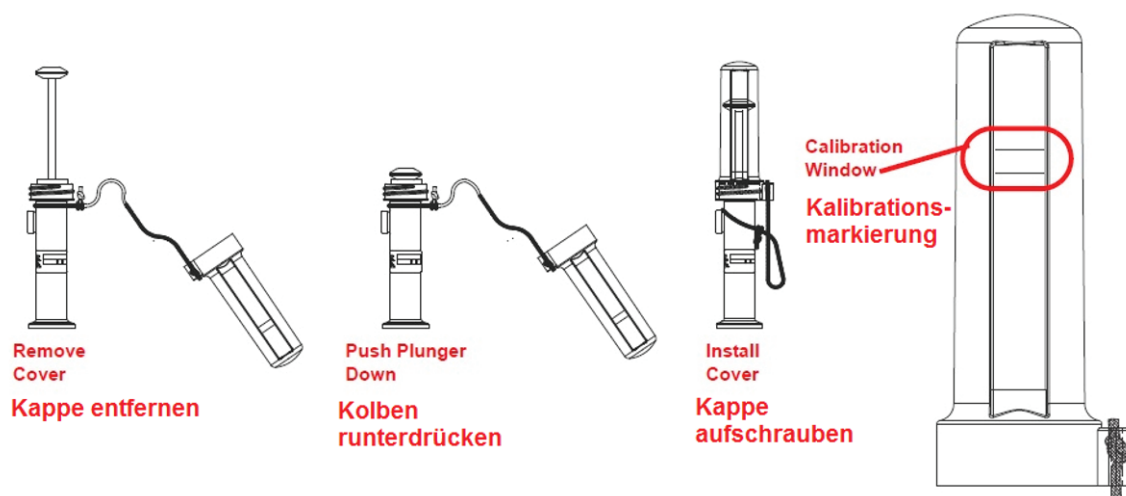


Abbildung 6: Kalibrierung der Direkteinspeisepumpe (RAVEN 2015a)

Vorladen

Um Verzögerungszeiten bei der Direkteinspeisung zu vermeiden ist am Prototyp jeder Direkteinspeiseeinheit eine eigene Düsenleitung mit Ringspülleitung zugeordnet, die vorgeladen werden kann. Vorladen heißt, dass die im Spritzbetrieb geschlossene Ringspülleitung vor Applikationsbeginn solange geöffnet wird, bis in der Düsenleitung die volle Soll-Konzentration erreicht ist. Wobei die Ringspülleitungen nicht in den Tank der jeweiligen Systeme zurückgeführt werden, sondern in den Spülwasserauffangtank. Abbildung 7 zeigt einen Auszug aus dem Fluid-Schaubild des Prototyps.

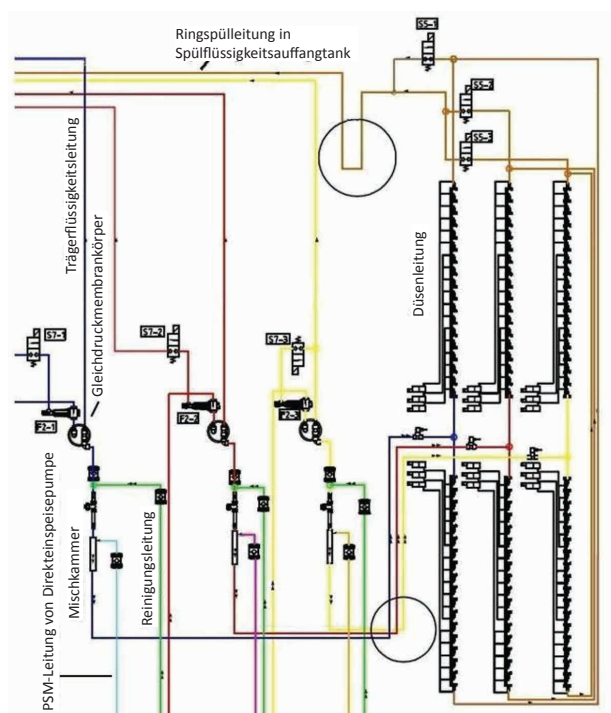


Abbildung 7: Auszug Fluid-Schaubild Prototyp mit drei Düsenleitungen, verändert (DAMMANN 2013)

