

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) **630**

Martin Schmidt

**Maschinelle Beurteilung agronomischer
Arbeitsqualität als Grundlage für die
Verhaltensgenerierung automatisierter
Landmaschinen**

Maschinelle Beurteilung agronomischer Arbeitsqualität als Grundlage für die Verhaltensgenerierung automatisierter Landmaschinen

vorgelegt von

M. Sc.

Martin Schmidt

ORCID: 0000-0002-1547-0297

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Cornelia Weltzien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karlheinz Köller

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. November 2022

Berlin 2023

Martin Schmidt

**Maschinelle Beurteilung agronomischer Arbeits-
qualität als Grundlage für die Verhaltensgenerierung
automatisierter Landmaschinen**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8945-5

ISSN 0931-6264

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die Durchführung einer solchen Arbeit wäre ohne die großartige Unterstützung vieler Menschen nicht möglich gewesen. Dafür bedanke ich mich ausdrücklich.

Prof. Dr.-Ing. Henning Jürgen Meyer danke ich für die Möglichkeit zur Promotion sowie die geleistete Betreuung mit wertvollen Hilfestellungen, die die vorliegende Arbeit in die richtige Richtung geleitet haben. Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karlheinz Köller danke ich für die Übernahme der Aufgabe als Gutachter und die engagierte Betreuung, speziell bei bodenbearbeitungstechnischen Fragestellungen. Prof. Dr.-Ing. Cornelia Weltzien gebührt mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur im Small- and Mid-Tractor Advanced Engineering der John Deere GmbH & Co. KG entstanden. Dr.-Ing. Norbert Fritz als meinem direkten Vorgesetzten danke ich für das hierbei in mich gesetzte Vertrauen, die großartige Unterstützung und den gewährten Freiraum. Zudem bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Udo Scheff für die gewährte Unterstützung in den vergangenen dreieinhalb Jahren und dafür, stets ein offenes Ohr für meine Anliegen gehabt zu haben.

Ohne eine Werkstatt auf aller höchstem Niveau wäre das Gelingen der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen. Daher gilt mein Dank Benjamin Müller stellvertretend für die Werkstätten in Mannheim, Bruchsal und Kaiserslautern.

Das Hofgut Neumühle hat die vorliegende Arbeit durch agronomische Expertise und durch die zur Verfügung gestellten Felder und Gerätschaften außerordentlich unterstützt. Stellvertretend für alle Mitarbeitenden bedanke ich mich bei Ulrich Schmitt und M. Sc. Christoph Weiss.

Zudem bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. (FH) Bernd Baum für die Unterstützung bei der Ansteuerung der TIA-Schnittstelle. Den Kolleg*Innen aus der Feldtestabteilung danke ich für die Unterstützung beim Akquirieren der Daten. M. Sc. Jan C. Peters und Michio Kise (Ph.D.) gilt mein Dank für die Hilfestellung bei der Einarbeitung in die Perception Software. Dr.-Ing. Philipp Münch danke ich für die Tipps im Umgang mit

regelungstechnischen Fragen. Zudem danke ich meinen Studenten, die im Rahmen eines Praktikums oder einer Abschlussarbeit die vorliegende Arbeit unterstützt haben.

Meinen Eltern gebührt mein besonderer Dank, da sie mir diesen Weg erst ermöglicht haben. Bei meiner Schwester Friederike bedanke ich mich für die Unterstützung in turbulenten Zeiten. Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Onkel Prof. h. c. Dr. Bernhard Haas, der mich stets von seinem Erfahrungsschatz hat profitieren lassen. Speziell danke ich auch meinem verstorbenen Großvater und Gießerei Ingenieur Willi Haas, ohne den ich diesen Weg so nicht gegangen wäre und den das Zustandekommen dieser Arbeit unter den gegebenen Umständen sicherlich besonders gefreut hätte.

Mannheim, im Dezember 2022

Martin Schmidt

Kurzfassung

Hochautomatisierte Landmaschinen sind keine Fiktion mehr und werden in den nächsten Jahren marktreif verfügbar sein. Solche Landmaschinen sind im Betrieb nicht mehr auf den Menschen angewiesen und werden eigenständig Entscheidungen treffen und umsetzen. Betrachtet man das Aufgabenspektrum einer maschinenführenden Person bei der Ausführung der Feldarbeit, so lässt sich die Gesamtaufgabe in die Teilaufgaben „Fahren“ und „Steuern und Überwachen des Arbeitsprozesses“ unterteilen. In der vorliegenden Arbeit wird exemplarisch am ausgewählten Verfahren Grubbern ein Ansatz für die Automatisierung der angesprochenen Teilaufgabe „Steuern und Überwachen des Arbeitsprozesses“ erarbeitet. Durch Feldtests wird dessen Relevanz nachgewiesen.

