

Institut für Landtechnik
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Aufbau und Untersuchung eines Versuchsträgers zur Direkteinspeisung an der Düse

In a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt am

04.02.2014

von

Dipl.-Ing. agr. Martin Walgenbach

aus Asbach/Parscheid

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Jan-Welm Biermann

Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2014

© 2014

Im Selbstverlag

Bezugsquelle: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Landwirtschaftliche Fakultät
Institut für Landtechnik
Nussallee 5
53115 Bonn

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Zusammenfassung

Direkteinspeisungssysteme für Pflanzenschutzmittel werden entwickelt, um diese flexibel einsetzen zu können, Restmengen von Spritzbrühe zu vermeiden und die Umwelt sowie den Anwender zu schützen. Sie können anhand ihrer Einspeisungspunkte der Pflanzenschutzmittel in den Strom der Trägerflüssigkeit unterschieden werden. Diese verursachen unterschiedliche Verzögerungszeiten, bis die erzeugte Spritzbrühe die Düse erreicht. Zur sensorbasierten Applikation mehrerer unterschiedlicher Pflanzenschutzmittel in einem Arbeitsgang sind Mehrtank- oder Direkteinspeisungssysteme erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Standardfeldspritze zu einem Prototyp mit Direkteinspeisung an der Düse für die teilschlagspezifische Applikation aufgebaut und am Prüfstand untersucht. Bei der geplanten Nutzung sollen drei Herbizide unabhängig voneinander online mit einem Erkennungssystem ausgebracht werden.

Die Aufwandmengen der Pflanzenschutzmittel werden an den Einspeisungspunkten unabhängig von der Menge und dem Druck der ausgebrachten Trägerflüssigkeit gesteuert. Zur Steuerung wird ein Controller mit deterministischem Betriebssystem und Field Programmable Gate Array (FPGA) Technologie eingesetzt. Die Zusammenhänge im hydraulischen System, wie die Einflüsse von Temperatur, Viskosität und Druck werden untersucht. Verschiedene Pumpen werden hinsichtlich deren Eignung als Druckquelle für den Anwendungsfall verglichen und eine Differenzdruckregelung zwischen dem Leitungssystem für Trägerflüssigkeit und dem für Pflanzenschutzmittel aufgebaut. Die Steuerung der eingespeisten Menge setzt einen konstanten Differenzdruck zwischen diesen hydraulischen Systemen voraus, da die ausgebrachte Menge durch die Öffnung des verwendeten Einspeisungsventils (RRV[®]) gesteuert wird.

Diese Einspeisungsventile sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchung. Es handelt sich dabei um neuartige Kugelventile. Durch die Bewegung der Ventilkugel aus einer Bohrung im Ventilsitz wird die Dosierung gesteuert. Das Dosierventil deckt ein Mengenspektrum von 0,1 bis 150 ml·min⁻¹ und ein Viskositätsspektrum von 1 bis 800 mPa·s ab. Ein Arbeitsschwerpunkt ist die Auslegung des Leitungssystems im Ventilverbund zur Vermeidung von pulsationsbedingten Schwingungen.

Da Druckänderungen und Pulsation die Dosierung beeinflussen, ist das Erreichen der geforderten Genauigkeit mit maximal 10 % Abweichung vom Sollwert der

Ausbringung ebenfalls Arbeitsschwerpunkt. Dieser Wert ist gemeinsam mit dem Julius Kühn-Institut erarbeitet worden. Weiterhin wurde die Leistungsaufnahme der Einspeisungsventile von 40,25 W auf 25,94 W abgesenkt. Dazu ist die Ventilschule angepasst, und die maximale Stromstärke darin begrenzt worden. Die Erwärmung des Mediums im Einspeisungsventil wurde mit und ohne den kühlenden Trägerflüssigkeitsstrom untersucht und die Gefahr der Veränderung der eingespeisten Pflanzenschutzmittelformulierung bei Applikation von Trägerflüssigkeit als gering eingeschätzt.

Verschiedene Durchflussmesser wurden auf ihre Eignung für den Einsatz am einzelnen Einspeisungsventil auf dem Spritzgestänge untersucht. Um den Aufbau des Systems zu beschleunigen, wird zukünftig die Durchflussregelung direkt am Einspeisungsventil angestrebt.

Abstract

Direct injection systems for Plant Protection Products (PPP) are developed to increase the precision of application, to avoid residual amounts of spray mixture and to protect the environment as well as the operator against harm. They can be divided by their injection point of the PPP in the pipes. These injection points cause different volumes of spray mixture in the piping system and therewith different response times until the desired spray mixture exits the nozzle. For sensor-based application of several different pesticides in a one work step, multi-tank or direct injection systems are required.

In this dissertation a standard field sprayer is converted into a prototype with direct nozzle injection of PPP for the site-specific application and it is investigated on a test bench. The aim is to build a field sprayer for independent application of three different herbicides online with a detection system.

The application rates of the PPP are controlled independently from the amount and the pressure of the carrier fluid at the injection points. Therefore a controller with deterministic operating system and Field-programmable gate array (FPGA) technology is used. The interactions in the hydraulic system, such as the effects of temperature, viscosity and pressure are analyzed. Different pumps are investigated in terms of their ability to use them as a pressure source for the application. A differential pressure control between the hydraulic system for carrier fluid and for PPP is set up. Since the injected amount is controlled by the opening of the injection valve (RRV[®]), a constant differential pressure between these systems is required.

These specific ball valves are also investigated. Dosing is realized by moving the valve ball from a hole in the valve seat. This metering valve covers an injection range from 0.1 to 150 ml·min⁻¹ and a viscosity range of 1-800 mPa·s. One focus is the design of the pipeline with these injection valves to prevent from vibrations caused by pulsation.

Since changes in pressure and pulsation affect dosing, the achievement of a maximum deviation of 10 % from the target value is also investigated. This limit has been developed together with the Julius Kühn-Institute. Also the power consumption of the injection valves was reduced from 40.25 W to 25.94 W by adjusting the valve coil as well as limiting the maximum current in it. The warming of the medium in the

injection valve was studied with and without the application of the cooling carrier fluid. The risk of damage for the formulation of the PPP appears to be small.

Different flow meters were tested in terms of using them with one single injection valve on the spray boom. To accelerate the set-up of the sprayer in the future, closed loop flow control at the injection valve is aimed at.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelzeichen.....	IV
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens und der Technik	3
2.1 Einführung in die Pflanzenschutztechnik.....	3
2.2 Steuerung von Pflanzenschutzspritzen	5
2.3 Teilschlagspezifische Applikation	6
2.4 Mehrkammerspritze.....	9
2.5 Direkteinspeisungssysteme (DES)	10
2.5.1 Aufbau von Direkteinspeisungssystemen	10
2.5.2 Zentrale Direkteinspeisung zur teilschlagspezifischen Applikation.....	12
2.5.3 Dosiereinrichtung.....	12
2.5.4 Durchflussmessung.....	15
3 Zielsetzung.....	16
4 Anforderungen an die Genauigkeit der Ausbringung von DES an der Düse..	18
5 Bauteile und Untersuchungsmethoden.....	19
5.1 Aufbau des Versuchsträgers	19
5.1.1 Spannungsversorgung	19
5.1.2 Hard- und Software	20
5.1.3 Trägerflüssigkeitssystem	21
5.2 Druckquelle für Pflanzenschutzmittel	22
5.2.1 Druckmessung.....	24

5.3 Leitungssysteme für Pflanzenschutzmittel	24
5.3.1 Pulsationsmessung an der Teilbreite.....	27
5.3.2 Pulsationsmessung im gesamten Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel	28
5.3.3 Befüllung und Entleerung des Leitungssystems	30
5.4 Differenzdruckregelung	30
5.5 Direkteinspeisungseinheit	31
5.6 Einspeisungsventil (RRV [®])	33
5.6.1 Ventilprinzip	33
5.6.2 Ventilsteuerung.....	36
5.6.3 Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme.....	37
5.6.3.1 Einfluss des Spulensystems und der angelegten elektrischen Leistung auf die Öffnung des Einspeisungsventils.....	37
5.6.3.2 Einfluss der Induktivität im Dosierbetrieb	39
5.6.3.3 Leistungsaufnahme der RRV [®] auf dem Versuchsträger	40
5.6.4 Temperaturmessung	41
5.7 Messung der Dosiergenauigkeit.....	42
5.8 Durchflussmessung.....	43
5.9 PSM-Simulanz.....	45
6 Ergebnisse und Diskussion.....	47
6.1 Druckquelle	47
6.1.1 Temperatur-, Viskositäts- und Druckänderung bei Einsatz einer ungeregelten Pumpe	47
6.1.2 Druckänderung beim Einsatz einer druckluftbetriebenen Kolbenpumpe als Beispiel für eine einfache Pumpenregelung.....	49
6.1.3 Diskussion der Druckquelle für Pflanzenschutzmittel	51
6.2 Aufbau des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel.....	53
6.2.1 Pulsation an der Teilbreite.....	53

6.2.2 Pulsationsminderung im gesamten Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel	57
6.2.3 Differenzdruckregelung im Gesamtsystem	60
6.2.4 Diskussion des Aufbaus des Leitungssystems	63
6.3 Entwicklung des Einspeisungsventils	65
6.3.1 Leistungsaufnahme	65
6.3.2 Ventilerwärmung und Einfluss auf die Dosierung	67
6.3.3 Kennfeld des RRV [®] in Abhängigkeit von Druck und Viskosität.....	70
6.3.3.1 Öffnungskennlinie	70
6.3.3.2 Druckkennlinie	71
6.3.4 Diskussion der Ventilentwicklung	73
6.3.4.1 Leistungsaufnahme.....	73
6.3.4.2 Erwärmung und Einfluss auf die Dosierung	74
6.3.4.3 Kennfeld.....	75
6.4 Ergebnisse und Diskussion zur Genauigkeit der Dosierung.....	76
6.4.1 Dosiergenauigkeit der Einspeisungsventile.....	76
6.4.2 Ergebnisse zur Durchflussmessung.....	81
6.4.2.1 Ovalradzähler.....	81
6.4.2.2 Kalorimetrischer Durchflussmesser	82
6.4.3 Diskussion der Dosiergenauigkeit der Einspeisungsventile.....	86
6.4.4 Diskussion der Durchflussmessung.....	87
6.5 Abschließende Diskussion.....	88
7 Schlussfolgerung und Ausblick.....	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Titel	Seite
Abb. 1	Schematische Darstellung einer Pflanzenschutzspritze nach dem Stand der Technik	3
Abb. 2	Darstellung des On- und Offlineverfahrens in der Pflanzenschutzmittelapplikation (Walgenbach und Dörpmund, 2011, verändert)	7
Abb. 3	Entwicklungs- und Verbreitungsstand der Online-Sensorik für Geräte zur Bestandsführung im konventionellen Feldbau (Piotraschke, 2010, verändert)	8
Abb. 4	Schema zum Aufbau von Direkteinspeisungssystemen mit verschiedenen Einspeisungsarten	11
Abb. 5	Gesamtansicht des Versuchsträgers mit Schaltkasten und PSM-Behälter	19
Abb. 6	Detailansicht der Spannungsversorgung auf dem Versuchsträger	20
Abb. 7	Schema des modifizierten Trägerflüssigkeitssystems	21
Abb. 8	Schema des Aufbaus zur Untersuchung von PSM-Pumpen	22
Abb. 9	Druckbehälter für Pflanzenschutzmittel, links Foto des Versuchsträgers, rechts schematischer Aufbau	23
Abb. 10	Schema des PSM-Leitungssystems aus Vitonschlauch in der rechten Hälfte des Spritzgestänges	25
Abb. 11	Adapter zur Anbringung der RRV [®] am Schlauch	26
Abb. 12	Schema des Aufbaus zur Pulsationsmessung an einer Teilbreite der PSM-Leitung	27
Abb. 13	Aufbau des PSM-Leitungssystems mit Drossel und Stichleitung zum RRV [®]	29
Abb. 14	Schema des PSM-Leitungssystems aus Edelstahlrohr mit einem Drucksensor	29

Abb. 15	Schema des Aufbaus zur Befüllung und Entleerung des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel	30
Abb. 16	Einbausituation einer Direkteinspeisungseinheit für drei PSM im Spritzgestänge	31
Abb. 17	Direkteinspeisungseinheit mit einem (links) und drei RRV [®] (rechts)	32
Abb. 18	Aufbau des Einspeisungsventils	33
Abb. 19	Innerer Aufbau und Funktionsprinzip des RRV [®] (Mönning et al., 2010, verändert)	34
Abb. 20	Grundkörper der Direkteinspeisungseinheit	35
Abb. 21	Schematische Darstellung der Zielwerte des Spulenstroms bei dessen Modulation über der Zeit am RRV [®]	36
Abb. 22	Temperaturmessung im Einspeisungsventil	41
Abb. 23	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Dosiergenauigkeit	42
Abb. 24	Ovalradzähler (links) und kalorimetrischer Sensor nach Hüchtebrock (1997; rechts)	43
Abb. 25	Aufbau zur kalorimetrischen Durchflussmessung und –regelung am RRV [®]	44
Abb. 26	Dynamische Viskosität wichtiger Pflanzenschutzmittel der Firma Bayer CropScience nach Friessleben (2011)	45
Abb. 27	Temperaturanstieg und Viskositätsänderung bei Zirkulation von 1 l Glycerin mit einer Membranpumpe und 1441 kPa Druck (n= 3)	48
Abb. 28	Temperaturanstieg und Druckänderung bei Zirkulation von 1 l Glycerin mit einer Membranpumpe	49
Abb. 29	Druckverlauf zwischen Pumpenausgang der druckluftbetriebenen Kolbenpumpe und Druckregler mit Wasser als Versuchsmedium	50
Abb. 30	Vergleich des Druckverlaufs am Pumpenausgang der druckluftbetriebenen Kolbenpumpe bei 500 kPa mit und ohne zusätzliche Druckminderung	51
Abb. 31	Standardabweichung des Druckes in der Leitung aus Edelstahlrohr	54

	und aus edelstahldrahtummanteltem Vitonschlauch beim Betrieb der Einspeisungsventile (n= 3)	
Abb. 32	Mittlere Verkürzung von drei Vitonschlauchabschnitten zwischen Direkteinspeisungseinheiten im Spritzgestänge (50 cm Abstand) mit unterschiedlichen Mantelmaterialien bei steigendem Druck	55
Abb. 33	Standardabweichung des Druckes in der Leitung aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch mit Betrieb von einem und von sechs Einspeisungsventilen (n=3)	56
Abb. 34	Aufschwingen des Druckes im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Seibold, 2011)	57
Abb. 35	Druck im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel bei 27 % Öffnung der Einspeisungsventile an TB 5,6 und 7	58
Abb. 36	Druck im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel bei 28 % Öffnung der Einspeisungsventile an TB 5,6 und 7	59
Abb. 37	Geregelter Differenzdruck bei 13 % Öffnung von Teilbreite 4 und 5 im Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Seibold, 2011)	61
Abb. 38	Geregelter Differenzdruck bei 12,5 % Öffnung von Teilbreite 5,6 und 7	62
Abb. 39	Geregelter Differenzdruck bei 13 % Öffnung von Teilbreite 5,6 und 7	63
Abb. 40	Stromaufnahme mit der ursprünglichen und der optimierten Konfiguration des Einspeisungsventils (100 Hz Steuerfrequenz, n= 3)	66
Abb. 41	Temperaturanstieg von Glycerin im RRV [®] ohne Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 80 % und 96 % Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)	67
Abb. 42	Temperaturanstieg von Glycerin im RRV [®] mit Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 70 % und 80 % Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)	68
Abb. 43	Viskositätsänderung von Glycerin durch die Erwärmung des RRV [®] mit Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 70 % und 80 %	69

	Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)	
Abb. 44	Öffnungskennlinie des Einspeisungsventils (100 Hz Steuerfrequenz) bei der Dosierung von Wasser mit 400 kPa Druck	70
Abb. 45	Beispiel für Kennlinien des Einspeisungsventils für mittlere Viskositäten des Einsatzspektrums (n=3)	72
Abb. 46	Beispiel für Kennlinien des Einspeisungsventils für hohe und niedrige Viskosität des Einsatzspektrums (n=3)	73
Abb. 47	Durchschnittliche Ausbringung Wasser der RRV [®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 4,5 % Öffnung (n=3)	77
Abb. 48	Durchschnittliche Ausbringung Wasser der RRV [®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 5,5 % Öffnung (n=3)	78
Abb. 49	Durchschnittliche Ausbringung Wasser der RRV [®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 6 % Öffnung (n=3)	79
Abb. 50	Kalibrationskurve des Massendurchflussmessers für eine Glycerin-Wasser-Lösung mit 85 Masseprozent Glycerin (n=3)	83
Abb. 51	Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringung mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 200 kPa (n=3)	84
Abb. 52	Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringung mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 400 kPa (n=3)	84
Abb. 53	Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringung mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 600 kPa (n=3)	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Titel	Seite
Tab. 1	Konfiguration des ursprünglichen und des angepassten RRV [®]	65
Tab. 2	Variationskoeffizienten der Ausbringungsmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 4,5 % Öffnung der RRV [®] (n=3)	77

Tab. 3	Variationskoeffizienten der Ausbringmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 5,5 % Öffnung der RRV® (n=3)	78
Tab. 4	Variationskoeffizienten der Ausbringmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 6 % Öffnung der RRV® (n=3)	79
Tab. 5	Vergleich der Ausbringmenge mit der Impulszahl pro ml beim Betrieb des Ovalradzählers mit Wasser	81
Tab. 6	Vergleich der Ausbringmenge mit der Impulszahl pro ml beim Betrieb des Ovalradzählers mit Glycerin	82
Tab. 7	Prozentuale Abweichung des mittleren Durchflussmesswertes von der gravimetrisch bestimmten Ausbringmenge	85

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung oder Symbol

Bedeutung

<i>Abb.</i>	Abbildung
<i>BBA</i>	Biologische Bundesanstalt
<i>BMELV</i>	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
<i>ca.</i>	circa
<i>CCD</i>	Charge-coupled Device
<i>DES</i>	Direkteinspeisungssystem
<i>DLR</i>	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
<i>DNIS</i>	Direkteinspeisungssystem an der Düse
<i>FPGA</i>	Field Programmable Gate Array
<i>JKI</i>	Julius Kühn-Institut
<i>NRW</i>	Nordrhein-Westfalen
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>PEEK</i>	Polyetheretherketon
<i>PSM</i>	Pflanzenschutzmittel

%	Prozent
RRV [®]	Rapid Reaction Valve
σ	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TB	Teilbreite
USA	United States of America
VK	Variationskoeffizient
WNr.	Werkstoffnummer
z.B.	zum Beispiel

Formelzeichen

Abkürzung oder Symbol	Einheit	Bedeutung
α		Durchflusszahl
a	m	Abstand zwischen zwei Düsen
A_D	m ²	Querschnittsfläche der Drosselstelle
A_W	m ²	Querschnittsfläche des Drahtes
A_S	m ²	Querschnittsfläche der Spule
B	T	Magnetische Flussdichte
C_p	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Spezifische Wärmekapazität
C_m	%	Massenanteil Glycerin
d	m	Innendurchmesser
d_D	m	Hydraulischer Durchmesser der Drossel
D	l·ha ⁻¹	Aufwandmenge
e		Eulersche Zahl
η	mPa·s	Dynamische Viskosität
η_w	mPa·s	Dynamische Viskosität von Wasser
η_g	mPa·s	Dynamische Viskosität von Glycerin
F		Füllfaktor der Spule
G		Gewichtungsfaktor
I	A	Strom
I_p	A	Anzugstrom

I_h	A	Haltestrom
l	m	Länge
l_l	m	Länge des Leitungsabschnittes
L	H	Induktivität
λ_R	f(Re)	Rohrwiderstandsbeiwert
n		Zahl der Einzelversuche
N		Windungszahl
Δp	kPa	Druckdifferenz
ΔP	kPa	Druckverlust
P	W	Ohmsche Verlustleistung
q	ml·min ⁻¹	Ausbringmenge Pflanzenschutzmittel eines RRV®
Q_d	m ³ ·s ⁻¹	Durchfluss an der Drosselstelle
R	Ω	Widerstand
Re		Reynolds-Zahl
r_m	m	Mittlerer Radius der Spule
ρ	$\Omega \cdot m$	Spezifischer Widerstand
ρ_F	kg·m ⁻³	Dichte der Flüssigkeit
T	°C	Temperatur
ΔT	°C	Temperaturänderung
μ_0	N·A ⁻²	Magnetische Feldkonstante
μ_R	N·A ⁻²	Magnetische Permeabilität
v	m·s ⁻¹	Fahrgeschwindigkeit
v_s	m·s ⁻¹	Strömungsgeschwindigkeit
W	J	Energie im Magnetfeld

1 Einleitung

Die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft ist stetig in der öffentlichen Diskussion und soll nach dem nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (2008) auf das notwendige Maß begrenzt werden. Der Stand der Entwicklung der dazu verwendeten Pflanzenschutztechnik ist weltweit betrachtet sehr unterschiedlich, wobei die Entwicklung der Landtechnik in Deutschland neben Anderen eine Vorreiterrolle einnimmt. Allerdings unterscheiden sich die Umsätze der deutschen Pflanzenschutzmittel- und der Pflanzenschutzgerätehersteller stark. So werden beispielsweise in der deutschen Landwirtschaft jährlich ca. 1,4 Mrd. € für Pflanzenschutzmittel ausgegeben und nur ca. 7 % (unter 100 Mio. €) dieser Summe für die Pflanzenschutztechnik investiert (Ganzelmeier, 2011). Der nationale Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln aus dem Jahr 2008 erklärte jedoch zum Ziel, Pflanzenschutzgeräte im Hinblick auf die Einsparung von Pflanzenschutzmitteln und die Ressourcenschonung zu entwickeln und zu optimieren. Im Besonderen gehört dazu die Entwicklung für eine sensorbasierte, teilschlagspezifische Applikation nur dort, wo die Notwendigkeit einer Bekämpfung besteht. Nachweislich können damit bei Herbiziden 4 - 80 % der ausgebrachten PSM gegen dikotyle Unkräuter, und 22 - 70 % gegen monokotyle Unkräuter eingespart werden, ohne Verluste bei Kulturpflanzen zu verursachen (Gerhards und Oebel, 2006).

Die Fortschritte in der Entwicklung von Sensortechniken, beispielsweise zur Erkennung von Unkräutern oder anderen Schaderregern im Feld, erfordern die Weiterentwicklung der entsprechenden Applikationstechnik, um unabhängig voneinander verschiedene Wirkstoffe ausbringen zu können. Die bisherige Pflanzenschutztechnik zur Applikation von Spritzbrühe ermöglicht keinen Wechsel der ausgebrachten Wirkstoffe, ohne vorherige Erstellung einer neuen Tankmischung, oder mittels unabhängiger Ausbringung mehrerer Spritzbrühen im Feld (Mehrtankspritze). Direkteinspeisungssysteme bieten die Möglichkeit, das ausgebrachte Pflanzenschutzmittel während der Applikation unabhängig von der ausgebrachten Menge Trägerflüssigkeit zu verändern. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Versuchsträger zur teilflächenspezifischen Ausbringung von PSM mittels eines

Direkteinspeisungssysteme an der Düse entwickelt und am Prüfstand untersucht. Damit soll Wissen über die Applikationstechnik zur sensorbasierten Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln gewonnen, und damit zum Anwenderschutz, zur Verlustminderung sowie zu deren Einsparung beigetragen werden.

2 Stand des Wissens und der Technik

2.1 Einführung in die Pflanzenschutztechnik

Der Stand der Technik ist die einheitliche Applikation von Lösungen, Suspensionen und Emulsionen von Pflanzenschutzmitteln mit Wasser auf der gesamten Fläche. Diese werden im Folgenden als Spritzbrühe bezeichnet. Die Spritzbrühe wird in einem Tank gemischt, mittels einer Pumpe unter Druck gesetzt und durch ein Leitungssystem mit Düsen als Flüssigkeitszerstäuber ausgebracht (Abb. 1). Dabei kann die Wirkstoffzusammensetzung nicht an die teilschlagspezifischen Gegebenheiten angepasst werden.

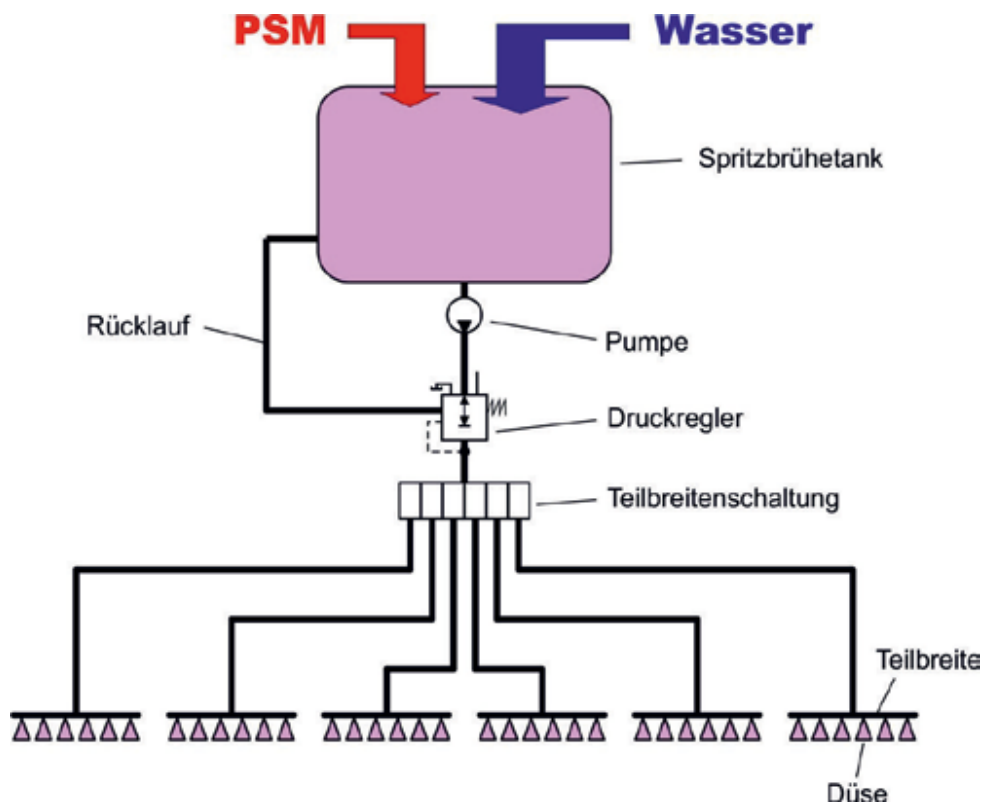


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Pflanzenschutzspritze nach dem Stand der Technik

In den professionellen landwirtschaftlichen Betrieben Europas zeichnet sich in den vergangenen Jahren ein zunehmender Trend zur Leistungssteigerung im Pflanzenschutz ab (Kiefer, 2011). Höhere Fahrgeschwindigkeiten zur Steigerung der Flächenleistung bei punktgenauer Behandlung stellen neue Anforderungen an die Applikationstechnik dar. Verschiedene Hersteller bieten Beleuchtungseinrichtungen zur Ausleuchtung der Spritzkegel an, um bei Nacht Hindernisse im Feld und

verstopfte Düsen erkennen zu können. Bei den Pflanzenschutzgeräten gibt es einen Trend zu Selbstfahrern. Der Schwerpunkt des Markabsatzes liegt allerdings weiterhin auf Anhäng- und Anbaugeräten (Wiesendorfer et al., 2011).

Die Dosierung an einer Pflanzenschutzspritze beruht grundsätzlich auf der Bernoulli-Gleichung, wonach der Durchfluss an einer Drosselstelle bei konstanter Konzentration der Spritzbrühe vom Querschnitt und von der Druckdifferenz an der Drosselstelle abhängt (Schmitt-Ott, 1976):

$$Q_d = \alpha \cdot A_D \cdot \sqrt{\frac{0,02 \cdot \Delta p}{\rho_F}} \quad (1)$$

mit:

Q_d = Durchfluss an der Drosselstelle, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

α = Durchflusszahl, eine Konstante, die von der Geometrie der Drosselstelle und der Zähigkeit der Flüssigkeit abhängt

A_D = Querschnittsfläche der Drosselstelle, m^2

Δp = Druckdifferenz, kPa

ρ_F = Flüssigkeitsdichte, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Nach Kifferele und Stahli (2001) kann die Dichte der Spritzbrühe als konstant angenommen werden. Technisch sind stufenlose Änderungen des Querschnitts und der Geometrie der Drosselstelle schwer umsetzbar. Der Arbeitsdruck kann dagegen stufenlos verändert werden. Begrenzende Faktoren sind der maximal mögliche Arbeitsdruck der Pumpe und die Größe der erzeugten Tropfen. Abgestufte Einstellungen des Düsenausstoßes werden durch Querschnittsänderungen (Düsengröße) realisiert, wohingegen die stufenlose Einstellung auf der Änderung des Arbeitsdruckes basiert (Kifferle & Stahli, 2001).

Volumenstromregelung an der Pflanzenschutzdüse

Erste Untersuchungen zur Volumenstromregelung an der Pflanzenschutzdüse mittels Pulsweitenmodulation wurden bereits in den achtziger Jahren durchgeführt (Giles und Comino, 1989; 1990). Diese Form der Volumenstromregelung erlaubt eine flexiblere Anpassung der Aufwandvolumina an ausgebrachter Spritzbrühe oder

Flüssigdünger an der Spritzdüse als die Veränderung des Druckes der anliegenden Spritzbrühe. Zudem kann das Tropfenspektrum der Spritzdüsen kontrolliert und in weiten Bereichen unabhängig vom Druck konstant gehalten werden (GopalaPillai et al., 1999; Giles ,1997).

2.2 Steuerung von Pflanzenschutzspritzen

Bei den auf dem Markt angebotenen Pflanzenschutzgeräten werden die Durchflussmenge und die Fahrgeschwindigkeit mit elektronischen Sensoren erfasst. Anhand dieser Größen und der Arbeitsbreite wird das Aufwandvolumen automatisch und durchgehend während des Spritzvorgangs errechnet und auf dem Gerätedisplay angezeigt. Alternativ werden die Geräte mit Druckmessern ausgestattet (Kifferle & Stahli, 2001). Dabei dienen der Arbeitsdruck und die Düsengröße zur Berechnung des Durchflusses.

Zur exakteren Applikation der Spritzbrühe in Reihenkulturen wird im Obstbau die Bestandsdichte erfasst und der Spritzbrühestrom in Freiräumen zwischen den Pflanzen abgeschaltet (Balsari, 2008). Nach Chen et al. (2011) können auf diese Weise 47-73 % der Spritzbrühe eingespart werden.

Im Feldbau werden zur präziseren Applikation der Spritzbrühe, Vermeidung von Überlappung und Entlastung der Fahrer zunehmend automatische Teilbreitenschaltssysteme eingesetzt. Die Mehrzahl der angehängten Pflanzenschutzspritzen ist nach Ganzelmeier (2011) mittlerweile damit ausgestattet. In Kombination mit einem Vorgewendemanagement hebt das Gestänge beim Wenden aus. Dadurch gibt es vor allem bei hohen Geschwindigkeiten weniger Bodenkontakte (Höhner und Kramer, 2012).

Zur Höhenführung der Spritzgestänge werden automatische Systeme angeboten, die mit Abstandssensoren und variabler Geometrie eine gleichmäßige Höhenführung der Düsen über dem Bestand erzielen sollen (Höhner und Kramer, 2012).

Düsenüberwachungen mit unterschiedlichen Sensorbauarten zur Erkennung von Verschmutzungen oder Blockaden der Spritzdüsen wurden auf der Agritechnica 2011 von verschiedenen Herstellern vorgestellt. Bei einigen ist eine Kalibration des Messsystems auf den Durchfluss der eingesetzten Düsengröße möglich.

Automatische Innenreinigungssysteme dienen der Erleichterung und Verbesserung der Gerätereinigung und somit der Absicherung vor Schäden in der Folgekultur. Untersuchungen des Julius Kühn-Institutes (JKI) haben gezeigt, dass nach der Reinigung und einer erneuten Wiederbefüllung mit Wasser Pflanzenschutzmittelrestkonzentrationen zwischen lediglich 0,1 und 0,4 % erreicht werden können. Mit einer kontinuierlichen Innenreinigung können die Werte noch weiter reduziert werden (Ganzelmeier, 2011). Diese Technik wurden von der Landwirtschaftskammer NRW mit entwickelt (Kramer, 2010). Kiefer (2011) hält eine Kombination eines absätzigen Verfahrens mit der kontinuierlichen Innenreinigung besonders bei komplexeren Pflanzenschutzgeräten für wirkungsvoll.

Hahn (2011) hat die Elektrifizierung des Antriebs einer Pflanzenschutzspritze und die daraus entstehenden Konsequenzen für den Aufbau des Gerätes und dessen Steuerung untersucht. Die Unterbringung der Spritzpumpe muss nicht mehr notwendigerweise an der Deichsel erfolgen, wodurch sich die technische Restmenge Spritzbrühe im Leitungssystem reduzieren lässt. Die verwendete Kreiselpumpe benötigt beim Betrieb mit einem Elektromotor kein Untersetzungsgetriebe und wird direkt angetrieben. Die Druckregelung erfolgt durch Variation der Pumpendrehzahl und ist einfacher umsetzbar als bei einem hydraulischen Antrieb der Kreiselpumpe.

In Kentucky/USA haben Luck et. al. (2010) den Applikationsfehler durch die Veränderungen der Geschwindigkeit des Spritzgestänges über dem Boden bei Kurvenfahrt von selbstfahrenden Pflanzenschutzgeräten untersucht. Anhand von aufgezeichneten Applikationskarten wurde festgestellt, dass die Schlagstruktur einen erheblichen Einfluss hat. Eine maximale Abweichung von 10 % vom Sollwert der Ausbringung wurde dabei auf 6,5 bis 23,8 % der untersuchten Flächen errechnet. Die Firma Herbert Dammann GmbH hat im Jahr 2013 eine Technik zur Lösung dieses Problems vorgestellt. Durch den automatischen Wechsel der Düsen und die Anpassung des Druckes während der Kurvenfahrt in Abhängigkeit von Lenkwinkel, Geschwindigkeit und Sollwert des Aufwandvolumens wird die Ausbringmenge an den Düsen entsprechend angepasst (profi, 2013).

2.3 Teilschlagspezifische Applikation

Die Notwendigkeit von Bekämpfungsmaßnahmen ist oft räumlich (teilschlagspezifisch) wie auch zeitlich sehr unterschiedlich (Steiner et al., 2008).

Durch den Einsatz des teilschlagspezifischen Pflanzenschutzes ergeben sich sowohl positive ökonomische als auch ökologische Effekte. Die in Zukunft zu erwartende Praxisreife einer Technik, die sensorbasiert eine unabhängige Applikation verschiedener Wirkstoffe auf Teilflächen ermöglicht, schafft auch eine gesellschaftliche Erwartung zum Einsatz dieser Technik. Der Anwender kann, neben dem Anreiz durch einen möglichen monetären Nutzen, auch von der Politik zum Einsatz einer praxisreifen Technik zur teilschlagspezifischen Applikation verpflichtet werden. Neben den Erkennungssystemen ist dazu auch eine Applikationstechnik zur unabhängigen, teilschlagspezifischen Ausbringung verschiedener Wirkstoffe erforderlich.

Grundsätzlich kann die teilschlagspezifische Applikation in Online- und Offlineverfahren unterteilt werden. Dabei ist die Online-Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Erkennungssystemen wesentlich praktikabler als absätziges Verfahren mit mehreren Arbeitsgängen (Abb. 2).

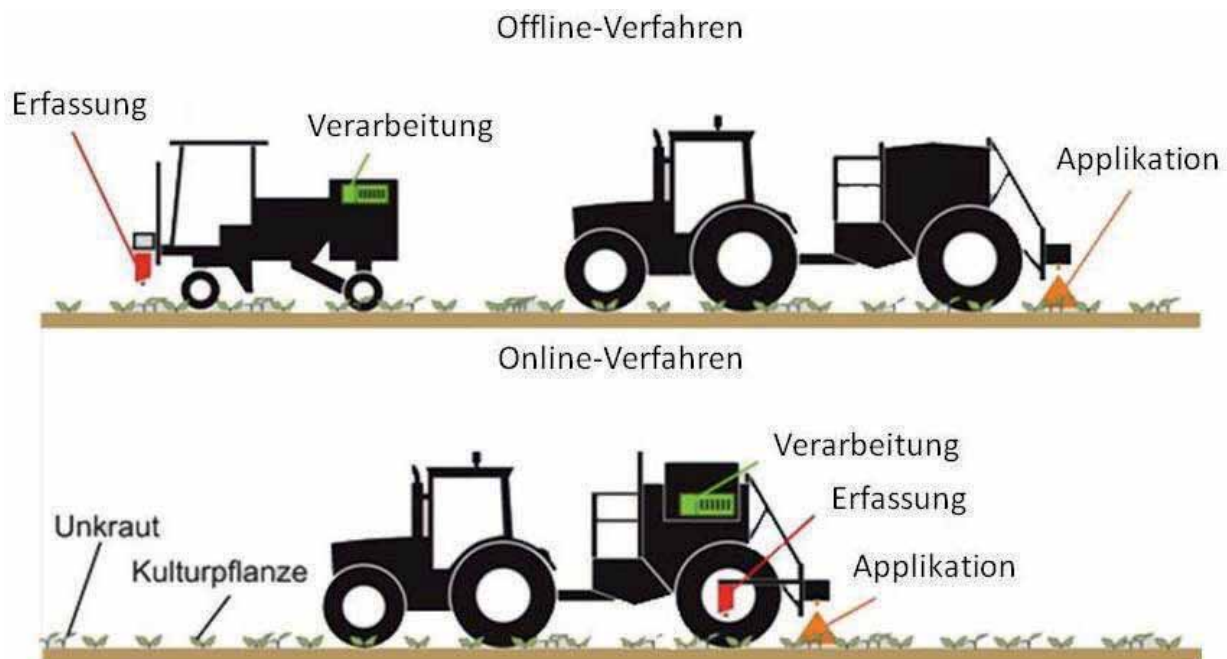


Abb. 2: Darstellung des On- und Offlineverfahrens in der Pflanzenschutzmittelapplikation (modifiziert nach Walgenbach und Dörpmund, 2011)

In der Vergangenheit sind verschiedene Arten von Erkennungssystemen entwickelt und untersucht worden, die unterschiedliche Grade der Praxisreife erreicht haben. Die sensorbasierte Düngung ist bereits in breiter praktischer Anwendung (Abb. 3). Für eine teilschlagspezifische Herbizidapplikation stehen grundsätzlich sowohl

optoelektronische als auch kamerabasierte Erkennungssysteme zur Verfügung (Nordmeyer, 2006). Die Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanzen bietet bisher nur die digitale Bildanalyse. Dabei werden zumeist CCD oder Videokameras eingesetzt, wobei die Verarbeitung der Aufnahmen durch eine Bildanalysesoftware erfolgt (Oebel et al., 2004). Weis et al. (2008) beschreiben ein Erkennungssystem, das mittels Bildanalyse Unkrautkarten zur Differenzierung von Unkräutern und Kulturpflanzen automatisch erstellt. Dazu werden Modelle zur Beschreibung der Auswirkungen des Unkrautbesatzes auf den Ertrag entwickelt und in Praxisversuchen angewendet. Ökonomische Schadschwellen werden abgeleitet und können für eine Herbizidapplikation mit einer auf Teilflächen steuerbaren Spritze umgesetzt werden. Die Firma Agri Con GmbH arbeitet daran, dieses Erkennungssystem mit einer Unterscheidung von monokotylen und dikotylen Unkrautarten sowie Nutzpflanzen zur Praxisreife zu führen.