Zum Vorladen müssen sowohl die Wasserpumpe als auch die Direkteinspeisepumpe auf die gewünschten Werte eingestellt werden. Die Wasserpumpe fördert auch bei geschlossenen Düsen ständig Wasser bis zur Gleichdruckarmatur, die sich noch vor dem Durchflussmesser befindet. Solange die Düsen geschlossen sind, fließt es von dort zurück in den Tank. Wird nun das Programm „Vorladen“ gestartet, öffnet die Ringspülleitung für eine bestimmte, von der eingestellten Förderleistung der Trägerflüssigkeitspumpe (Wasserpumpe) abhängige Zeit. Die Direkteinspeiseeinheit bekommt über den Wert am Durchflussmesser der Trägerflüssigkeit (Wasser) das Signal PSM hinzuzudosieren (vgl. Abbildung 3). Die eingestellte Zeit des Vorladens ist so bemessen, dass vom Einspeisepunkt bis zur äußersten Düse das Wasser-PSM-Gemisch in der Sollkonzentration anliegt. Nach Schließen der Ringspülleitung fließt kein Wasser mehr durch den Durchflussmesser und somit wird die Dosierung von PSM gestoppt. Erst während der Applikation, wenn die Düsen geöffnet werden, fließt wieder Wasser durch den Durchflussmesser und es wird wieder PSM hinzudosiert. Mit diesem Verfahren steht beim Öffnen jeder Teilbreite an jeder Düse sofort die volle Anwendungskonzentration zur Verfügung.

Bedienung Prototyp

Für die Bedienung aller drei Systeme sind zurzeit noch sieben Terminals notwendig. Ein Terminal je System zur Steuerung und Regelung des Trägerflüssigkeitsstroms und ein weiteres für jedes Direkteinspeisesystem. Ein siebtes Terminal dient zur Steuerung der Reinigung und zum Schalten der notwendigen Programme (Betrieb, Kalibrieren, Vorladen usw.). Die Anzahl der Terminals wird für den zukünftigen Praxiseinsatz auf wenige reduziert.

Material und Methoden

Zur Messung der Dosiergenauigkeit der Dosierpumpen sowie der Arbeitsqualität der Mischkammer beim Mischen von Pflanzenschutzmittel und Wasser wurde eine Lösung mit dem fluoreszierenden Farbstoff Brilliantulfloflavin (BSF) verwendet. Die Messung der Genauigkeit, mit der das System arbeitet, erfolgte durch die fluorometrische Messung der am Düsenausgang austretenden BSF-Wasser-Mischung (Spritzflüssigkeit). Vor jeder Änderung der Dosierstufe wurde das Messgerät mit einer Kalibrierlösung, die der eingestellten Sollkonzentration entsprach, kalibriert. Ein Anzeigewert von 100 % entspricht der jeweils gewünschten Sollkonzentration.

Die Frage, mit welcher Arbeitsbreite bzw. welchen Teilbreiten der Prototyp – in Abhängigkeit von den Förderbereichen der verwendeten Dosierpumpen sowie von der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit – betrieben werden kann, wurde rechnerisch ermittelt. Die theoretisch mögliche Arbeitsbreite b_A [m] berechnet sich mit der Gleichung 1:

$$b_A = \frac{\dot{V}}{v_a} \times 600 \quad (\text{Gl. 1})$$

Tabelle 1: Formelzeichen

	Formelzeichen	Einheit
Mögliche Arbeitsbreite	b_A	m
Aufwandmenge	A	l/ha
Arbeitsgeschwindigkeit	v_a	km/h
Dosierleistung	\dot{V}	l/min