Der zentrale Punkt der Automatisierung der angesprochenen Teilaufgabe ist die agronomische Arbeitsqualität. Diese wird für das ausgewählte Verfahren zuerst systematisch untersucht. Auf dieser Grundlage wird eine für die vorliegende Arbeit gültige Definition des Begriffs „Arbeitsqualität“ vorgenommen. Hierbei handelt es sich um einen vom Menschen zu definierenden Bodenbedeckungsgrad von Ernteresten oder sonstiger Biomasse auf dem Feld.

Ausgehend von einer systematischen Analyse der Aufgaben der maschinenführenden Person bei der Feldarbeit wird ein Modell zur Beschreibung der Gesamtarbeitsaufgabe erarbeitet. Darauf basierend wird ein technisches Grundgerüst für die Automatisierung der Teilaufgabe „Steuern und Überwachen des Arbeitsprozesses“ erarbeitet.

Das technische Grundgerüst lässt sich weitergehend in eine zu erarbeitende Sensorik und ein zu erarbeitendes Regelungskonzept unterteilen. Für die zu erarbeitende Sensorik zur Messung des Bedeckungsgrades wird ein bildgebendes Verfahren mit einer monokularen Kamera ausgewählt. Hierbei werden Methoden des maschinellen Sehens und des maschinellen Lernens untersucht und miteinander verglichen. Ein Deep Learning Ansatz erweist sich in Tests als der geeignetste Ansatz. Zusätzlich wird noch ein einfaches Klassifizierungsverfahren zur Erkennung signifikanter Luftstaubkonzentrationen im Bild entwickelt, basierend auf Deep Learning.

Im regelungstechnischen Teil wird das erarbeitete technische Grundgerüst weiter verfeinert und ein kaskadiertes Regelungskonstrukt entwickelt. Hierbei wird auf der Grundlage von Feldversuchen zur Charakterisierung der Regelstrecke ein Split-Range-Ansatz erarbeitet. Der Ansatz wird auf Stabilität untersucht und implementiert. Da zur Umsetzung des erarbeiteten technischen Grundgerüsts mehr Funktionen notwendig sind als nur der reine Regelkreis, beispielsweise für den Umgang mit signifikanten Konzentrationen von Luftstaub, wird ein gesamtheitliches Konzept zur „Verhaltensgenerierung“ entwickelt.

Die entwickelten Deep Learning Modelle und das Konzept zur Verhaltensgenerierung werden abschließend in umfangreichen Feldversuchen auf verschiedenen Feldern mit unterschiedlichen Pflanzenarten erfolgreich getestet und verifiziert.

Abstract

Highly automated agricultural machinery is no longer fiction and will be available in the market in the next years. Such agricultural machinery does not depend on humans during operation and will make decisions independently. Looking at the range of tasks a machine operator must carry out during field work, the overall work task can be divided into the subtasks "driving" and "controlling and monitoring the work process". In this thesis, an approach for the automation of the subtask "controlling and monitoring the work process" is developed using the selected agronomic process cultivating as an example. Its relevance is demonstrated by field tests.

Agronomic job quality plays a major role in the automation of this subtask. First, job quality is systematically examined for the selected agronomic process cultivating. Based on this, job quality gets defined for this thesis as a desired degree of coverage of crop residues or other biomass in the field. The target value for this residue coverage degree must be defined by humans.

Based on a systematic analysis of the overall work task of the person operating the agricultural machine during field work, a generic model is developed describing the overall work task of the operator. Based on this generic model, a generic technical framework for the automation of the subtask "control and monitoring the work process" is developed.

The implementation of the developed generic technical framework requires a sensor system to be developed and a control concept to be developed. For the sensor system measuring the residue coverage, a monocular camera is selected. Computer Vision and Machine Learning methods are investigated and compared. As a result, a Deep Learning approach turns out to be the best approach. Additionally, a simple classification approach for detecting significant airborne dust concentrations in the image is developed based on Deep Learning.