Für eine teilschlagspezifische Ausbringung von Fungiziden stehen derzeit nur indirekte Bestandsmerkmale wie die Bestandsdichte zur Verfügung (Dammer et al., 2000).

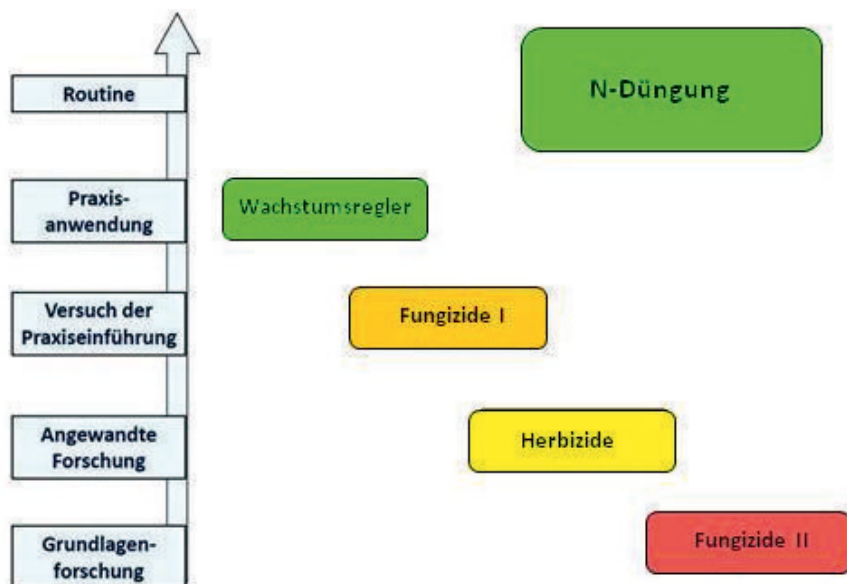


Abb. 3: Entwicklungs- und Verbreitungsstand der Online-Sensorik für Geräte zur Bestandsführung im konventionellen Feldbau (modifiziert nach Piotraschke, 2010)

Für den teilschlagspezifischen Pflanzenschutz werden Pflanzenschutzspritzen benötigt, die die Möglichkeit zur Variation verschiedener Wirkstoffe während der

Fahrt bieten. Dies kann entweder mit Mehrkammerspritzen oder Direkteinspeisungssystemen realisiert werden.

2.4 Mehrkammerspritze

Am Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn wurde gemeinsam mit der Firma Kverneland Group/RAU eine Mehrkammerspritze mit drei Kammern (Dreikammerspritze) entwickelt, um bei der Herbizidapplikation die Spritzbrühe während der Fahrt anhand von Unkrautverteilungskarten variieren zu können. Dabei wurden auf einem Trägerrahmen drei konventionelle Pflanzenschutzspritzen verbaut und die Spritzcomputer mit einer zentralen Steuereinheit verbunden. Die Dreikammerspritze bietet die Möglichkeit online mit Erkennungssystemen zu arbeiten, indem über die Teilbreitenabschaltungen der drei Düsenleitungen die unabhängige Applikation verschiedener Wirkstoffe ermöglicht wird. Die Befüllung mit Pflanzenschutzmitteln erfolgt über eine zentrale Einspülschleuse und die Ausbringung der Spritzbrühen aus verschiedenen Tanks kann auch über eine Leitung erfolgen, um die Reinigung zu vereinfachen (Gerhards et al., 2008). Ein Gerät mit zwei getrennten Flüssigkeitskreisläufen wurde von der Firma Dammann realisiert (Höhner und Kramer, 2012).

Nach Kluge (2011) kann die Dreikammerspritze die Anforderungen der landwirtschaftlichen Praxis an eine Teilflächenunkrautbekämpfung mit Online-Unkrauterkennerung insbesondere für Großbetriebe nicht erfüllen. Als Gründe hierfür gibt er an:

- Geringe Schlagkraft des Systems durch zu kleine Spritzbrühebehälter;
- Herbizidbedarf bzw. Spritzbrühemenge vor der Applikation nicht bekannt;
- Häufigeres Befüllen des Gerätes;
- Hohe Restmengen.

Das Mischen von Trägerflüssigkeit und Wasser mit Direkteinspeisungssystemen während der Applikation ermöglicht es, diese Anforderungen zu erfüllen.

2.5 Direkteinspeisungssysteme (DES)

Direkteinspeisungssysteme bieten die Möglichkeit die Zusammensetzung der Spritzbrühe unabhängig vom Aufwandvolumen der Trägerflüssigkeit zu verändern. Die ersten Ansätze zu dieser Technik liegen bereits mehr als vierzig Jahre zurück (Amsden, 1970). In der Folge wurden eine Reihe von zentralen Direkteinspeisungssystemen mit Einspeisung auf der Saug- und Druckseite der Trägerflüssigkeitspumpe angeboten, von denen sich jedoch bisher keines am Markt etablieren konnte. Ein Hersteller hat ein Verfahren mit einer zentralen Einspeisung von Stammlösungen entwickelt (Premix, Amazone, Osnabrück). Das System erlaubt einen Wechsel der Präparate und kann damit eine angepasste Längsverteilung realisieren. Nicht bekannt sind die Reaktionszeiten des Systems, bis die gewünschte Konzentration an der Düse anliegt.

Zentrale Direkteinspeisungssysteme für reine Pflanzenschutzmittel wurden in jüngerer Vergangenheit von den Herstellern Lechler GmbH, TeeJet Technologies und Raven Industries (Varioinject, Lechler GmbH, Metzingen; AddFlow, TeeJet Technologies, Wheaton/Illinois/USA; Sidekick, Raven Industries, Sioux Falls/South Dakota/USA) vorgestellt sowie in der Vergangenheit von MSR Dosiertechnik GmbH & Co. KG (Agroinject, Wölfersheim) und anderen. Zwei Systeme wurden von der Biologischen Bundesanstalt anerkannt (Agroinject, MSR Dosiertechnik GmbH & Co. KG, Wölfersheim; AddFlow, TeeJet Technologies, Wheaton/Illinois/USA).

Das weite Aufwandmengen- und Viskositätsspektrum der Pflanzenschutzmittel stellt eine Schwierigkeit bei der Umsetzung der Direkteinspeisung dar. Jedoch bestehen Möglichkeiten die Formulierungen der Pflanzenschutzmittel einheitlicher zu gestalten, um damit die Dosierung in Direkteinspeisungssystemen zu vereinfachen. Diese sind jedoch mit hohem finanziellen Aufwand verbunden (persönliche Kommunikation mit Brix, 2010). Daneben stellen die Verzögerungszeiten der Direkteinspeisungssysteme eine der größten Herausforderungen dar.

2.5.1 Aufbau von Direkteinspeisungssystemen

Direkteinspeisungssysteme können anhand der Einspeisungsorte in das Trägerflüssigkeitssystem unterschieden werden, die verschiedene Reaktionszeiten

verursachen, bis die gewünschte Konzentration der Spritzbrühe an den Düsen anliegt (Abb. 4).

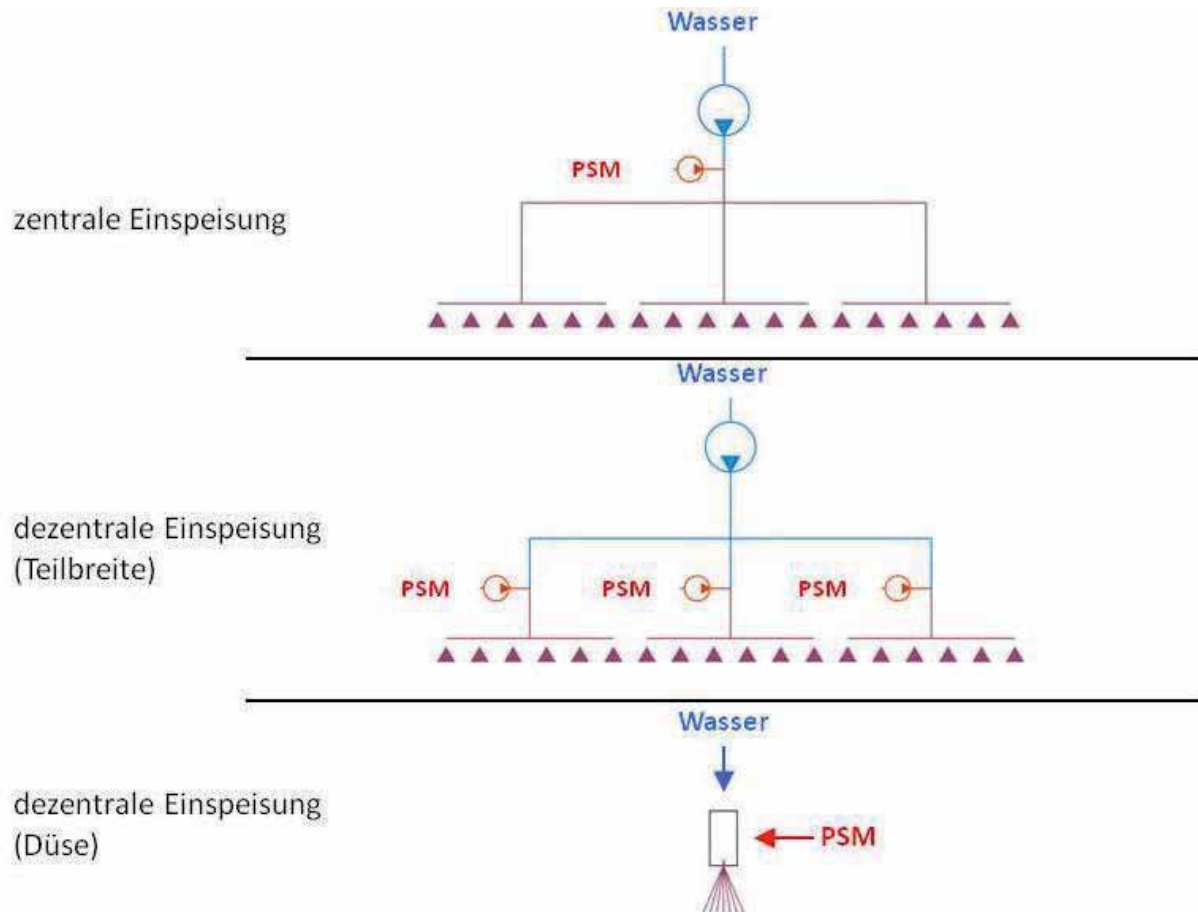


Abb. 4: Schema zum Aufbau von Direkteinspeisungssystemen mit verschiedenen Einspeisungsorten

Zentrale Direkteinspeisungssysteme speisen vor oder hinter der Pumpe für Trägerflüssigkeit ein und verursachen dabei Reaktionszeiten von 10 bis 40 s (Peisl und Estler, 1993; JKI, 2005).

Für eine echtzeitgesteuerte Applikation von Pflanzenschutzmitteln werden Systeme mit kurzer Reaktionszeit benötigt. Die Untersuchung von Hloben (2007) hat Reaktionszeiten der Einspeisung an einer Teilbreite von 2,75 bis 8,84 s hervorgebracht. Nachdem die Einspeisung gestartet wurde, legt das Applikationssystem bei einer Fahrgeschwindigkeit von $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ im Optimum 6,1 m Wegstrecke zurück, bis sich die gewünschte Konzentration eingestellt hat. Bei $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ entspräche dies bereits 7,6 m Wegstrecke. Die Direkteinspeisung an der Teilbreite ist damit nicht geeignet, um ein Erkennungssystem direkt am

Spritzgestänge anzubringen (Hloben, 2007). Die Einspeisung an der Düse lässt aufgrund der kurzen Reaktionszeit von 250 ms (Vondricka, 2008) die Kombination der Applikationstechnik mit einem Erkennungssystem direkt am Pflanzenschutzgerät zu.

2.5.2 Zentrale Direkteinspeisung zur teilschlagspezifischen Applikation

Eine weitere Möglichkeit zur teilschlagspezifischen Applikation, ist die Kombination von einem Behälter für Trägerflüssigkeit, mit mehreren hydraulischen Systemen zur Spritzbrüheapplikation, die mit zentralen Direkteinspeisungssystemen ausgestattet sind. Damit können die unter 2.3 genannten Nachteile der Mehrkammerspritze vermieden werden. Paice et al. (1995) haben eine derartige Pflanzenschutzspritze mit zwei Düsenrohren und zwei zentralen Direkteinspeisungssystemen aufgebaut, um verschiedene Herbizide unabhängig voneinander auszubringen. Im stationären Zustand wurde eine Abweichung von weniger als 5 % vom Sollwert mittels Spektralphotometrie gemessen, wobei die Reaktionszeit zur Erreichung der gewünschten Spritzbrühekonzentration an den Düsen 3-4 s betrug.

Bei diesen Systemen werden jedoch bei der gleichzeitigen Ausbringung mehrerer Pflanzenschutzmittel vergleichsweise hohe Spritzbrühemengen appliziert. Mögliche Auswirkungen auf die biologische Wirksamkeit der Pflanzenschutzmittel bei der teilschlagspezifischen Applikation müssen noch untersucht werden.

2.5.3 Dosiereinrichtung

Als Dosierungseinrichtung kommen unterschiedliche Pumpentypen oder Einspeisungsventile in Frage. Schlauchpumpen wurden von verschiedenen Herstellern zentraler DES verbaut. Mit diesem Pumpentyp kann nur ein geringer Druck erzeugt werden, weswegen auf der Saugseite der Pumpe für Trägerflüssigkeit eingespeist wird (Way et al., 1990). Durch die Trägerflüssigkeitspumpe wird eine ausreichende Durchmischung der Trägerflüssigkeit und des Pflanzenschutzmittels erreicht (Tompkins et al., 1990). Zur Erzeugung eines höheren Drucks zur Einspeisung auf der Druckseite der Trägerflüssigkeitspumpe, werden Kolbenpumpen eingesetzt (Lechler GmbH, 2008; TeeJet Technologies, 2010; Raven Industries, 2003). Zur Anpassung der Fördermengen an die Aufwandmenge des

Pflanzenschutzmittels wird die Anzahl der Pumpeneinheiten variiert (TeeJet Technologies, 2010).

Eine Veränderung der Scherrate führt bei nicht Newtonschen Flüssigkeiten zu einer Viskositätsänderung. Antuniassi und Miller (1998) haben beispielsweise mit einer Kolbenpumpe nachgewiesen, dass die Viskosität einer Testflüssigkeit nach dem Britischen Standard 6356 von 1996 vier Stunden nach dem Pumpvorgang noch nicht wieder dem Anfangswert entsprach. Bei der Nutzung einer Pumpe als Druckquelle und einer Dosierung mittels Ventilen kann das Viskositätsverhalten von Pflanzenschutzmitteln die Dosiergenauigkeit beeinflussen. In der Lackierbranche sind die Anforderungen zur Förderungen von Farben denen in der Pflanzenschutztechnik ähnlich. Dort werden deshalb bei scherempfindlichen Lacken Druckbehälter anstatt von Pumpen als Druckquelle genutzt.

Bennet und Brown (1997) haben eine Teilbreite mit 6 Düsen und je einem Linearaktuator als Dosierungseinheit aufgebaut. Ein Schrittmotor diente zur Mengensteuerung. Das Pflanzenschutzmittel wurde mittels einer Blende in die Mitte des Trägerflüssigkeitsstroms eingespeist und danach mit einem statischen Mischer homogenisiert. Die Zeit, bis 95 % der gewünschten Konzentration bei einem Durchfluss von $0,7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ erreicht wurden, betrug 0,9 s. Ein Küvettenprüfstand diente zur gravimetrischen Untersuchung der ausgebrachten Mengen an Spritzbrühe, während die Menge an Simulanz mit einem Photometer ermittelt wurde. Der Linearaktuator benötigte beim Taktwechsel 0,68 bis 0,73 s, bis 95 % der Konzentration an eingespeister Simulanz wieder erreicht wurden. Der Variationskoeffizient der eingespeisten Menge bei Dauerbetrieb betrug 1,42 %. Zwischen den Ausbringmengen der einzelnen Düsen wurde ein Variationskoeffizient von 0,68 % ermittelt.

Downey et al. (2006) haben ein Ventil zur Schaltung des PSM-Volumenstroms genutzt, das mit einer Blende zur Einstellung der dosierten Menge versehen ist. Bei dem System zur gezielten Herbizidbehandlung von Fahrbahnbanquetten mit einem Direkteinspeisungssystem wird zur Förderung des Pflanzenschutzmittels ein Druckbehälter eingesetzt. Der Abstand zwischen Erkennungs- und Applikationssystem betrug 4 m. Die Untersuchungen ergaben, dass das System für Spotbehandlungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ mit einem Zeitverzug zwischen dem Signal für den Einspeisungsbeginn und der vollen

Konzentration an der Düse von 20 bis 30 ms reagiert, was einer Strecke von 1,66 m entspricht.

Giles und Brock (2008) haben die Eignung von passiven Zweistoffdüsen zur Direkteinspeisung an der Düse untersucht. Bei kommerziellen Injektordüsen wurden anstatt Luft verschiedene Simulanzen durch den Venturi-Effekt angesaugt. Als Trägerflüssigkeit wurde entionisiertes Wasser genutzt und der verwendeten Simulanz jeweils Salz zugesetzt, um deren Konzentration nach der Einspeisung zu bestimmen. Der erzeugte Unterdruck war ausreichend um eine Konzentration von 30 % und mehr der eingespeisten Simulanz zu erreichen. Dabei konnten mit Hilfe von zusätzlichen Blenden eine Konzentration von 3-18 % eingestellt und gehalten werden. Bei Arbeitsdrücken von 200-400 kPa erfolgte die Verteilung und Mischung gleichmäßig im Sprühstrahl. Der mittlere Volumendurchmesser der erzeugten Tropfen veränderte sich durch die Flüssigkeitseinspeisung. Die Tropfen wurden tendenziell kleiner und deren Größenverteilung bimodaler.

Rockwell und Ayers (1996) haben eine Pflanzenschutzspritze mit Direkteinspeisung an der Düse aufgebaut. Es wurde ein zentrales Direkteinspeisungssystem der Firma Raven Industries mit einer verstellbaren Kolbenpumpe eingesetzt, um das Pflanzenschutzmittel zu den Düsen zu fördern. Dort wurde durch ein Rückschlagventil und eine Blende in den Trägerflüssigkeitsstrom eingespeist. Die Verzögerungszeit, bis an der Düse die Einspeisung begann, betrug 2,5 s, und die Reaktionszeit bis der Sollwert der Konzentration erreicht wurde 3,8 s. Es wurde festgestellt, dass die Verteilung der benutzten Pflanzenschutzmittlersatzstoffe auf der Zielfläche sich nicht von der Ausbringung mit herkömmlichen Spritzverfahren unterschied. Das Ergebnis ist jedoch auf Applikation in Düsenverbänden beschränkt. Eine Spotapplikation mit Einzeldüsensteuerung ist gesondert zu betrachten.

Vondricka (2008) hat Ventile, sogenannte RRV[®] (Rapid Reaction Valve, GSR-Ventiltechnik, Vlotho-Exter) zur Dosierung der Pflanzenschutzmittel an der Einzeldüse eingesetzt. Mit diesen Ventilen konnte eine Einspeisungseinheit aufgebaut und der Mischvorgang untersucht werden (Vondricka, 2008). Die Einspeisungseinheit und die Einspeisungsventile (RRV[®]) wurden im Rahmen dieser Arbeit genutzt und weiterentwickelt. Dabei wurde die Erkenntnis gewonnen, dass eine Messung und Regelung des Durchflusses am Einspeisungsventil für einen

sicheren und zuverlässigen Dosierbetrieb auf einer Pflanzenschutzspritze mit Direkteinspeisung von reinen Pflanzenschutzmitteln an der Düse notwendig ist.

2.5.4 Durchflussmessung

Bereits Frost (1990) hat für Direkteinspeisungssysteme an der Düse die Notwendigkeit der Messung und Regelung des PSM-Durchflusses an der Einzeldüse erkannt. Seiner Meinung nach ist die Messung des Gesamtflusses nicht ausreichend, da nicht gewährleistet werden kann, dass die Teilmengen gleichmäßig verteilt sind und eine Blockade des PSM-Durchflusses zu einer Düse schwierig zu erkennen ist.

Bei einer Messung der Konzentration des Pflanzenschutzmittels hinter dem Einspeisungspunkt in der gemischten Spritzbrühe muss auch die Menge der an der Düse ausgebrachten Trägerflüssigkeit berücksichtigt werden.

Durch eine Kombination des Einspeisungsgerätes mit einem Durchflussmesser und einem Regler kann sichergestellt werden, dass der Sollwert der PSM-Konzentration erreicht wird und Fehlapplikationen verhindert werden. Die Sicherheit vor unkontrolliertem Austreten von Pflanzenschutzmitteln im System steigt.

3 Zielsetzung

Die fortschreitende Entwicklung von Systemen zur Unkrauterkenennung und zur Erfassung des Befalls von Schaderregern erfordert eine Technik, die die unabhängige, teilschlagspezifische Applikation verschiedener Pflanzenschutzmittel erlaubt. Eine aufgegliederte Pflanzenschutzmaßnahme mit vorgelagerter Ermittlung des Spritzbrühebedarfs (Offline-Verfahren) ist nicht praxistauglich, da mit dem zusätzlichen Arbeitsgang hoher Aufwand verbunden ist, und die Wirksamkeit der PSM-Maßnahmen in großem Maß von der zeitgerechten Durchführung abhängt.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit besteht darin, eine Pflanzenschutzspritze mit einer Direkteinspeisungseinheit an jeder Düse aufzubauen, die im Online-Verfahren eine flexible Variation der ausgebrachten Wirkstoffe mit geringen Restmengen an Spritzbrühe erlaubt. Diese dient als Entwicklungsprüfstand und Versuchsträger. Aufbauend auf den Arbeiten von Vondricka (2008) und Hloben (2007) werden dabei die technischen Anforderungen des vollständigen Systems einer Pflanzenschutzspritze untersucht. Dies beinhaltet:

- Die Untersuchung verschiedener Druckquellen für Pflanzenschutzmittel. Eine geeignete Druckquelle soll ausgewählt und auf den Versuchsträger aufgebaut werden.
- Den Umbau des vorhandenen Leitungssystems für Spritzbrühe zum Trägerflüssigkeitssystem mit Einzeldüsenstockschtung.
- Den Aufbau und die Untersuchung des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel einschließlich der Regelung des Differenzdrucks zwischen den beiden hydraulischen Systemen. Dies schließt die Dämpfung der in diesem System auftretenden Druckstöße mit ein.
- Den Aufbau der Mess- und Steuerungshardware einschließlich der Spannungsversorgung für die Sensorik und Aktorik zur Direkteinspeisung sowie der erforderlichen Software.
- Die Untersuchung und Optimierung des Einspeisungsventils. Neben der Analyse von Dosierverhalten und -genauigkeit soll die Erwärmung des

Mediums im RRV[®] gemessen sowie die elektrische Leistungsaufnahme verringert werden.

- Die Untersuchung der Durchflussmessung am einzelnen Einspeisungsventil.

Damit soll Grundlagenwissen über ein Direkteinspeisungssystem gewonnen werden, das eine größtmögliche Präzision und Flexibilität bei der Applikation verschiedener Pflanzenschutzmittel ermöglicht. Die Reinigung des aufgebauten Direkteinspeisungssystems wurde in einer separaten Arbeit behandelt (Dörpmund, 2012).

4 Anforderungen an die Genauigkeit der Ausbringung von DES an der Düse

Die Direkteinspeisung findet bisher bei den Richtlinien für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten in Deutschland keine Berücksichtigung vom Gesetzgeber. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Ausbringung betreffen bei Pflanzenschutzspritzen nach dem Stand der Technik neben dem Fehler der Messeinrichtungen und der Spritzdüsen, die Konzentration der Spritzbrühe und das ausgebrachte Aufwandvolumen (JKI, 2002):

- *Eine maximal zulässige Konzentrationsabweichungen der Spritzbrühe im Tank von 15 %.*
- *Während des Spritz-/ Sprühvorgangs und unabhängig vom Füllstand im Behälter darf das gemessene Aufwandvolumen in $l \cdot ha^{-1}$ um nicht mehr als 10 % vom dem aus 5 Messwerten errechneten Mittelwert abweichen.*
- *Bei wiederholter Einstellung des gleichen Aufwandvolumens ($l \cdot ha^{-1}$) darf der aus 7 Messungen berechnete Variationskoeffizient nicht mehr als 3 % betragen.*
- *7 Sekunden nach der Änderung eines Betriebszustands darf das gemessene Aufwandvolumen nicht mehr als +/- 10 % vom mittleren Aufwandvolumen im neuen Betriebszustand abweichen. Änderungen des Betriebszustands sind zum Beispiel das Ausschalten von Düsen, Geschwindigkeitsänderungen und Teilbreitenschaltungen.*

Dies sind einige der Richtwerte, die auch zur Anerkennung des Versuchsträgers vor dem Umbau dienen. Zur Bewertung der Qualität der Direkteinspeisung an der Düse ist jedoch neben den genannten Kriterien, in dem Fall für die Trägerflüssigkeit, vor allem die Einhaltung des Sollwerts der an jeder Düse eingespeisten Menge an Pflanzenschutzmittel wichtig. Die maximale Abweichung dieser PSM-Menge wird jedoch bisher vom Gesetzgeber nicht festgeschrieben. Deswegen wurde selbst eine maximale Abweichung vom Sollwert der Ausbringmenge an Pflanzenschutzmittel von 10 % an der Einzeldüse als ausreichend genau definiert. Dies geschah in Abstimmung mit dem Institut für Anwendungstechnik des Julius Kühn-Institut in Braunschweig.

5 Bauteile und Untersuchungsmethoden

5.1 Aufbau des Versuchsträgers

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Pflanzenschutzspritze (Ikarus A38, Kverneland Group, Nieuw-Vennep/Niederlande) umgebaut. Die elektrische Versorgungs- und Wandlereinheit sowie die Spannungsversorgung für die aufgebauten Sensoren und Aktoren wurden jeweils in Schaltkästen untergebracht, die an den Seiten des Versuchsträgers integriert wurden (Abb. 5). Die Anbringung der Behälter für die Pflanzenschutzmittel erfolgte an zentraler Position des Spritzgestänges um kurze Leitungen und damit geringe technische Restmengen gewährleisten zu können.



Abb. 5: Gesamtansicht des Versuchsträgers mit Schaltkasten und PSM-Behälter

5.1.1 Spannungsversorgung

Die zentrale Spannungsversorgung wurde in einem Schaltschrank auf der rechten Seite des Versuchsträgers installiert (Abb. 6). Je ein Schaltnetzteil mit einer dazu entwickelten Endstörplatine diente zur Spannungsversorgung der Einspeisungsventile einer Teilbreite. Ein Kabelbaum wurde in das Spritzgestänge eingezogen und sieben Verteilerkästen zum Anschluss der dort verbauten Sensoren und Aktoren angebracht. Ein Kompressor und die Versorgungs- und Wandlereinheit wurden ebenfalls von der zugehörigen Verteilung aus versorgt. Die Sensoren und Aktoren wurden mit separaten Netzteilen betrieben.

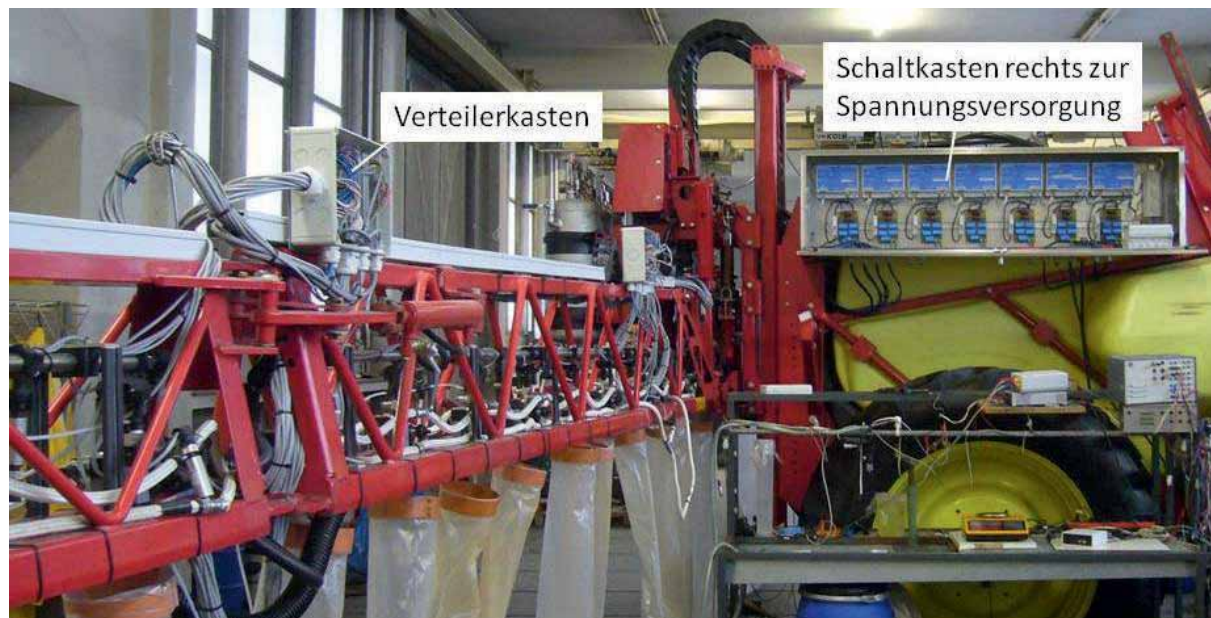


Abb. 6: Detailansicht der Spannungsversorgung auf dem Versuchsträger

Der Versuchsträger ist ursprünglich zum Betrieb mit einem Traktor mit einer Kleinspannungsquelle vorgesehen. Zur Gewährleistung der elektrischen Versorgung der aufgebauten Einrichtungen kann im Feld auch ein Stromaggregat (400 V/ 50 Hz) über eine zentrale Zuleitung angeschlossen werden.

5.1.2 Hard- und Software

Die Steuerung des aufgebauten Direkteinspeisungssystem erfolgte mit einem Prozessrechner (CompactRio, National Instruments, Austin/Texas/USA) und der zugehörigen Software (LabView, Version 8.6, National Instruments, Austin/Texas/USA). Der vorhandene Steuerrechner der Pflanzenschutzspritze blieb erhalten, um die Steuerung und Druckregelung des Trägerflüssigkeitssystems zu übernehmen. Die Signale der Teilbreitenschaltung dienen bei der Steuerung der Direkteinspeisung als Sicherheitsinformation. Nach deren Empfang wurde die Einspeisung gestartet. Die Messaufgaben übernahm ebenfalls der Prozessrechner. Bei hohen Messfrequenzen, die zur Messung der Druckpulsation und der Leistungsaufnahme erforderlich waren, wurden die Messdaten in den Speicher des Prozessrechners geschrieben und nach Abschluss der Messung auf einen PC übertragen.

5.1.3 Trägerflüssigkeitssystem

Die Düsenrohre wurden höher gelegt, um Raum für den Einbau der Direkteinspeisungseinheiten im Spritzgestänge zu schaffen. Zudem wurden sie verbunden und die Teilbreitenschaltventile durch eine Düsenträgerschaltung ersetzt. Zusätzliche Schlauchleitungen im Spritzgestänge dienen dazu, zusätzliches Flüssigkeitsvolumen zuzuführen und Druckverluste zu vermeiden (Abb. 7).

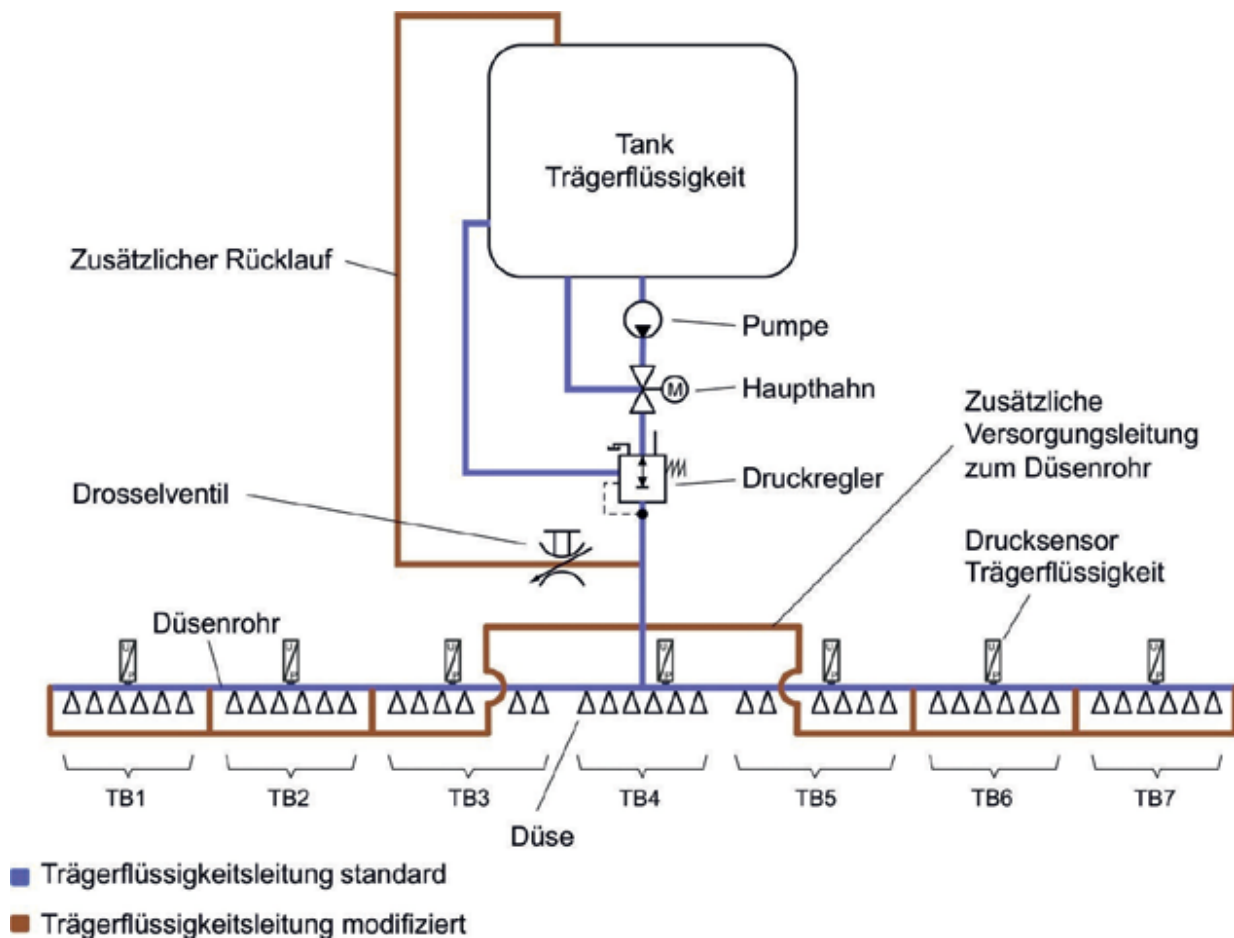


Abb. 7: Schema des modifizierten Trägerflüssigkeitssystems

Es wurden elektropneumatische Düsenstockschaftventile (Direct Control, Altek GmbH, Rottenburg) verbaut, die nach Vondricka (2009) ein ausreichend schnelles Schalten der Trägerflüssigkeit für eine Direkteinspeisung an der Düse ermöglichen. Um das softwarebedingte Schließen des Haupthahns beim Abschalten aller Teilbreiten und einen damit verbundenen Druckabfall im Düsenrohr zu vermeiden, wurde ein Rücklauf von der Hauptleitung zum Trägerflüssigkeitstank mit einer einstellbaren Drossel verbaut, und in der Steuersoftware zwei zusätzliche Teilbreiten

simuliert. Die Drossel wurde auf den Ausstoß von zwei Teilbreiten des jeweils verwendeten Düsentyps eingestellt.

5.2 Druckquelle für Pflanzenschutzmittel

Der hydraulische Differenzdruck zwischen den Systemen für Trägerflüssigkeit und Pflanzenschutzmittel soll bei den wechselnden Volumina, die zu der unterschiedlichen Anzahl geöffneter Einspeisungsventile gefördert wird, konstant gehalten werden. Das eingespeiste Volumen der RRV[®] wird durch deren Öffnung gesteuert. Für eine exakte Dosierung ist daher die Einhaltung eines konstanten Differenzdrucks erforderlich. Zu diesem Zweck wurden eine geregelte und eine unregelte Pumpe auf ihre Eignung als Druckquelle im PSM-System untersucht (Abb. 8).

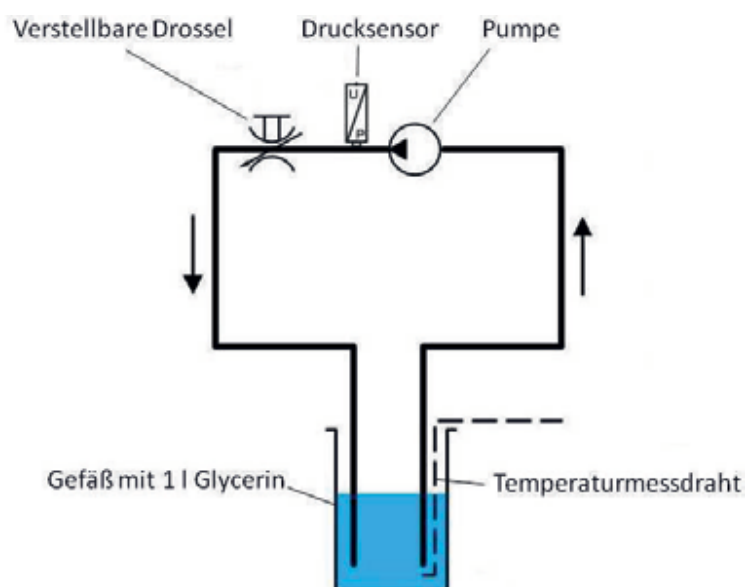


Abb. 8: Schema des Aufbaus zur Untersuchung von PSM-Pumpen

Bei unregulierten Pumpen ist ein zusätzlicher Druckregler erforderlich, der die nicht benötigte Fördermenge mittels eines Rücklaufs in die PSM-Behälter fördert. Dazu wurde eine unregelte, zapfwellenbetriebene Membranpumpe (AR 202, Annovi reverberi, Modena/Italien) bei Nenndrehzahl betrieben. Mittels einer verstellbaren Drossel wurde dabei ein Druck von 1500 kPa am Pumpenausgang eingestellt. 8,96 l Glycerin wurden bei einer Temperatur von 23°C gefördert.