Die Berechnung erfolgte für die schon erwähnten Arbeitsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen PSM-Aufwandmengen. Für die Variable „Dosierleistung“ wurde mit vier Größen gerechnet, bedingt durch die zwei Pumpengrößen mit verschiedenen minimalen und maximalen Dosiergrenzen.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse der Prüfstandsmessung mit der kleinen Pumpe (Arbeitsbereich 0,03–1,18 l/min) sowie der großen Pumpe (Arbeitsbereich 0,15–5,9 l/min). Dargestellt sind jeweils Messungen in fünf verschiedenen Dosierstufen innerhalb des Arbeitsbereiches der Pumpe. Die Zahlen neben den blauen Punkten sind für jede Dosierstufe das arithmetische Mittel aus jeweils 180 Messungen. Die Box verdeutlicht den Interquartilsabstand, innerhalb dessen 50% aller Messungen liegen.

Wie die Ergebnisse für die kleine Dosierpumpe in Abbildung 8 zeigen, liegt die Abweichung der Dosiergenauigkeit vom Sollwert im Mittel bei nicht mehr als $\pm 4\%$. Der höchste Wert der Istdosierung wurde für die Pumpe mit dem kleinen Fördervolumen mit 106,8% bei einer Dosiermenge von 0,81 l/min gemessen und liegt immer noch innerhalb des vorher festgelegten Toleranzbereichs von $\pm 7\%$ gegenüber dem Sollwert. Der geringste Wert wurde mit 95% bei der Dosiermenge 0,054 l/min gemessen und liegt ebenfalls innerhalb des festgelegten Toleranzbereiches. Neben dem Mittelwert, der möglichst nah beim Sollwert liegen sollte, ist für die Qualität der Dosierung auch eine möglichst geringe Streuung der Werte bedeutsam. Die größte Streuung wurde bei der geringsten Dosiermenge (0,054 l/min) gemessen.

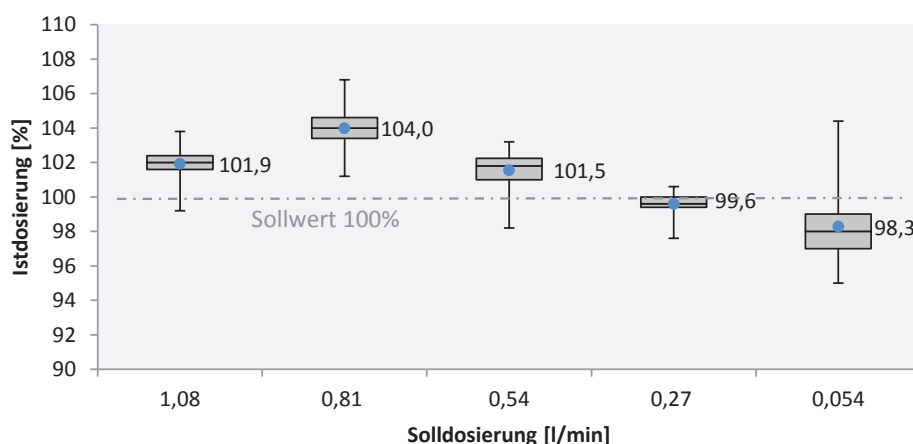


Abbildung 8: Dosiergenauigkeit bei verschiedenen Arbeitsbereichen der kleinen Dosierpumpe mit einem Arbeitsbereich von 0,03–1,18 l/min (n = 180)

