

Institut für Landtechnik  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

# **Fahrspur- und Routenplanung für teilautonome, GNSS-gestützte Landmaschinen**

**Inaugural-Dissertation**

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

vorgelegt am

09.07.2015

von

Dipl.-Ing. Dennis Sabelhaus

aus Kluse

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Jan-Welm Biermann  
Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2015  
Erscheinungsjahr: 2016

©2016 im Selbstverlag

Bezugsquelle: Institut für Landtechnik  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität  
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.

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Firma CLAAS E-Systems in Zusammenarbeit mit dem Institut für Landtechnik der Universität Bonn. Im universitären, im industriellen und im privaten Umfeld haben viele Personen einen Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit geleistet, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers danke ich ganz herzlich für das Ermöglichen dieser Industriepromotion. Die persönlichen und fachlichen Diskussionen haben ganz wesentlich zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jan-Welm Biermann bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats. Bei Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Helfrich und Prof. Dr. Cyrill Stachniss bedanke ich mich für die Begutachtung meiner mündlichen Prüfung.

Besonderer Dank gilt der Firma CLAAS und insbesondere Herrn Alexander Kruse, der mir diese Industriepromotion ermöglicht hat. Allen Kollegen sei herzlich gedankt für die Unterstützung bei einzelnen Themen dieser Arbeit und Ihren Beitrag zum stets sehr guten Arbeitsklima.

Herausheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Frank Röben, der mich mit großem persönlichem Einsatz und in täglichen fachlichen Diskussionen bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt hat.

Den Herren Lars Peter Meyer zu Hellingen, Kalle Weiland, Sascha Burdick, Frank Hagenlücke und Gerhard Nienaber möchte ich für die Hilfestellungen, die jederzeit spannenden Diskussionen und die unermüdliche Unterstützung danken.

Meiner Freundin Henny danke ich für ihr Verständnis und ihre große Geduld. Nur mit ihrer Hilfe war es mir möglich, die notwendigen Freiräume für das Entstehen dieser Arbeit, zu schaffen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und der Familie meiner Freundin für die motivierenden Gespräche, die mich immer wieder ermuntert haben, sowie die unermüdliche Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit, bedanken. Ohne diesen Rückhalt wäre das Entstehen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.



## Abstract

The presented work shows a strategy how semi-autonomous driving on the field can be realised. The focus is on the application in an agricultural vehicle with integration of a GNSS guidance system and its functionalities. Weather and situation dependent driving routes and limited computational resources during field process result in an important requirement of a planning system, an agile and fast recomputation. Further savings were realised by computer-aided optimisation algorithms. The system has a modular structure and it is shown how it can be extended for planning steps with special restrictions.

The field process is modeled based on machine data, thus working time and route length can be estimated. With recorded real data, the model is verified. The working time minimisation is implemented by defined cost function. New algorithms for field division and track generation can save up to 5 percent working time. Also the track order was optimised, so that the turning time can be reduced up to 50 percent. In addition, also recomputation because of plan deviation was implemented. The software scope contained a method to generate turning manoeuvres so that the connection of two field tracks can be computed with the shortest possible path length drivable for GNSS steering systems.

Semi-autonomous agricultural machines based on a GNSS steering system are still in focus of research and predevelopment phases developed. In this work, an assistance system and not an autonomous, mobile robot is presented. There are proposals for each planning step generated and - after confirmation or amendment by the user - executed. The advantage is that any auto-generated step can be changed manually.

A general modular system is designed. Extensions are possible so that further not considered field processes can be operated semi-autonomously. For several processes, such as combine harvesting, the machine-utilisation shall be optimised. This thesis deals with working time minimisation, while Multi-machine communication was not subject of the thesis.

## Kurzfassung

Die Entwicklungen in der Landwirtschaft sind durch Automatisierung und Informationstechnologie geprägt. Parallelfahrssysteme sind zu einem wichtigen Werkzeug geworden, um die Maschine mit einer Spurgenaugigkeit von wenigen Zentimetern auf dem Feld zu navigieren.

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Planungsprogramm, mit dem ein automatisches Lenksystem zu einem teilautonomen Feldroboter ohne Mehrmaschinenkooperationen weiterentwickelt wurde. Hierfür sind fünf notwendige Planungsschritte konzipiert worden. Im ersten Schritt werden die notwendigen Eingabeparameter Feldgrenze und Hindernisse aufgezeichnet und nachbearbeitet, die notwendigen Maschinenparameter wurden ebenfalls in das System eingegeben. Das Feld wird in Bereiche unterteilt und Bearbeitungsrichtungen für die Teilbereiche bestimmt. Die Fahrspuren werden mithilfe der eingegebenen Daten flächendeckend generiert und Wendeflächen vorgesehen. Im Anschluss wird eine Teilfeld- sowie Fahrspurreihenfolge mittels Methoden des Operations Research berechnet.