Als geregelte Pumpe kam eine druckluftbetriebene Kolbenpumpe (CUB 4:400, VR Coatings, Pune/Indien) zum Einsatz. Diese Pumpe wurde für Lackieranwendungen

entwickelt und arbeitet mit einer pneumohydraulischen Übersetzung von 1:4, wobei ein Kolbenhub ein Volumen von 200 ml Flüssigkeit fördert. Der anliegende Luftdruck bleibt konstant und das Fördervolumen der Pumpe soll sich der wechselnden Abnahmemenge anpassen. Die unterschiedlichen Abnahmemengen der Einspeisungsventile wurden ebenfalls mit einer verstellbaren Drossel simuliert.

Ein Druckminderer (DO6F, Honeywell, Morristown/New Jersey/USA) wurde auf der Druckseite der geregelten Pumpe angebaut, um dessen Dämpfungseigenschaften auf die Druckpulsation beim Taktwechsel zu untersuchen. Dieser reduzierte den Druck von 1500 kPa auf 500 kPa.

Da die ersten Untersuchungen des Einspeisungsventils ventilbedingte Druckpulse im hydraulischen System erwarten ließen, wurden zur Gewährleistung einer pulsationsfreien Druckerzeugung am Versuchsträger Druckbehälter (Abb. 9) eingesetzt. Zudem eröffnete sich damit die Möglichkeit der Homogenisierung der Spülflüssigkeit vor der Ausbringung.

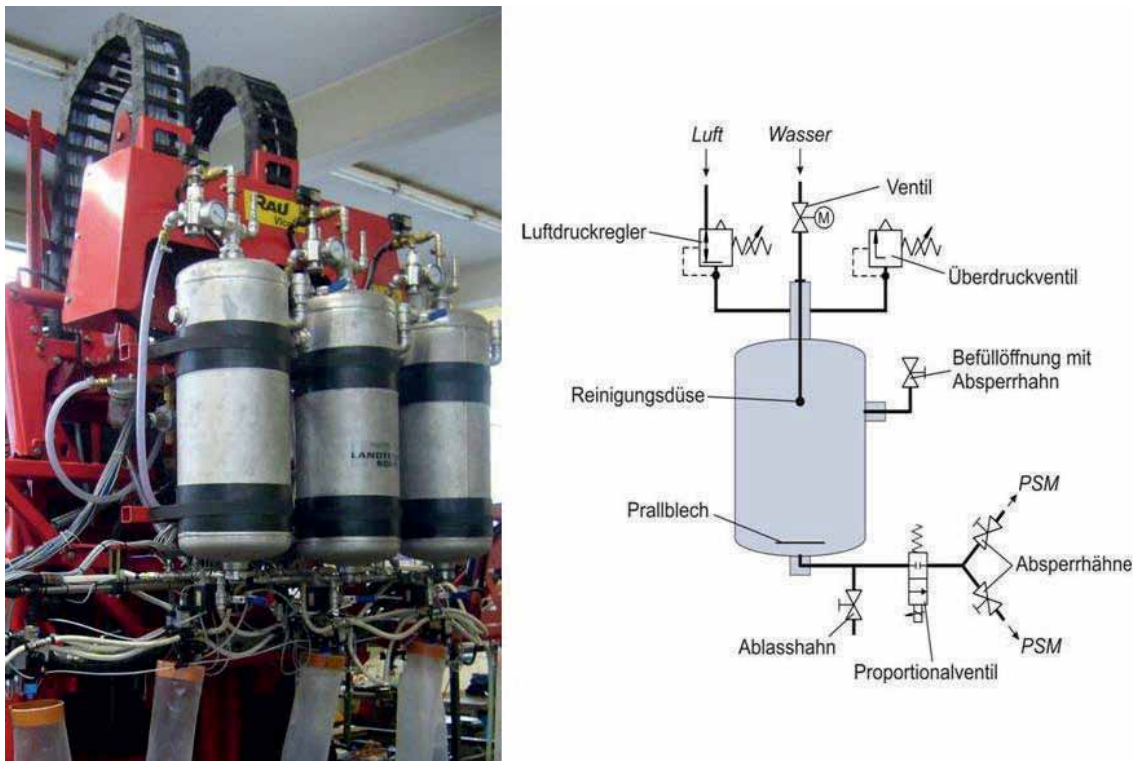


Abb. 9: Druckbehälter für Pflanzenschutzmittel, links Foto des Versuchsträgers, rechts schematischer Aufbau

Die Befüllung des Behälters erfolgte über eine seitliche Befüllöffnung. Der Druck im Behälter wurde über den Luftdruckregler konstant eingestellt. Ein Überdruckventil

sicherte das System ab. Ein Proportionalventil (2835, Bürkert, Ingelfingen) als Flüssigkeitsdruckminderer auf der Unterseite des Behälters diente zur Regelung des Differenzdrucks zwischen den hydraulischen Systemen für Trägerflüssigkeit und Pflanzenschutzmittel. Am Boden der Druckbehälter befindet sich eine Prallplatte, um den Flüssigkeitsstrahl beim Zurückdrücken der Pflanzenschutzmittel in den Behälter abzulenken. Die Leitungen zu den Gestängeseiten lassen sich mit Absperrhähnen blockieren. Eine rotierende Reinigungsdüse ist zur Reinigung des Behälters oberhalb der Befüllöffnung angebracht worden.

5.2.1 Druckmessung

Auf jeder Teilbreite des Trägerflüssigkeitssystems wurde ein Drucksensor (CTE 8016 GYO, Sensortechnics, Puchheim) verbaut. Dazu wurden Düsenhalter und Düsenkappen mit Innengewinde am Düsenrohr angebracht.

In den Pflanzenschutzmittelleitungen wurden auf jeder Teilbreite Drucksensoren eingebaut. Zwei Systeme wurden mit Sensoren für einen Messbereich von 0-1600 kPa (CTE 8016 GYO, Sensortechnics, Puchheim) ausgestattet und eines mit Sensoren für 0-8000 kPa (CTE 8080 GYO, Sensortechnics, Puchheim). Die Sensoren wurden zwischen den Pressfittingen (Abb. 11) und den Einspeisungsventilen in einem zusätzlichen Adapter eingeschraubt.

5.3 Leitungssysteme für Pflanzenschutzmittel

Eine Schwierigkeit beim Aufbau des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel ist es einen Kompromiss zu finden zwischen der technischen Restmenge Pflanzenschutzmittel im Leitungssystem, die nicht ausgebracht werden kann, und den dort auftretenden strömungsbedingten Druckverlusten. Dabei soll eine Beständigkeit der Leitungsmaterialien gegen Pflanzenschutzmittel gegeben sein. Gleichzeitig muss das Leitungssystem so aufgebaut werden, dass die Rückförderung der Pflanzenschutzmittel möglich ist. Toträume sollten vermieden werden, um die Reinigung des Leitungssystems zu vereinfachen. Um die Länge des Leitungssystems einzuschränken, wurden die PSM-Behälter aus Edelstahl (Form T, 40 l, WNr. 1.4571, Kleusberg, Niederfischbach) direkt am Spritzgestänge angebracht (Abb. 10).

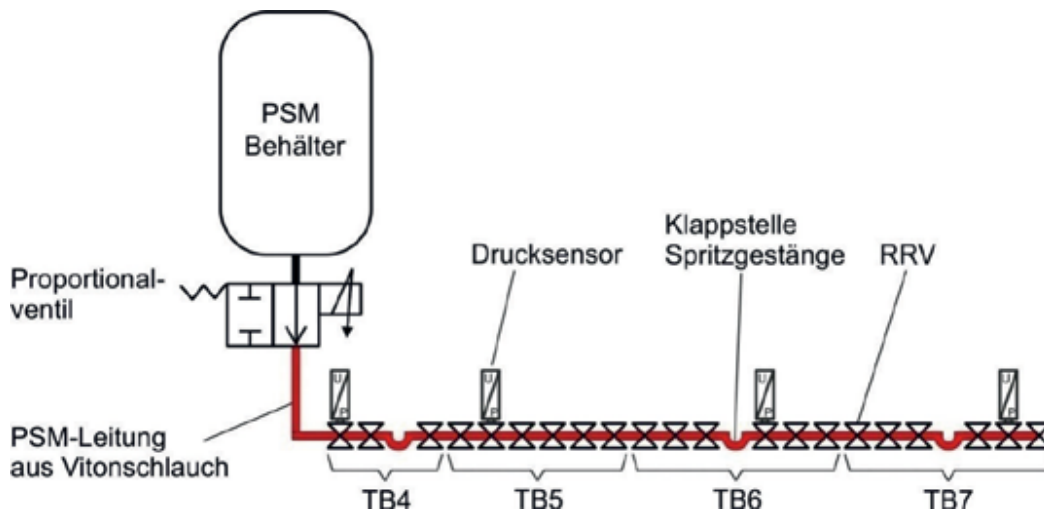


Abb. 10: Schema des PSM-Leitungssystems aus Vitonschlauch in der rechten Hälfte des Spritzgestänges

Zur Festlegung des Rohrleitungsquerschnitts wurde der auf Prandtl zurückgehende Druckverlust an den einzelnen Düsenpositionen in einem geraden Rohr gemäß Matthies und Renius (2011) bei einer inkompressiblen, stationären, isothermen Strömung berechnet:

$$\Delta P = 100 \cdot \lambda_R \cdot \frac{l_l}{d} \cdot \frac{\rho_F \cdot v_s^2}{2} \quad (2)$$

mit:

ΔP = Druckverlust, kPa

l_l = Länge des Leitungsabschnitts, m

d = Innendurchmesser des Rohres, m

ρ_F = Dichte des Fluids, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

v_s = auf d bezogene, mittlere Strömungsgeschwindigkeit, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Bei dem Faktor λ_R handelt es sich um den Rohrwidestandsbeiwert, der eine Funktion der Reynolds'schen Zahl Re ist.

$$\lambda_R = f(Re) \quad (3)$$

Nach Reynolds (1883) ist:

$$Re = \frac{v_s \cdot d \cdot \rho_F}{1000 \cdot \eta} \quad (4)$$

Mit η als dynamische Viskosität, in mPa·s . Dabei wird zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden.

Anhand dessen wurde ein Leitungsquerschnitt von 10 mm festgelegt. Der Rohrwidestandsbeiwert ändert sich jedoch in Abhängigkeit von der Art des Leitungssystems und der Viskosität, die beim Strömen von Fluiden maßgeblich den Druckverlust bestimmt. Daher führt die Auslegung des Leitungssystems für hochviskose Pflanzenschutzmittel zu entsprechend hohen technischen Restmengen.

Eine Einschränkung der Viskositätsspanne auf wasserähnliche Fließeigenschaften lässt eine deutliche Reduktion des Leitungsquerschnitts und damit auch der technischen Restmengen zu. Eine Reduzierung der Viskosität kann auch durch eine Vormischung der Pflanzenschutzmittel mit Wasser erreicht werden. Womit zukünftig eine Möglichkeit zur Reduzierung der Leitungsquerschnitte und damit eine Verringerung der technischen Restmengen gegeben ist. Die verwendeten Dosierventile könnten damit ebenfalls für eine geringere Viskositätsspanne ausgelegt werden. Allerdings wird die Formulierung des Pflanzenschutzmittels damit verändert und eventuell die Lagerstabilität beeinflusst.

Das erste Leitungssystem wurde aus Edelstahlrohr mit Abzweigungen aus Teflonschlauch aufgebaut. Bei dem Einsatz dieser Materialien konnten sich allerdings mechanische Schwingungen über das Leitungssystem fortpflanzen. Aufgrund der Ergebnisse der Pulsationsmessung an der Teilbreite wurden daraufhin Schlauchstücke (LEZ-Vitglas 70, $d = 0,010$ m, Lézaud, Marpingen), die mit den Einspeisungsventilen durch Adapterstücke (Abb.11) verbunden wurden, zum Leitungssystem aufgebaut. Der Schlauch wurde mittels einer Hülse mit dem Adapter (Abb. 11) verpresst.

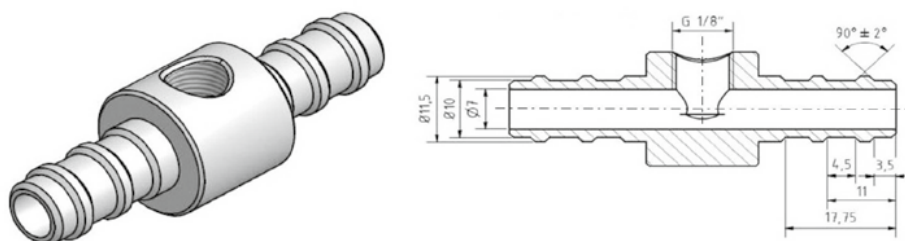


Abb. 11: Adapter zur Anbringung der Einspeisungsventile am Schlauch

Der Hersteller gibt für diesen Schlauch einen Maximaldruck von 1000 kPa an, nennt aber den Anschluss ans Fitting als Schwachstelle, das den Druckbereich entsprechend einschränkt. Eine feste Verbindung von Mantel und Schlauch mit dem Fitting ermöglicht höhere Drücke.

5.3.1 Pulsationsmessung an der Teilbreite

Verschiedene Leitungsmaterialien wurden an einer Teilbreite des PSM-Systems auf ihre Dämpfungseigenschaften untersucht. Untersuchungsgegenstand waren Edelstahlrohr und verschiedene ummantelte Schläuche mit 10 mm Innendurchmesser. Die Druckpulsation wurde dabei mit einem Drucksensor (4045 A100, Kistler, Winterthur/Schweiz) bei einer Messfrequenz von 20 kHz gemessen. Zunächst wurde der Drucksensor an den Anfang der Teilbreite gesetzt und eine unterschiedliche Anzahl an angeschlossenen Einspeisungsventilen betrieben (Abb.12). Der Ausstoß des zweiten Einspeisungsventils wurde dabei gravimetrisch bestimmt. Die RRV[®] wurden mit einer 100 Hz Öffnungsfrequenz betrieben und Wasser mit verschiedenen Öffnungsanteilen bei 600 kPa dosiert. Die Standardabweichung des Drucks wurde zur Beschreibung der Pulsation genutzt. Bei tropfbaren Fluiden ist nach Sigloch (2009) die Kompressibilität so gering, dass sie in der Regel vernachlässigt werden kann.

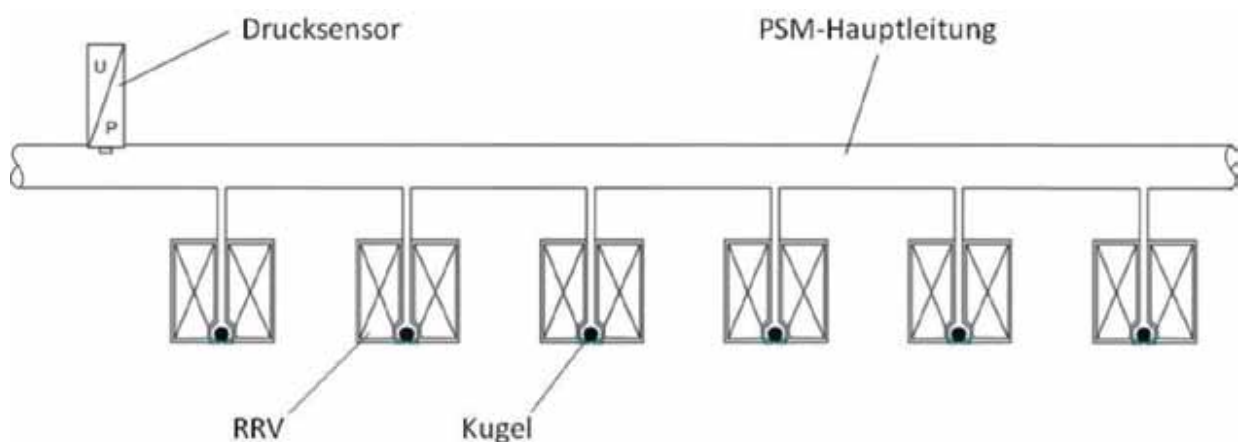


Abb. 12: Schema des Aufbaus zur Pulsationsmessung an einer Teilbreite der PSM-Leitung

Zur Messung der gegenseitigen Beeinflussung der Einspeisungsventile wurde die Sensorposition an deren Anschlussfittings verlegt. So konnte die Veränderung der

Druckpulsation direkt am RRV[®] bei Betrieb unterschiedlicher Anzahl von Einspeisungsventilen gemessen werden.

5.3.2 Pulsationsmessung im gesamten Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel

Im Rahmen der Untersuchung des gesamten Leitungssystems stellte sich heraus, dass die dämpfenden Eigenschaften des Schlauchs nicht ausreichen, um den Einfluss der Schwingungen auf die Dosiergenauigkeit des RRV[®]-Verbands auszuschließen. Als Ansatzstelle zur Dämpfung wurde das Einspeisungsventil gewählt, da eine wesentliche Ursache für die Schwingungsproblematik in der pulsdauermodulierten Ansteuerung der RRV[®] und der daraus resultierenden Überlagerung von Druckwellen vermutet wurde. Zudem kann ein größerer Abstand eines Dämpfers von der Schwingungsquelle nach Matthies und Renius (2011) unerwünschte Dämpfungseinbrüche verursachen. Das von Seibold (2011) beschriebene Druckspeicherverhalten des Vitonschlauchs beeinflusst ebenfalls die Schwingungen. Ein Zusammenziehen und Aufpumpen des Schlauchs konnte während des Betriebs beobachtet werden.

Um dieses abzustellen, wurde der flexible Schlauch wieder gegen ein Edelstahlrohr ($d = 0,010 \text{ m}$) getauscht, an dem jedoch jeweils eine 70 mm lange Stichleitung zu den Einspeisungsventilen aus dem zuvor verwendeten glasfaserummantelten Vitonschlauch angebracht wurde. Im Anschlussfitting an das Edelstahlrohr wurde dann eine Drossel ($d_D = 0,002 \text{ m}$) zur Pulsationsdämpfung eingebracht (Abb. 13).

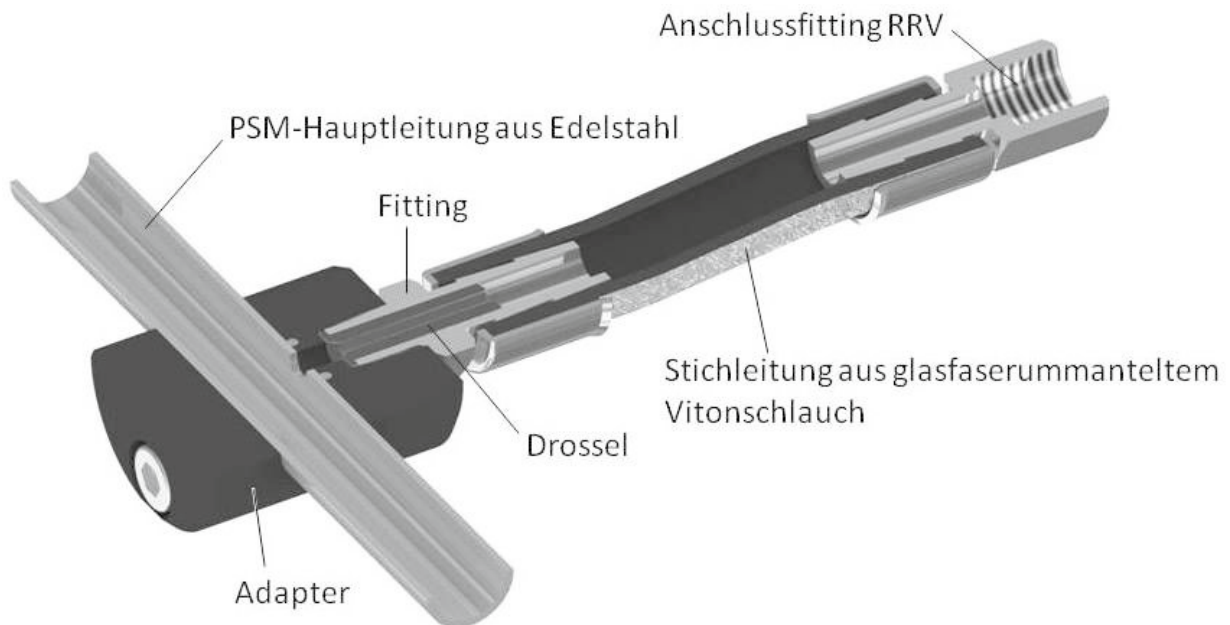


Abb. 13: Aufbau des PSM-Leitungssystems mit Drossel und Stichleitung zum RRV®

Zur Erfassung des Drucks im PSM-Leitungssystem ohne den Einfluss der durch die Einspeisungsventile bedingten Druckpulsation wurde ein Drucksensor direkt hinter dem Druckregler in die Hauptleitung eingesetzt (Abb. 13).

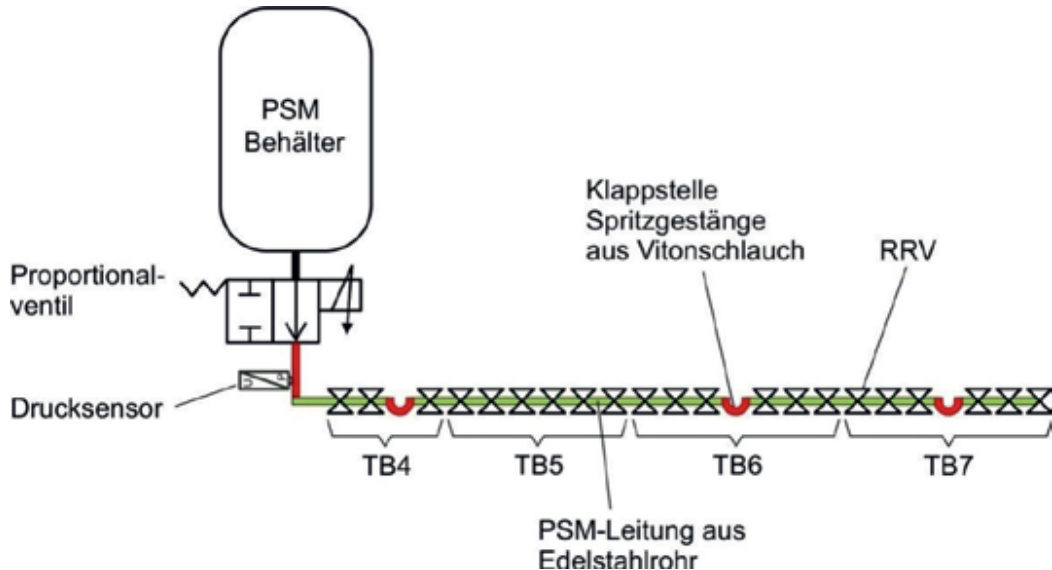


Abb. 14: Schema des PSM-Leitungssystems aus Edelstahlrohr mit einem Drucksensor

Die Druckpulsation wurde sowohl mit Differenzdruckregelung als auch mit vollständig geöffnetem Druckregelventil untersucht, um den Einfluss der Regelung auf die Schwingungen auszuschließen und mit dem Druckbehälter ein offenes Leitungsende

zu erzeugen. Die Versuche zur Pulsationsminderung wurden wegen der einfachen Umsetzbarkeit mit Wasser als Versuchsmedium durchgeführt.

5.3.3 Befüllung und Entleerung des Leitungssystems

Zur Befüllung des PSM-Leitungssystems wird der PSM-Behälter unter Druck gesetzt und das Proportionalventil sowie das letzte Einspeisungsventil der Leitung solange geöffnet, bis ein kapazitiver Endschalter die Füllung signalisiert (Abb. 15). Dieser wurde mit Rapsöl als PSM-Simulanz, wegen der vergleichsweise geringen dielektrischen Leitfähigkeit, abgeglichen.

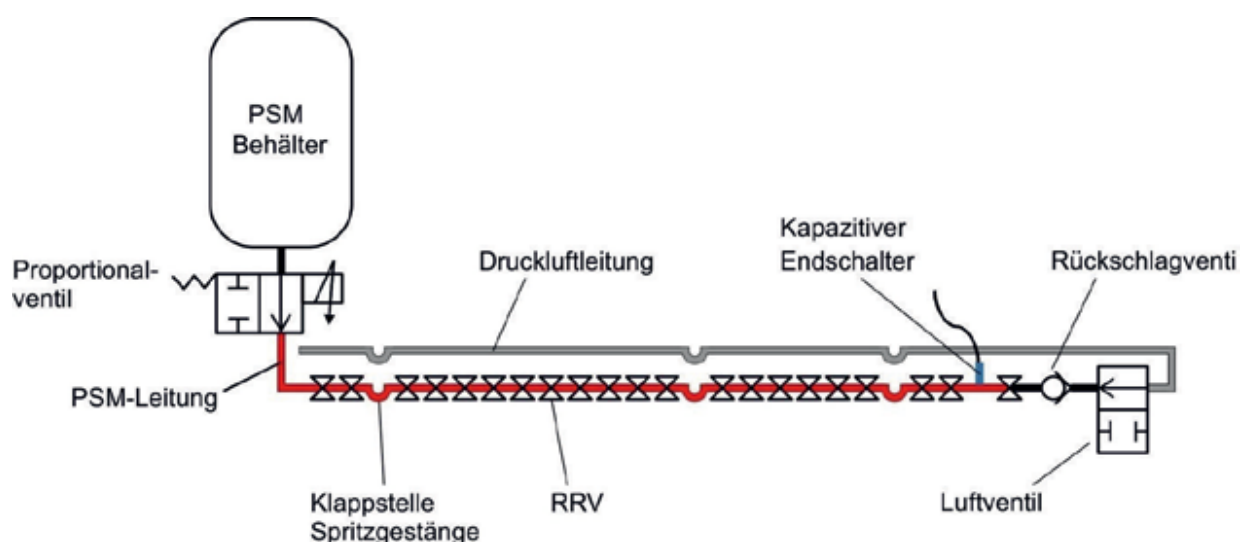


Abb. 15: Schema des Aufbaus zur Befüllung und Entleerung des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel

Zur Entleerung der PSM-Leitung wird der PSM-Behälter entlüftet und das Proportional- sowie das Luftventil am Ende des Spritzgestänges geöffnet (Abb. 15). Damit kann die technische Restmenge an Pflanzenschutzmittel aus der Leitung zurück in den drucklosen Druckbehälter gefördert und über den Ablasshahn entnommen werden.

5.4 Differenzdruckregelung

Zwischen den hydraulischen Systemen für Trägerflüssigkeit und Pflanzenschutzmittel ist die Einhaltung eines konstanten Differenzdrucks erforderlich, da die eingespeiste PSM-Menge mittels der Öffnung der

Einspeisungsventile gesteuert wird. Der PSM-Behälter wird dazu mit 1500 kPa Druckluft beaufschlagt, damit gewährleistet ist, dass der Druck im PSM-System über dem im Trägerflüssigkeitssystem liegt. Mittels eines Proportionalventils kann der Differenzdruck bei Zu- oder Abschaltungen von Einspeisungsventilen und Aufwandmengenänderungen eingestellt werden. Die Signale der Drucksensoren dienen zur Erfassung der Regelgröße und mittels eines Softwarereglers wird die Öffnung des Stellgliedes (Proportionalventil) angepasst.

5.5 Direkteinspeisungseinheit

Die aufgebaute Direkteinspeisungseinheit (Abb. 16) wird anstelle der Düse am Düsenträger mit Standard-Bajonettverschluss angebracht.

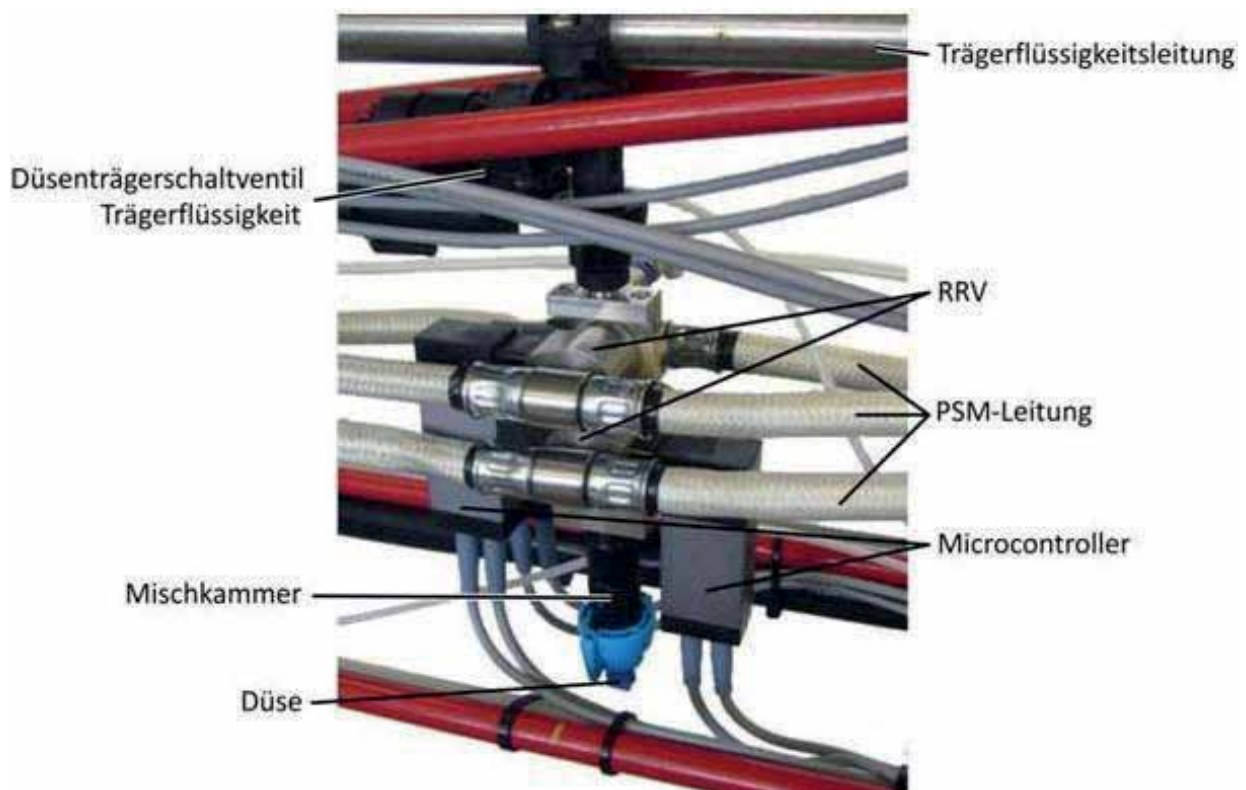


Abb. 16: Einbausituation einer Direkteinspeisungseinheit für drei PSM im Spritzgestänge

Dabei werden drei Einspeisungsventile, die je mit einem Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel verbunden sind, mit einem Lufteinlass zur Reinigung, einem drucklos geschlossenen Sicherheitsventil und einer statischen Mischkammer kombiniert (Abb. 17). Der Mischvorgang wurde bereits von Vondricka (2008) untersucht und anhand der Ergebnisse die Mischkammer ausgelegt. Es kam ein 24-

stufiger statischer Mischer zum Einsatz. Bei dem Gehäuse des Sicherheitsventils handelt es sich um eine Eigenanfertigung, bei der Komponenten von Düsenträgerschaltventilen verbaut wurden. Ein Sicherheitsventil jeder Teilbreite wurde mit den Komponenten eines elektropneumatisches Masterventils (Direct Control Master, Altek GmbH, Rottenburg) ausgestattet, damit es die übrigen pneumatischen Düsenträgerschaltventile (PSV, Lechler GmbH, Metzingen) als Slaves mitschaltet.

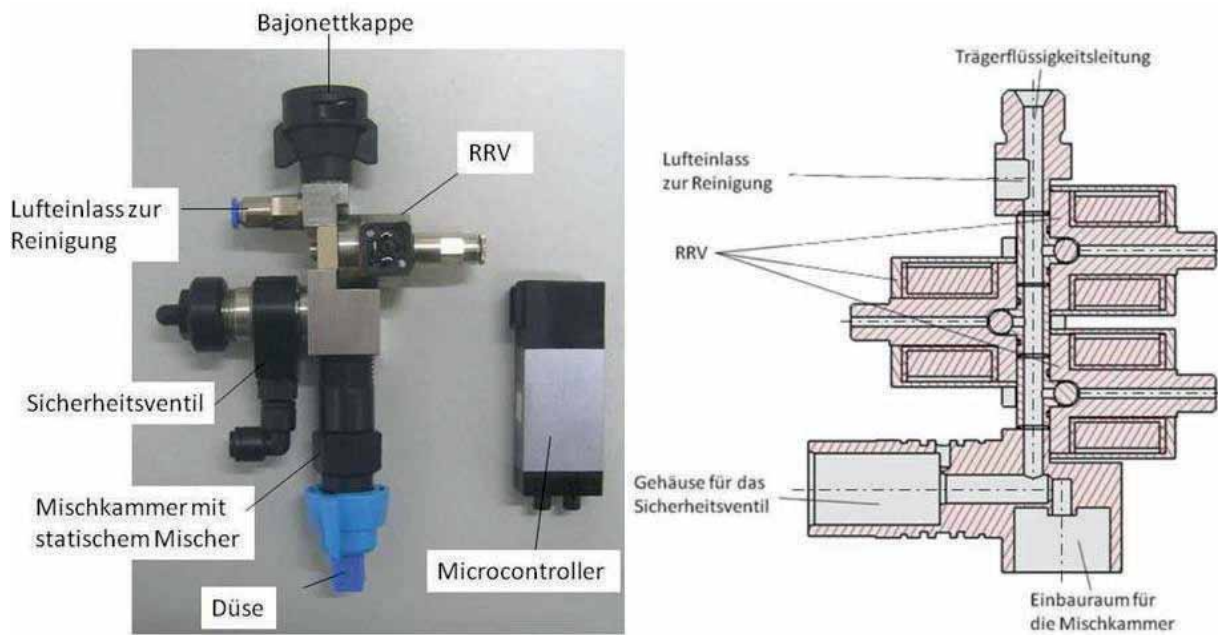


Abb. 17: Direkteinspeisungseinheit mit einem (links) und drei RRV[®] (rechts)

5.6 Einspeisungsventil (RRV[®])

Das zur Einspeisung verwendete RRV[®] (Abb. 18) nach Patent Nummer DE 103 59 852 B3 wurde ursprünglich vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) entwickelt. In Zusammenarbeit mit dem Lizenznehmer GSR Ventiltechnik und dem DLR wurde es für die Anwendung in der Pflanzenschutztechnik optimiert.



Abb. 18: Aufbau des Einspeisungsventils

5.6.1 Ventilprinzip

Es handelt sich um ein neues Kugeldosierventil, dessen besondere Vorteile ein tottraumloser innerer Aufbau, kurze Schaltzeiten, und ein weites Dosiermengenspektrum sind. Im Inneren des Einspeisungsventils (Abb.19) befindet sich ein gerader Strömungskanal, in dem eine Kugel vom dosierten Medium umströmt wird. Im geschlossenen Zustand wird die Kugel vom Medium auf eine Bohrung im Ventilsitz gedrückt und bei Öffnung des Ventils mit Hilfe eines Magnetfelds seitlich von der Bohrung bewegt. Bei dem verwendeten Ventilsitz kann bei vollständiger Öffnung ein maximaler Querschnitt von 2 mm freigegeben werden. Die Kugel kann sich im Medium drehen.

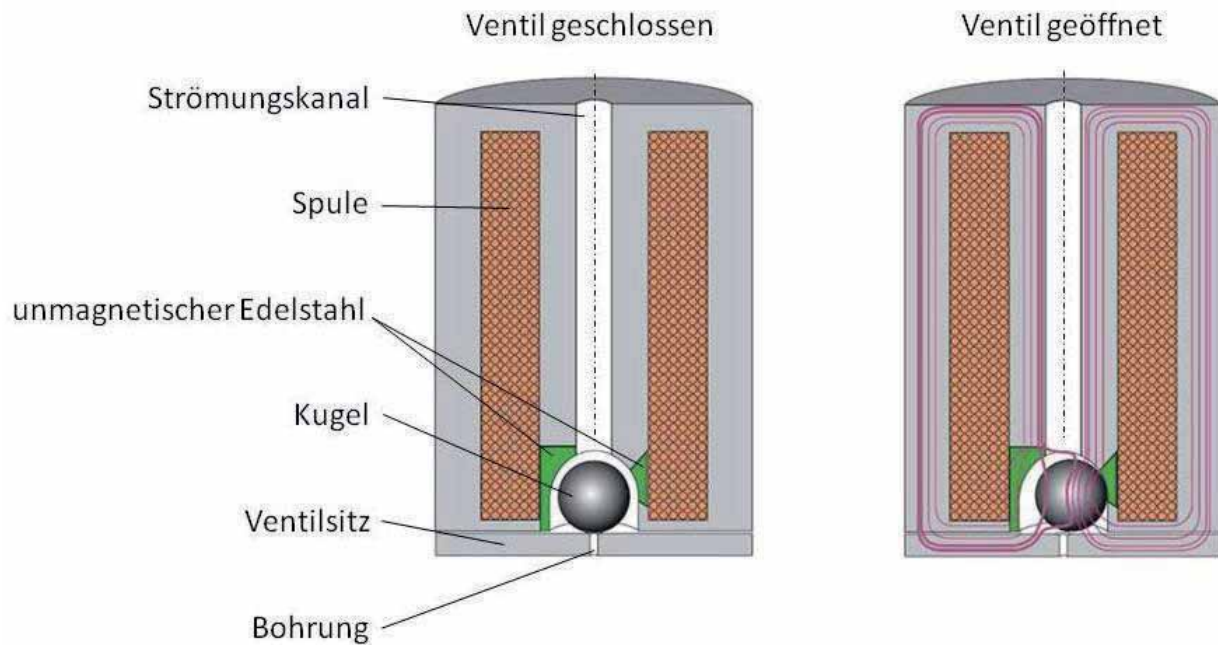


Abb. 19: Innerer Aufbau und Funktionsprinzip des RRV[®] (modifiziert nach Mönning et al., 2010)

Die Schaltzeit bei dem verwendeten Einspeisungsventil beträgt unter 3 ms. Durch eine pulsweitenmodulierte Ansteuerung lässt sich das RRV[®] als Stetigventil und damit auch zur Kleinstmengendosierung einsetzen.