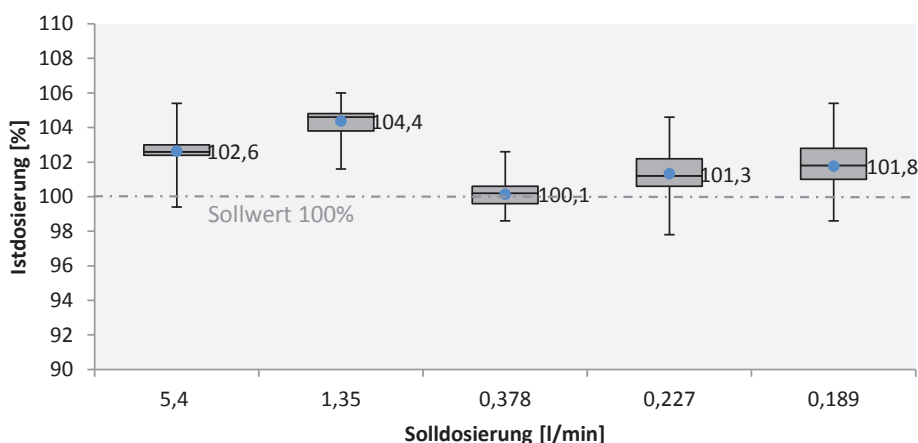


Abbildung 9: Dosiergenauigkeit bei verschiedenen Arbeitsbereichen der großen Dosierpumpe mit einem Arbeitsbereich von 0,15–5,9 l/min (n = 180)

Die Ergebnisse der großen Pumpe in Abbildung 9 zeigen, dass auch hier die größte Streuung der Werte im unteren Dosierbereich vorliegt. Die Extremwerte bei der Pumpe mit dem großen Fördervolumen liegen über alle fünf Dosierbereiche betrachtet zwischen 97,8% im unteren Bereich und 106% im oberen Bereich und damit innerhalb der Toleranz von $\pm 7\%$ um den Sollwert. Beim Vergleich der Streuung innerhalb der jeweiligen Dosierstufe zeigt sich, dass die Streuung bei beiden Pumpengrößen in der Dosierstufe an der unteren Grenze des Arbeitsbereiches am größten ist. Somit sind Dosiergenauigkeiten eher am unteren Ende des jeweiligen Dosierbereiches zu erwarten. Ob die mit der BSF-Lösung gemessenen Dosiergenauigkeiten auch mit den auf dem Markt befindlichen flüssig formulierten Pflanzenschutzmitteln erreicht werden können, muss sich in der Praxis zeigen. Wenn der Anwender die beschriebene, leicht durchzuführende Kalibrierung der Direkteinspeisepumpen, welche in wenigen Minuten zu erledigen ist, für jedes Pflanzenschutzmittel ausführt, dann ist zu erwarten, dass keine größeren Probleme mit der Dosiergenauigkeit auftreten. Die Ursache für die bessere Dosiergenauigkeit der verwendeten Pumpen im Vergleich zu früher getesteten Systemen ist in der Bauart der Dosierpumpen begründet. Die verwendeten elektrisch angetriebenen Kolbenpumpen ermöglichen eine feinere Dosierung als die früher verwendeten Schlauchpumpen. Die Kolbenpumpe dosiert mit jedem Kolbenhub eine definierte PSM-Menge und lässt sich durch den elektrischen Antrieb präzise steuern.

Ein weiterer Grund für die höhere Dosiergenauigkeit des Prototyps ist die Positionierung des Einspeisepunktes. Durch das höhere Fördervolumen bei der zentralen Einspeisung in die Düsenleitung vor dem Gestänge ist die Dosiergenauigkeit wesentlich exakter im Vergleich zur dezentralen Dosierung direkt an der Einzeldüse mithilfe von Rapid-Reaction-Ventilen (RRV). Die extrem kleinen Mengen PSM, die bei der dezentralen Einzeldüsendosierung notwendig sind, können technisch kaum präzise beherrscht werden (WALGENBACH 2014). Der von SÖKEFELD et. al. (2005) diskutierte Nachteil von langen Verzögerungszeiten bei einer zentralen Einspeisung des PSM in die Düsenleitung ist mit dem Verfahren der Vorladung beim entwickelten Prototyp behoben worden. So kann durch die Verwendung von drei Düsenleitungen mit je einem eigenen Direkteinspeisesystem das PSM ohne Verzögerungszeiten gewechselt werden oder bei Bedarf auch mit allen drei Systemen gleichzeitig appliziert werden.