In the control engineering part of this thesis, the generic technical framework for the automation of the subtask "controlling and monitoring the work process" is further refined, and a cascaded control structure is developed. Based on field tests to characterize the control plant, a Split-Range approach is developed. Furthermore, this

approach is investigated for stability and then implemented as a final step. For the implementation of the generic technical framework more functions are required than just the pure control loop, for example a logic for handling significant concentrations of airborne dust. Thus, a holistic concept for "behavior generation" is developed.

Finally, the developed Deep Learning models and the concept for behavior generation are successfully tested and verified in extensive field tests on different fields with different plant species.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	i
Kurzfassung.....	iii
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Symbolverzeichnis	xiii
Indexverzeichnis	xviii
Abkürzungsverzeichnis.....	xx
Glossar	xxii
1 Einleitung	1
1.1 Randbedingungen bei der Entwicklung automatisierter Landmaschinen.....	1
1.2 Motivation	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	4
1.4 Landwirtschaftliche Verfahrenskette in der Pflanzenproduktion	5
1.5 Auswahl des in der vorliegenden Arbeit betrachteten landwirtschaftlichen Verfahrens	6
2 Entwicklungsstand.....	8
2.1 Marktverfügbare Assistenzsysteme in der Landtechnik	8
2.1.1 Patente	9
2.2 Forschungsarbeiten an Prozessassistenzsystemen in der Landwirtschaft	9
2.2.1 Methoden der klassischen Bildverarbeitung	10
2.2.1.1 Gewichteter Jaccard Koeffizient.....	11
2.2.1.2 HSV-Farbmodell/HSL-Farbmodell	12
2.2.2 Maschinelles Lernen/Deep Learning	12
2.2.3 Light Detection And Ranging (LiDAR).....	14

2.3	Beschreibung der Arbeitsaufgabe des Menschen mit Landmaschinen	14
2.3.1	Technisches Grundgerüst für die Automatisierung der auf den landwirtschaftlichen Arbeitsprozess bezogenen Aufgaben der maschinenführenden Person.....	16
2.4	Verhalten von Sensoren in Szenarien mit Staub.....	17
2.4.1	LiDAR-Sensoren	18
2.4.2	RGB-Kamera	19
2.5	Verhalten von Sensoren in Szenarien mit geringem Licht	19
3	Agronomische Arbeitsqualität im Kontext automatisierter Landmaschinen.....	20
3.1	Definition des Begriffs „agronomische Arbeitsqualität“	20
3.2	Qualitätskriterien bei der Stoppelbearbeitung.....	22
3.2.1	Zusammenhang zwischen Arbeitsqualität an der Oberfläche und dem sich daraus ergebenden Bodenzustand.....	24
3.3	Bekannte Methoden zur Messung des Bodenbedeckungsgrades	25
3.4	Eigener Ansatz für die Beschreibung der Arbeitsaufgabe mit einer Traktor-Anbaugeräte-Kombination	27
3.5	Eigener generischer Ansatz für die Automatisierung der auf den landwirtschaftlichen Arbeitsprozess bezogenen Aufgaben der maschinenführenden Person.....	33
3.6	Ableitung der zu verwendenden Methoden.....	36
3.7	Weitere Vorgehensweise.....	41
4	Bildverarbeitung.....	42
4.1	Anforderungen und Konzept	43
4.1.1	Anforderungen an eine Bildverarbeitungsmethode zur Detektion des Bodenbedeckungsgrades.....	43
4.1.2	Anforderungen an eine Bildverarbeitungsmethode zur Detektion von signifikanten Luftstaubkonzentrationen.....	44
4.1.3	Konzept.....	44
4.2	Datenerfassung.....	46

4.2.1	Anforderungen an den zu erstellenden Datensatz	46
4.2.2	Aufbau der zwei Versuchsträger	47
4.2.3	Vorgehensweise zur Akquirierung der Rohdaten	52
4.3	Erstellen des Datensatzes zur Detektion des Bodenbedeckungsgrades	52
4.3.1	Datensatz für Training und Validierung	53
4.3.2	Testdatensätze	58
4.3.2.1	Erster Testdatensatz	58
4.3.2.2	Zweiter Testdatensatz	59
4.4	Bildverarbeitungsmethoden zur Detektion des Bodenbedeckungsgrades von Stroh und Stoppeln	59
4.4.1	Vorläufige Eingrenzung der Problemstellung	60
4.4.2	Wahl des bildverarbeitungstechnischen Ansatzes	60
4.4.3	Klassische Bildverarbeitung	61
4.4.4	Annotierung der Daten	70
4.4.4.1	Beschreibung der neuen Methode	70
4.4.4.2	Bewertung der resultierenden Datenqualität	73
4.4.5	Deep Learning	78
4.4.6	Evaluierung und Vergleich der Bildverarbeitungsmethoden	86
4.5	Erweiterung der Bildverarbeitungsmethode und Erhöhung der Robustheit	87
4.5.1	Grünpflanzen	88
4.5.2	Frontkamera	91
4.5.3	Labeling	92
4.5.4	Data Augmentation	94
4.5.5	Trainingsergebnisse	95
4.6	Entwicklung einer robusten Methode zur Detektion von Luftstaub	97
4.6.1	Datensatz für die Entwicklung einer Methode zur Detektion von Luftstaub	99