Es erfüllt die Anforderungen hinsichtlich des weiten Dosiermengenspektrums, das - vergleichbar der Berechnung des Spritzbrüheausstosßes an einer Düse nach Kifferle und Stahl (2001) - für die Ausbringung eines Pflanzenschutzmittels an einem Einspeisungsventil ermittelt werden kann:

$$q = D \cdot a \cdot v \cdot \frac{10}{6} \quad (5)$$

mit:

q = Ausbringmenge Pflanzenschutzmittel eines RRV[®], ml·min⁻¹

D = Aufwandmenge, l·ha⁻¹

a = Abstand zwischen zwei Düsen, m

v = Fahrgeschwindigkeit, km·h⁻¹

Die exakte Dosierung der unterschiedlichen Aufwandmengen stellt eine Herausforderung für das Einspeisungsventil dar. Beispielsweise variiert die

Ausbringmenge eines RRV[®] bei einer Fahrgeschwindigkeit $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ von $0,08 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ bis $41,67 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ bei PSM-Aufwandmengen von $10 \text{ ml}\cdot\text{ha}^{-1}$ bis $5 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Neben der Aufwandmenge wird der Einfluss der Formulierung des Pflanzenschutzmittels auf dessen Dosiereigenschaften verstärkt durch die weite Viskositätsspanne der verschiedenen Mittel. Das Einspeisungsventil muss die PSM mit unterschiedlichen Formulierungen mit der geforderten Genauigkeit von maximal 10 % Abweichung vom Sollwert (Vergleich Kapitel 4), ausbringen können. Voraussetzung ist ein konstanter Differenzdruck zwischen den hydraulischen Systemen für Trägerflüssigkeit und Pflanzenschutzmittel, da die eingespeiste Menge durch die Öffnung des Einspeisungsventils gesteuert wird (Vergleich Kapitel 5.4).

Bei zentralen Direkteinspeisungssystemen variieren die Ausbringmengen der Einspeisungseinheit stärker als bei der Direkteinspeisung an der Düse, da zusätzlich Teilbreiten bzw. Einzeldüsen zu- und abgeschaltet werden.

Drei Einspeisungsventile werden mit den Anschlussstücken für die Trägerflüssigkeit und für den statischen Mischer zum Grundkörper der Direkteinspeisungseinheit zur Einspeisung drei verschiedener Pflanzenschutzmittel zusammengesetzt (Abb. 20).

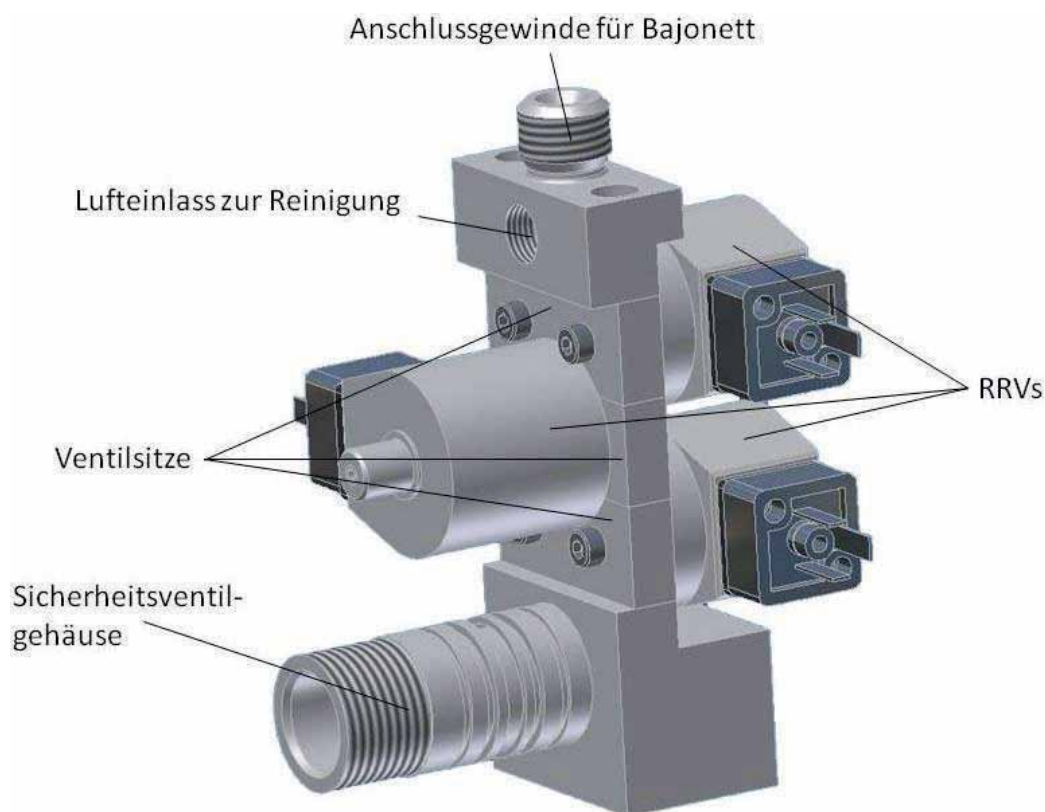


Abb. 20: Grundkörper der Direkteinspeisungseinheit

Der Aufbau der RRV[®] wurde mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen weiterentwickelt. Um Dichtigkeit der Einspeisungsventile zu erreichen, wurden zunächst O-Ring-gedichtete Edelstahlventilsitze genutzt. Später kamen Ventilsitze aus hochwertigem Kunststoff (PeeK) zum Einsatz. Die Kunststoffsitze zeigten sich jedoch empfindlich gegenüber Fremdkörpern im dosierten Medium. Schließlich konnte die Oberflächenqualität der Edelstahlsitze soweit verbessert werden, dass Dichtigkeit bei der Dosierung von Flüssigkeiten gegeben war.

5.6.2 Ventilsteuerung

Am Einspeisungsventil wird ein Microcontroller zur Modulation des Spulenstroms eingesetzt. Dieser wird mit 24 V Versorgungsspannung gespeist und erhält vom Prozessrechner ein pulswidenmoduliertes Signal zur Steuerung der Ventilöffnung. Die Steuerfrequenz beträgt bei den in dieser Arbeit dargestellten Versuchen 100 Hz. Der Spulenstrom wird anhand des Steuersignals und der einstellbaren Parameter für Anzugstrom (I_p) und Haltestrom (I_h) moduliert (Abb. 20). Die im Magnetfeld der Spule gespeicherte Energie wird beim Schließen des Ventils in Wärme umgewandelt.

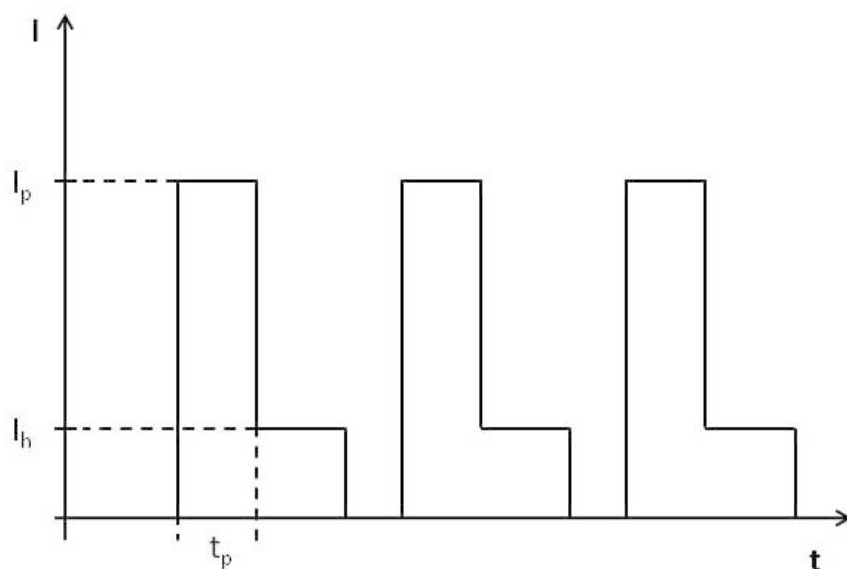


Abb. 21: Schematische Darstellung der Zielwerte des Spulenstroms bei dessen Modulation über der Zeit am Einspeisungsventil

I_p dient der Bewegung der Kugel aus dem Ventilsitz und damit zur Öffnung des Einspeisungsventils. Zum Offenhalten wird weniger Energie benötigt, weshalb der Spulenstrom dann mit I_h auf kleinere Werte abgesenkt wird. Der Anzugstrom wird für die Zeit t_p , die bei den dargestellten Versuchen drei Millisekunden betrug, erzeugt.

Änderungen der Einstellung der Strombegrenzung sowie der Konfiguration des RRV[®] (Sitz, Spule, Ventilkörper, Gehäuse) führen zur Veränderung der Kennlinien des Einspeisungsventils.

5.6.3 Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme

Der Widerstand der Ventilspule des Einspeisungsventils kann in einen induktiven und einen ohmschen Anteil aufgeteilt werden. Zur grundsätzlichen Erläuterung der Vorgänge an der Ventilspule wird im folgenden Kapitel der induktive Anteil ausgeblendet, was in der Anwendung näherungsweise einer sehr langsamen Änderung der elektrischen Versorgungsleistung der Spule bei einem Einsatz des RRV[®] als Schaltventil entsprechen würde. Die in 5.6.3.1 und 5.6.3.2 dargestellten Zusammenhänge gehen auf persönliche Kommunikation mit Neuhaus (2012) zurück.

5.6.3.1 Einfluss des Spulensystems und der angelegten elektrischen Leistung auf die Öffnung des Einspeisungsventils

Die Öffnung des Einspeisungsventils wird durch die vom Magnetfeld an der Ventilkugel erzeugten Kraft erreicht, die von der dort herrschenden magnetischen Flussdichte $B(t)$ bestimmt wird (Abb. 19). Wird für den vorgegebenen Ventilkörper mit der Länge l und gegebener Materialzusammensetzung ein homogenes Magnetfeld entlang der Achse der Ventilspule angenommen (tatsächlich führt der Ventilkörper das Magnetfeld zu einer Seite der Kugel) so gilt nach dem Ampèreschen Gesetz:

$$B(t) \sim N \cdot I(t) \quad (6)$$

mit:

N = Windungszahl

$I(t)$ = Stromstärke, A

Aufgrund der ohmschen Verlustleistung:

$$P(t) = I(t)^2 \cdot R \quad (7)$$

und des ohmschen Widerstands der Spule:

$$R = \rho \cdot 2\pi \cdot r_m \cdot \frac{N}{A_w} \quad (8)$$

mit:

$P(t)$ = Ohmsche Verlustleistung, W

R = Widerstand, Ω

ρ = spezifischer Widerstand, $\Omega \cdot m$

r_m = mittlerer Radius der Spule, m

A_W = Querschnittsfläche des Drahtes, m^2

ergibt sich:

$$B(t) \sim N \cdot \sqrt{\frac{P(t)}{R}} = N \cdot \sqrt{\frac{P(t) \cdot A_W}{\rho \cdot 2\pi \cdot r_m \cdot N}} \quad (9, 10)$$

$$B(t) \sim \sqrt{\frac{P(t) \cdot A_W \cdot N}{\rho \cdot 2\pi \cdot r_m}} \quad (11)$$

Wird für die Füllung der Ventilschule folgendes ersetzt:

$$N \cdot A_W = F \cdot A_S \quad (12)$$

mit:

F = Füllfaktor der Schule

A_S = Querschnittsfläche der Schule, m^2

ergibt sich:

$$B(t) \sim \sqrt{\frac{P(t) \cdot F \cdot A_S}{\rho \cdot 2\pi \cdot r_m}} \quad (13)$$

Wenn beim Aufbringen der Wicklung der Bauraum des Ventilkörpers vollständig genutzt wird und damit eine nahezu konstante Füllung der Ventilschule erreicht werden kann, gilt:

$$\frac{F \cdot A_S}{r_m} = konst \quad (14)$$

Dann ist die magnetische Flussdichte im Einspeisungsventil außerhalb des Sättigungsbereichs nur proportional zur Wurzel der angelegten Leistung $P(t)$. Das bedeutet, dass bei demselben Ventilkörper mit vorgegebener Materialzusammensetzung und Länge l , gleichem spezifischen Widerstand des Wicklungsdrahtes und gleicher (in der Praxis möglichst vollständiger) Füllung der Ventilschule, die Kraft zur Öffnung des Einspeisungsventils nur von der angelegten elektrischen Leistung abhängt. Damit sind der Querschnitt und die Länge des Spulendrahtes für die Kraft zur Öffnung, bei Einhaltung einer konstanten Füllung der Ventilschule, unbedeutend.

Die Veränderung des Bauraumes für die Ventilschule bietet ebenfalls die Möglichkeit andere Spulen aufzubauen und damit die Kraft an der Ventilkugel zu beeinflussen. Bei dieser Anwendung handelte es sich jedoch um einen vorgegebenen Ventilkörper.

5.6.3.2 Einfluss der Induktivität im Dosierbetrieb

Im Folgenden wird auf den Einfluss der Induktivität der Ventilschule auf die Leistungsaufnahme im Dosierbetrieb eingegangen. Die ursprüngliche Auslegung der Ventilschule für den Dosierbetrieb mit dem RRV[®] ohne Leistungselektronik sah eine kleine Induktivität der Ventilschule vor, da diese nach Formel 15 für eine möglichst geringe Speicherung von Energie im Magnetfeld ausgelegt sein sollte, die bei jedem Schließvorgang des pulsweitenmodulierten Einspeisungsventils wieder frei wird.

$$W(t) = \frac{1}{2} \cdot L(t) \cdot I(t)^2 \quad (15)$$

mit:

$W(t)$ = Energie im Magnetfeld, J

$L(t)$ = Induktivität, H

Unter der Annahme, dass es sich um eine zylinderförmige Spule handelt, deren Länge l im Vergleich zum Durchmesser des Querschnitts A_s verhältnismäßig groß ist, wurde für das erste entwickelte Einspeisungsventil wegen der kleineren Induktivität eine Spule mit geringer Windungszahl gewählt.

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_s}{l} \quad (16)$$

mit:

μ_0 = Magnetische Feldkonstante, $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$

μ_R = Magnetische Permeabilität, $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$

l = Länge der Spule, m

Der hohe erforderliche Spulenstrom erzeugt allerdings nach Formel 7 eine große ohmsche Verlustleistung $P(t)$ an der Ventilschule, wodurch es zu einer Erwärmung des Einspeisungsventils kommt.

Zudem erforderte der Einsatz des Microcontrollers eine Begrenzung des Spulenstroms. Der ursprüngliche Spulenwiderstand betrug $1\ \Omega$. Bei $24\ \text{V}$ Versorgungsspannung wären damit theoretisch $24\ \text{A}$ Spulenstrom möglich gewesen. Der Microcontroller ermöglicht allerdings maximal $10\ \text{A}$ Anzugstrom und $2\ \text{A}$ Haltestrom in der Ventilschule. Zur Anpassung der Ventilschule an die mit dem Microcontroller maximal möglichen Stromstärken, wurde daher deren Windungszahl nach Formel 6 erhöht.

Abschließend wurde mit Hilfe der Strombegrenzung des Microcontrollers der Spulenstrom für die Anwendung in einer Versuchsreihe stufenweise reduziert. Dabei wurden die Parameter für den Druckbereich bis maximal $1500\ \text{kPa}$ eingestellt.

5.6.3.3 Leistungsaufnahme der Einspeisungsventile auf dem Versuchsträger

Das Einspeisungsventil der ursprünglichen Auslegung mit der Ventilschule mit 250 Windungen, einem Kupferdraht mit $0,560\ \text{mm}$ Durchmesser und den Maximalwerten der Strombegrenzung des Microcontrollers benötigt bei $20\ \%$ Öffnungsanteil $40,25\ \text{W}$. Ziel war es, die Leistungsaufnahme der RRV[®] zu verringern, um möglichst wenig elektrische Leistung zur Verfügung stellen zu müssen, da an dem Versuchsträger eine vergleichsweise hohe elektrische Leistung zum Betrieb der Einspeisungsventile erforderlich ist. Bei $21\ \text{m}$ Arbeitsbreite wurden zur Einspeisung von drei verschiedenen Pflanzenschutzmitteln insgesamt 126 RRV[®] verbaut. Der elektrische Leistungsbedarf des Versuchsträgers betrug bei $20\ \%$ Öffnung aller RRV[®] in der ursprünglichen Konfiguration näherungsweise $5\ \text{kW}$ allein für die Einspeisungsventile.

Die Messung der Stromstärke erfolgte vor dem am Einspeisungsventil angeschlossenen Microcontroller mit einer Strommesszange (Typ E3N, Chauvin Annoux, Paris/Frankreich). Die Stromaufnahme des Einspeisungsventils wurde als arithmetischer Mittelwert der einzelnen Messwerte berechnet. Die Spannung wurde mittels eines Spannungsteilers ermittelt. Die Messdaten wurden mit einer Messfrequenz von 20 kHz mit dem Prozessrechner aufgezeichnet.

5.6.4 Temperaturmessung

Magnetventile sind in der Regel für Grenztemperaturen von 155°C ausgelegt (Linsmeier und Greis, 2005). Da der Flüssigkeitsstrom im Einspeisungsventil durch die Ventilschule geleitet wird (Abb. 22), werden eine Erwärmung der Flüssigkeit und eine damit verbundene Viskositätsänderung der durchströmenden Flüssigkeit erwartet. Diese Änderung wirkt sich auf das Dosierverhalten aus. Um die Beeinflussung des Dosierverhaltens zu untersuchen, wurde die Erwärmung der hochviskosen Simulanz Glycerin bei verschiedenen Öffnungszeiten im Einspeisungsventil hinter der Kugel gemessen. Über ein Fitting wurde dazu ein Temperaturdraht eingelassen und mit dem Ahlborn Almemo 2590 die Temperatur des Mediums erfasst (Abb. 22). Zudem kann sich die chemische Zusammensetzung von Pflanzenschutzmitteln bei Erwärmung verändern. Eine Temperatur von unter 50°C wird dabei aber als unkritisch angesehen (persönliche Kommunikation mit Steinbeck, 2011).

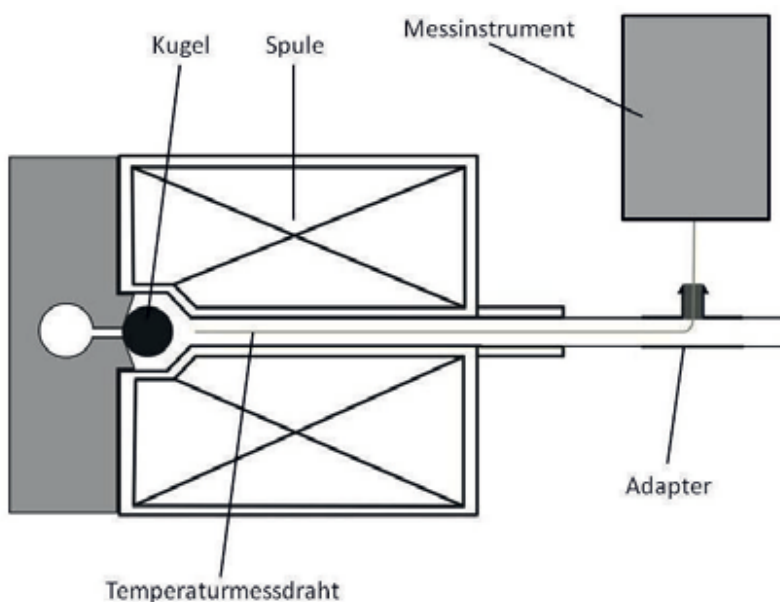


Abb. 22: Temperaturmessung im Einspeisungsventil

5.7 Messung der Dosiergenauigkeit

Nach Schlücker (2002) ist das genaueste Verfahren zur Untersuchung der Exaktheit der Flüssigkeitsdosierung die diskontinuierliche, gravimetrische Bestimmung nach dem Prinzip der diskontinuierlichen Entnahme-Wägetechnik. Daher wurde die Dosiergenauigkeit ohne die Applikation von Trägerflüssigkeit gravimetrisch mit Glycerin-Wasser-Mischungen unterschiedlicher Viskositäten an einer Teilbreite mit sechs Einspeisungsventilen bestimmt. Dabei wurde jeweils ein Druckbehälter für jedes RRV[®] als Druckquelle genutzt und das Simulanz mit dem Druckluftregler unter Druck gesetzt (Abb. 23). Die Leitungslängen wurden dabei gleich gehalten.

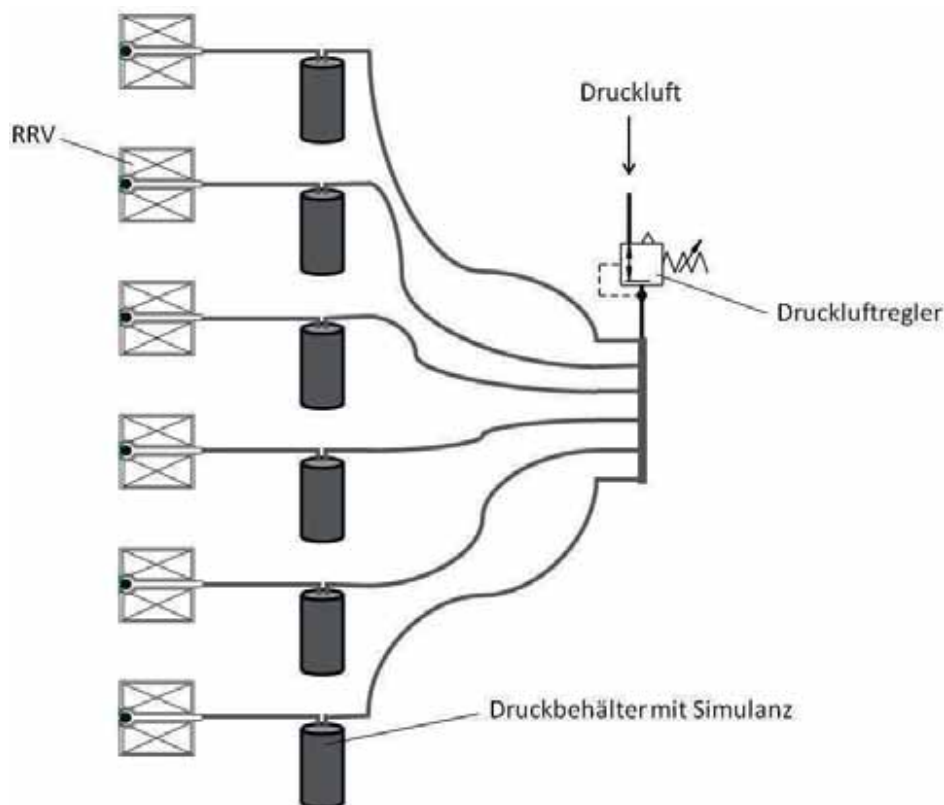


Abb. 23: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Dosiergenauigkeit

Die von jedem Einspeisungsventil ausgebrachte Menge Simulanz wurde aufgefangen und ausgewogen. Aus Vorversuchen war bekannt, dass die Reproduktion der eingestellten Dosiermenge innerhalb derselben Versuchsreihe besser gelang, als bei Beginn einer neuen Untersuchung. Deshalb wurde an drei Versuchstagen und von jeweils drei Wiederholungen die bei verschiedenen Öffnungsanteilen der RRV[®] ausgebrachte Menge entnommen und gewogen.

5.8 Durchflussmessung

Drei verschiedene Arten von Kleinstmengendurchflussmessern haben sich für die Messung des PSM-Durchflusses am Einspeisungsventil grundsätzlich als geeignet erwiesen. Mechanische, kalorimetrische Durchflussmessung (Abb. 24) und die Massendurchflussmessung nach dem Coriolisprinzip.

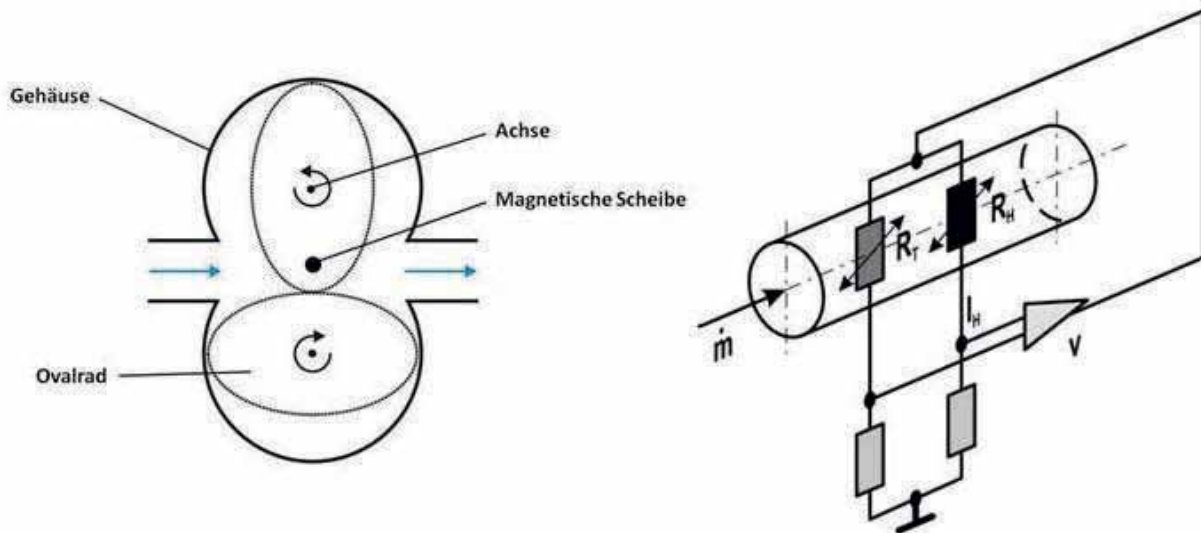


Abb. 24: Ovalradzähler (links) und kalorimetrischer Sensor nach Hächtebrock (1997; rechts)

Nach Frenzel et al. (2010) sind Ovalradzähler ideale Geräte für große Viskositäten. Mit zunehmender Viskosität werden sie wegen kleinerer Spaltverluste genauer. Problematisch sind nach Häfelfinger (2002) unter anderem das Risiko von Lagerschäden bedingt durch Pulsation, die Empfindlichkeit gegen Verschmutzung, Druckverluste bei Vorschaltung von Filtern sowie bei chemisch aggressiven Medien die Belastung durch die mechanische Reibung. Untersucht wurde ein Ovalradzähler zur Messung von chemisch aggressiven Flüssigkeiten für den Messbereich von $5\text{--}700\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ (VZS-005-VA, B.I.O-TECH e.K., Vilshofen). Die Anzahl der Impulse des Ovalradzählers pro ml ausgebrachte Flüssigkeit wurde für Wasser und Glycerin bei unterschiedlichen Ausbringmengen mit Einsatz von Blenden bestimmt.

Ebenfalls untersucht wurde ein kalorimetrischer Sensor (FS5LA, IST AG, Wattwil/Schweiz) nach dem Konstant-Temperatur-Verfahren. Eine Sensorelektronik der Firma Elactis am Sensor gibt ein vom Durchfluss abhängiges analoges Spannungssignal aus. Das Messprinzip besteht nach Fiedler (1992) in der

Einstellung einer konstanten Heiztemperatur der Sonde durch Nachführung des Speisestroms oder der Speisespannung. Diese kompensieren die durch die Strömung verursachte Abkühlung des Heizelements. Damit sind Speisestrom und Speisespannung ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Zwischen der Masse eines Fluids und dem Betrag der Energie, die erforderlich ist, um das Fluid um eine bestimmte Temperatur ΔT zu erwärmen, besteht eine lineare Abhängigkeit. Nach Hüchtebrock (1997) ist der Proportionalitätsfaktor bei konstantem Druck der Kehrwert der spezifischen Wärmekapazität c_p des Mediums in $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Das Messprinzip wird vielfach zur Durchflussmessung von Gasen eingesetzt. Eine Kalibration des Messsystems auf die unterschiedlichen Flüssigkeitseigenschaften, wie zum Beispiel die jeweilige Wärmekapazität des Pflanzenschutzmittels, wird zukünftig wahrscheinlich erforderlich sein.

Die Genauigkeit des kalorimetrischen Durchflussmessers am RRV[®] wurde bei konstanter Öffnung des Einspeisungsventils untersucht. Abb. 25 zeigt die Anbringung des Sensors am Einspeisungsventil. Die in einer Minute ausgebrachte Flüssigkeitsmenge wurde ausgewogen und der arithmetische Mittelwert des Messwertes über diese Messzeit gebildet. Veränderungen der Ausbringmenge während der Messung wurden nicht berücksichtigt. Der Aufbau wurde mit einer Glycerin-Wasser-Lösung mit 85 Masseprozent Glycerin bei 600 kPa kalibriert.

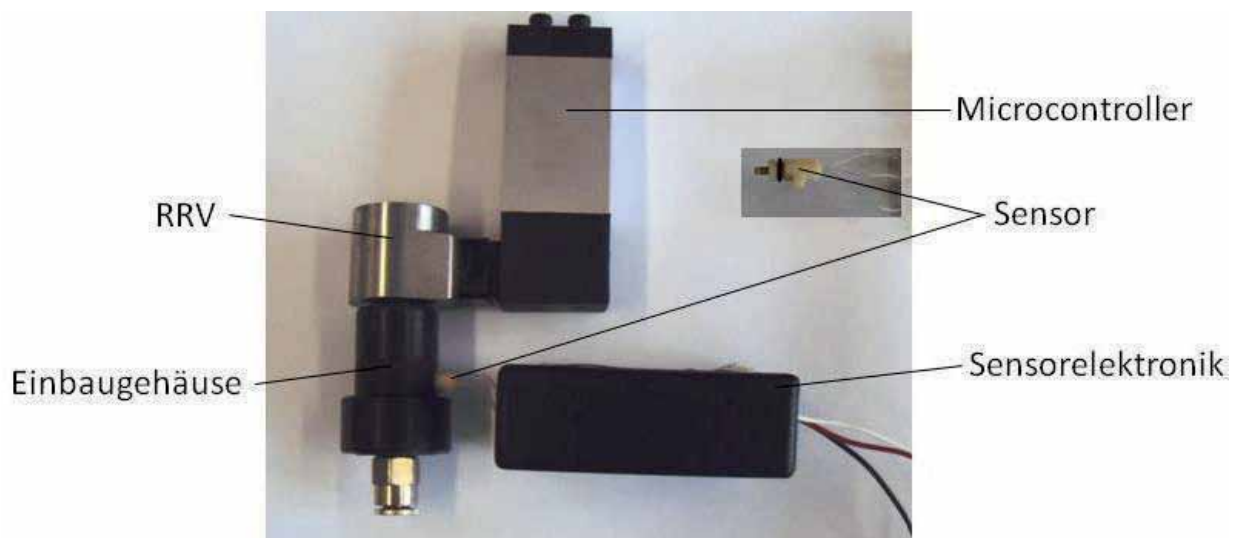


Abb. 25: Aufbau zur kalorimetrischen Durchflussmessung und –regelung am RRV[®]

Für eine Kleinstmengendurchflussmessung an jedem Einspeisungsventil wurde die Massendurchflussmessung nach dem Coriolisprinzip nicht weiter verfolgt, da diese Sensoren nicht zu einem für die Anwendung akzeptablen Preis verfügbar sind.

5.9 PSM-Simulanz

Flüssige Pflanzenschutzmittel haben eine im Vergleich zur Trägerflüssigkeit weite Viskositätsspanne. Zhu et al. (1998) geben einen Bereich von 1-1000 mPa·s an. Vondricka (2008) schränkt die Viskositätsspanne für PSM auf 1-800 mPa·s ein, wobei die Mehrzahl der Formulierungen sich bei 100 mPa·s befindet. Friessleben (2011) gibt für Bayer CropScience-Produkte vergleichbare Zahlen an (Abb. 26). Die Dichte befindet sich nach Vondricka (2008) im Bereich von 930 bis 1240 kg·m⁻³.

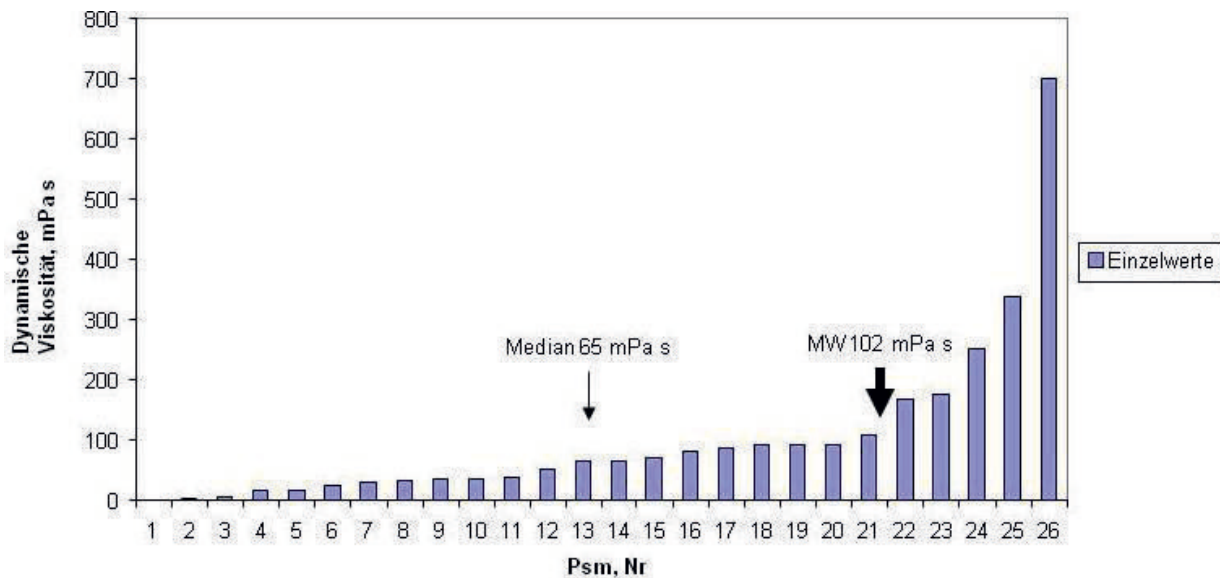


Abb. 26: Dynamische Viskosität wichtiger Pflanzenschutzmittel der Firma Bayer CropScience nach Friessleben (2011)

Anstelle von Pflanzenschutzmittel wurden Glycerin-Wasser-Mischungen eingesetzt. Die dynamische Viskosität η wurde dabei nach Cheng (2008) berechnet:

$$\eta = \eta_w^G \cdot \eta_g^{1-G} \quad (17)$$

mit:

G = Gewichtungsfaktor

η_w = dynamische Viskosität Wasser, mPa·s

η_g = dynamische Viskosität Glycerin, mPa·s

$$G = 1 - C_m + \frac{a \cdot b \cdot C_m \cdot (1 - C_m)}{a \cdot C_m + b \cdot (1 - C_m)} \quad (18)$$

$$a = 0,705 - 0,0017 \cdot T \quad (19)$$

$$b = (4,9 + 0,036 \cdot T) \cdot a^{2,5} \quad (20)$$

mit:

C_m = Massenanteil Glycerin, %

T = Temperatur, °C

Die Dichte der Glycerin-Wasser-Mischungen wurde aus Adamenko et al. (2006) übernommen. Die dazu erforderlichen Temperaturmessungen wurden mit einem Ahlborn Almemo 2590 mit Temperaturmessdraht durchgeführt.

6 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Aufbau des Versuchsträgers dargestellt. Die einzelnen Kapitel beinhalten zunächst Ausführungen zur Druckquelle, danach zum Aufbau des Leitungssystems. Abschließend werden die Untersuchungen des Einspeisungsventils behandelt. Die zugehörigen Ergebnisse werden jeweils diskutiert, und abschließend der Gesamtaufbau des Versuchsträgers einer kritischen Betrachtung unterzogen.

6.1 Druckquelle

Die Voraussetzung zur Eignung einer Druckquelle für Pflanzenschutzmittel zum Einsatz auf dem Versuchsträger ist die Möglichkeit der Erzeugung eines konstanten Differenzdruckes im Pflanzenschutzmittelleitungssystem zum Trägerflüssigkeitssystem. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst unregelte und geregelte Pumpen untersucht.

6.1.1 Temperatur-, Viskositäts- und Druckänderung bei Einsatz einer unregulierten Pumpe

Eine unregelte Pumpe benötigt einen Druckregler zur Anpassung der Fördermenge an die Abnahmemenge an den Dosierventilen. Die Rückförderung in den PSM-Behälter und die damit verbundene Erwärmung des Pflanzenschutzmittels wurden untersucht. Den Anstieg der Temperatur von einem Liter Glycerin, das beim Einsatz einer Membranpumpe mit zu Versuchsbeginn fest eingestellter Drehzahl (540 min^{-1}) durch eine Drossel zirkuliert wird, zeigt Abb. 27.

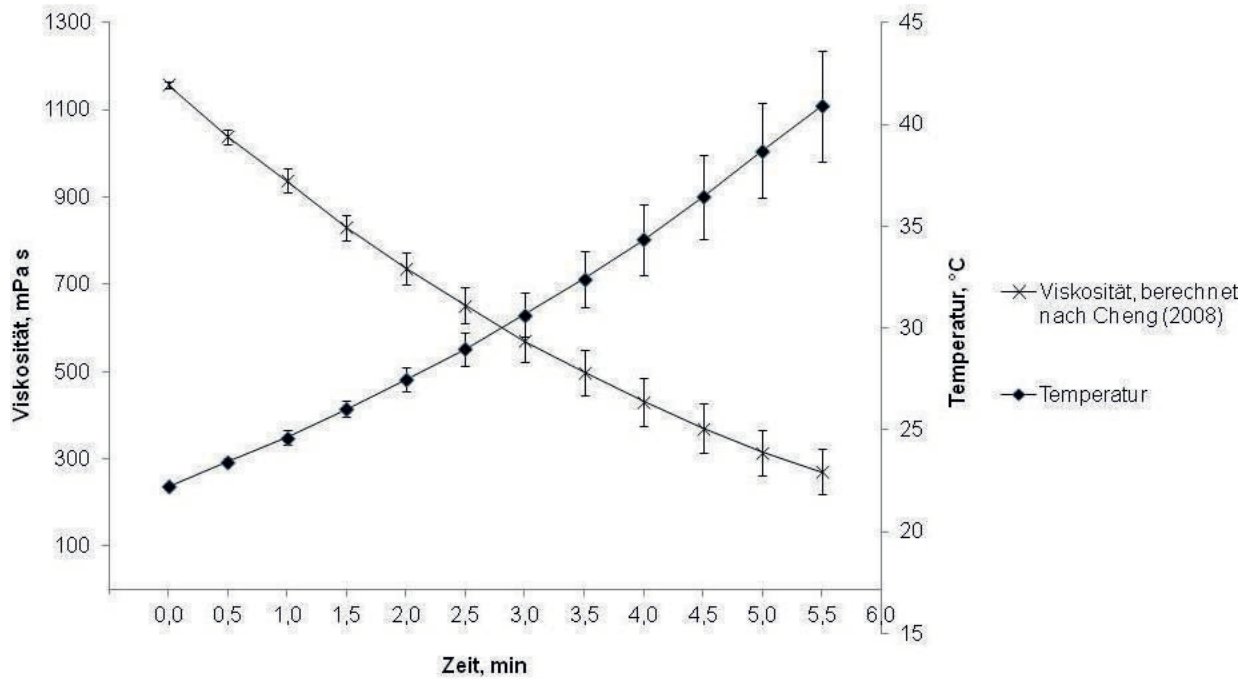


Abb. 27: Temperaturanstieg und Viskositätsänderung bei Zirkulation von 1 l Glycerin mit einer Membranpumpe und 1441 kPa Druck (n= 3)

Damit wurde die Bereitstellung einer geringen Menge Pflanzenschutzmittel ohne Öffnung der Einspeisungsventile simuliert. Zusätzlich ist die Abnahme der dynamischen Viskosität des Glycerins aufgetragen.