In den Tabellen 2 bis 5 sind die errechneten theoretisch möglichen Arbeitsbreiten bei unterschiedlichen PSM-Aufwandmengen bei 6, 8, 10 und 12 km/h dargestellt. Zu beachten ist, dass der Prototyp eine maximale Arbeitsbreite von 27 m hat. Der Abstand zwischen den Düsen beträgt 0,5 m. Bei der Düsenleitung von System I ist eine Einzeldüsenschaltung montiert, sodass hier die Teilbreiten, unter Beachtung der durch die Direkteinspeisepumpen limitierten Arbeitsbreiten, frei gewählt werden können. Die Düsenleitungen der beiden weiteren Systeme sind in 7 Teilbreiten von sechsmal 4 m und einmal 3 m unterteilt.

Tabelle 2: Theoretische Arbeitsbreiten (b_A) der Direkteinspeisung in Abhängigkeit von der verwendeten Pumpengröße bei 6 km/h Arbeitsgeschwindigkeit.

Arbeitsgeschwindigkeit 6 km/h	Dosierleistung [l/min]			
	Kleine Direkteinspeiseeinheit		Große Direkteinspeiseeinheit	
	min.	max.	min.	max.
	0,03	1,18	0,15	5,9
Aufwand PSM [l/ha]	theoretische Arbeitsbreite [m]			
0,1	30,0	1180,0	150,0	5.900,0
0,2	15,0	590,0	75,0	2.950,0
0,5	6,0	236,0	30,0	1.180,0
1	3,0	118,0	15,0	590,0
2	1,5	59,0	7,5	295,0
3	1,0	39,3	5,0	196,7
4	0,8	29,5	3,8	147,5
5	0,6	23,6	3,0	118,0
7	0,4	16,9	2,1	84,3
10	0,3	11,8	1,5	59,0

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass bei 6 km/h Arbeitsgeschwindigkeit mit der kleinen Pumpe eine Mindestarbeitsbreite von 30 m notwendig ist, um einen PSM-Aufwand von 0,1 l/ha zu realisieren. Das heißt, dass der Feldspritzen-Prototyp bei dieser Arbeitsgeschwindigkeit (v_d) mit seiner 27 m Arbeitsbreite keine PSM Aufwandmenge von 0,1 l/ha applizieren kann. Mit steigender Aufwandmenge je Hektar sinkt die erforderliche Mindestarbeitsbreite, sodass bei größeren Aufwandmengen eine Teilbreitenschaltung bei der Applikation ermöglicht wird. Unterschreitet die maximal mögliche Arbeitsbreite die reelle Arbeitsbreite des Prototyps, muss mit der größeren Pumpe gearbeitet werden. So beträgt z. B. bei einer PSM-Aufwandmenge von 5 l die maximale theoretische Arbeitsbreite bei der kleinen Pumpe 23,6 m und ist damit kleiner als die reelle Arbeitsbreite des Prototypen von 27 m. Mit der großen Pumpe sind unter gleichen Bedingungen theoretische Arbeitsbreiten (b_A) zwischen 3 und 118 m möglich. Die folgenden Tabellen 3 bis 5 zeigen die theoretisch möglichen Spannen der Arbeitsbreiten bei höheren Geschwindigkeiten.

Tabelle 3: Theoretische Arbeitsbreiten (b_A) der Direkteinspeisung in Abhängigkeit von der verwendeten Pumpengröße bei 8 km/h Arbeitsgeschwindigkeit

Arbeitsgeschwindigkeit 8 km/h	Dosierleistung [l/min]			
	Kleine Direkteinspeiseeinheit		Große Direkteinspeiseeinheit	
	min.	max.	min.	max.
	0,03	1,18	0,15	5,9
Aufwand PSM [l/ha]	theoretische Arbeitsbreite [m]			
0,1	22,5	885,0	112,5	4.425,0
0,2	11,3	442,5	56,3	2.212,5
0,5	4,5	177,0	22,5	885,0
1	2,3	88,5	11,3	442,5
2	1,1	44,3	5,6	221,3
3	0,8	29,5	3,8	147,5
4	0,6	22,1	2,8	110,6
5	0,5	17,7	2,3	88,5
7	0,3	12,6	1,6	63,2
10	0,2	8,9	1,1	44,3

