

Universität Hohenheim  
Institut für Agrartechnik  
Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion  
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. K. Köller

# Entwicklung eines Tausensors mit Algorithmik zur Steuerung freiregelbarer Applikationsgeräte im Pflanzenschutz

Dissertation  
Zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Agrarwissenschaften

vorgelegt

der Fakultät Agrarwissenschaften

von  
M.Sc. Heike Kerstin Fröschle  
aus Stuttgart

2016

Die vorliegende Arbeit wurde am 06.04.2016 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung:	9. Juni 2016
1. Prodekan:	Prof. Dr. Ludwig Hölzle
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Dr. Dr. h.c. mult. K. Köller
Mitberichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. J. K. Wegener
3. Prüfer:	Prof. Dr. J. Müller

**Heike Kerstin Fröschele**

**Entwicklung eines Tausensors mit Algorithmik  
zur Steuerung freiregelbarer Applikationsgeräte  
im Pflanzenschutz**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5150-6

ISSN 0931-6264

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik im Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion der Universität Hohenheim. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karlheinz Köller für die Überlassung eines spannenden und aktuellen Themas sowie für das entgegengebrachte Vertrauen bei dessen Bearbeitung. Dank sagen möchte ich Herrn Professor Köller auch für sein stets offenes Ohr, seinen wissenschaftlichen Rat und für die Gewährung der zur Umsetzung notwendigen Freiheiten. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Jens K. Wegener für die Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Dr. Joachim Müller für die Teilnahme am Kolloquium.

Danken möchte ich den AMAZONEN-Werken H. Dreyer GmbH & Co. KG, insbesondere Herrn Dr. Justus Dreyer, Herrn Dr. Rainer Resch und Herrn Dr. Bernd Scheufler für die Initiative und das rege Interesse, sowie Herrn Stefan Kiefer und Herrn Dr. Florian Rahe für die Zusammenarbeit. Auch für die Bereitstellung von Maschinen möchte ich mich herzlich bedanken. Dem Unternehmen BASF SE Limburgerhof gebührt ebenfalls mein Dank. Zunächst Herrn Dr. Helmut Auwether für das unterstützende Interesse, ebenso Herrn Dr. Horst Dieter Brix und Herrn Dr. Heinz-Gerd Wegkamp. Herrn Dr. Marc Nolte und Frau Dr. Diana Westfalia Moran Puente danke ich für die Möglichkeit der Nutzung von Labors und technischen Einrichtungen, die Unterstützung bei der Vorbereitung von Feldversuchen sowie für das stets offene Ohr für fachliche Fragen.

Des Weiteren gilt mein Dank allen beteiligten studentischen Hilfskräften. Insbesondere Herr Joschko Luib hat durch sein tatkräftiges Engagement zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Herrn Hans-Peter Kärcher danke ich für die Unterstützung bei der Funktionsprüfung des Systems. Herrn Lukas Wagner, Frau Eva-Maria Holland und Herrn Marc Pommerau möchte ich für die Auswertung der zahlreichen Bilddaten danken.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meinem Mann Markus Ströbel-Fröschle. Ohne seinen Rat und seine Geduld, seinen Beitrag bei der Umsetzung von Ideen sowie bei der Durchführung von Feldversuchen hätte diese Arbeit in der vorliegenden Form nicht entstehen können.

Osnabrück, im Juni 2016

Heike Kerstin Fröschle



Dem Anwenden muss das Erkennen vorangehen.

(Max Planck)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1.	Problemstellung . . . . .	5
1.2.	Zielsetzung . . . . .	7
<b>2.</b>	<b>Kenntnisstand</b>	<b>9</b>
2.1.	Klimatologische Grundlagen . . . . .	9
2.1.1.	Allgemeine Meteorologie, Wetter, Klima und Tau . . . . .	9
2.1.2.	Taupunkt, Taupunkttemperatur und Taubildung . . . . .	10
2.1.3.	Taumenge und Taubildungsverlauf . . . . .	17
2.2.	Methoden der Taumengenmessung . . . . .	21
2.2.1.	Übersicht relevanter Messverfahren . . . . .	21
2.3.	Belagsbildung im chemischen Pflanzenschutz . . . . .	25
2.3.1.	Physikalische Grundlagen der Benetzung . . . . .	25
2.3.2.	Tropfengröße und Tropfenspektrum . . . . .	27
2.3.3.	Benetzbarkeit und Retention . . . . .	28
2.4.	Wirkstoffe, Taubildung und Stoffaustausch . . . . .	32
2.5.	Möglichkeiten zur variablen Anpassung der Trägersubstanzmenge	35
2.5.1.	Mehrkammerspritze . . . . .	35
2.5.2.	Direkteinspeisung . . . . .	38
2.5.2.1.	Technische Varianten der Direkteinspeisung . . . . .	39
2.5.2.2.	Pre-Mix Prototyp . . . . .	48
<b>3.</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>51</b>
3.1.	Allgemeine Definitionen . . . . .	51
3.2.	Auswahl der Versuchsstandorte . . . . .	56
3.3.	Applizierte Flüssigkeiten . . . . .	58
3.4.	Auswahl eines absoluten Vergleichsparameters . . . . .	61