Die in Abb. 27 dargestellten Werte stellen arithmetische Mittelwerte von drei Wiederholungen dar, die Fehlerbalken die entsprechenden Standardabweichungen. Die Temperatur stieg in 5,5 min von 22,3°C auf 40,9°C, während die dynamische Viskosität von 1157,8 mPa·s auf 271,0 mPa·s absank.

Abb. 28 stellt dieselbe Temperaturkurve dar. Zusätzlich ist der während des Versuchs zwischen Pumpe und Drossel gemessene Druck aufgetragen.

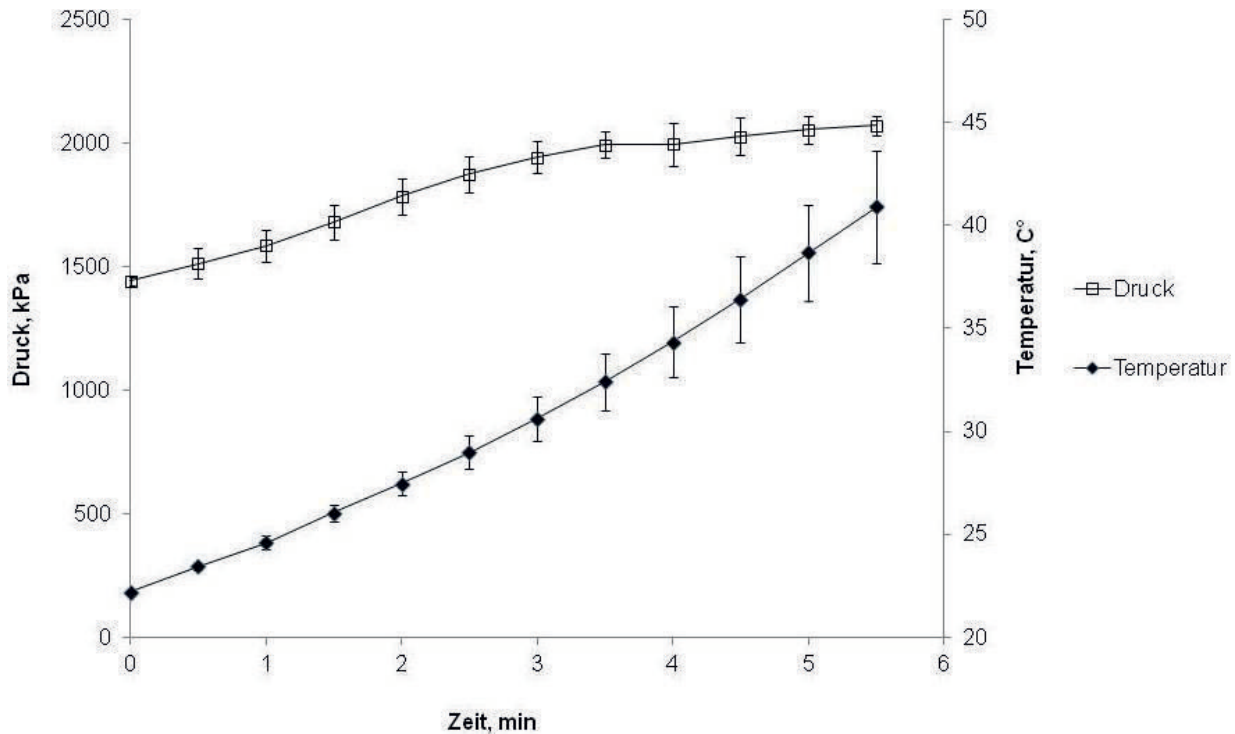


Abb. 28: Temperaturanstieg und Druckänderung bei Zirkulation von 1 l Glycerin mit einer Membranpumpe (n= 3)

Der Druck zwischen Pumpe und Drossel stieg während des Versuchs mit der Abnahme der dynamischen Viskosität der Simulanz Glycerin von 1441 kPa auf 2071 kPa an. Bei gleicher Einstellung erzeugte die Pumpe mit abnehmender Viskosität einen höheren Druck. Dieser lässt auf eine Zunahme der Fördermenge der Pumpe mit der im Versuchsverlauf abnehmenden Viskosität schließen.

6.1.2 Druckänderung beim Einsatz einer druckluftbetriebenen Kolbenpumpe als Beispiel für eine einfache Pumpenregelung

Bei der untersuchten druckluftbetriebenen Kolbenpumpe handelt es sich um einen pneumohydraulischen Druckübersetzer, bei dem sich bei konstantem Luftdruck die Fördermenge dem wechselnden Bedarf anpasst. Um auch beim Taktwechsel der Kolbenpumpe einen konstanten Differenzdruck zu gewährleisten, wurde zusätzlich der Einsatz eines Flüssigkeitsdruckminderers am Pumpenausgang untersucht.

Abb. 29 zeigt den Druckverlauf hinter Pumpenausgang und vor dem Druckminderer mit dem Versuchsmedium Wasser bei unterschiedlichem Druck. Die Pumpe wurde vor jeder Messung nach einem erfolgten Taktwechsel gestoppt. Nach der Öffnung

der Drossel setzte die Förderung ein. Die Kolbenpumpe liefert jeweils 200 ml pro Kolbenhub, bevor der dargestellte Taktwechsel erfolgt.

Beim Öffnen der Drossel fällt der Druck mit dem Einsetzen der Strömung leicht ab. Der Druckabfall beim Taktwechsel steigt mit zunehmendem Druck. Die Dauer des Druckabfalls von ca. 1 Sekunde stellt ein Problem für die Einhaltung eines konstanten Differenzdrucks dar.

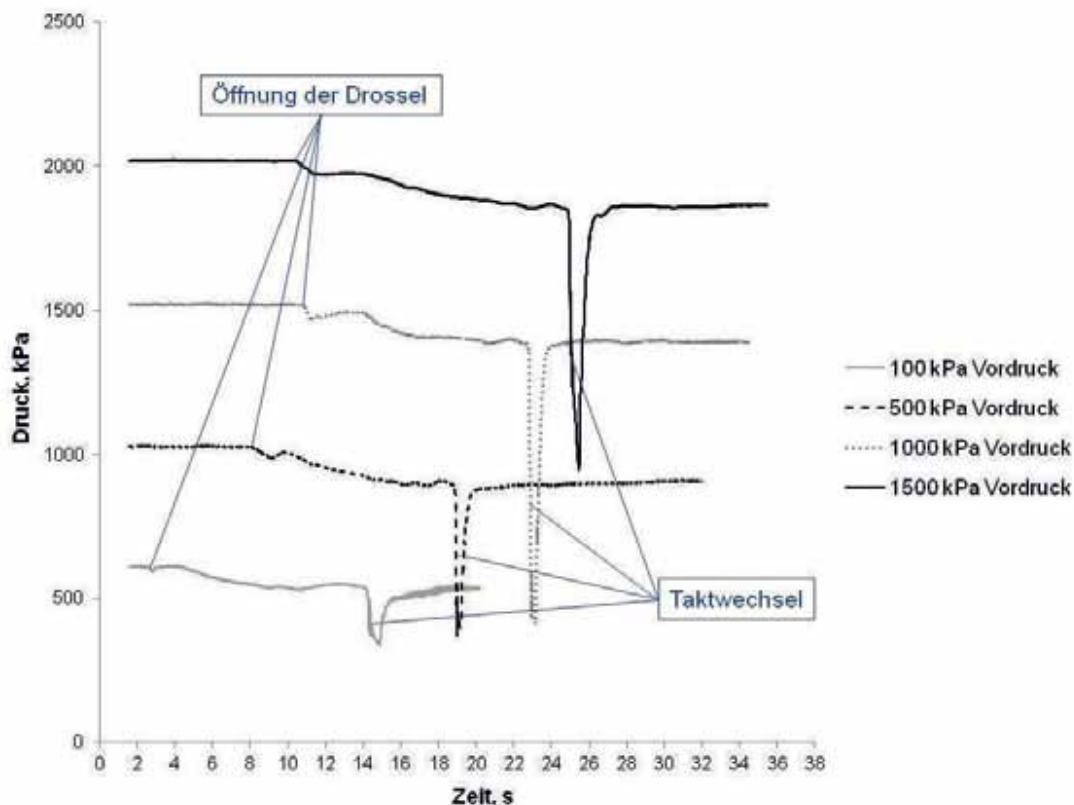


Abb. 29: Druckverlauf zwischen Pumpenausgang der druckluftbetriebenen Kolbenpumpe und Druckregler mit dem Versuchsmedium Wasser

Am Pumpenausgang wurde ein zusätzlicher Druckminderer eingesetzt, um den Schaltimpuls zu glätten. Abb. 30 zeigt den Vergleich des Druckverlaufs mit und ohne Druckminderer bei 500 kPa. Ohne Druckminderer wurde im dargestellten Versuch eine Fördermenge von 737,7 g Wasser pro Minute eingestellt. Mit Druckminderer und 1500 kPa Vordruck wurden 730,4 g Wasser pro Minute gefördert.

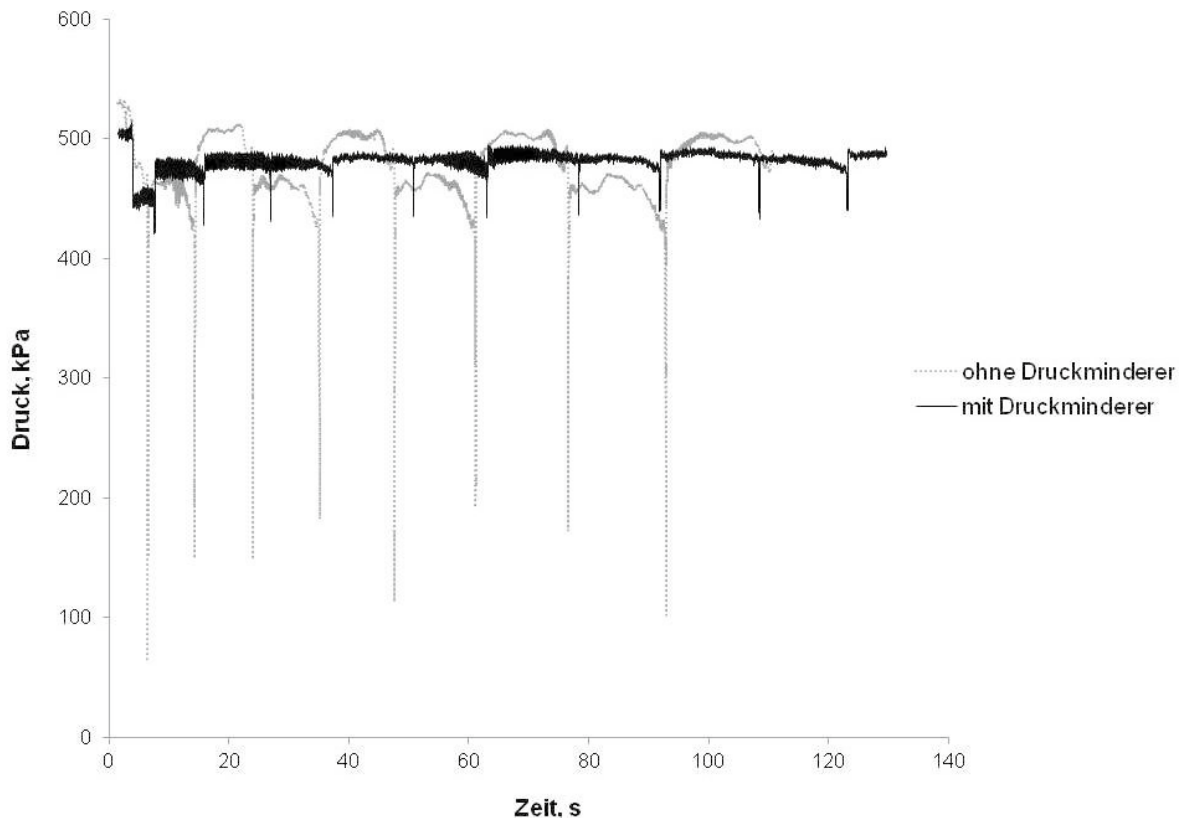


Abb. 30: Vergleich des Druckverlaufs am Pumpenausgang der druckluftbetriebenen Kolbenpumpe bei 500 kPa mit und ohne zusätzliche Druckminderung

Die Standardabweichung des Drucks ohne Druckminderer betrug 31,03 kPa, mit Druckminderer betrug sie 7,91 kPa. Die Stärke und die Dauer der Schaltpulse nehmen mit dem Einbau des Druckminderers ab. Zudem werden Druckunterschiede zwischen den Takten geglättet. Die Pulsation ist aber nach wie vor erkennbar.

6.1.3 Diskussion der Druckquelle für Pflanzenschutzmittel

- Beim Einsatz einer unregelmäßigen Pumpe wird bei fehlender Einspeisung von Pflanzenschutzmittel an den Düsen im ungünstigsten Fall die im Behälter vorhandene Menge zirkuliert. Bei niedrigem Füllstand führt die Zirkulation einer geringen Menge hochviskosen Pflanzenschutzmittels durch einen Rücklauf zu einer schnellen Erwärmung. Diese Temperaturänderung verursacht eine Viskositätsänderung, die bei der Steuerung der Einspeisung berücksichtigt werden muss. Das Förderverhalten der Pumpe kann sich mit der Viskosität des geförderten Mediums ändern. Die chemische Zusammensetzung der Pflanzenschutzmittel ist gefährdet. Eine unregelmäßige Pumpe ist damit zur

Förderung reiner Pflanzenschutzmittel in der geplanten Anwendung ungeeignet.

- In der Vergangenheit wurden bereits hydraulische Übersetzer für den Antrieb durch den Trägerflüssigkeitsstrom als zentrale Direkteinspeisungssysteme entwickelt (zum Beispiel Agroinject, MSR Dosiertechnik GmbH & Co. KG, Wölfersheim; Kap. 2.5). In dieser Arbeit wurde eine druckluftbetriebene Kolbenpumpe aus einer ähnlichen Anwendung (Lackiertechnik) als pneumohydraulischer Übersetzer auf seine Eignung zur Anpassung der Fördermenge an die wechselnden Abnahmemengen bei der Direkteinspeisung an der Düse untersucht. Der Druck der Druckluft blieb dabei konstant und die Fördermenge sollte sich bei weitestgehend konstantem Differenzdruck anpassen.
- Eine Pumpenregelung bietet die Möglichkeit der Anpassung der Fördermengen an den Bedarf der Einspeisungsventile. Als Schwierigkeit stellt sich bei der untersuchten druckluftbetriebenen Kolbenpumpe die Druckpulsation dar, da das Dosierverhalten der Einspeisungsventile hierdurch beeinflusst wird. Der Betrieb der Pumpe ohne Druckminderventil am Pumpenausgang zeigte Druckschwankungen zwischen den Lastphasen im Bereich bis 50 kPa und starke, ca. 1 s lange Druckpulse beim Taktwechsel. Ein Druckminderventil konnte die Druckschwankungen zwischen den Lastphasen glätten, jedoch die Druckpulse nicht vollständig eliminieren.
- Die Anforderungen an die Druckquelle sind grundsätzlich vergleichbar mit denen der zentralen Direkteinspeisung. Rockwell und Ayers (1996) haben beispielsweise ein Direkteinspeisungssystem an der Düse aufgebaut, bei dem ein zentrales DES der Firma Raven Industries mit einer verstellbaren Kolbenpumpe als Druckquelle genutzt wurde. Beim Einsatz der Druckquelle des aufgebauten DNIS als zentrales Direkteinspeisungssystem ist der Einfluss der Pulsation als Störgröße für die Dosierung vermutlich geringer.
- Da eine ventilbedingte Pulsation bereits als Schwierigkeit beim Aufbau des Systems bekannt war, kam als Druckquelle auf dem Versuchsträger ein Druckbehälter zum Einsatz, der das Pflanzenschutzmittel pulsationsfrei unter Druck setzt. Überlagerungen von Druckpulsen verschiedener Störquellen

konnten so verhindert werden. Änderungen des Differenzdruckes bei Veränderungen des Trägerflüssigkeitsdruckes oder der Strömungsgeschwindigkeit im PSM-Leitungssystem treten damit allerdings weiter auf. Deswegen erfolgte die Differenzdruckregelung bei Einstellung eines konstanten PSM-Druckes im Druckbehälter durch einen Flüssigkeitsdruckregler (Abb. 9).

6.2 Aufbau des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel

Die Auslegung des PSM-Leitungssystems wurde neben den Druckverlusten zunächst bestimmt durch die technischen Restmengen. Im Lauf der Entwicklung zeigte sich die Ventilpulsation und ein daraus resultierendes Aufschwingen des Systems als weiterer einflussreicher Faktor. Die Dämpfung der Pulsation wird durch die Anforderung der Reinigbarkeit des Leitungssystems erschwert. Die Differenzdruckregelung einschliesslich der Druckverluste des in 2011 aufgebauten Systems wurden in der Arbeit von Seibold (2011) abgebildet. Die im Folgenden dargestellten Versuchsergebnisse ergänzen diese.

6.2.1 Pulsation an der Teilbreite

Ein festes PSM-Leitungssystem aus Edelstahlrohr mit Abzweigen aus Teflonschlauch erwies sich als ungeeignet zum Aufbau des Versuchsträgers mit den verwendeten Einspeisungsventilen. Abb. 31 zeigt den entsprechenden Vergleich der Pulsation in der PSM-Leitung einer Teilbreite aus Edelstahlrohr und einer flexiblen Leitung aus edelstahldrahtummanteltem Vitonschlauch bei unterschiedlichen Ausbringmengen der Einspeisungsventile. Die Druckpulsation wurde zunächst nach Kapitel 5.3.1 vor dem ersten Einspeisungsventil gemessen. Die Standardabweichung σ des Druckes wurde als Mass für die Stärke der Pulsation gewählt. Die Einspeisungsventile wurden mit verschiedenen Öffnungen betrieben.

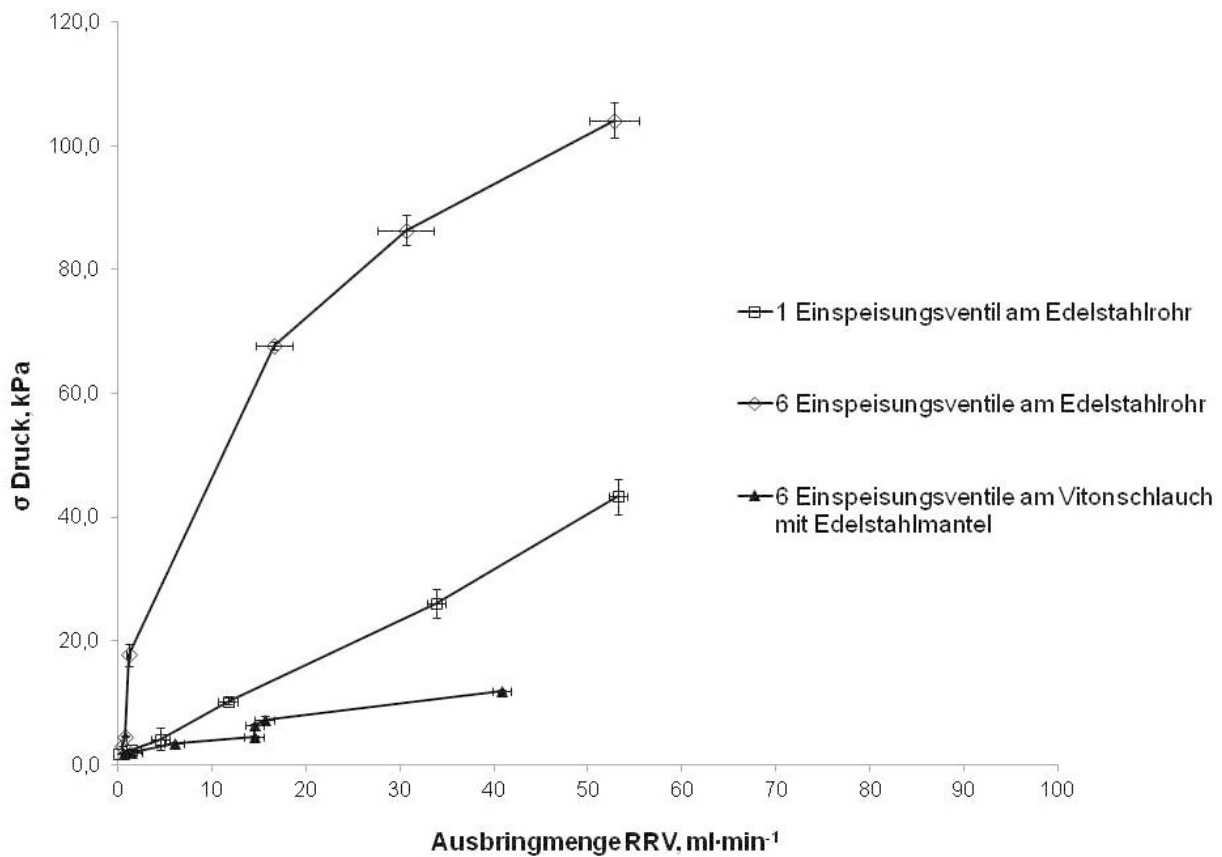


Abb. 31: Standardabweichung des Druckes in der Leitung aus Edelstahlrohr und aus edelstahldrahtummanteltem Vitonschlauch beim Betrieb der Einspeisungsventile ($n=3$)

Die Pulsation steigt mit der Ausbringungsmenge (Abb. 31). Bei Edelstahlrohr als Leitungsmaterial und einer festen Verbindung zum Einspeisungsventil mit einem Abzweig aus Teflonschlauch ist die Pulsation auch bei Betrieb eines einzigen Einspeisungsventils stärker als beim Betrieb einer Teilbreite der PSM-Leitung aus edelstahldrahtummanteltem Vitonschlauch. Durch die feste Verbindung kam es zur Resonanz, und mechanische Schwingungen übertrugen sich zwischen den Einspeisungsventilen.

Es zeigte sich jedoch, dass sich der Querschnitt der Leitungsabschnitte aus edelstahldrahtummanteltem Vitonschlauch mit steigendem Druck erweiterte und die Länge abnahm. Die Direkteinspeisungseinheiten der Teilbreite im Spritzgestänge wurden dadurch mit steigendem Druck zusammengezogen. Als Alternative zum Edeldrahtmantel wurde nach Rücksprache mit dem Hersteller ein Glasfasergeflecht als Ummantelung eingesetzt. Der Kern des Schlauchs blieb gleich. Die Längenänderung wurde an drei Schlauchabschnitten jeweils zwischen den

Einspeisungsventilen mit 50 cm Abstand im Spritzgestänge untersucht. Abb.32 zeigt die Mittelwerte der Längenänderung bei unterschiedlichen Drücken.

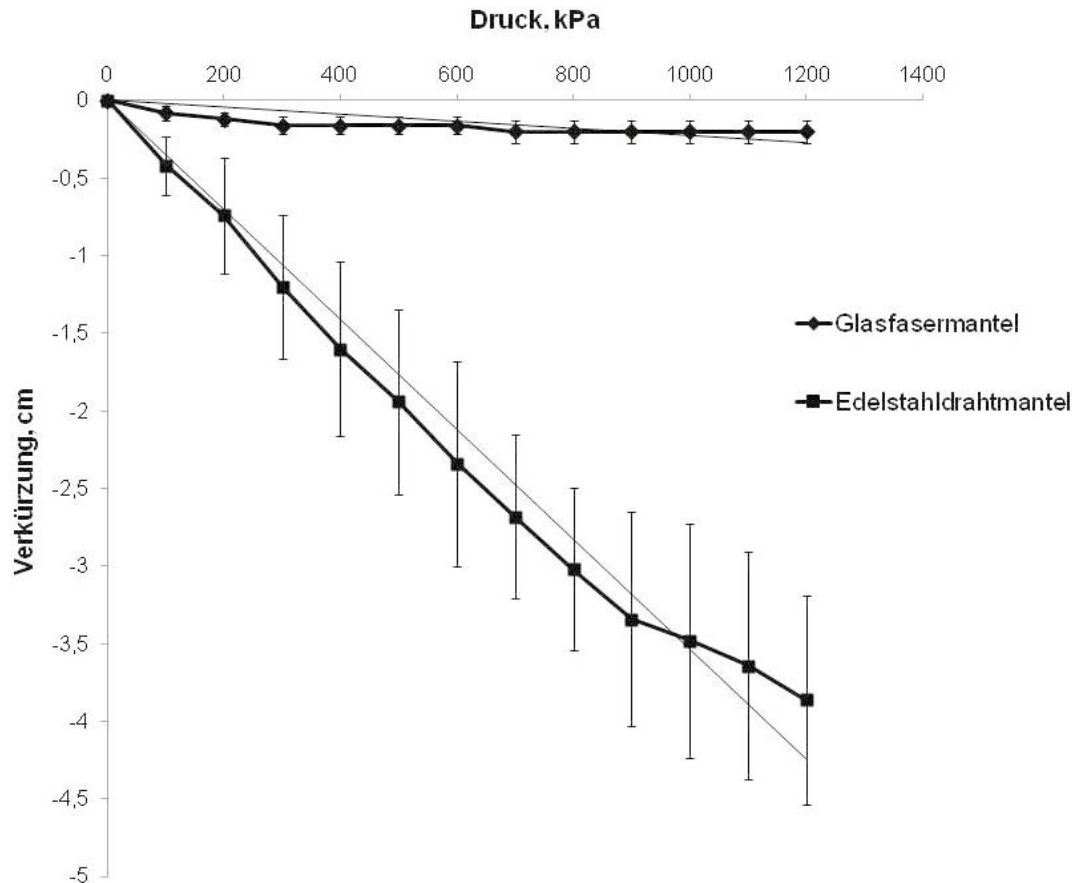


Abb. 32: Mittlere Verkürzung von drei Vitonschlauchabschnitten zwischen den Direkteinspeisungseinheiten im Spritzgestänge (50 cm Abstand) mit unterschiedlichen Mantelmaterialien bei steigendem Druck (n= 3)

Die Längenänderung der Schlauchabschnitte zwischen zwei Direkteinspeisungseinheiten fiel mit dem Glasfasermantel mit 0,2 cm bei einer Druckdifferenz von 1200 kPa deutlich geringer aus. Die stärkste Querschnittserweiterung fand zu Beginn des Druckanstiegs statt (Abb. 32). Der Edelstahlbrahtmantel verkürzte sich weitgehend linear (Bestimmtheitsmass 97 %) um bis zu 3,86 cm bei 1200 kPa. Das Bestimmtheitsmass für einen linearen Zusammenhang der Verkürzung des glasfaserummantelten Schlauchs beträgt für den Druckbereich bis 1200 kPa nur 18 %. Die Ursache liegt darin, dass der Schlauch sich zu Beginn des Druckanstiegs bis ca. 300 kPa ausdehnt, und dann keine weitere Querschnittserweiterung mehr erfolgt.

Die unterschiedlichen Ummantelungen ließen auch verschiedene Dämpfungseigenschaften der Schläuche erwarten. Zur Bestimmung dieser Eigenschaften erfolgte die Druckmessung nach Kapitel 5.3.1 im Falle des glasfaserummantelten Vitonschlauchs direkt am Einspeisungsventil. Abb. 33 zeigt die Standardabweichung des Drucks in dem PSM-Leitungssystem, das mit glasfaserummanteltem Vitonschlauch ausgestattet wurde, bei unterschiedlichen Ausbringmengen der Einspeisungsventile.

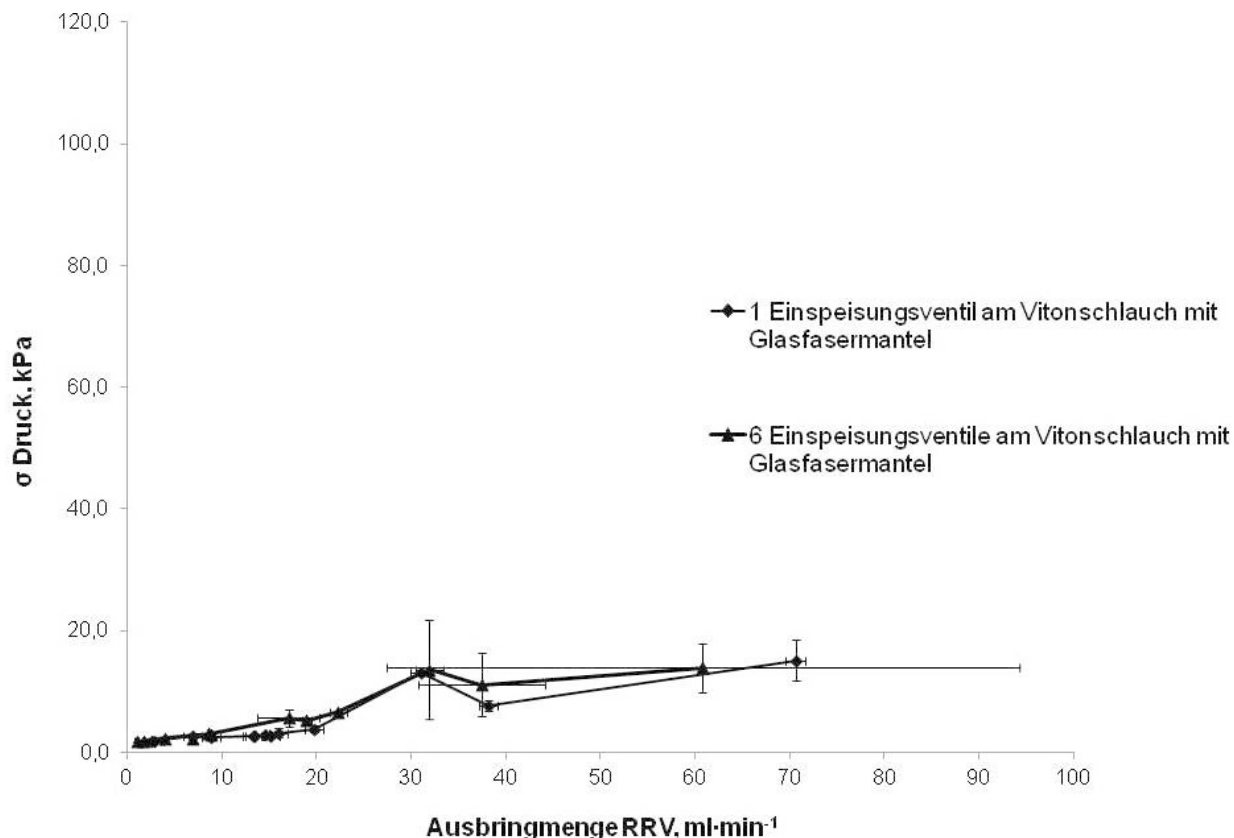


Abb. 33: Standardabweichung des Druckes in der Leitung aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch mit Betrieb von einem und von sechs Einspeisungsventilen ($n=3$)

Es konnte kein Anstieg von σ und damit der Pulsation beim Betrieb aller Einspeisungsventile der Teilbreite im Vergleich zum Betrieb eines Ventils festgestellt werden. Damit besteht keine gegenseitige Beeinflussung durch die Pulsation auf der Teilbreite mit einer PSM-Leitung aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch. Der edelstahldrahtummantelte Vitonschlauch wurde wegen der großen Längenänderung und der daraus resultierenden geringeren Druckstabilität nicht eingesetzt.

6.2.2 Pulsationsminderung im gesamten Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel

Die Dämpfung der durch die Einspeisungsventile bedingten Pulse im Ventilverbund des gesamten PSM-Leitungssystems stellt eine wesentliche Herausforderung beim Aufbau des Versuchsträgers dar. Es zeigte sich im PSM-Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch eine deutliche Neigung zum Aufschwingen.

Abb.34 zeigt diese bei Dosierung einer Glycerin-Wasser-Mischung mit einer Viskosität von 5 mPa·s und Öffnungsanteilen von 20 % an TB 4, 23 % an TB 5 und je 26 % an TB 5 und 6. Auslöser für das Aufschwingen sind vermutlich verschiedene Einflussfaktoren, wozu aber allem voran die pulsweitenmodulierte Ansteuerung der Einspeisungsventile in Kombination mit der flexiblen Schlauchwand zählt. Die Untersuchungen zur Verhinderung der Pulsation fanden an einer Hälfte des Spritzgestänges statt. Eine zunächst untersuchte um 1110 μ s versetzte Ansteuerung der Teilbreiten konnte das Aufschwingen nicht unterbinden.

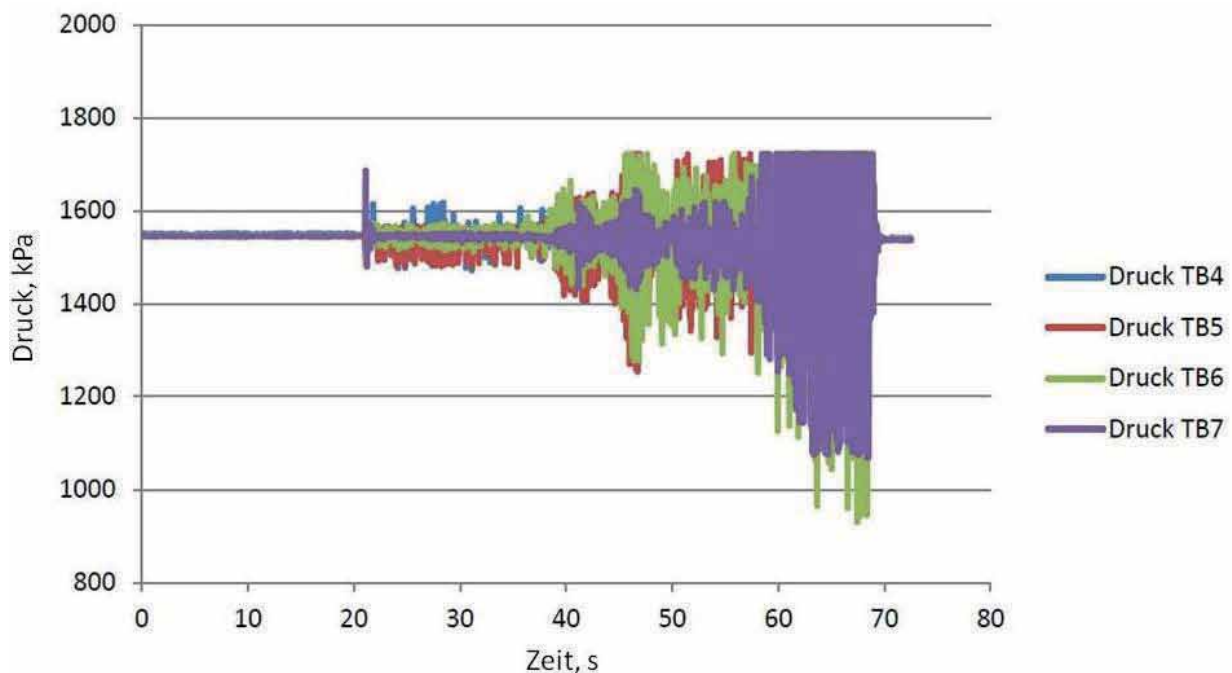


Abb. 34: Aufschwingen des Druckes im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Seibold, 2011)

Deswegen wurde als Ansatzstelle zur Dämpfung direkt das Einspeisungsventil gewählt und nach 5.3.2 an jedem RRV[®] eine Kombination einer flexiblen Stichleitung aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch mit einer Drossel angebracht (Abb.13).

Als Hauptleitung wurde wieder Edelstahlrohr gewählt, das an den Klappstellen des Spritzgestänges mit Schlauchstücken aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch verbunden wurde (Abb.14).

Im Folgenden sind die zugehörigen Ergebnisse dargestellt. Im Druckbehälter wurde der Maximaldruck des Druckluftkompressors eingestellt (ca. 1500 kPa) und der Flüssigkeitsdruckregler geöffnet. Drei Teilbreiten der Einspeisungsventile wurden nacheinander geöffnet und wieder geschlossen und das Versuchsmedium Wasser eingespeist. Abb.35 zeigt den Druckverlauf für 27 % Öffnungsanteil.

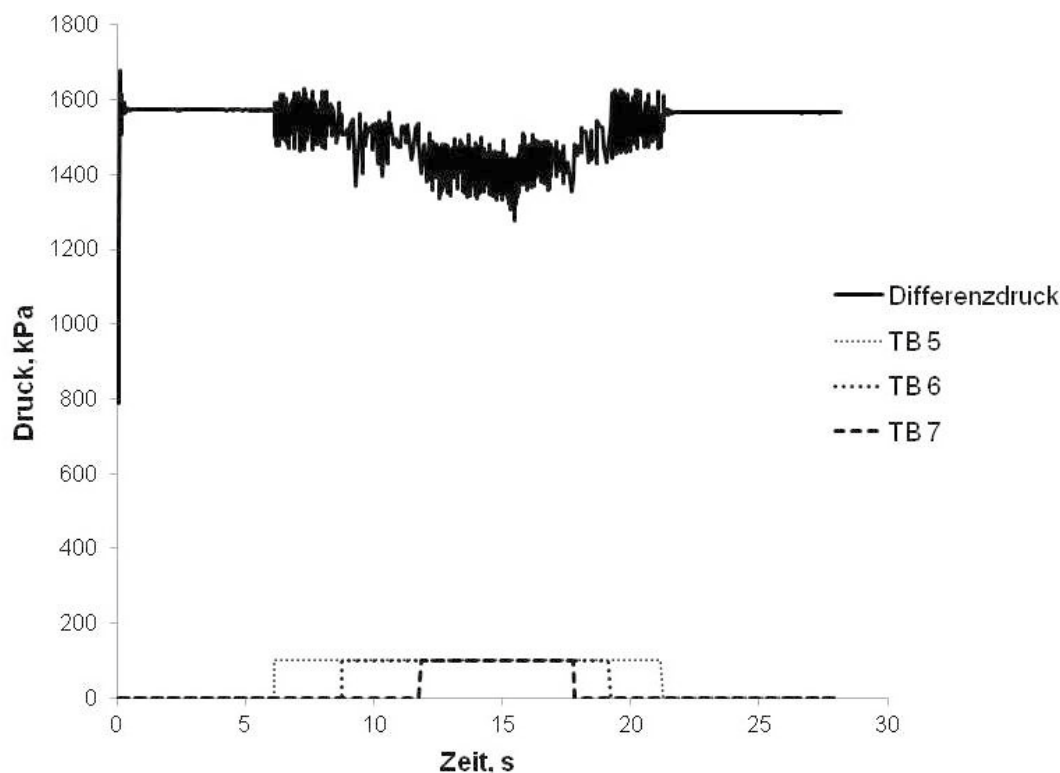


Abb. 35: Druck im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel bei 27 % Öffnung der Einspeisungsventile an TB 5,6 und 7

Mit dem Einsetzen der Strömung ließ sich ein Druckabfall von 1546,60 kPa auf ein arithmetisches Mittel von 1426,61 kPa mit einer Standardabweichung von 34,35 kPa beobachten. Abb. 36 zeigt den Druckverlauf mit 28 % Öffnungsanteil, bei dem der Druck deutlich stärker abfällt.