Tabelle 4: Theoretische Arbeitsbreiten (b_A) der Direkteinspeisung in Abhängigkeit von der verwendeten Pumpengröße bei 10 km/h Arbeitsgeschwindigkeit

Arbeitsgeschwindigkeit 10 km/h	Dosierleistung [l/min]			
	Kleine Direkteinspeiseeinheit		Große Direkteinspeiseeinheit	
	min.	max.	min.	max.
	0,03	1,18	0,15	5,9
Aufwand PSM [l/ha]	theoretische Arbeitsbreite [m]			
0,1	18,0	708,0	90,0	3.540,0
0,2	9,0	354,0	45,0	1.770,0
0,5	3,6	141,6	18,0	708,0
1	1,8	70,8	9,0	354,0
2	0,9	35,4	4,5	177,0
3	0,6	23,6	3,0	118,0
4	0,5	17,7	2,3	88,5
5	0,4	14,2	1,8	70,8
7	0,3	10,1	1,3	50,6
10	0,2	7,1	0,9	35,4

Tabelle 5: Theoretische Arbeitsbreiten (b_A) der Direkteinspeisung in Abhängigkeit von der verwendeten Pumpengröße bei 12 km/h Arbeitsgeschwindigkeit.

Arbeitsgeschwindigkeit 12 km/h	Dosierleistung [l/min]			
	Kleine Direkteinspeiseeinheit		Große Direkteinspeiseeinheit	
	min.	max.	min.	max.
	0,03	1,18	0,15	5,9
Aufwand PSM [l/ha]	theoretische Arbeitsbreite [m]			
0,1	15,0	590,0	75,0	2.950,0
0,2	7,5	295,0	37,5	1.475,0
0,5	3,0	118,0	15,0	590,0
1	1,5	59,0	7,5	295,0
2	0,8	29,5	3,8	147,5
3	0,5	19,7	2,5	98,3
4	0,4	14,8	1,9	73,8
5	0,3	11,8	1,5	59,0
7	0,2	8,4	1,1	42,1
10	0,2	5,9	0,8	29,5

Aus den Tabellen 2 bis 5 geht hervor, dass die theoretischen Arbeitsbreiten (b_A) mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit kleiner werden. Dies ermöglicht es, bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten kleinere Teilbreiten zu schalten. Bei der Dosierpumpe mit dem kleineren Arbeitsbereich wird jedoch bei höheren Aufwandmengen schnell die Grenze der maximal möglichen Arbeitsbreite erreicht. So ist mit der kleinen Direkteinspeiseeinheit bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 12 km/h und einer Aufwandmenge von 5 l/ha PSM lediglich eine maximale theoretische Arbeitsbreite von 11,8 m möglich. Mit der großen Direkteinspeiseeinheit sind unter gleichen Bedingungen theoretische Arbeitsbreiten zwischen minimal 1,5 m und maximal 59 m realisierbar. Die vier Tabellen mit den verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten machen deutlich, warum es notwendig ist, dem zukünftigen Anwender für sein Feldspritzgerät mit Direkteinspeisung unterschiedliche Pumpengrößen zur Verfügung zu stellen. Aufgrund der breiten Spanne an zugelassenen PSM-Aufwandmengen im Ackerbau sowie bei Wiesen und Weiden von 0,05 l/ha bei Insektiziden bis zu 6,25 l/ha bei Herbiziden (BVL 2015) kann eine Pumpengröße alleine nicht alle erforderlichen Bereiche abdecken. Stehen dem Anwender dagegen verschiedene Pumpengrößen zur Verfügung, kann der größte Teil der denkbaren Situationen in der Praxis abgedeckt werden.