4.6.1.1	Datensatz für Training und Validierung.....	100
4.6.1.2	Testdatensatz.....	102
4.6.2	Training des Klassifikators	102
4.6.3	Test auf realem Feld	104
4.7	Implementierter Bildverarbeitungsprozess	105
5	Verhaltensgenerierung der Traktor-Anbaugeräte-Kombination	107
5.1	Arbeitskennfelder	108
5.1.1	Versuchsbedingungen	109
5.1.2	Auswertung	110
5.2	Methoden für die technische Umsetzung des 3-Ebenenmodells	114
5.2.1	Prozessplanungsebene	114
5.2.2	Prozessoptimierungsebene	116
5.2.3	Prozessstabilisierungsebene.....	124
5.2.4	Regelstrecke und Sensoren	127
5.2.5	Verhalten bei signifikanten Luftstaubkonzentrationen	128
5.2.6	Zustandsautomat.....	129
5.3	Stabilität der Regelkreise	131
5.3.1	Stabilisierungsebene	131
5.3.2	Optimierungsebene.....	132
5.4	Implementierung	140
5.5	Hardware-Architektur	141
6	Verifizierung des Gesamtsystems im Feld	143
6.1	Grundlegende Verifizierung der Funktionalität	144
6.1.1	Charakterisierung der Regelstrecke.....	145
6.1.2	Überprüfung der Funktionalität der Regelung	146
6.1.3	Einfluss des Systems auf den Bodenbedeckungsgrad.....	149
6.1.4	Fazit	151

6.2	Verifizierung des dynamischen Verhaltens des Systems	151
6.2.1	Charakterisierung der Regelstrecke.....	153
6.2.2	Verifizierung des dynamischen Verhaltens der Regelung.....	155
6.2.3	Vertiefende Tests verschiedener Reglerverstärkungen.....	164
6.2.4	Fazit	169
6.3	Nachweis des statistisch signifikanten Einflusses des Systems auf den Bodenbedeckungsgrad	170
6.4	Verifizierung des Systems unter Bedingungen mit signifikantem Luftstaub	174
6.4.1	Test des Binären Klassifikators	175
6.4.2	Auswirkung auf das Arbeitsergebnis	176
6.4.3	Fazit	181
7	Zusammenfassung und Ausblick	182
7.1	Zusammenfassung	182
7.2	Schlussfolgerungen	185
7.3	Übertragbarkeit auf weitere Arbeitsprozesse und Anbaugeräte.....	188
7.4	Ausblick.....	189
7.5	Schlussbemerkung	191
8	Literaturverzeichnis.....	193
9	Abbildungsverzeichnis.....	208
10	Tabellenverzeichnis	216
11	Anhang	219
11.1	Statistiken des ersten Testdatensatzes.....	219
11.2	Statistiken des zweiten Testdatensatzes	221
11.3	Übersicht Aufnahmezeitpunkte des Trainings- und Validierungsdatensatzes für die Bodenbedeckungsgraddetektion.....	223
11.4	Bilder des ersten Experiments zur Bewertung der Konsistenz der Annotierung	224

11.5	Netzwerkarchitektur von Smallnet	225
11.6	Beispielbilder des auf Grünpflanzen erweiterten Annotierungsprogramms	226
11.7	Bilder des zweiten Experiments zur Bewertung der Konsistenz der Annotierung.....	228
11.8	Verteilung der Bilder im Datenset zum Testen der binären Staubklassifizierung	229
11.9	Netzwerkarchitektur für die binäre Klassifizierung.....	233
11.10	Regelungstechnisches Gesamtkonzept.....	234
11.11	Messschriebe der Versuche zur Verifizierung der Funktionalität des Systems	235
11.12	Messschriebe der Versuche zur vertiefenden dynamischen Verifizierung	237