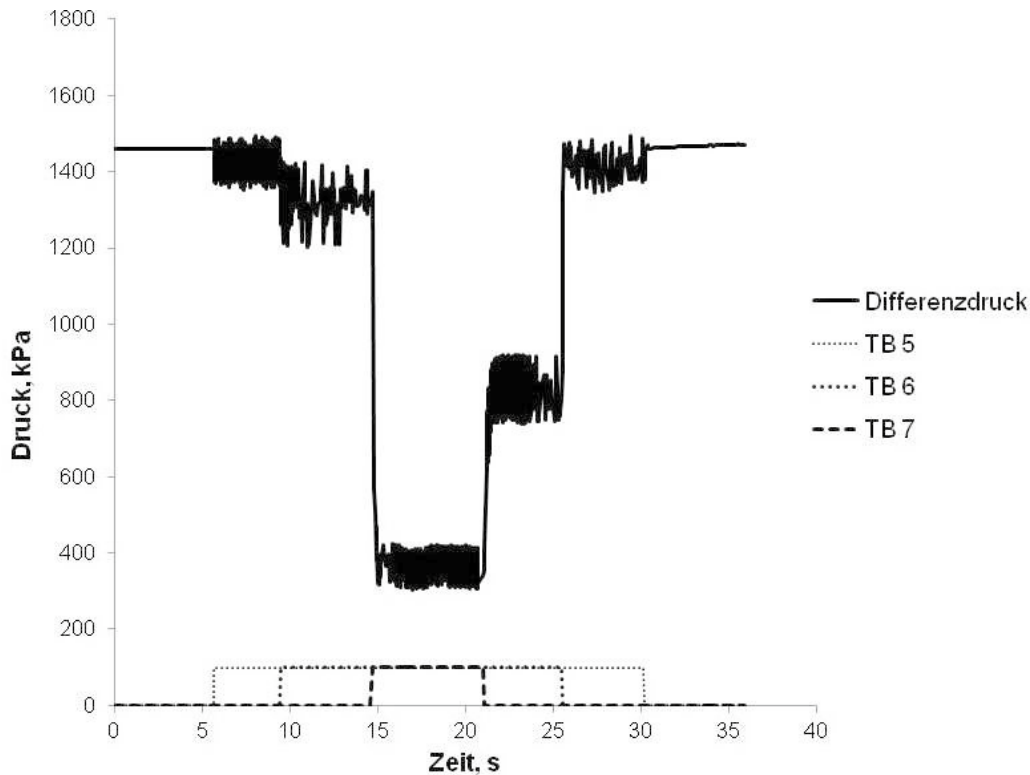


Abb. 36: Druck im Leitungssystem für Pflanzenschutzmittel bei 28 % Öffnung der Einspeisungsventile an TB 5,6 und 7

Die leicht unterschiedlichen Anfangsdrücke kommen durch das Durchlaufen der Hysterese des Druckluftkompressors zustande, wobei der Druckluftregler auf Maximaldruck eingestellt wurde.

Der Mittelwert des Druckes fiel von 1459,69 kPa auf 366,31 kPa. Es wurde eine Standardabweichung von 49,81 kPa ermittelt. Nach dem Schließen der Einspeisungsventile stieg der Druck wieder auf den Anfangsdruck an. Eine unkontrollierbare Resonanzschwingung, wie in Abb. 34 dargestellt, trat nicht auf. Der starke Druckabfall von 1093,38 kPa war bedingt durch eine vermutlich strömungsbedingte, vollständige und nicht kontrollierbare Öffnung der Einspeisungsventile. Die verwendeten RRV[®] neigten wegen eines Fehlers in der verwendeten Ausführung zu diesem Verhalten. Bei dem in Abb. 35 dargestellten Versuch trat der Druckabfall mit der geringeren Öffnung der Einspeisungsventile noch nicht auf.

6.2.3 Differenzdruckregelung im Gesamtsystem

Die Untersuchungen zur Differenzdruckregelung im Gesamtsystem fanden wieder an einer Hälfte des Spritzgestänges am Versuchsträgers statt. Im Druckbehälter wurde erneut der maximal mit dem Druckluftkompressor mögliche Druck von 1500 kPa eingestellt. Mit Hilfe des Flüssigkeitsdruckreglers wurde ein Differenzdruck von 600 kPa eingestellt. Aufgrund der Ventilcharakteristik des RRV[®] ergaben sich damit bei gleichem Öffnungsanteil der PWM höhere Ausbringmengen als bei dem in Kapitel 6.3.2 gewählten Differenzdruck. Der Proportionalwert des Reglers wurde auf 1 und die Nachstellzeit auf 0,01 min gesetzt.

Das zunächst verwendete Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch wies hierbei ein Druckspeicherverhalten auf. Das Volumen der Leitung der halben Breite des Spritzgestänges erweiterte sich bei Druckerhöhung von 0 auf 1500 kPa nach Seibold (2011) um ein Volumen von 18,1 ml. Beim Ausbleiben von Resonanzzuständen wie in Abb.34 dargestellt, erleichtert dies grundsätzlich die Differenzdruckregelung. Die Druckmessung erfolgte mit je einem Drucksensor pro Teilbreite (Abb.10).

Abb. 37 zeigt einen entsprechenden Druckverlauf. Bei der Öffnung von Teilbreite 4 und 5 mit Dosierung von Wasser einer Viskosität von 1 mPa·s fiel der Druck mit dem Einsetzen der Strömung ab. Beim Abschalten war ein entsprechender Anstieg zu beobachten. Es gab eine wahrscheinlich pulsationsbedingte Druckschwankung im Bereich von +52 kPa und – 53 kPa. Ein Aufschwingen des Systems konnte jedoch nicht beobachtet werden.

Seibold (2011) gibt für den Aufbau mit einem Sollwert von 600 kPa Differenzdruck einen maximalen Öffnungsanteil der Einspeisungsventile von 13 % bei Wasser und 26 % bei Glycerin an. Darüber schwingt sich das System auf.

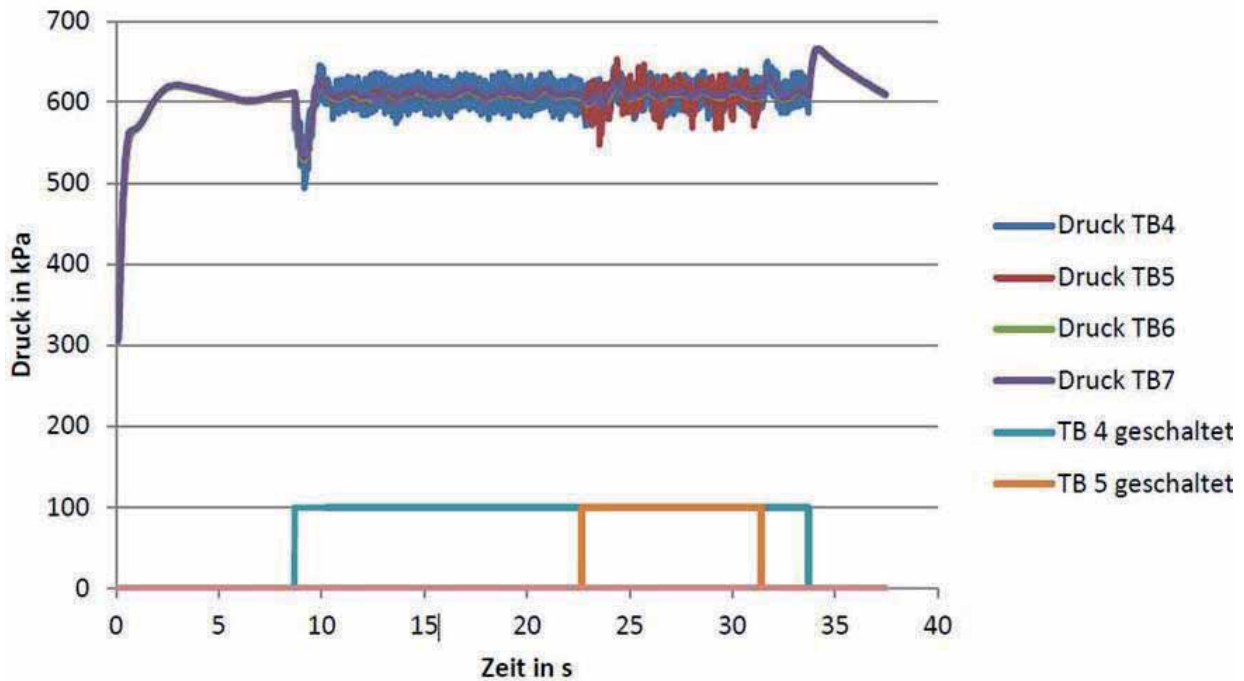


Abb. 37: Geregelter Differenzdruck bei 13 % Öffnung von Teilbreite 4 und 5 im Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Seibold, 2011)

Zur Vermeidung des Aufschwingens wurde das Leitungssystem nach Abb.13 und 14 umgebaut. Aufgrund des deutlich geringeren Druckspeicherverhaltens im Leitungssystem veränderte sich das Verhalten des Druckregelkreises damit deutlich. Die Hauptleitung bestand aus Edelstahlrohr mit glasfaserummanteltem Vitonschlauch an den Klappstellen und je einer Stichleitung aus Vitonschlauch mit einer Drossel am Einspeisungsventil. Bei diesem Aufbau erfolgte die Druckregelung anhand des Signals eines Drucksensors der direkt am Stellglied zentral am Versuchsträger angebracht war (Abb.14). Ausgebracht wurde wieder eine Glycerin-Wasser-Mischung mit 5 mPa·s dynamischer Viskosität ohne Applikation von Trägerflüssigkeit. Abb.38 zeigt den Druckverlauf hinter dem Druckregler bei versetzter Öffnung von TB 5,6 und 7 des Spritzgestänges mit 12,5 % Öffnungsanteil.

Bei Öffnung von TB 5 war eine periodische Schwankung des Druckes zwischen 570 und 650 kPa zu beobachten. Bei Öffnung von Teilbreite 6 schwang sich der Regelkreis stärker auf. Der Druck schwankte zwischen maximal 1143 kPa und 193 kPa. Die Öffnung von TB 7 verstärkte die Schwankung weiter. Eine Anpassung der Reglerparameter konnte keine Verbesserung herbeiführen.

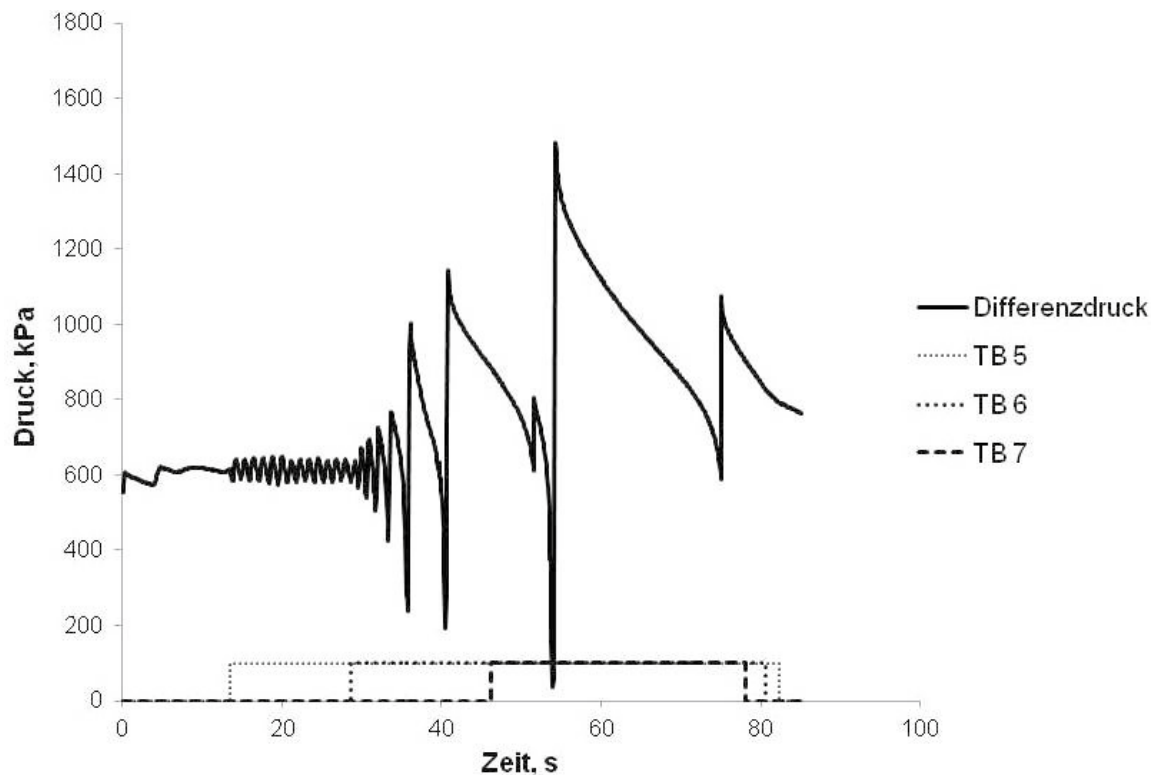


Abb. 38: Geregelter Differenzdruck bei 12,5 % Öffnung von Teilbreite 5,6 und 7

Abb.39 zeigt den Druckverlauf hinter dem Druckregler bei versetzter Öffnung von TB 5,6 und 7 mit 13 % Öffnungsanteil. Die Neigung zum Aufschwingen wurde dabei mit der größeren Ausbringmenge noch verstärkt.

Ein sehr schneller Anstieg des Differenzdruckes und ein entsprechend schneller Abfall vom Sollwert lassen sich wieder beobachten. Der Abbau des Differenzdruckes bei deutlicher Überschreitung des Sollwertes benötigt mehrere Sekunden. Bei Erreichen des Maximaldruckes von 1500 kPa beispielsweise 19 s. Das im Folgenden dargestellte Ventilkennfeld des RRV[®] hat erheblichen Einfluss auf den Druckverlauf im Leitungssystem.

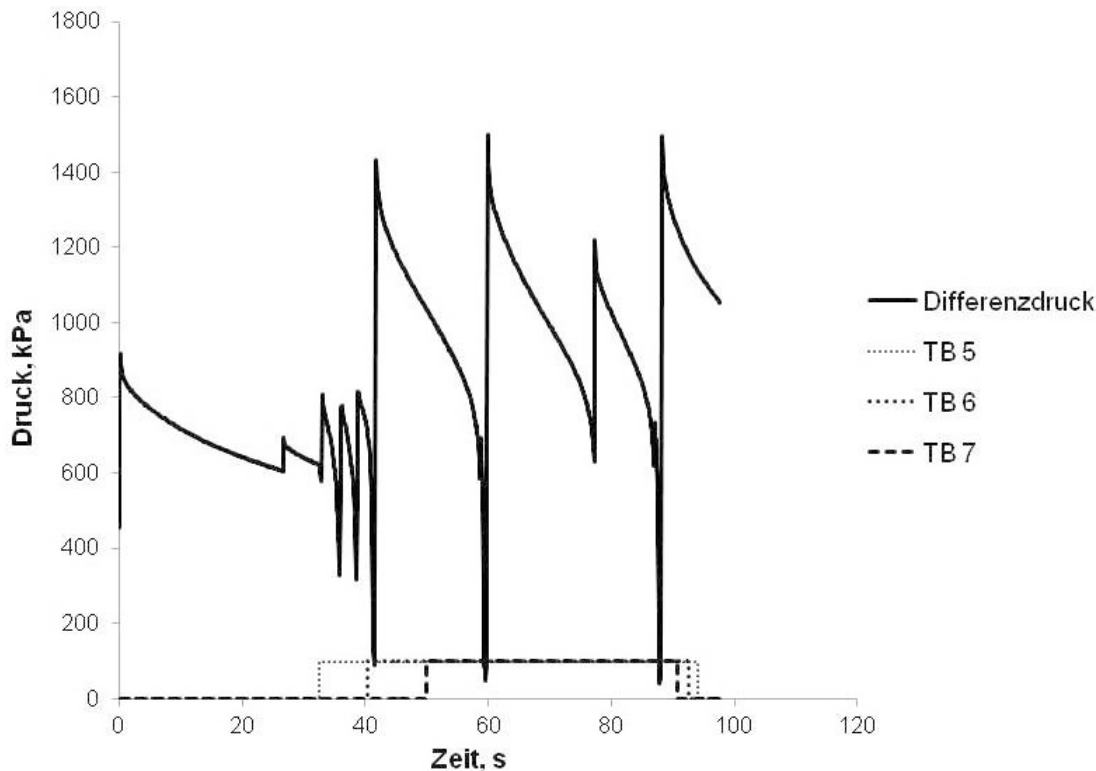


Abb. 39: Geregelter Differenzdruck bei 13 % Öffnung von Teilbreite 5,6 und 7

Im Vergleich zu dem PSM-Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Abb. 10) war in diesem Fall nur noch eine stabile Differenzdruckregelung bis zu 11 % Öffnungsanteil der Einspeisungsventile möglich.

6.2.4 Diskussion des Aufbaus des Leitungssystems

Der Aufbau der PSM-Versorgung der Einspeisungsventile kann grundsätzlich auf mehrere Arten erfolgen. Für diese Arbeit wurde ein Ventilverbund mit einer durchgängigen Hauptleitung mit 10 mm Durchmesser gewählt. Im Verlauf der Entwicklung hat sich allerdings gezeigt, dass die gegenseitige Beeinflussung der Einspeisungsventile bedingt durch Pulsation einen Nachteil dieses Ventilverbundes darstellt.

Eine Aufteilung der Zuleitungen zu den RRV[®] wurde wegen der Zunahme der technischen Restmengen nicht weiter in Betracht gezogen. Einzelne Druckbehälter an jedem Einspeisungsventil sind ebenfalls möglich, würden aber bei Einzeldüsensteuerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten leer. Damit, und mit dem zusätzlichen Gewicht im Spritzgestänge, ist die praktische Umsetzbarkeit nicht gegeben. Zukünftig kann der Querschnitt des PSM-Leitungssystems zu den Enden

des Spritzgestänges hin auch abnehmend gestaltet werden, um technische Restmengen zu vermindern und einheitliche Strömungsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Das hydraulische System für Pflanzenschutzmittel des Versuchsträgers ist grundsätzlich dadurch gekennzeichnet, dass unterschiedliche Betriebszustände eintreten können. Im Spritzgestänge befinden sich an jeder Leitung 42 Einspeisungsventile, die teilbreitenweise zufällig geöffnet werden und eine weite Mengen und Viskositätsspanne dosieren (Kapitel 5.6.1, 5.9). Im Ventilverbund der RRV[®] trat dabei ein Aufschwingen auf, das zunächst im Rahmen der Arbeit zur Differenzdruckregelung von Seibold (2011) auf den Aufbau des PSM-Leitungssystems selbst zurückgeführt werden konnte. Zusätzlich wurde dadurch die Differenzdruckregelung erschwert. Als Hauptursache für das beobachtete Aufschwingen konnten ventilbedingte Druckpulsationen und die flexible Schlauchwand des verwendeten glasfaserummantelten Vitonschlauchs ausgemacht werden.

Eine versetzte Ansteuerung der Einspeisungsventile zur Vermeidung des Aufschwingens ist wenig erfolgversprechend, da die Anzahl möglicher Öffnungszustände im System vermutlich zu groß ist. Ein Versuch mit einer um 1110 μ s versetzten Ansteuerung der Teilbreiten mit dem PSM-Leitungssystem aus Vitonschlauch (nach Abb. 10) brachte keine Verbesserung.

Daher wurde versucht, die Pulsation als Hauptursache des Aufschwingens direkt am Einspeisungsventil zu unterbinden. Auf den Einsatz von Membranpulsationsdämpfern wurden wegen der Anforderung der einfachen Reinigbarkeit des PSM-Leitungssystems verzichtet und der Aufbau nach Abb.13 entwickelt. Eine Kombination aus einer flexiblen Stichleitung zu jedem RRV[®] mit einer Drossel am Übergang zum Edelstahlrohr dient als Pulsationsdämpfer. Dazu wurde ein festes Edelstahlrohr ohne Druckspeicherverhalten als Hauptleitung genutzt. Dieses wurde nur an den Klappstellen des Spritzgestänges mit Abschnitten aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch verbunden. Damit konnte das Aufschwingen des Systems beim Betrieb der Einspeisungsventile ohne Flüssigkeitsdruckregelung verhindert werden.

Die Regelung des Differenzdruckes wurde jedoch durch diesen Aufbau des PSM-Leitungssystems, aufgrund des schnellen Ansprechens auf Veränderungen der Einstellung des Stellgliedes, erschwert. Im Vergleich zu dem PSM-Leitungssystem aus glasfaserummanteltem Vitonschlauch (Abb. 10) war eine stabile Differenzdruckregelung nur noch mit einem geringen Öffnungsanteil des Einspeisungsventils möglich. Zur Verbesserung der Regelbarkeit ist daher in Zukunft wieder die kontrollierte Einbringung von Dämpfungsvolumen in das PSM-Leitungssystem nötig. Damit sollte der Aufbau des Regelkreises weiter untersucht werden. Da das in den hier dargestellten Versuchen verwendete Einspeisungsventil zum Offenbleiben neigte, ist nach Abstellen dieses Fehlers ebenfalls eine verbesserte Differenzdruckregelung zu erwarten.

6.3 Entwicklung des Einspeisungsventils

6.3.1 Leistungsaufnahme

Die Kombination aus der Ventilschule und der Einstellung des Microcontrollers wird im Folgenden als Konfiguration des Einspeisungsventils bezeichnet (Tab. 1). Die angepasste Konfiguration aus Tab. 1 stellt gegenüber der ursprünglichen ein Beispiel der Abstimmung der RRV[®]-Parameter dar. Der maximal mögliche Differenzdruck zur Dosierung von maximal 40 ml·min⁻¹ Glycerin beträgt hier 600 kPa. Die Windungszahl der Ventilschule wurde erhöht, um den Spulenstrom stärker als im ursprünglichen Aufbau begrenzen zu können. Die Drahtstärke musste aufgrund des eingeschränkten Bauraumes des gegebenen Ventilkörpers reduziert werden, wodurch der Widerstand von 1 Ω auf 5,7 Ω anstieg.

Tab. 1: Konfiguration des ursprünglichen und des angepassten RRV[®]

RRV [®]	Spule		Microcontroller	
	Drahtdurchmesser, mm	Windungszahl	Anzugstrom, A	Haltestrom, A
ursprünglich	5,60	250	10	2
angepasst	3,55	600	1,6	0,3

Abb. 40 gibt die Stromaufnahme mit der ursprünglichen und der angepassten Konfiguration des RRV[®] bei der Einspeisung von 0,1 bis über 40 ml·min⁻¹ Glycerin mit 600 kPa Differenzdruck wieder.

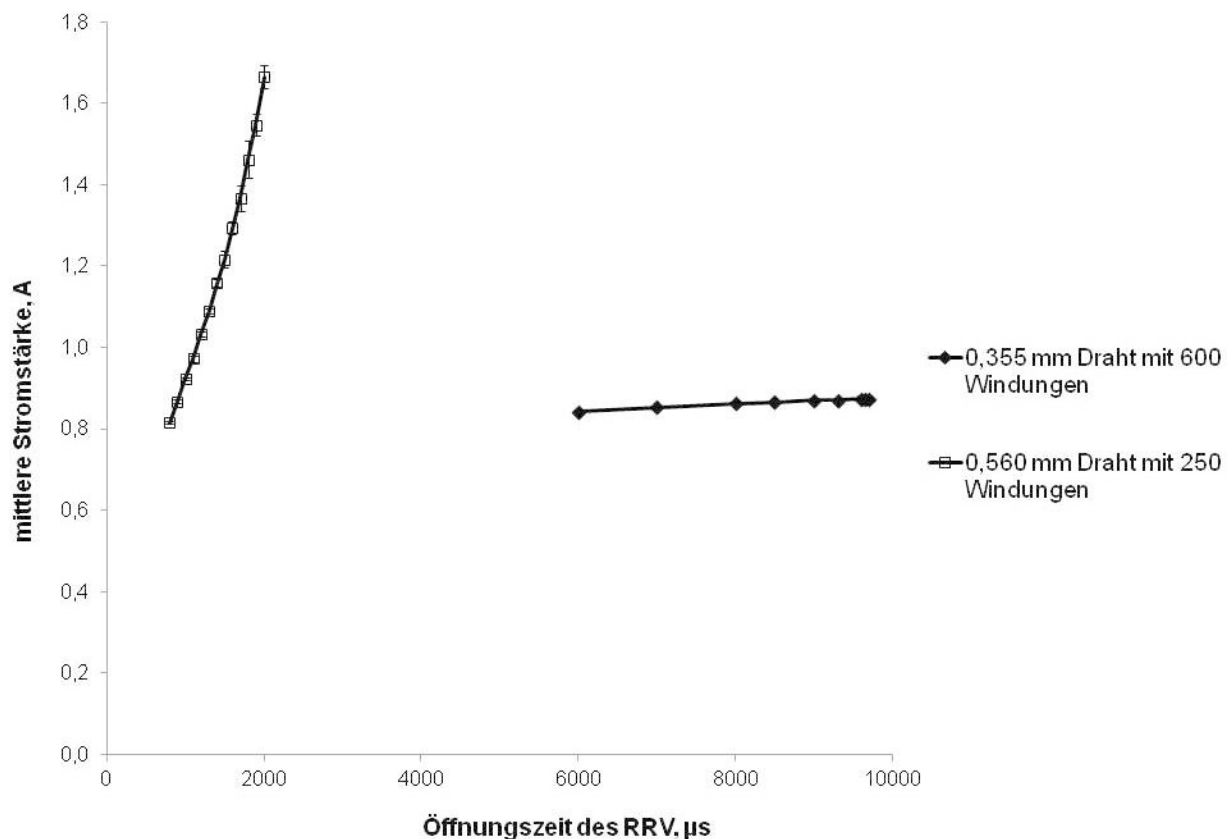


Abb. 40: Stromaufnahme mit der ursprünglichen und der angepassten Konfiguration des Einspeisungsventils (100 Hz Steuerfrequenz, n= 3)

Der Kurvenverlauf der Stromaufnahme ist vergleichbar mit dem der Leistungsaufnahme, da die Versorgungsspannung nahezu konstant bleibt. Anzugs- und Haltestrom konnten im Falle des angepassten Einspeisungsventils stark reduziert werden (Tab. 1). Die Kennlinie wurde dadurch zu hohen Öffnungsanteilen verschoben und verläuft verhältnismäßig flach. Die mittlere Leistungsaufnahme zur Dosierung von über 40 ml·min⁻¹ Glycerin ist durch die Anpassung von 40,33 W mit 20 % Öffnung bei der ursprünglichen Konfiguration, auf 21,13 W mit 97 % Öffnung bei der angepassten Konfiguration gesunken.

Die angepasste Konfiguration wurde für den maximalen Differenzdruck von 600 kPa gewählt. Um den Dosierbetrieb auch bei höherem Differenzdruck gewährleisten zu können, wurde der Anzugstrom auf 2 A und der Haltestrom auf 1 A bei Verwendung

der Ventilschleife mit 0,355 mm Draht und 600 Wicklungen erhöht. Die mittlere Leistungsaufnahme bei 90 % Öffnung betrug dabei 25,94 W.

6.3.2 Ventilerwärmung und Einfluss auf die Dosierung

Die im Folgenden dargestellten Versuche wurden mit dem angepassten RRV[®] durchgeführt. Diese Konfiguration zeigt eine geringere Eigenerwärmung als die ursprüngliche Konfiguration der Einspeisungsventile.

Abb. 41 zeigt den Temperaturanstieg im RRV[®] bei Dosierung von Glycerin mit 600 kPa Druck und unterschiedlichen Öffnungsanteilen des pulsweitenmodulierten Einspeisungsventils. Die Temperatur des Glycerins stieg von der Umgebungstemperatur 23,0°C bei 80 % Öffnungsanteil innerhalb von 10 min bis auf durchschnittlich 39,2°C an. Bei der größten dargestellten Ventilöffnung von 96 % stieg der Mittelwert aus drei Wiederholungen lediglich auf 33,1°C nach 10 min an.

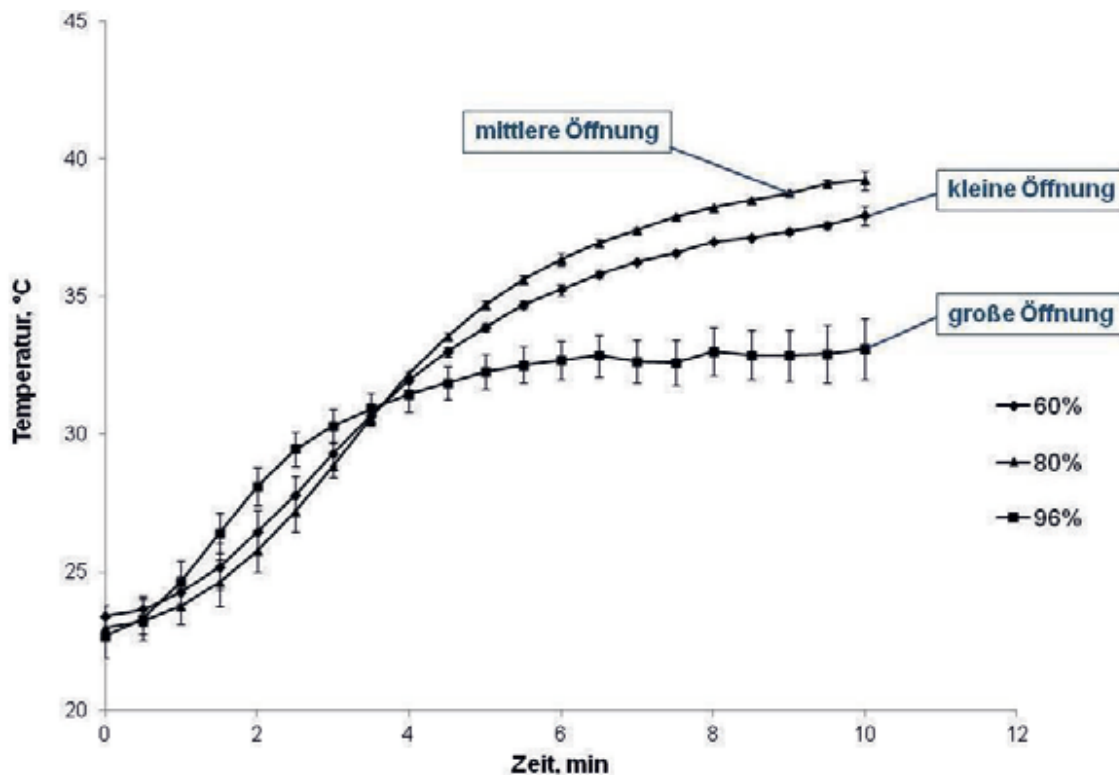


Abb. 41: Temperaturanstieg von Glycerin im RRV[®] ohne Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 80 % und 96 % Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)

Nach einem schnellen Anstieg nimmt die Temperatur im Einspeisungsventil nach 10 min nur noch wenig zu und nähert sich in allen drei Fällen asymptotisch einer vom Wärmetransport aus dem RRV[®] abhängigen Gleichgewichtstemperatur.

Anschließend wurde die kühlende Wirkung der am Ventilsitz vorbeiströmenden Trägerflüssigkeit untersucht. Abb. 42 zeigt den Temperaturanstieg im Einspeisungsventil bei Dosierung von Glycerin mit 600 kPa Differenzdruck und Ausbringung von 1 l Wasser pro Minute als Trägerflüssigkeit. Die Temperatur des Wassers betrug 18°C. Bei einer Ventilöffnung von 80 % ist die Temperatur nach 10 min im Durchschnitt auf 33,3°C gestiegen. Bei Öffnungsweiten von 60 und 70 % wurden geringere Temperaturanstiege verzeichnet (ΔT_{max} 26,2 bzw. 32,4°C). Folglich erzeugte bei vorbeiströmender Trägerflüssigkeit die größte Öffnung auch die stärkste Erwärmung. Dies steht im Gegensatz zu den zuvor in Abb. 41 dargestellten Versuchen, bei denen der Wärmetransport nur durch das vom Einspeisungsventil dosierte Medium erfolgte.

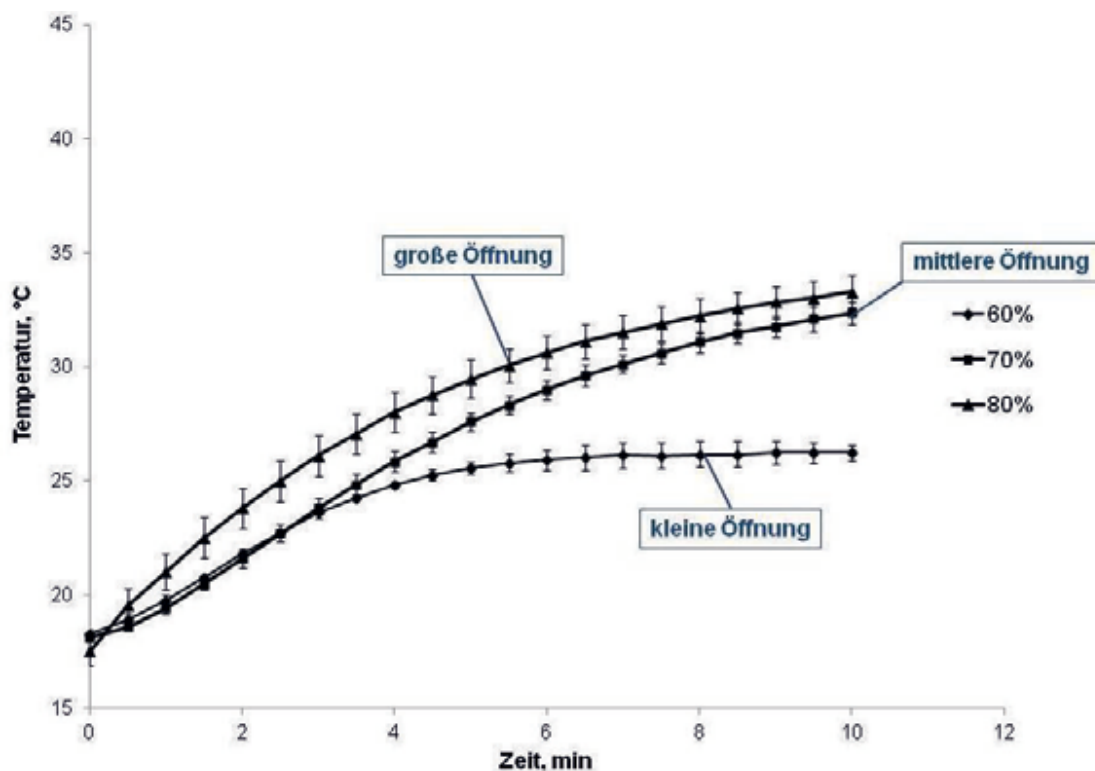


Abb. 42: Temperaturanstieg von Glycerin im RRV[®] mit Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 70 % und 80 % Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)

Die Anpassung der entsprechenden Öffnungsanteile war erforderlich, da das Einspeisungsventil bei größeren Öffnungsanteilen im Versuch mit vorbeiströmender Trägerflüssigkeit vollständig öffnete und damit auch wesentlich größere Mengen dosierte.

Zu den Temperaturmesswerten wurde jeweils die entsprechende Viskosität des Glycerins berechnet (Kapitel 5.9). Abb. 43 zeigt die Abnahme der Viskosität des Glycerins im RRV[®] bei Dosierung mit 600 kPa Differenzdruck und Ausbringung von 1 l Wasser pro Minute als Trägerflüssigkeit mit unterschiedlichen Öffnungsanteilen des Einspeisungsventils.

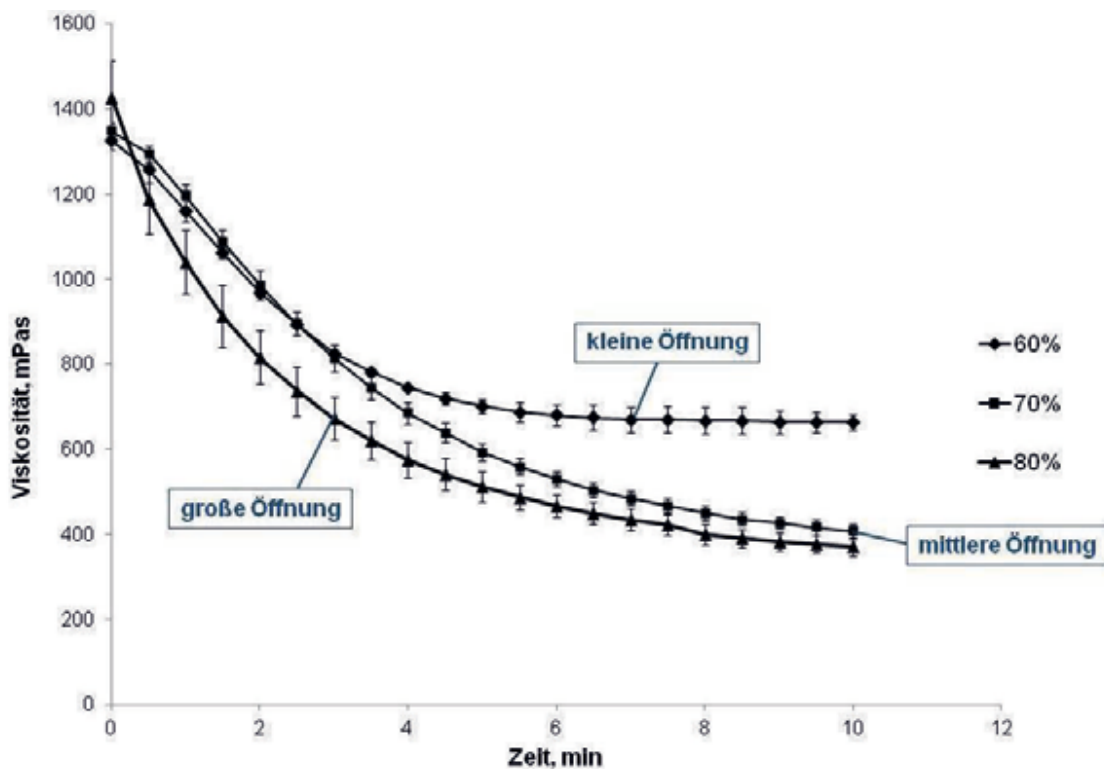


Abb. 43: Viskositätsänderung von Glycerin durch die Erwärmung des RRV[®] mit Ausbringung von Trägerflüssigkeit bei 60 %, 70 % und 80 % Öffnungsanteil des Einspeisungsventils (n= 3)

Die Viskosität verringerte sich in Abhängigkeit vom Öffnungsanteil bis auf die Hälfte bzw. ein Drittel der Anfangsviskosität. Die dosierte Menge stieg dabei bei jeweils gleicher Ansteuerung mit der Temperatur des Glycerins an (z.B. von 3,86 ml·min⁻¹ in der ersten Minute auf 9,54 ml·min⁻¹ nach 10 min bei 96 % Öffnungsanteil ohne Ausbringung von Trägerflüssigkeit).