Der entwickelte Prototyp kann als ein wichtiger Schritt für Precision Farming im Pflanzenschutz angesehen werden, da er zeigt, dass die Anwendung einzelner PSM mit Direkteinspeisung bei hoher Dosiergenauigkeit und ohne Verzögerungszeiten möglich ist. Die teilflächenspezifische Behandlung mit einzelnen Pflanzenschutzmitteln als „Ja/Nein-Entscheidung“, und durch die Anpassung der Wassermenge auch die teilflächenspezifische Anpassung der Aufwandmenge des Wirkstoffes sind mit dem Prototypen möglich. Damit können PSM gezielter situationsgerecht angewendet werden. Bis der teilflächenspezifische Pflanzenschutz mit der differenzierten Anwendung einzelner Pflanzenschutzmittel verbreitet in die landwirtschaftliche Praxis Einzug hält, sind aber noch einige Schritte

(z. B. Sensoren zur Schaderregererkennung) notwendig. Die erzielten Ergebnisse belegen die Aussage von GANZELMEIER (2012), dass Precision Farming im Pflanzenschutz nur schrittweise vorankommt, diesen jedoch in Zukunft ganz wesentlich bestimmen wird.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Feldspritzgeräte-Prototyp mit Direkteinspeisung in der Lage ist, innerhalb des Arbeitsbereiches der Dosierpumpen mit hoher Dosiergenauigkeit flüssig formulierte Pflanzenschutzmittel per Direkteinspeisung teilflächenspezifisch und ohne Verzögerungszeiten zu applizieren. Im Projekt war es nicht möglich, alle auf dem Markt befindlichen flüssig formulierten PSM zu testen. Erst nach umfangreichen Praxiseinsätzen kann festgestellt werden, ob alle Formulierungen unter verschiedenen Umweltbedingungen unproblematisch dosierbar sind. Problematisch sind kleine Aufwandmengen je Hektar, wenn nur in kleiner Teilbreite bei geringer Arbeitsgeschwindigkeit gearbeitet werden soll. In einem weiteren Entwicklungsschritt muss die Bedienung und Reinigung des Prototyps vereinfacht werden. Ferner sind für die Zukunft weitere Verbesserungen, wie z. B. die Reduktion der Anzahl von Bedienterminals vorgesehen. Auch weitere Feldversuche auf Praxisflächen zur Demonstration der Praxistauglichkeit des Systems sind geplant bzw. befinden sich zum Teil auch schon in der Durchführungsphase. Die bisherigen Tests und Erfahrungen mit dem Feldspritzgeräte-Prototyp zeigen, dass praxistaugliche Systeme zur verzögerungsfreien Direkteinspeisung realisierbar sind.

Literatur

- Berthoud (2013): Direkteinspritzungssystem BERTHOUD: „CLEAN SPRAYER“. <http://www.berthoud.com/allemand/news-und-messen/news/direkteinspritzungssystem-berthoud—clean-sprayer—5208.aspx>, Zugriff am 5.6.2015
- BVL (2015): Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis 2015, Teil 1 Ackerbau – Wiesen und Weiden Hopfenbau – Nichtkulturland. Hg. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Braunschweig, 63. Auflage
- Dammann (2013): Fluid-Schaubild D-I-S PSM, unveröffentlicht
- Danfoil (2015): Vorteile des danfoil MultiDose Injection Systems. http://www.danfoil.dk/de/produkte/injection/vorteile_des_danfoil_multidose_injection_systems.htm, Zugriff am 5.6.2015
- Eikel, G. (2007): Direkteinspeisung für bis zu vier Pflanzenschutzmittel. *profi* 19(11), S. 8
- Ganzelmeier, H. (2012): Nachhaltiger und schlagkräftiger Pflanzenschutz. In: *Jahrbuch Agrartechnik 2012*. Hg. Frerichs, L., Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, S. 1–9, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043448>, Zugriff am 18.6.2015
- Garrelts, J. (2013): Aktuelle Entwicklungen zur Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln in einer Feldspritze. In: *Norddeutsches Marktfruchtforum 2013*, Hg. Kage, H., Sieling, K., Huesmann, S., Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel 84, S. 49–53
- Gerhards, R. (2004): Precision Farming im Pflanzenschutz. In: *Landinfo 3: Informationen für die Landwirtschaftsverwaltung/Baden-Württemberg*, Hg. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume (LEL), S. 10–15
- Holtmann, W. (2010): Was wurde eigentlich aus ... der Cerberus-Feldspritze von Rau? *profi* 22(1), S. 112
- Kyndestoft (2015): Kyndestoft Injection. <http://kyndestoft.eu/onewebmedia/injektion%20%28ny%20adr%29.pdf>, Zugriff am 5.6.2015
- Lechler (2007): Lechler VariInject Bedienungsanleitung. Hydraulisch angetriebenes Direktdosiersystem mit zentraler Einspeisung auf dem Gestänge
- Neunaber, M. (1989): Pflanzenschutz: Wasser und Mittel endlich getrennt. *profi* 1(12), S. 9