3.5.	Grundlegender Feldversuch (GLV) . . . . .	63
3.5.1.	Klimadatenerfassung und Auswahl der Sensorik . . . . .	63
3.5.2.	Versuchsaufbau und Durchführung (GLV) . . . . .	66
3.5.2.1.	Bestandesklima und Klimafaktoren . . . . .	69
3.5.3.	Datenbewertung (GLV) . . . . .	70
3.5.3.1.	Bewertung der Bildsequenzen (GLV) . . . . .	71
3.6.	Rückstandsgrößenanalyse (LV1) . . . . .	73
3.6.1.	Versuchsaufbau und Datenerhebung (LV1) . . . . .	73
3.6.2.	Bildanalytische Bewertung von Rückstandsstruktur und Rückstandsverteilung (LV1) . . . . .	75
3.7.	Taumengenbestimmung . . . . .	77
3.7.1.	Taupunktberechnung . . . . .	77
3.7.2.	Tausimulation und Bestimmung des Betaungsgrades . . . . .	80
3.7.2.1.	Erster Messaufbau TMSG 1.0 . . . . .	80
3.7.2.1.1.	Versuchsdurchführung TMSG 1.0 . . . . .	81
3.7.2.2.	Weiterentwicklung zum TMSG 100 . . . . .	82
3.7.3.	Herleitung einer ersten Berechnungsgleichung . . . . .	83
3.7.4.	Tausteigung, absolute Mengen und Taubildungsvorgang . . . . .	85
3.7.4.1.	Tausteigung (LV2) . . . . .	85
3.7.4.2.	Taumengenentwicklung nach GLV sowie deren weiterführende Labor- und in vivo Betrachtungen . . . . .	86
3.7.4.2.1.	Taumengenentwicklung über die Zeit . . . . .	86
3.7.4.2.2.	Prüfung der Systemgenauigkeit und Taumengenerhebung durch Blotting . . . . .	88
3.7.4.2.2.1.	Standardisierte Laborbetrachtung (LV3) . . . . .	88
3.7.4.2.2.2.	Laborbetrachtung bei variablen Einflussfaktoren (LV4) . . . . .	89
3.7.4.2.2.3.	In vivo Untersuchung . . . . .	91
3.7.4.2.3.	Mathematische Beschreibung des Taubildungsvorganges aller Blottingversuche . . . . .	92
3.8.	Stereomikroskopische Betrachtung der Tautropfenradien (LV5) . . . . .	93
3.8.1.	Auswertung der Mikroskopaufnahmen . . . . .	94
3.8.1.1.	Häufigkeitsverteilung der Tautropfenradien . . . . .	94
3.8.1.1.1.	Betrachtung von Radien und Verlustarten . . . . .	95