6.3.3 Kennfeld des RRV[®] in Abhängigkeit von Druck und Viskosität

Grundsätzlich verändert sich das Kennfeld des Einspeisungsventils mit der Anpassung der Ventilkomponenten Sitz und Spule sowie Veränderungen der Einstellung der Strombegrenzung des Microcontrollers. Für die im Folgenden dargestellten Dosierversuche wurden die RRV[®] in Bezug auf das vorangegangene Kapitel vorgewärmt, um Viskositätsänderungen des dosierten Mediums im Ventil während des Versuchs einzuschränken.

6.3.3.1 Öffnungskennlinie

Die Öffnungskennlinie eines Einspeisungsventils mit der ursprünglichen Spule und 10 A Anzugstrom für 3000 μs bei der Dosierung von Wasser mit 400 kPa Differenzdruck ist in Abb. 44 dargestellt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung aus drei Wiederholungen an.

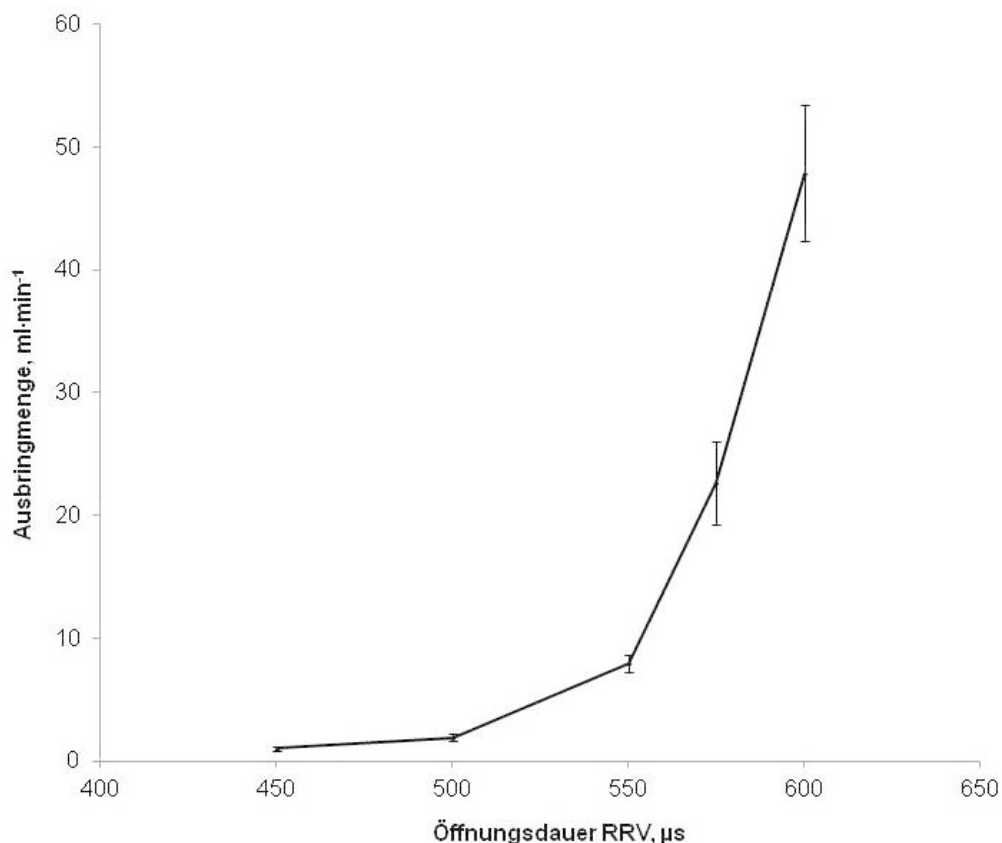


Abb. 44: Öffnungskennlinie des Einspeisungsventils (100 Hz Steuerfrequenz) bei der Dosierung von Wasser mit 400 kPa Druck ($n=3$)

Die Öffnungskennlinie zeigt im dargestellten Versuch einen exponentiellen Anstieg der Ausbringmenge mit der Erhöhung der Öffnungsdauer. Des Weiteren unterliegt die Ausbringmenge mit Erhöhung der Öffnungsdauer stärkeren Streuungen. Die Öffnungsdauer bleibt in diesem Beispiel deutlich unter 3000 μs . Dies entspricht der Dauer des Anzugstroms bei der Ventilöffnung. Damit wird die Öffnung nur durch den Anzugstrom des Microcontrollers bedingt, und eine Reduzierung der Stromstärke auf den eingestellten Haltestrom findet wegen der kurzen Öffnungsdauer nicht statt. Dies wurde erst im Rahmen der Anpassung der Konfiguration möglich.

6.3.3.2 Druckkennlinie

Zur Öffnung des Einspeisungsventils wird die Ventilkugel gegen den anstehenden Flüssigkeitsdruck aus dem Ventilsitz bewegt. Damit verbunden ist mit ansteigendem Druck ein höherer Kraftaufwand zur Ventilöffnung bzw. ist die entsprechende Abnahme der Ausbringmenge für das Einspeisungsventil kennzeichnend. Dies wird mit dem folgenden Ergebnis verdeutlicht. Dabei wurde die für 600 kPa angepasste Konfiguration des RRV[®] mit einem Ventilsitz aus PEEK verwendet. Zunächst sind in Abb.45 die Druckkennlinien des Einspeisungsventils für die Dosierung von Glycerin-Wasser-Mischungen mit den mittleren Viskositäten 5 mPa·s, 80 mPa·s und 346 mPa·s bei 20°C dargestellt. Im Versuch wurde jeweils die Öffnung des Einspeisungsventils konstant gehalten und der Druck variiert. Dargestellt ist die Abnahme der Ausbringmenge mit ansteigendem Druck. Die Kennlinie der 5 mPa·s Viskosität schneidet die der höheren Viskositäten zwischen 500 und 550 kPa Druck. Außerdem befindet sich diese Kennlinie bei 500 kPa deutlich oberhalb der beiden anderen. Bei dem kleinen Öffnungsanteil könnte die Ursache hierfür ein starker Anstieg der Temperatur im Einspeisungsventils mit geringem Wärmeabtransport durch das dosierte Medium sein.

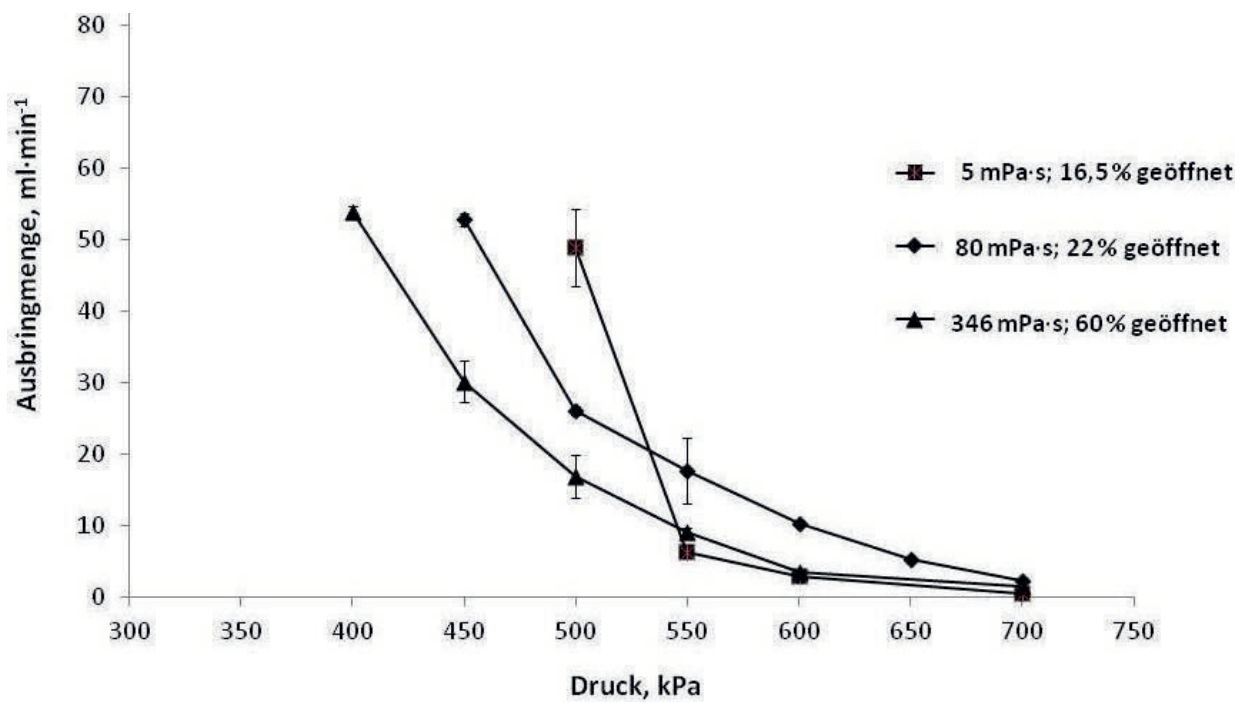


Abb. 45: Beispiel für Kennlinien des Einspeisungsventils für mittlere Viskositäten des Einsatzspektrums (n= 3)

Die Abb. 46 zeigt die Druckkennlinien für die Viskositäten 1 mPa·s und 735 mPa·s. Diese steigen bei der Einstellung des Differenzdrucks auf 550 kPa sprunghaft an. Folglich liessen sich bei dieser Ventilkonfiguration höhere Ausbringungsmengen bei einer Viskosität des dosierten Mediums am oberen und unteren Ende des Einsatzspektrums schlecht kontrollieren.

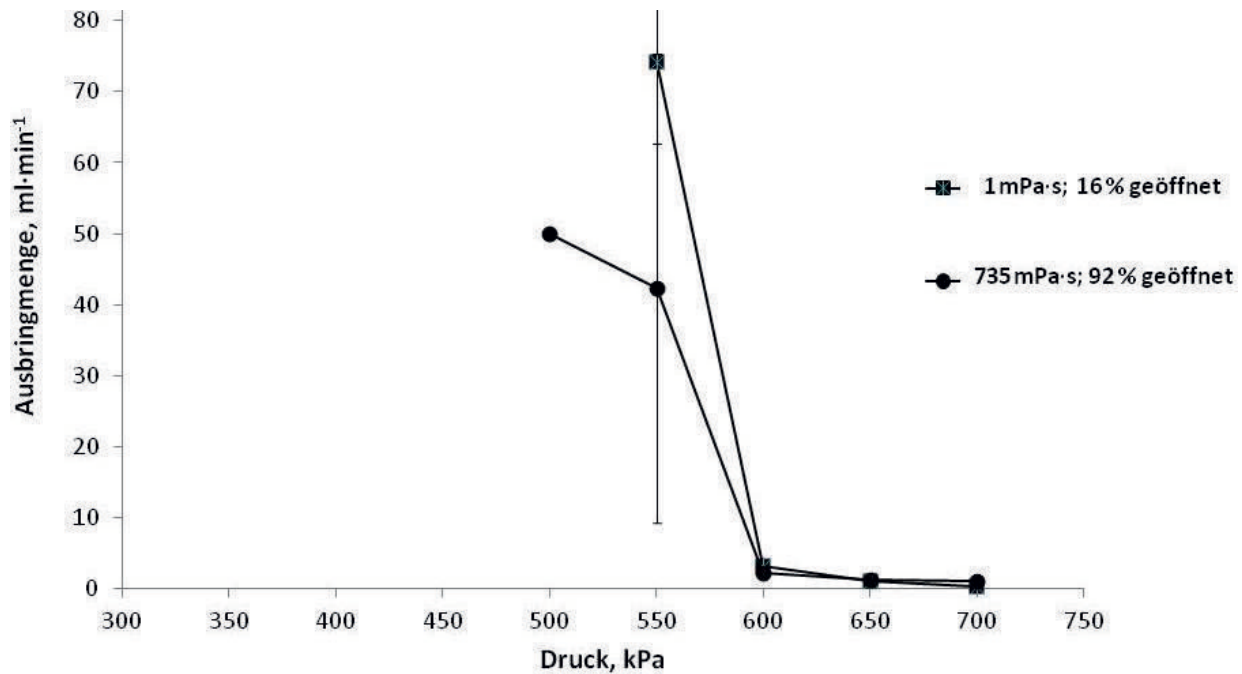


Abb. 46: Beispiel für Kennlinien des Einspeisungsventils für hohe und niedrige Viskosität des Einsatzspektrums ($n=3$)

Für den Betrieb auf dem Versuchsträger wurde zunächst eine Ventilkonfiguration für den Druckbereich bis 1500 kPa gewählt und die eingesetzte Viskositätsspanne eingeschränkt. Bei dieser Vorserie der Einspeisungsventile ist beim Betrieb aufgefallen, dass sie sich nicht zuverlässig schliessen lassen. Der Grund für dieses unerwünschte Schließverhalten war, dass die Strömungskanäle der Einspeisungsventile lediglich 2 mm anstelle von 2,4 mm Durchmesser aufwiesen. Das nachträgliche Aufbohren der Strömungskanäle verbesserte das Ventilverhalten und die Steuerung der Dosierung deutlich.

6.3.4 Diskussion der Ventilentwicklung

6.3.4.1 Leistungsaufnahme

Ziel der Veränderungen der Ventilschule war eine Anpassung an die mit dem Microcontroller maximal möglichen Stromstärken zur Optimierung der Leistungsübertragung zwischen Leistungselektronik und Einspeisungsventil. Bei komplett geöffnetem Betrieb eines Einspeisungsventils mit vollständig gefüllter Ventilschule haben Änderungen an der Ventilschule selbst nach Formel 13 keinen Einfluss auf die magnetische Flussdichte an der Ventilkugel. Durch die Erhöhung der Windungszahl um den Faktor 2,4 kam es allerdings zu einem Anstieg der Induktivität,

da die Windungszahl in Formel 16 quadratisch eingeht. Das führt beim pulsweitenmodulierten Dosierbetrieb nach Formel 15 zu einer stärkeren Freisetzung von im Magnetfeld der Spule gespeicherter Energie, die im Microcontroller in Form von Wärme frei wird. Die anschließend erfolgte Reduzierung der Leistungsaufnahme mit Hilfe der Begrenzung des Spulenstroms am Microcontroller wirkt dem nach Formel 15 entgegen, da hier die Stromstärke quadratisch eingeht. Durch diese Einstellungen kommt es zusätzlich zu einer Verschiebung des Kennfeldes des Einspeisungsventils. Wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, erfolgte die Untersuchung und Einstellung der Strombegrenzung bei der Einspeisung von Glycerin mit 600 kPa Differenzdruck. Zur Erweiterung des Druckbereichs bis 1500 kPa und um größere Öffnungsanteile für die Reinigung des Leitungssystems zu erreichen, wurde die Strombegrenzung des Microcontrollers anschließend auf 2 A Anzugstrom und 1 A Haltestrom erhöht. Der Anzugstrom wurde so insgesamt um den Faktor 5 verringert, der Haltestrom halbiert.

Der Anzugstrom bestimmt vor allem bei geringen Öffnungsanteilen die Leistungsaufnahme des RRV[®]. Durch die Anpassung der Strombegrenzung verschob sich das Kennfeld des Einspeisungsventils, so dass die Einstellung höherer Öffnungsanteile für die Anwendung erforderlich wurde. Dadurch wurde der Bereich des Haltestroms im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration des Einspeisungsventils bei der Pulsweitenmodulation erst erreicht. Die Leistungsaufnahme zur Versorgung aller RRV[®] des Versuchsträgers konnte so insgesamt auf annähernd 3,15 kW bei 90 % Öffnung aller Einspeisungsventile abgesenkt werden.

6.3.4.2 Erwärmung und Einfluss auf die Dosierung

Der konstruktive Aufbau des Einspeisungsventils bedingt einen Einfluss der Ventiltemperatur auf die Temperatur des dosierten Mediums, dessen Viskosität, und damit auf die dosierte Menge. Ohne vorbeiströmende Trägerflüssigkeit steigt beispielsweise bei 23°C Umgebungstemperatur die Temperatur der Simulanz mit kleinen Öffnungsanteilen des RRV[®] innerhalb von 10 min auf über 40°C an. Mit größeren Ausbringmengen wird in diesem Fall die Wärme stärker aus dem Einspeisungsventil transportiert.

Nach guter fachlicher Praxis sind Spritzeinsätze bei dauerhaften Temperaturen über 25°C untersagt (BMELV, 2010). Die durch die Einspeisungseinheit strömende Trägerflüssigkeit wirkt also bei praxisüblichen Applikationsbedingungen für PSM kühlend auf das Einspeisungsventil. Bei einer Temperatur der Trägerflüssigkeit von 18°C war mit der höchsten untersuchten Einspeisungsmenge ein maximaler Anstieg der Temperatur des Mediums im RRV[®] auf 35°C zu beobachten. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass bei erstmaligem Beginn des Dosiervorgangs mit hochviskosen Medien die Ausbringmenge mit der Betriebsdauer und der damit verbundenen Erwärmung des Einspeisungsventils anstieg. Dieser Effekt wird durch eine vorbeiströmende Trägerflüssigkeit mit deutlich niedrigerer Temperatur jedoch abgeschwächt. Eine mögliche Vorwärmung der Ventilschule sollte noch weiter untersucht werden. Mit einem nicht vorgewärmten Einspeisungsventil ist eine zuverlässige Dosierung von hochviskosen Medien ohne Regelung der Ventilöffnung anhand der ausgebrachten Menge nicht möglich. Der Einfluss höherer Umgebungstemperaturen und die damit einhergehende Erwärmung der Trägerflüssigkeit sollte ebenfalls betrachtet werden. Bei den dargestellten Messungen wäre die Stabilität von PSM-Formulierung nicht gefährdet gewesen. Zur Einschätzung ob ein Gefährdungspotential, vor allem für die hochviskosen PSM-Formulierungen, unter Praxisbedingungen ausgeschlossen werden kann, ist eine weitere Erfassung der Temperatur des Mediums im Einspeisungsventil unter Feldeinsatzbedingungen jedoch sicherlich hilfreich.

6.3.4.3 Kennfeld

Bei konstantem Differenzdruck zeigt die Öffnungskennlinie des untersuchten Einspeisungsventils mit der Erhöhung des Öffnungsanteils einen exponentiellen Anstieg der Ausbringmenge. Eine Veränderung des Differenzdrucks verursacht ebenfalls exponentielle Veränderungen der Ausbringmenge. Mit den untersuchten Flüssigkeiten ist entsprechend mit sinkendem Druck ein exponentieller Anstieg der Ausbringmenge zu beobachten. Auf dem Versuchsträger wird damit beim Spritzvorgang, mit Betrieb aller Einspeisungsventile, die höchste elektrische Leistung zur Ausbringung hoher Viskositäten bei großem Differenzdruck zwischen den Leitungssystemen für Trägerflüssigkeit und Pflanzenschutzmittel benötigt.

Die Steuerung der Ausbringmenge der einzelnen Einspeisungsventile ist im Vergleich zu einem linearen Verlauf der Öffnungs- und Druckkennlinie schwieriger. Daher erleichtert nach den vorhandenen Kenntnissen zum Ventilverhalten eine Regelung des Differenzdruckes die exakte Dosierung mit dem Einspeisungsventil. Besonders kennzeichnend für das hydraulische System der Pflanzenschutzmittel auf dem Versuchsträger ist, dass sich starke Druckanstiege und Druckabfälle bei konstanter Öffnung der Einspeisungsventile durch den umgekehrt exponentiellen Verlauf der Druckkennlinien weiter verstärken können.

Weiterhin wurde am RRV[®] ein Einfluss des Durchmessers vom Strömungskanal auf dessen Dosierverhalten festgestellt. Da sich die Kugel frei im Medium drehen kann, wird diese bei geöffnetem Ventil vermutlich durch die Strömung in Rotation versetzt. Ob und in welcher Art ein Einfluss dieser Bewegung der Ventilkugel auf die Ausbringmenge ausgeht, sollte zukünftig noch weiter untersucht werden.

6.4 Ergebnisse und Diskussion zur Genauigkeit der Dosierung

6.4.1 Dosiergenauigkeit der Einspeisungsventile

Wie sich die Ausbringmenge des RRV[®] bei unterschiedlichen Ventilöffnungen und Differenzdrücken ändert, wurde bereits dargestellt. Zur Untersuchung der Dosiergenauigkeit verschiedener Einspeisungsventile wurden die RRV[®] einer Teilbreite bei einem konstanten Differenzdruck von 400 kPa mit dem Dosiermedium Wasser und unterschiedlichen Öffnungsanteilen nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Methode an drei Tagen betrieben. Die Versuche wurden mit der angepassten Ventilschule (Tab. 1), jedoch mit Einstellung der maximal mit dem Microcontroller möglichen Stromstärke von 10 A Anzugstrom und 2 A Haltestrom durchgeführt.

Die Ergebnisse der gravimetrischen Untersuchungen der Dosiermengen zeigen die Abb. 47, 48 und 49. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Ausbringmengen des jeweiligen Versuchstages an. Die Tab. 2,3 und 4 zeigen die zugehörigen Variationskoeffizienten (VK) der Ausbringmenge. Diese erlauben einen Vergleich der Dosiergenauigkeit der Einspeisungsventile bei den unterschiedlichen Öffnungsanteilen mit sehr verschiedenen Ausbringmengen.

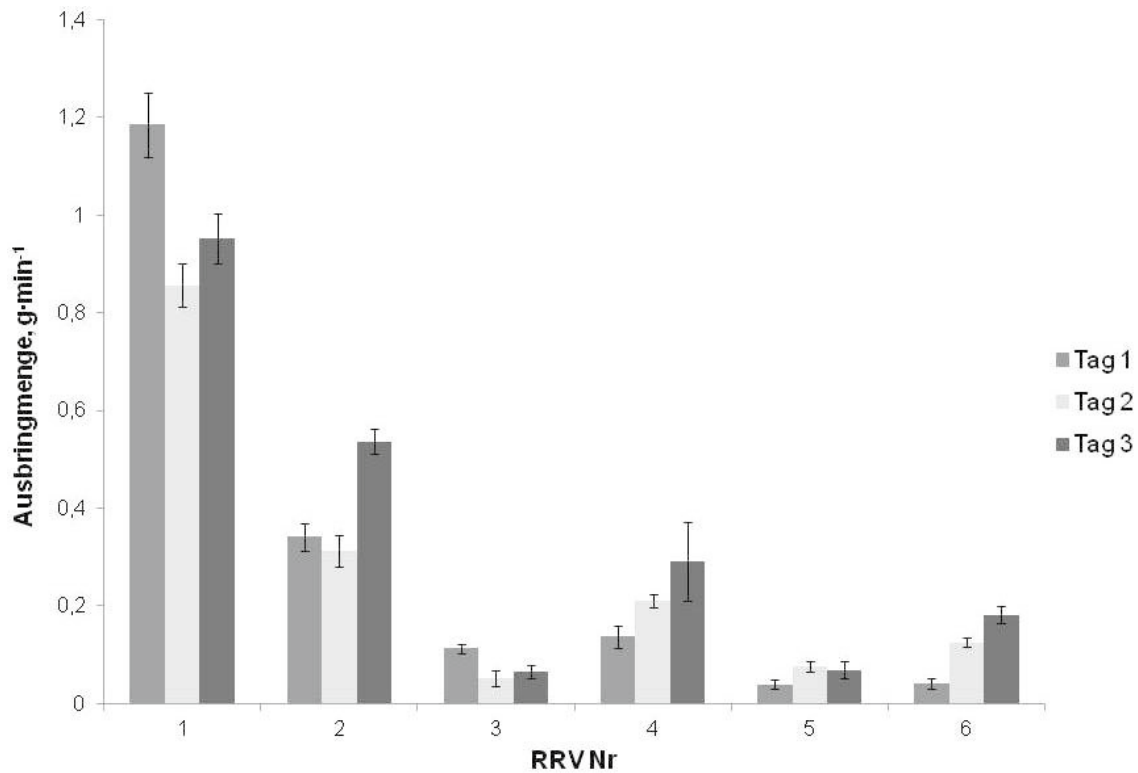


Abb. 47: Durchschnittliche Ausbringungsmenge Wasser der RRV[®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 4,5 % Öffnung (n= 3)

Tab. 2: Variationskoeffizienten der Ausbringungsmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 4,5 % Öffnung der RRV[®] (n= 3)

RRVNr	VK Tag 1, %	VK Tag 2, %	VK Tag 3, %	VK der Tagesmittelwerte, %
1	5,54	5,16	5,35	13,86
2	8,38	10,27	4,80	25,00
3	8,93	28,73	20,34	34,09
4	15,93	6,86	27,89	29,54
5	24,55	15,22	26,73	26,27
6	27,35	6,48	9,84	49,51

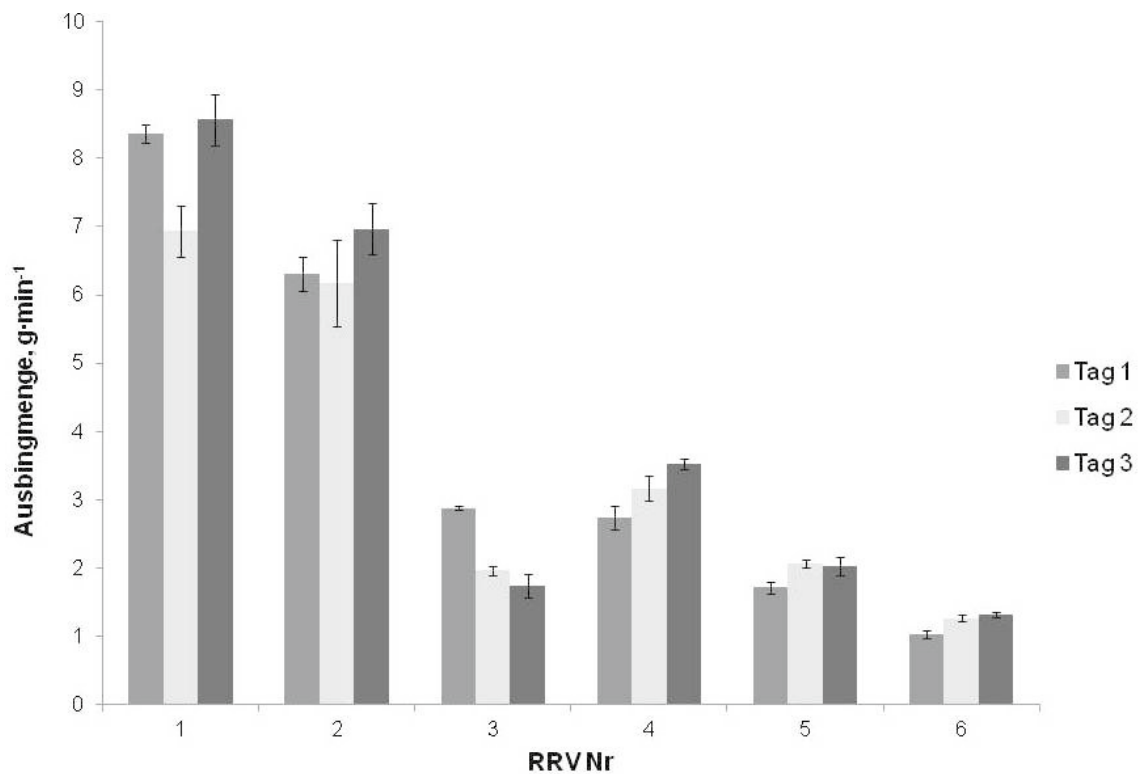


Abb. 48: Durchschnittliche Ausbringungsmenge Wasser der RRV[®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 5,5 % Öffnung (n= 3)

Tab. 3: Variationskoeffizienten der Ausbringungsmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 5,5 % Öffnung der RRV[®] (n= 3)

RRVNr	VK Tag 1, %	VK Tag 2, %	VK Tag 3, %	VK der Tagesmittelwerte, %
1	1,63	5,41	4,32	9,10
2	3,93	10,33	5,41	5,32
3	1,31	3,46	9,93	22,59
4	6,51	5,66	2,03	10,24
5	5,20	2,99	6,60	8,20
6	5,40	3,52	2,52	10,30

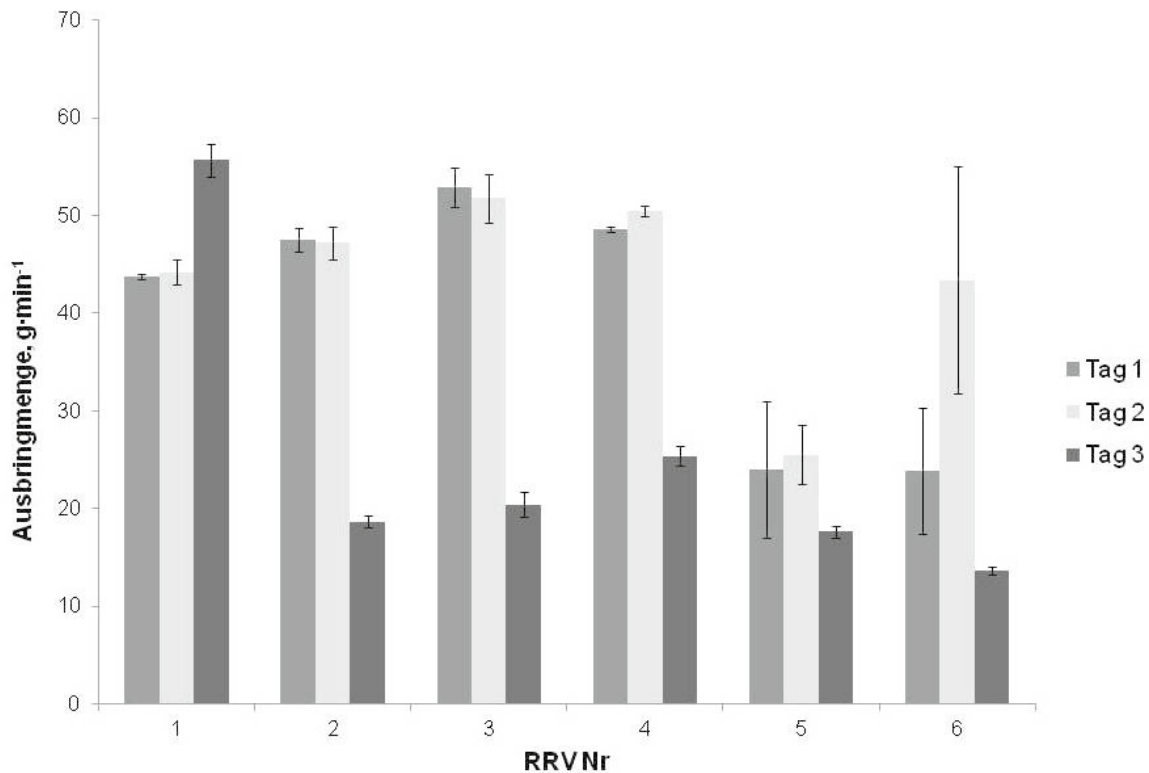


Abb. 49: Durchschnittliche Ausbringungsmenge Wasser der RRV[®] einer Teilbreite an drei Versuchstagen mit 6 % Öffnung (n= 3)

Tab. 4: Variationskoeffizienten der Ausbringungsmengen an drei Versuchstagen im Vergleich zum Variationskoeffizient der Tagesmittelwerte bei 6 % Öffnung der RRV[®] (n= 3)

RRVNr	VK Tag 1, %	VK Tag 2, %	VK Tag 3, %	VK der Tagesmittelwerte, %
1	0,69	2,89	3,10	11,50
2	2,46	3,57	3,24	35,82
3	3,82	4,77	6,07	36,10
4	0,58	1,15	3,94	27,49
5	29,22	11,79	3,41	15,25
6	27,01	26,84	2,93	45,67

Die Ausbringungsmengen der einzelnen Einspeisungsventile der Teilbreite unterscheiden sich deutlich. Eine mögliche Ursache dafür können Fertigungsunterschiede der Vorserienventile sein.

Während des Versuchs wurde die Einstellung des Druckluftreglers zur Beibehaltung möglichst gleicher Druckverhältnisse an den Einspeisungsventilen nicht verändert. Die Variationskoeffizienten der Tagesmittelwerte sind in diesem Versuch deutlich größer als die der einzelnen Wiederholungen der Versuchstage. 15 der 18 Variationskoeffizienten der Tagesmittelwerte sind größer als 10 %. Dabei sind nur vier der 54 Variationskoeffizienten der einzelnen Versuchstage größer als die zugehörigen VK der Tagesmittelwerte. Wird der Mittelwert der drei Wiederholungen eines Versuchstages als Sollwert der Ausbringung angenommen, dann kann für den Versuchsträger davon ausgegangen werden, dass dieser mit dem untersuchten Entwicklungsstadium der Einspeisungsventile, an verschiedenen Versuchstagen bei gleichen Betriebsbedingungen, nicht erreicht wird.

Eine eindeutige Ursache für die schlechtere Wiederholbarkeit der Ausbringmenge an unterschiedlichen Versuchstagen, im Vergleich zur Wiederholung am selben Tag, konnte bei den Versuchen nicht identifiziert werden. Die Ungenauigkeit wird vermutlich durch die bereits in Kapitel 6.4.4.3 beschriebene Bewegung der Kugel im Einspeisungsventil bedingt.

Das Dosierverhalten der RRV[®] im derzeitigen Entwicklungsstadium macht deren fortgehende Untersuchung und Weiterentwicklung, einschließlich einer Kalibrierung der einzelnen Einspeisungsventile, notwendig. Damit kann das ursprüngliche Ziel weiter verfolgt werden, nur durch die Steuerung des Öffnungsanteils die angestrebte maximale Abweichung vom Sollwert der Ausbringung von 10 % nach Kapitel 4 zu erreichen. Eine zusätzliche Möglichkeit die geforderte Genauigkeit der Dosierung an allen Einspeisungsventilen wahrscheinlich schneller zu erreichen, bietet die Implementierung einer Durchflussregelung an den einzelnen RRV[®], aufbauend auf Messsignalen geeigneter Durchflussmesser.

6.4.2 Ergebnisse zur Durchflussmessung

Die Untersuchung der Genauigkeit der Dosierung des RRV[®] ließ bereits frühzeitig einen Bedarf an einer Durchflussregelung am einzelnen Einspeisungsventil erkennen. Darum wurden entsprechende Anstrengungen unternommen, die Eignung verschiedener Durchflussmessverfahren zu prüfen.

6.4.2.1 Ovalradzähler

Die Tab. 5 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung des Ovalradzählers nach Kap. 5.8 mit Wasser und einer durchschnittlichen Durchflussrate von $104,9 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Der Mittelwert der Impulszahl ist $3,80 \text{ ml}^{-1}$ bei einem Variationskoeffizient von 7,34 %. Die ausgebrachte Menge ist bei diesem Versuch deutlich höher als in der geplanten Anwendung. Eine Absenkung der Durchflussrate erschwerte jedoch die Messung. Unterhalb von $40 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ war kein zuverlässiger Betrieb von diesem Messgerät mit Wasser möglich. Dies ist wahrscheinlich bedingt durch die niedrige Viskosität der Flüssigkeit, die dazu führt, dass Wasser durch den Spalt zwischen Gehäuse und Ovalrad entweicht, ohne dieses anzutreiben.

Tab. 5: Vergleich der Ausbringmenge mit der Impulszahl pro ml beim Betrieb des Ovalradzählers mit Wasser

Wiederholung	Impulse, min^{-1}	Volumen, $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$	Impulse, ml^{-1}	
1	465	112,4	4,14	
2	400	102,5	3,90	
3	369	102,4	3,60	
4	415	107,2	3,87	
5	369	106,0	3,48	
6	418	102,8	4,07	
7	411	102,6	4,01	
8	341	103,0	3,31	
Mittelwert			3,80	Impulse, ml^{-1}
Variationskoeffizient			7,34	%

Der Betrieb des Ovalradzählers mit Glycerin war auch mit wesentlich geringeren Ausbringmengen möglich (Tab. 6). Bei einer mittleren Ausbringmenge von $2,78 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ wird beispielsweise ein Variationskoeffizient der Impulszahl pro ml von

5,32 % erreicht. Damit wird eine höhere Wiederholgenauigkeit als in den Versuchen mit Wasser erreicht.

Tab. 6: Vergleich der Ausbringmenge mit der Impulszahl pro ml beim Betrieb des Ovalradzählers mit Glycerin

Wiederholung	Impulse, min ⁻¹	Volumen, ml·min ⁻¹	Impulse, ml ⁻¹
1	8,2	2,34	3,51
2	6,2	1,96	3,16
3	7,4	2,37	3,12
4	7,0	2,24	3,12
5	11,2	3,54	3,16
6	9,8	3,18	3,08
7	11,4	3,21	3,55
8	10,8	3,40	3,18
Mittelwert			3,24
Variationskoeffizient			5,32 %

Beim Aufbau des Versuchsträgers war eine Vorreinigung des Leitungssystems mit Druckluft geplant. Dies erwies sich bei diesem Messprinzip bereits während der Untersuchungen am Prüfstand als problematisch, da die mit der Druckluft erzeugten hohen Umdrehungsfrequenzen der Ovalräder zu Lagerschäden im Gerät führen konnten.