- Raven (2015a): Installation & Operation Manual Sidekick Pro™ Manual No. 016-0171-391 Rev. C. <http://ravenhelp.com/~media/Product%20Information/Service%20Manuals/Application%20Controls/016-0171-391%20Rev%20C%20-%20Sidekick%20Pro%20-%20Installation%20and%20Operation%20Manual.ashx>, Zugriff am 11.6.2015
- Raven (2015b): Sidekick Pro™ Funktionsschema. <http://ravenprecision.com/products/application-controls/sidekick-sidekick-pro/>, Zugriff am 4.6.2015
- Rimpau, J. (2006): Innovationsbedarf für den zukünftigen praktischen Pflanzenschutz: Anforderungen an die Wissenschaft. In: Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft. Band 8. Biotechnologie – Innovationsmotor für den Pflanzenschutz, Hg. von Tiedemann, A.; Feldmann, F., Stuttgart, Eugen Ulmer KG, S. 118–122
- Sökefeld, M.; Hlobe, P.; Schulze Lammers, P. (2005): Entwicklung einer Versuchseinrichtung zur Untersuchung der Verzögerungszeiten von Direkteinspeisungssystemen für die teilflächenspezifische Applikation von Herbiziden. Agrartechnische Forschung 11(5), S. 145–154
- Vondricka, J.; Schulze Lammers, P. (2009): Real-time controlled direct injection system for precision farming. Precision Agric 10, pp. 421–430
- Walgenbach, M. (2014): Aufbau und Untersuchung eines Versuchsträgers zur Direkteinspeisung an der Düse. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Wartenberg, G. (2000): Teilflächenspezifisches Spritzen von Pflanzenschutzmitteln. Landtechnik 55(6), S. 438–439, DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2000.1992>
- Wehrspann, J. (2013): Direct injection for sprayers is back. <http://farministrynews.com/sprayers/direct-injection-sprayers-back>, Zugriff am 5.6.2015

Autoren

Dr. Henning Nordmeyer ist wissenschaftlicher Oberrat und Leiter der Abteilung Herbologie am Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland des Julius Kühn-Instituts, **M. Sc. agr. Mathias Krebs** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dipl.-Ing. Dirk Rautmann** ist wissenschaftlicher Direktor und stellvertretender Institutsleiter und **Dr. sc. agr. Jens Karl Wegener** ist Direktor und Professor und leitet das Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz des Julius Kühn-Instituts, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, E-Mail: dirk.rautmann@jki.bund.de

Hinweise/Danksagungen

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung (FKZ 2815404010). Des Weiteren gilt unser Dank den Kolleginnen und Kollegen der Institute für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz und für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland des Julius Kühn-Instituts in Braunschweig für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung. Bedanken möchten wir uns ebenfalls bei unserem Projektpartner, der Herbert Dammann GmbH, für die produktive Zusammenarbeit.