3.9.	Retentionsanalyse (LV6) . . . . .	96
3.9.1.	Auswertung der Retentionsdaten (LV6) . . . . .	98
3.10.	Ansätze zur Applikationsmengenempfehlung im betauten Bestand	101
3.10.1.	Gute fachliche Praxis im chemischen Pflanzenschutz . . . . .	101
3.10.2.	Ansätze der Applikationsmengenempfehlung . . . . .	101
3.11.	Prototypenanalyse und abschließender Funktionstest des Steuerungssystems . . . . .	104
3.11.1.	Analyse des Pre-Mix Prototyps . . . . .	104
3.11.2.	Finaler Funktionstest . . . . .	106
3.11.2.1.	Versuchsaufbau und Durchführung des Systemtests . . . . .	107
3.11.2.2.	Ergebnisbewertung der Funktionsprüfung . . . . .	109
3.12.	Sensorsystem, Steuerung und Algorithmik . . . . .	110
3.12.1.	Aufbau, Parametergenerierung und Informationsfluss . . . . .	110
3.12.1.1.	Systemanforderungen im finalen Praxiseinsatz . . . . .	113
3.12.2.	Algorithmik, Software und Versionierung . . . . .	114
3.13.	Taamodelle . . . . .	117
3.13.1.	Input-/Output Modell der Steuerung . . . . .	117
3.13.2.	Ergänzendes konzeptionelles Klimamodell . . . . .	118
3.14.	Methoden der Datenanalyse . . . . .	120
3.14.1.	Fragestellungen . . . . .	120
3.14.2.	Statistische Verfahren . . . . .	121
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>125</b>
4.1.	Grundlegender Feldversuch (GLV) . . . . .	125
4.1.1.	Vergleich der Standard und Tauwerte aller Kulturen . . . . .	126
4.1.2.	Einfluss von Taumenge, Applikationsmenge und Verlusten auf die Anlagerung . . . . .	128
4.1.2.1.	Taumenge und Applikationsmenge - Einfluss auf die Anlagerung	128
4.1.2.2.	Taumenge und Applikationsmenge - Einfluss der Verlustarten auf die Anlagerung . . . . .	130
4.1.3.	Analyse von Rückstandsflächen (LV1) . . . . .	133
4.1.3.1.	Darstellung von Struktur und Art des Tropfenbildes . . . . .	133
4.1.3.2.	Erste Überlegungen zu taumengenbezogener Ausbringung . . . . .	137

4.2.	Taumengenberechnung . . . . .	139
4.2.1.	Erste Annahme - Entwicklung der Gesamtaumenge über die Zeit	139
4.2.2.	Ermittlung der Tausteigung (LV2) . . . . .	150
4.2.3.	Genauigkeitsprüfung unter Laborbedingungen (LV3) . . . . .	151
4.2.4.	Genauigkeitsprüfung unter variablen Laborbedingungen (LV4) .	153
4.2.5.	Genauigkeitsprüfung in vivo . . . . .	157
4.2.6.	Finales Berechnungsverfahren . . . . .	159
4.2.7.	Näherungsweise Herleitung der absolut gebildeten Taumenge . .	159
4.3.	Stereomikroskopische Betrachtung der Tautropfenbildung (LV5)	162
4.3.1.	Häufigkeitsverteilung der Tautropfenradien . . . . .	162
4.3.2.	Verlustarten und Tautropfenradien . . . . .	166
4.4.	Retentionsanalyse (LV6) . . . . .	171
4.5.	Weitere Ansätze der taumengenspezifischen Applikationsempfeh- lung . . . . .	175
4.5.1.	Maximale Retention als Basis der Empfehlung . . . . .	175
4.5.2.	Applikationsmengenempfehlung unter Berücksichtigung der gu- ten fachlichen Praxis . . . . .	177
4.6.	Finaler Funktionstest des Steuerungssystems . . . . .	181
4.6.1.	Betrachtung nach Taumenge, Applikationsmenge und Fahrgeschwin- digkeit . . . . .	183
4.6.2.	Untersuchung von Fahrzeit, Taumengenschwankung und Verzö- gerungszeit . . . . .	185
<b>5.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>189</b>
5.1.	Versuchsdurchführung . . . . .	189
5.2.	Aspekte der Applikation im betauten Bestand . . . . .	197
5.3.	Taumengenbestimmung . . . . .	200
5.3.1.	Bedingungen und Eingrenzung der Berechnung . . . . .	200
5.3.2.	Differenzierung von Mengenangaben . . . . .	202
5.4.	System, Modell und Messverfahren . . . . .	204
5.4.1.	System . . . . .	204
5.4.1.1.	Nutzen und Vorteile des Systems . . . . .	206
5.4.2.	Messverfahren . . . . .	208

---

5.4.3.	Modell . . . . .	209
5.5.	Applikationsmengenempfehlung und Kosten . . . . .	210
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>215</b>
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>219</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>225</b>
<b>9.</b>	<b>Summary</b>	<b>229</b>
<b>10.</b>	<b>Literatur</b>	<b>235</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang</b>	<b>261</b>