6.4.2.2 Kalorimetrischer Durchflussmesser

Die im Folgenden dargestellten Versuche wurden mit einer Glycerin-Wasser-Lösung mit 85 % Glycerin durchgeführt. Bei den in der Versuchshalle gegebenen Bedingungen hatte die Flüssigkeit eine Viskosität von etwa 100 mPa·s. Die Sensorelektronik gab ein Spannungssignal aus. Neben den Eigenschaften der eingesetzten Flüssigkeiten beeinflusste die Einbausituation ins Leitungssystem die Strömungsverhältnisse am Sensor und damit dessen Messsignal. Daher war eine Kalibrierung des Sensors erforderlich. Zunächst wurde diese mit dem Einspeisungsventil für den Massendurchfluss bei 600 kPa Druck durchgeführt (Abb. 50). Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen bei drei Wiederholungen an. Die entsprechende Kalibrationsfunktion mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,995 lautet:

$$y = 0,00770 \cdot e^{1,52205 \cdot x} \quad (21)$$

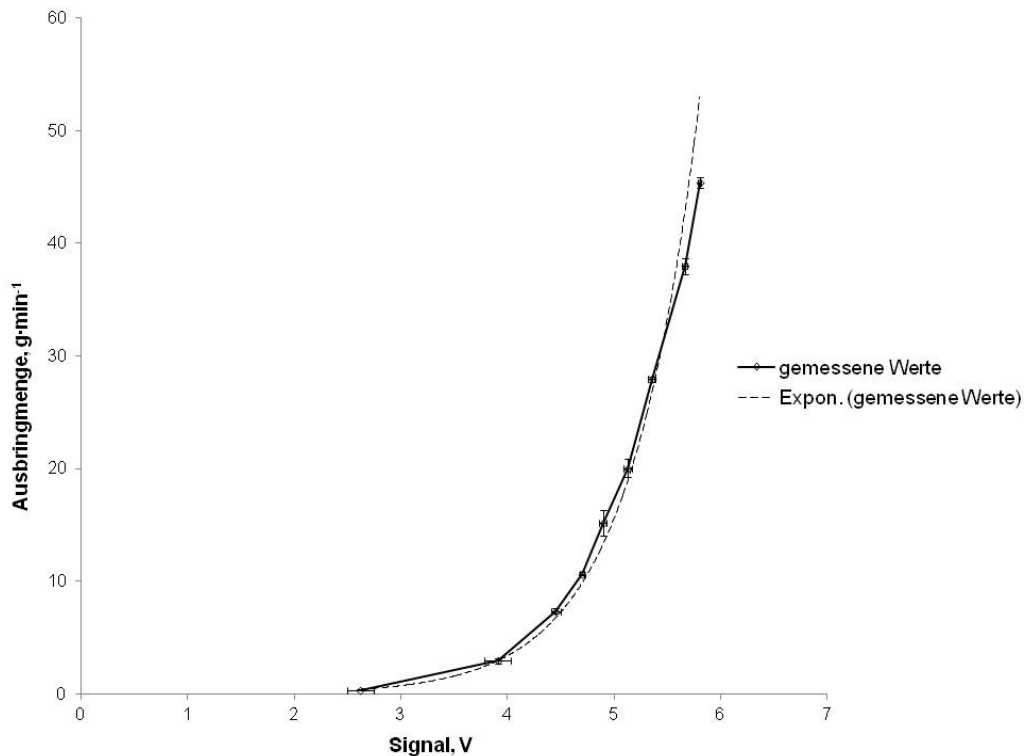


Abb. 50: Kalibrationskurve des Massendurchflussmessers für eine Glycerin-Wasser-Lösung mit 85 Masseprozent Glycerin (n= 3)

Die Genauigkeit der Durchflussmessung in Kombination mit dem Einspeisungsventil wurde anschließend in drei unterschiedlichen Druckbereichen mit der gleichen Flüssigkeit, mit der zuvor die Kalibration erfolgte, überprüft. Das entsprechende Kennfeld des Einspeisungsventils wurde bereits in Kap. 6.4.4.3 diskutiert. Bei höherem Druck ist ein größerer Öffnungsanteil des RRV[®] zur Ausbringung der gleichen Menge erforderlich. Die Abb. 51, 52 und 53 vergleichen die anhand des kalibrierten Durchflussmessersignals berechneten und die tatsächlichen Ausbringmengen von jeweils drei Messungen bei 200, 400 und 600 kPa Druck. Die zugehörigen Öffnungszeiten der RRV[®] bei der Pulsweitenmodulation wurden empirisch ermittelt, um einen Ausbringmengenbereich von 1 -40 g·min⁻¹ darzustellen. Daher haben sich in den verschiedenen Druckbereichen unterschiedliche Anzahlen an Öffnungszeiten des Einspeisungsventils zur Abbildung des vollständigen Mengenbereichs ergeben. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der drei Wiederholungen an.

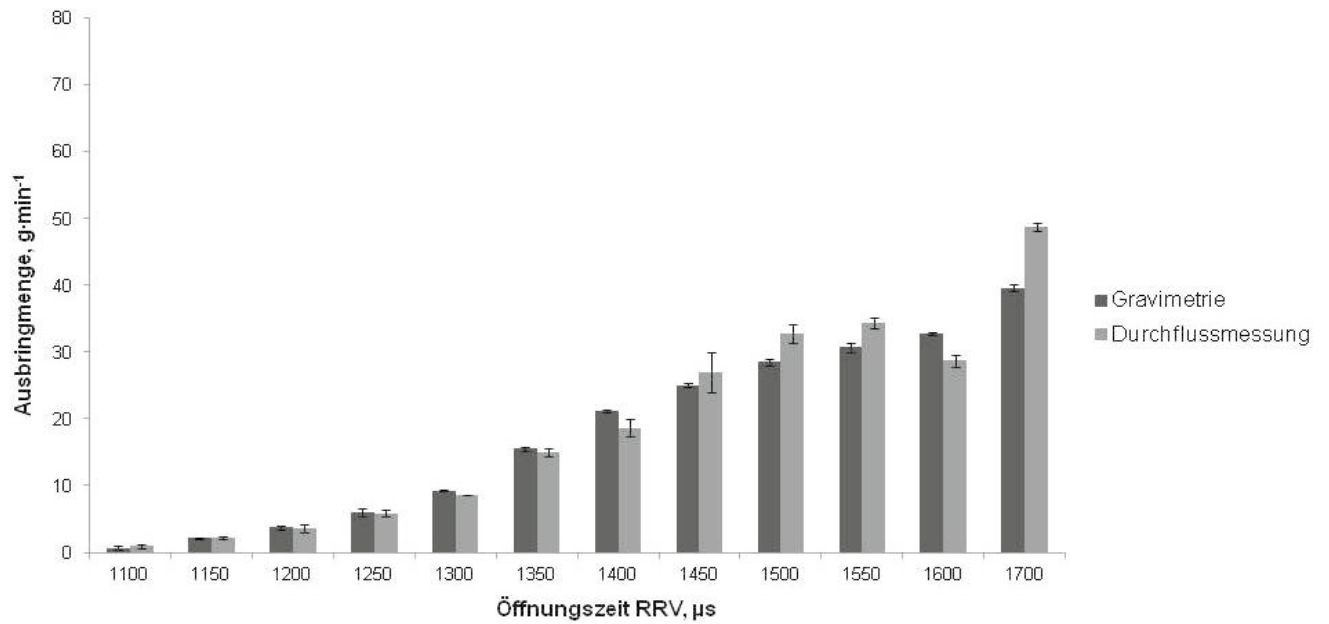


Abb. 51: Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringungsmenge mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 200 kPa (n= 3)

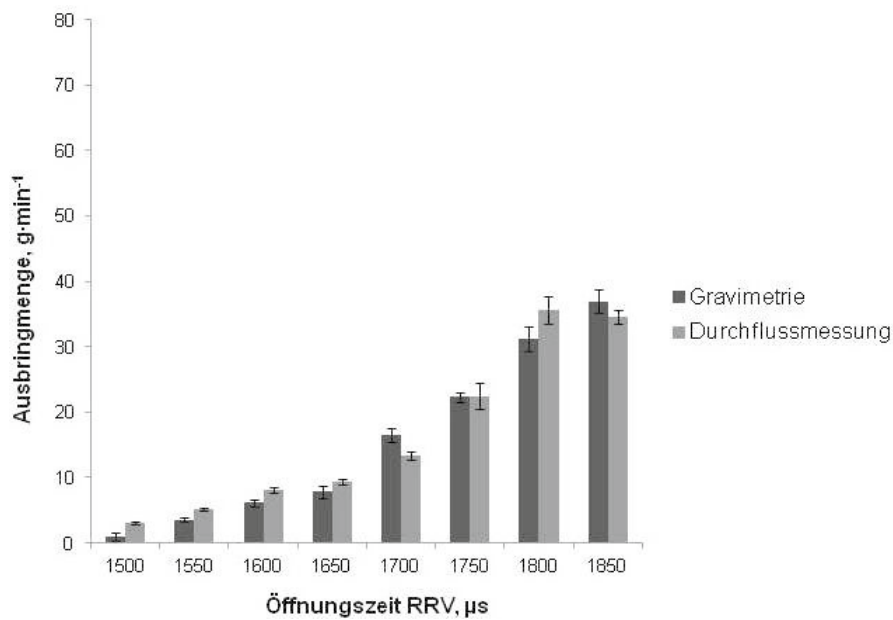


Abb. 52: Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringungsmenge mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 400 kPa (n= 3)

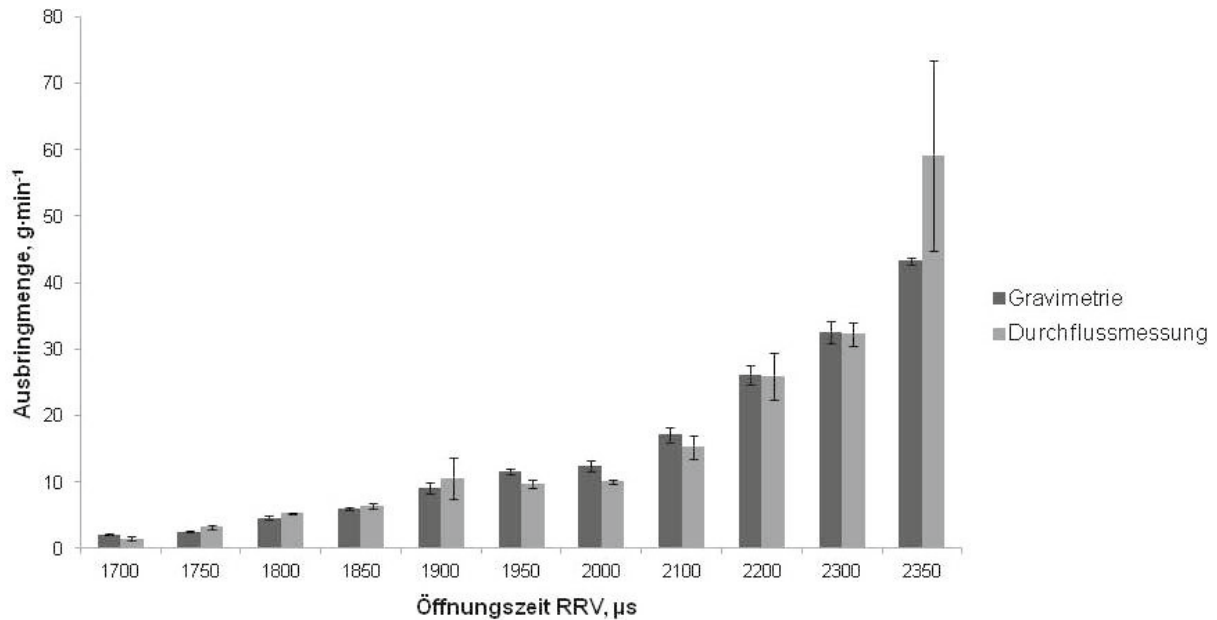


Abb. 53: Vergleich der gravimetrisch bestimmten Ausbringungsmenge mit dem mittleren Durchflussmesswert bei 600 kPa (n= 3)

Mit den Werten der Abb. 51 bis 53 wurden die prozentualen Abweichungen der mittleren Messwerte von den tatsächlichen Ausbringungsmengen errechnet. Tab. 7 gibt die Ergebnisse für die drei Druckbereiche an.

Tab. 7: Prozentuale Abweichung des mittleren Durchflussmesswertes von der gravimetrisch bestimmten Ausbringungsmenge

200 kPa		400 kPa		600 kPa	
Ausbringungsmenge, g·min ⁻¹	Abweichung, %	Ausbringungsmenge, g·min ⁻¹	Abweichung, %	Ausbringungsmenge, g·min ⁻¹	Abweichung, %
0,68	42,28	1,01	287,12	2,12	-30,48
2,13	7,18	3,59	46,33	2,54	28,03
3,71	-2,78	6,13	33,11	4,60	15,32
6,02	-2,57	7,87	20,04	5,96	10,89
9,25	-7,10	16,50	-19,23	9,17	14,67
15,48	-3,37	22,34	0,58	11,65	-16,46
21,10	-11,68	31,23	13,89	12,45	-19,21
25,03	7,94	36,96	-6,26	17,10	-10,88
28,46	14,99			26,07	-1,15
30,66	11,81			32,59	-0,96
32,68	-12,20			43,26	36,41
39,58	23,09				

Es lässt sich erkennen, dass die Abweichung vor allem im unteren Bereich stark ansteigt. Nur in 10 der 31 Fälle ist die Abweichung kleiner als 10 %. Diese Bedingung ist beispielsweise bei dem Versuch mit 200 kPa zwischen $2,13 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ und $15,48 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ in fünf aufeinander folgenden Fällen erfüllt.

Diese Ergebnisse stellen einen Einstieg in die Materie der Durchflussmessung am Einspeisungsventil mit einem ersten Aufbau dar. Grundsätzlich besteht bei der untersuchten Dosiereinheit und dessen Komponenten Einspeisungsventil und Durchflussmesser noch weiterer Entwicklungsbedarf.

6.4.3 Diskussion der Dosiergenauigkeit der Einspeisungsventile

Bedingt durch den konstruktiven Aufbau des RRV[®] ist die Erwärmung des dosierten Mediums bei der Strömung durch den Spulenkern des Einspeisungsventils schwierig zu beeinflussen. Dies kann vor allem bei hochviskosen Flüssigkeiten das Dosierverhalten beeinflussen. Da aber in dieser Arbeit die Dosiergenauigkeit mit dem Medium Wasser untersucht wurde, ist die Veränderung der Viskosität der Flüssigkeit sowie die dadurch verursachte Beeinflussung der ausgebrachten Menge als vergleichsweise gering anzusehen. Der Einfluss der Erwärmung der Flüssigkeit sollte also bei den in dieser Arbeit dargestellten Ergebnissen zur Dosiergenauigkeit eine untergeordnete Rolle gespielt haben.

Die Vergleichbarkeit der Ausbringmengen verschiedener Einspeisungsventile und die entsprechende Reproduzierbarkeit ohne Applikation von Trägerflüssigkeit wurde intensiv an einer Teilbreite untersucht. Dabei waren die Leitungslängen, wie auch die Druckverhältnisse gleich. Eine gegenseitige Beeinflussung der Einspeisungsventile sollte durch die Versorgung aus separaten Druckbehältern verhindert werden. Bei gleicher Ansteuerung ist die Reproduzierbarkeit der Ausbringmenge des Einspeisungsventils, vor allem bei der Wiederholung des gleichen Dosierversuchs an anderen Versuchstagen, nicht gegeben und die geforderte Dosiergenauigkeit konnte bisher nicht erreicht werden. Eine eindeutige Ursache ist nicht gefunden worden, es wird aber ein Einfluss der Bewegung der Kugel im RRV[®] vermutet. Die Untersuchung des Verhaltens der Ventilkugel im Einspeisungsventil während des Betriebs, beispielsweise mit einem transparenten Ventilkörper, ist erforderlich um eine exakte Einschätzung über die Einsatzmöglichkeiten des RRV[®] als Dosierventil und dessen Optimierungspotential zu bekommen. Eine Kalibration zum Erreichen gleicher

Ausbringmengen muss ebenfalls weiter untersucht werden. Die Freiheitsgrade der Ventilkugel während des Betriebs können die Ursache für die eingeschränkte Reproduzierbarkeit der ausgebrachten Mengen darstellen. Ob über das gesamte, vergleichsweise große Dosiermengenspektrum, die geforderte Vergleichbarkeit und Präzision der Dosierung der Einspeisungsventile erreicht werden kann, kann nicht abschließend beurteilt werden. Der tottraumlose innere Aufbau und das große Dosiermengenspektrum sind als eindeutige Vorteile des Einspeisungsventils zu sehen. Die Reproduzierbarkeit der Ausbringmengen verschiedener RRV[®] zu unterschiedlichen Zeiten muss weiter untersucht werden. Um mit dem Einspeisungsventil in der geplanten Anwendung schneller das Ziel von maximal 10 % Abweichung vom Sollwert der Ausbringmenge zu erreichen, wird zunächst die Kombination des RRV[®] mit einem Durchflussmesser für den weiteren Aufbau vorgeschlagen.

6.4.4 Diskussion der Durchflussmessung

Als mechanischer Durchflussmesser wurde ein Ovalradzähler untersucht. Dessen Aufbau erschien am geeignetsten für ein mechanisches Messprinzip. Dabei besteht grundsätzlich die Forderung der Reinigbarkeit des Durchflussmessers. Ausschlaggebend dafür, dass der Durchflussmesser nicht weiter betrachtet wurde, war jedoch, neben der schlechten Eignung für wasserähnliche Viskositäten, die fehlende Eignung für die Vorreinigung mit Druckluft wegen des Auftretens von Schäden an den Lagerstellen der Ovalräder. Das Risiko von Lagerschäden wird auch von Häfelfinger (2002) genannt. Zusätzlich zu der ungeklärten Frage der Reinigbarkeit von Ovalradzählern im Direkteinspeisungssystem verursachen entsprechend robuste Lager Kosten, die keinen Einsatz des Durchflussmessers am einzelnen Einspeisungsventil mehr erlauben.

Der Aufbau des kalorimetrischen Sensors ist eher für die Reinigung des Leitungssystems geeignet. Allerdings beansprucht das Erreichen der geforderten Messgenauigkeit noch weiteren Entwicklungsaufwand. Bei dem dargestellten Versuch wurde das Messsystem zuvor mit der eingesetzten Flüssigkeit kalibriert, wobei die Korrelation den tatsächlichen Kurvenverlauf sehr gut beschreibt. Die Veränderung der Ausbringmenge des Einspeisungsventils während der einminütigen Messung, beispielsweise durch die Erwärmung und Viskositätsänderung der

ausgebrachten Glycerin-Wasser-Mischung, könnte die Messgenauigkeit beeinflussen. Zudem muss der Einfluss der durch das Einspeisungsventil bedingten Strömungspulsation auf das Messsignal weiter untersucht werden. Eine Integration des Sensors in die Drossel des Aufbaus zur Pulsationsdämpfung am Einspeisungsventil nach Abb. 13, ist beispielsweise denkbar. Durch die Verringerung des durchströmten Querschnitts würden deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht, die eine bessere Auflösung des Signals und damit eine exaktere Messung ermöglichen.

6.5 Abschließende Diskussion

Die angestrebte maximale Abweichung von 10 % vom Sollwert der Ausbringung an der einzelnen Düse stellt eine hohe Zielanforderung dar, wenn berücksichtigt wird, dass die Spritzkegel der auf dem Versuchsträger eingesetzten Düsen überlappen, und diese im Verbund eingesetzt werden. Fehler in der Ausbringmenge einer Einzeldüse können bei diesem Aufbau von den benachbarten Düsen zum Teil ausgeglichen werden. Wenn jedoch bei der teilschlagspezifischen Applikation zukünftig Einzeldüsen geöffnet werden, muss auch ein anderer Düsentyp ohne Überlappung eingesetzt werden, wodurch die Anforderung an die Erfüllung des Sollwertes der Ausbringung bei der Einspeisung steigt. Der aktuelle Stand der Entwicklung der Einspeisungsventile muss dazu noch verbessert werden.

Die weitere Untersuchung verschiedener zentraler Druckquellen für Pflanzenschutzmittel auf dem Versuchsträger, einschließlich einer Vorrichtung zur Differenzdruckregelung, ist vor dem Hintergrund bedeutsam, dass sich diese Anordnung auch zum Aufbau eines zentralen Direkteinspeisungssystems eignet. Bei dem aktuellen Aufbau mit Druckbehältern muss die Löslichkeit der Druckluft in der Flüssigkeit weiter beobachtet und untersucht werden. Ansatzpunkte zur Minimierung einer möglichen Lösung der Druckluft im Pflanzenschutzmittel bietet der Wechsel von Druckluft auf ein anderes mit Druck beaufschlagtes Gas.

Die Auslegung des Leitungssystems für Pflanzenschutzmittel im Spritzgestänge des Versuchsträgers berücksichtigt die Minderung der Druckverluste und der technischen Restmengen sowie die entsprechende Reinigung. Aufgrund des Verhaltens der Einspeisungsventile musste auch die Dämpfung von Druckschwingungen berücksichtigt werden. Die Auflösung des Ventilverbunds und beispielweise die

Verwendung einzelner Einwegdruckbehälter am Einspeisungsventil würde dies vereinfachen. Allerdings ergeben sich dadurch neue technische Fragestellungen, vor allem hinsichtlich des Gewichts des Spritzgestänges und der unterschiedlichen Wechselintervalle der Behälter, die schwierig zu lösen sind.

Die Neigung zum Aufschwingen der Drücke im PSM-Leitungssystem ohne Differenzdruckregelung konnte abgestellt werden. Die Differenzdruckregelung ist jedoch nur in Grenzen möglich. Die Kennlinie der Einspeisungsventile erschwert die zentrale Differenzdruckregelung auf dem Spritzgestänge für den Ventilverbund, da Druckanstiege und Druckabfälle sich selbst verstärken.

Die Regelung des Einzelventildurchflusses am Einspeisungsort kann dabei als Lösungsansatz dienen. Anstatt einer zentral im Leitungssystem angeordneten Regelung des Stellglieds bei der Differenzdruckregelung kann ein fest eingestellter Druck im Pflanzenschutzmittelsystem mit einer dezentralen Regelung des Durchflusses direkt an den Einspeisungsventilen eine Möglichkeit für einen stabilen Dosierbetrieb bieten. Dazu ist allerdings eine weitere Entwicklung einer Durchflussregelung am Einspeisungsventil erforderlich.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit dem Aufbau des Versuchsträgers für die Untersuchung am Prüfstand und den dabei gewonnenen Kenntnissen über das Einspeisungsventil wurde die Basis für die Entwicklung eines zum Feldeinsatz fähigen Versuchsträgers mit einem Dosierventil mit breitem Einsatzspektrum an verschiedenen Pflanzenschutzmitteln geschaffen. Es sind jedoch eine Reihe weiterer praktischer und wissenschaftlicher Arbeiten am Versuchsträger und am Einspeisungsventil zur Anwendbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis erforderlich.

Die Arbeiten zur Druckquelle des Direkteinspeisungssystems an der Düse einschließlich Differenzdruckregelung konnten bereits wertvolle Kenntnisse zum Aufbau eines zentralen DES liefern und sollten ebenfalls weiter verfolgt werden. Die Erkenntnisse der Arbeiten zum Einspeisungsventil können auch für die Anpassung des RRV[®] auf vielfältige andere Einsatzbereiche genutzt werden.

Die Kenntnisse über die Dosiereigenschaften des RRV[®] konnten vertieft werden, wie auch die Kenntnisse über das Zusammenwirken mehrerer Einspeisungsventile im Verband. In diesen Bereichen besteht in Zukunft weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die weitere Entwicklung des Einspeisungsventils mit der Integration einer Durchflussregelung zur zuverlässigen und robusten Dosierung im Ventilverbund auf dem Spritzgestänge würde den Aufbau des Gesamtsystems deutlich vereinfachen.

Zukünftig bietet es sich an, im Rahmen einer weiteren Entwicklung den Microcontroller und die Sensorelektronik eines Durchflussmessers zusammen zu fassen (Abb.25), um dort direkt eine durchflussabhängige Regelung der Öffnung des Einspeisungsventils vorzunehmen. Die weitere Untersuchung der kalorimetrischen Durchflussmessung am Einspeisungsventil ist für den Einsatz dieses Messverfahrens in der Anwendung erforderlich. Die Verbindung der Durchflussmessung mit einem Aufbau zur Pulsationsdämpfung am Einspeisungsventil ist möglich. Dieser Aufbau sollte aber im Hinblick auf die Reinigung des Leitungssystems untersucht werden.

Daneben können weitere Durchflussmessverfahren betrachtet werden. So ist zum Beispiel vorstellbar, dass zukünftig die Kosten für Massendurchflussmesser nach dem Coriolis-Prinzip sinken und diese damit für die Anwendung in Frage kommen.

Literaturverzeichnis

- ADAMENKO, I.I., BULAVIN, L.A., ILYIN, V., ZELINSKY, S.A. & MOROZ, K.O., 2006. Anomalous behaviour of glycerol-water solutions. *Journal of Molecular Liquids* 127: 90-92.
- AMSDEN, R.C., 1970. The metering and dispersing of granules and liquid concentrates. *British Crop Protection Council Monograph No.2*: 124-129.
- ANTUNIASSI, U.R. & MILLER, P.C.H., 1998. The characteristics of a test liquid formulation for use in evaluating the performance of handling and metering systems. *British Crop Protection Council Proceeding 70: Managing pesticide waste and packaging*: 123-128.
- BALSARI, P., DORUCHOWSKI, G., MARUCCO, P., TAMAGNONE, M., VAN DE ZANDE, J. & WENNEKER, M., 2008. A system for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*. Manuscript ALNARP 08 002 Vol. X. May, 2008.
- BENNETT, K.A. & BROWN, R.B., 1997. Direct nozzle injection and precise metering for variable rate herbicide application. *ASAE paper no. 97-1046*. St. Joseph, MI.
- BRITISH STANDARD BS 6356, 1996. *Spraying equipment for crop protection, Teil 9, Specifications for systems for closed transfer of liquid formulations*. British Standards Institute.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV), 2008. *Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, Risikominderung im Pflanzenschutz, Weniger Risiko – mehr Vertrauen*. BMELV, Referat 517.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV), 2010. *Gute Fachliche Praxis im Pflanzenschutz - Grundsätze für die Durchführung*. BMELV, Referat 512: 54.
- CHEN, Y., ZHU, H., OZKAN, E.H., DERKSEN, R.C., & KRAUSE, C.R., 2011. An experimental variable-rate sprayer for nursery and orchard applications. *ASABE Annual International Meeting, August 7 - 10, Louisville, Kentucky, USA, Paper Number 1110497*.
-

- CHENG, N.-S., 2008. Formula for the Viscosity of a Glycerol-Water mixture. *Industrial & Engineering Chemical Research* 47 (9): 3285-3288.
- DAMMER, K.-H., WARTENBERG, G. & ADAMEK, R., 2000. Sensorgestützter teilflächenspezifischer Einsatz von Halmstabilisatoren und Fungiziden in Getreide. *Gesunde Pflanzen*, Springer Verlag, 52: 105-109.
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, 2005. Offenlegungsschrift DE 103 59 852 B3, Deutsches Patent- und Markenamt.
- DÖRPMUND, M., 2012. Pesticide reclamation and cleaning of direct nozzle injection systems. Dissertation, Institut für Landtechnik, Bonn.
- DOWNEY, D., CROWE, T.G., GILES D.K. & SLAUGHTER, D.C., 2006. Direct Nozzle Injection of Pesticide Concentrate into Continuous Flow for Intermittent Spray Applications. *Transactions of the ASABE* 49(4): 865-873.
- FIEDLER, K.O., 1992. Strömungs- und Durchflußmesstechnik. R. Oldenburg Verlag GmbH, München.
- FRENZEL, F., GROTHEY, H., HABERSETZER, C., HIATT, M., HOGREFE, W. KIRCHNER, M., LÜTKEPOHL, G., MARCHEWKA, W., MECKE, U., OHM, M., OTTO, F., RACKEBRANDT, K.-H., SIEVERT, D., THÖNE, A., WEGENER, H.-J., BUHL, F., KOCH, C., DEPPE, L., HORLEBEIN, E., SCHÜSSLER, A., POHL, U., JUNG, B., LAWRENCE, H., LOHRENGEL, F., RASCHE, G., PAGANO, S., KAISER, A. & MUTONGO, T., 2010. Industrielle Durchfluss-Messtechnik - Grundlagen und Praxis, ABB Automation Products, 246.
- FRIESSLEBEN, R. 2011. Dynamische Viskosität der derzeit wichtigsten in Deutschland zugelassenen PSM-Formulierungen. Anfrage des ILT, unveröffentlicht.
- FROST, A.R., 1990. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: 55-70.
- GANZELMEIER, H., 2011. Nachhaltiger und schlagkräftiger Pflanzenschutz –Neue Technik zeigt wie es geht-. VDI-MEG Tagung Landtechnik für Profis 2011, Tagungsband: 13-24.

- GERHARDS, R. & OEBEL, M., 2006. Kameragesteuerte Unkrautbekämpfung – eine Verfahrenstechnik für die Praxis, Special Issue XX: 181-187.
- GERHARDS, R., OEBEL, H. & SÖKEFELD, M., 2007. Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO). Abschlussbericht für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben: 82.
- GILES, D.K. & BROCK, T.K., 2008. Using air induction nozzles for direct injection of agrochemicals: A feasibility study, Aspects of Applied Biology. 84: 433-440.
- GILES, D.K. & COMINO, J.A., 1989. Variable flow control for pressure atomization nozzles. Journal of Commercial Vehicles 98 (2): 257-265.
- GILES, D.K. & COMINO, J.A., 1990. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. Journal of Agricultural Engineering Research 47: 249-267.
- GILES, D.K., 1997. Independent control of liquid flow rate and spray droplet size from hydraulic atomizers. Atomization and Sprays 7: 161-181.
- GOPALAPILLAI, S., TIAN, L., & ZHENG, J., 1999. Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications. Transactions of the ASAE 42(4): 863-870.
- HÄFELFINGER, H., 2002. Durchflussmessung von Fluiden. In: Vetter, Handbuch Dosieren, Vulkan-Verlag GmbH, 2.Auflage: 460.
- HAHN, K., 2010. Einsatzmöglichkeiten elektrischer Antriebe für landwirtschaftliche Maschinenkombinationen. Dissertation, Institut für Agrartechnik, Hohenheim.
- HLOBEN, P., 2007. Study on the Response Time of Direct Injection Systems for Variable Rate Application of Herbicides. Dissertation, Institut für Landtechnik, Bonn.
- HÖHNER, G. & KRAMER, H., 2012. Sprizentrends: Breiter, schneller, genauer. Top agrar 1/2012: 136-139.
- HÜCHTEBROCK, U., 1997. Thermische Durchflussmessung für Gase. In: Bonfig, Sensorik, Sensoren und Sensorsignalverarbeitung, Wegweisende, serienreife neue Produkte und Verfahren, Band 8, Expert Verlag: 207.

- JULIUS KÜHN-INSTITUT (JKI), 2002. Richtlinien für die Prüfung von Pflanzenschutzmitteln und Pflanzenschutzgeräten Teil VII, 1 - 1.1.1, Merkmale Spritz- und Sprühgeräte für Flächenkulturen, Braunschweig, September 2002.
- JULIUS KÜHN-INSTITUT (JKI), 2005. Pflanzenschutzmittelverzeichnis Teil VI. Anerkannte Pflanzenschutzgeräte, 52. Auflage, Braunschweig, 2005.
- KIEFER, S., 2011. Trends und Innovationen in der Pflanzenschutztechnik Automatisierung und Komfort bestimmen den Markt. VDI-MEG Tagung Landtechnik für Profis 2011, Tagungsband: 31-38.
- KIFFERLE, G. & STAHLI, W., 2001. Spritz- und Sprühverfahren in Pflanzenschutz und Flüssigdüngung bei Flächenkulturen. Books on Demand GmbH, Norderstedt.
- KLUGE, A., 2011. Methoden zur automatischen Unkrauterkenkung für die Prozesssteuerung von Herbizidmaßnahmen. Dissertation, Braunschweig.
- KRAMER, H. 2010. Zeitnahe und effektive Feldreinigung. Lohnunternehmen 6/2010: 50-53
- LECHLER GMBH, 2008. Offenlegungsschrift DE102006045450A1, Deutsches Patent- und Markenamt.
- LINSMEIER, K.D. & GREIS, A., 2005. Elektromagnetische Aktoren, Physikalische Grundlagen, Bauarten, Anwendungen. Bibliothek der Technik 197, Verlag Moderne Industrie.
- LUCK, J.D., PITLA, S.K., ZANDONADI, R.S., SAMA, M.P. & SHEARER, S.A., 2010. Estimating off-rate pesticide application errors resulting from agricultural sprayer turning movements. Precision Agriculture (12): 534-545.
- MATTHIES, H.J. & RENIUS, K.T., 2011. Einführung in die Ölhydraulik. Vieweg und Teubner Verlag, 7. Auflage.
- MÖNNING, W., 2010. Rapid Reaction Valve: Extrem schaltschnell und hochpräzise. Industriearmaturen, Heft 2/2010: 110-111.
- NORDMEYER, H., 2006. Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz - Beitrag der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. Nachrichtenblatt des

- deutschen Pflanzenschutzdienstes, Verlag Eugen Ulmer K.G., 58 (12): 317-322.
- OEBEL, H. & GERHARDS, R., 2006. Kamerateuere Unkrautbekämpfung - eine Verfahrenstechnik für die Praxis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XX: 181-187.
- OEBEL, H., GERHARDS, R., BECKERS, G., DICKE, D., SÖKEFELD, M., LOCK, R., NABOUT, A. & THERBURG, R.-D., 2004. Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online) - Verfahren (TURBO) - erste Erfahrungen aus der Praxis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX: 459-465.
- PAICE, M.E.R., MILLER, P.C.H., & BODLE, J.D., 1995. An experimental sprayer for the spatially selective application of herbicides. Journal of Agricultural Engineering Research 60: 107-116.
- PEISL, S. & ESTLER, M., 1993. Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln - Beobachtungen im praktischen Einsatz. Landtechnik (48): 168-170.
- PERSÖNLICHE KOMMUNIKATION, 2010. Mit Herrn Horst Dieter Brix, BASF SE, 20.09.2010, im Rahmen der 3. Konferenz Precision Crop Protection, Bonn.
- PERSÖNLICHE KOMMUNIKATION, 2011. Mit Herrn Dr. Martin Steinbeck, Abteilung Formulierungstechnik Fungizide bei Bayer CropScience, im Rahmen eines Fachgesprächs zur Direkteinspeisung, am 05.09.2011 in Monheim.
- PERSÖNLICHE KOMMUNIKATION, 2012. Mit Herrn Dr. Dietmar Neuhaus, Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum, Institut für Materialphysik im Weltraum, am 25.05.2012.
- PIOTRASCHKE, H.F., 2010. H-Sensor: Intelligenter optischer Sensor für den teilflächenspezifischen Herbizid-Einsatz im Online-Verfahren. Vortrag auf den Innovationstagen 2010 der BLE am 07.10.2010, <http://www.piotraschke.de/hagen/pdf/2010-BLE-Innovationstage-Beitrag-Piotraschke.pdf>.

- PROFI, 2013. Immer die passende Aufwandmenge. Online Veröffentlichung, <http://www.profi.de/neuheiten/Duengung-und-Pflanzenschutz-Immer-die-passende-Aufwandmenge-1254118.html>.
- RAVEN INDUSTRIES, 2003. Injection Pump Direct Drive Service manual 016-0159-929, 12/03.
- REYNOLDS, O., 1883. An experimental investigation of whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A: 935.
- ROCKWELL, A.D. & AYERS, P.D., 1996. A variable rate, direct nozzle injection field sprayer. Applied Engineering in Agriculture 12 (5): 531-538.
- SCHLÜCKER, E., 2002. Mikrodosiertechnik für Flüssigkeiten. In: Vetter, Handbuch Dosieren, Vulkan-Verlag GmbH, 2.Auflage: 679.
- SCHMITT-OTT, M., 1976. Konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verteilungsgüte von Pflanzenschutz- und Düngemaschinen. Dissertation, TU Berlin.
- SEIBOLD, F., 2011. Differenzdruckregelung an Pflanzenschutzspritzen mit Direkteinspeisung an der Düse. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Kraftfahrzeuge, Aachen.
- SIGLOCH, H., 2009. Technische Fluidmechanik. Springer Verlag, 7. Auflage: 7.
- STEINER, U., BÜRLING, K. & OERKE, E.C., 2008. Sensorik für einen präzisierten Pflanzenschutz, Gesunde Pflanzen, Springer Verlag, 60: 131-141.
- STEPANEK, D.. Was den Betreiber von Massendurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert. SCHWING-Verfahrenstechnik, Neukirchen-Vluyn, <http://www.inelektro.de/P051a.pdf>.
- TEEJET TECHNOLOGIES, 2010. Kolbenpumpe für Direkteinspeisung. Präsentation DE BG JG 081117, Anfrage bei Dr. Bernd Goebel, 2010.

- TOMPKINS, F.D., HOWARD, K.D., MOTE, C.R. & FREELAND, R.S., 1990. Boom flow characteristics with direct chemical injection. Transactions of the ASAE 33 (3): 737-743.
- VETTER, G. 2002. Handbuch Dosieren. Vulkan-Verlag GmbH, 2.Auflage: 43.
- VONDRICKA, J., 2008. Study on the Process of Direct Nozzle Injection for Real-Time Site-Specific Pesticide Application. Dissertation, Institut für Landtechnik, Bonn.
- VONDRICKA, J. & SCHULZE LAMMERS, P., 2009. Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system. Biosystems Engineering 103: 43-46.
- WALGENBACH, M. & DÖRPMUND, M., 2011. Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln: Eine ewige Vision? Profi Special Pflanzenschutztechnik, Februar 2011: 24-27.
- WAY, T.R., BASHFORD, L.L., VON BARGEN, K. & GRISSO, R.D., 1990. Peristaltic Pump Accuracy in Metering Herbicides. Applied Engineering in Agriculture 6 (3): 273-276.
- WEIS, M., GUTJAHR, C., RUEDA AYALA, V., GERHARDS, R., RITTER, C. & SCHÖLDERLE, F., 2008. Precision farming for weed management: techniques. Gesunde Pflanzen, Springer Verlag, 60: 171-181.
- WIESENDORFER, G., HAUS, A. & HÄSER, D., 2011. Wirtschaftsbericht VDMA Landtechnik 2011. Stand Mai 2011: 12.
- ZHU, H., FOX, D., OZKAN, H.E, BRAZEE, R.D. & DERKSEN, R.C., 1998. Time Delay for Direct Injection Sprayers. Transactions of the ASAE Vol. 41 (3): 525-530.

Danksagung

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers danke ich ganz herzlich für das in mich gesetzte Vertrauen. Seine persönliche Betreuung, die sehr angenehme Zusammenarbeit und sein Engagement haben ganz wesentlich zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan-Welm Biermann vom Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats. Bei Herrn Prof. Dr. agr. Heinrich W. Scherer bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Dr. Jiri Vondricka danke ich ganz besonders für die intensiven Diskussionen zum Thema Einspeisungsventil und Direkteinspeisung. Er hat das Projekt in dieser Form auf den Weg gebracht. Ohne Ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Malte Dörpmund danke ich für die Zusammenarbeit.

Gerd Beckers und Norbert Paulus danke ich für intensive Diskussionen im Rahmen von zahlreichen Projekttreffen sowie für die Unterstützung bei der Umsetzung des Aufbaus. Ein Dank gilt den Herren aus der Institutswerkstatt: Toni Berg, Roland Lutz, Walter Petriwski und Willi Berchtold. Die Zusammenarbeit war immer sehr konstruktiv und hat Spaß gemacht.

Mein Dank für Ihre Zusammenarbeit und Unterstützung gilt auch:

Dr. Hubert Hüging (INRES, Bonn), Dr. Dietmar Neuhaus (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum), Cai Xiang (China Agricultural University), Monika Förster (Institut für Landtechnik, Bonn), Frieder Seibold, Johannes Nepicks, Reiner Lock.

Sandra danke ich für Ihren Rückhalt und meiner Familie für Ihre Unterstützung, nicht zuletzt auch im landwirtschaftlichen Familienbetrieb.

Dem Projektträger der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung danke ich für die Unterstützung des Projektes und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für dessen Finanzierung.