Es wird gezeigt, dass die verwendeten Algorithmen für eine Feldteilung, Auswahl einer Abarbeitungsrichtung und für eine Spurerstellung die Arbeitszeit um durchschnittlich 5 % minimieren können. Ein Modell zur Arbeitszeitabschätzung für ein gegebenes Feld wird gebildet und verifiziert. Das Sequenzieren der Teilfelder und Fahrspuren wird ebenfalls durch das Programm vorgeplant. Durch eine solche Fahrstrategieplanung wird die Wendezeit um ca. 50 % verringert. Ein weiterer wichtiger Baustein für das System ist die Überwachung. Neben den Neuberechnungen der Routen aufgrund von situationsbedingten, von den Landwirten angestoßenen Planänderungen werden auch Wendemanöver geplant und ausgeführt.

Teilautonome Landmaschinen sind in einer Forschungsphase und haben aufgrund der Menge an noch zu lösenden Entwicklungsaufgaben die Marktreife nicht erreicht. In dieser Arbeit wird ein Assistenzsystem und kein autonomer, mobiler Roboter vorgestellt. Es werden Vorschläge für jeden Planungsschritt generiert und diese - nach Bestätigung oder Änderung durch den Anwender - ausgeführt. Der Vorteil ist somit, dass jeder automatisch generierte Schritt manuell geändert werden kann.

Das System ist modular aufgebaut und Erweiterungen des Systems sind möglich, sodass auch andere nicht betrachtete Feldprozesse teilautonom gefahren werden können. Alle Algorithmen sind auf einen minimalen Rechenzeitbedarf ausgelegt. Analysen bestätigen die Anwendbarkeit auf einem Maschinenterminal.

## Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Abstract</b> .....  | <b>V</b>    |
| <b>Kurzfassung</b> .....                                       | <b>VI</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....                                | <b>VII</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                             | <b>IX</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....                               | <b>XII</b>  |
| <b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen</b> .....           | <b>XIII</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                      | <b>1</b>    |
| 1.1 Zielsetzung .....  | 2           |
| <b>2 Stand der Technik</b> .....                               | <b>3</b>    |
| 2.1 GNSS-Parallelfahrssysteme.....                             | 3           |
| 2.1.1 Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) .....        | 4           |
| 2.1.2 Systemaufbau .....                                       | 8           |
| 2.1.3 Fahrfunktionen .....                                     | 9           |
| 2.2 Routenplanung in der Landwirtschaft .....                  | 10          |
| 2.2.1 Forschungsvorhaben .....                                 | 12          |
| 2.2.2 Feldteilung .....  | 15          |
| 2.2.3 Flächendeckende Pfadplanung.....                         | 18          |
| 2.2.4 Infield-Logistik.....                                    | 22          |
| 2.2.5 Fahrwegsplanung .....                                    | 24          |
| 2.3 Verwandte Forschungsgebiete .....                          | 29          |
| <b>3 Material und Methode</b> .....                            | <b>31</b>   |
| 3.1 Felddatenaufzeichnung .....                                | 34          |
| 3.1.1 Nachbearbeiten von Polygonen und Polylinien.....         | 34          |
| 3.2 Feldeinteilung.....  | 36          |
| 3.3 Referenzlinienwahl .....                                   | 37          |
| 3.3.1 Referenzlinienwahl nicht-kapazitiver Bearbeitung.....    | 38          |
| 3.3.2 Referenzlinienwahl, basierend auf der Tankkapazität..... | 39          |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4      | Spurmustergenerierung.....                            | 40         |
| 3.4.1    | Vorgewendespurgenerierung.....                        | 40         |
| 3.4.2    | Generierung der Feldfahrspuren.....                   | 45         |
| 3.4.3    | Hindernisbetrachtung.....                             | 47         |
| 3.5      | Strategieberechnung .....                             | 48         |
| 3.5.1    | Berechnung der Teilfeldreihenfolge .....              | 49         |
| 3.5.2    | Fahrstrategieberechnung.....                          | 50         |
| 3.6      | Pfadplanung .....                                     | 54         |
| 3.6.1    | CC-Kreise .....                                       | 55         |
| 3.6.2    | Wendewegplanung mithilfe von CC-Pfaden.....           | 58         |
| 3.6.3    | Sonderwegplanung mithilfe von CC-Pfaden .....         | 61         |
| 3.7      | Echtzeitüberwachung .....                             | 63         |
| 3.8      | Aufbau des mobilen Versuchsträgers.....               | 64         |
| 3.9      | Validierungsmethodik .....                            | 66         |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse.....</b>                                | <b>69</b>  |
| 4.1      | Verifikation des Arbeitszeitmodells.....              | 70         |
| 4.2      | Optimierungspotential durch Vorplanung .....          | 75         |
| 4.2.1    | Statistische Analyse.....                             | 75         |
| 4.2.2    | Beispielhafte Untersuchung.....                       | 77         |
| 4.3      | Optimierungspotential durch Fahrstrategieplanung..... | 80         |
| 4.4      | Pfadplanungsergebnisse .....                          | 82         |
| 4.5      | Berechnungszeiten.....                                | 88         |
| 4.6      | Statistische Schlaganalyse.....                       | 90         |
| <b>5</b> | <b>Diskussion.....</b>                                | <b>96</b>  |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>              | <b>102</b> |
| <b>7</b> | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                      | <b>105</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Umlaufbahnen der GPS-Satelliten (Köhne & Wößner, 2015) .....  | 4  |
| Abbildung 2: Prinzip des differentiellen GPS (Claas E-Systems, 2013) .....   | 5  |
| Abbildung 3: SBAS - Korrektursignale (Brunnert, 2006) .....  | 6  |
| Abbildung 4: Genauigkeitsklassen von Korrekturdaten (Claas E-Systems, 2013).....   | 8  |
| Abbildung 5: Systemkomponenten eines GNSS-Lenksystems (CLAAS S10, 2015) .....  | 9  |
| Abbildung 6: Fahrmodi (links - AB-Gerade, Mitte – Kreis, rechts – Kontur) (CLAAS S10,<br>2015) .....   | 10 |
| Abbildung 7: Systemaufbau des EU-Projektes Geopal .....  | 12 |
| Abbildung 8: Autonomer Roboter Forge (Autonomous Solutions, Inc., 2014) .....  | 13 |
| Abbildung 9: Verschiedene Anwendungen der Roboterplattform BoniRob .....   | 14 |
| Abbildung 10: Vorgeschlagene Feldteilung aus John Deere Patent (Kondekar, 2011) .....  | 15 |
| Abbildung 11: Vorgeschlagene Feldteilung nach Jin (2010) .....   | 16 |
| Abbildung 12: Zellulare Dekomposition (links) und resultierende, vorgeschlagene Feldteilung<br>(rechts) nach Oksanen und Visala (2009) (erster Ansatz).....                                | 17 |
| Abbildung 13: Vorgeschlagene Feldteilung und Reihenfolge nach Zhang et al. (2010).....   | 17 |
| Abbildung 14: Feldteilung nach Choudhury und Singh (2009) .....  | 18 |
| Abbildung 15: Geplante Fahrwege nach Jin (2009) mit farblich unterschiedenen Bereichen   | 19 |
| Abbildung 16: Digitales 3D-Modell eines Feldes nach Jin (2009); links: Luftaufnahme, rechts:<br>3D-Modell mit farblich gekennzeichneten Höhenunterschieden.....                            | 19 |
| Abbildung 17: Online-Pfadplanung nach Oksanen (2007), Zeitverlauf der Feldfahrt durch<br>farbliche Änderung gekennzeichnet.....  | 20 |
| Abbildung 18: Fahrspurerzeugung nach Hameed et al. (2010).....   | 21 |
| Abbildung 19: Ansicht eines Routenplanungs-Prototypen nach Brunnert (2006) .....   | 22 |
| Abbildung 20: Schema der Planung des Projektes marion (Scheuren, et al., 2011) .....   | 23 |
| Abbildung 21: Logistikproblem modelliert nach Bochtis und Sorensen (2010), links –<br>Graphenmodellierung des Feldprozesses, rechts –Routen nach<br>Berechnungen mit VRP-Heuristiken ..... | 24 |
| Abbildung 22: Dubinskurve (LaValle, 2006).....   | 25 |
| Abbildung 23: Reeds and Shepp Kurve (Reeds & Shepp, 1990) .....  | 26 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 24: Suchbasierte Planung mit Bewegungsprimitiven (Likhachev, 2013).....  | 26 |
| Abbildung 25: Wendebirne nach Oksanen (2007) .....   | 27 |
| Abbildung 26: Vorgewendeplanung nach Scheuren (2014) .....   | 28 |
| Abbildung 27: Wendemanöver unter Berücksichtigung der Feldgrenze (Choudhury & Singh,<br>2009) .....  | 29 |
| Abbildung 28: Systemaufbau einer modularen dynamischen Routenplanung (Microsoft Bing;<br>Nokia, 2015) .....  | 33 |
| Abbildung 29: Aufzeichnung einer Feldgrenze und eines Hindernisses.....  | 34 |
| Abbildung 30: Filterung einer aufgezeichneten Spur (Microsoft Bing; Nokia, 2015).....  | 35 |
| Abbildung 31: Methodik zur Aufzeichnung einer Feldgrenze; blau – gefilterte Schleifen, grün -<br>gefilterte Aufzeichnung, rot - interpretierte Feldgrenze..... | 36 |
| Abbildung 32: Ablauf der Feldteilung nach dem Prinzip „divide et impera“ .....   | 37 |
| Abbildung 33: Ablaufdiagramm der Referenzlinienwahl.....   | 39 |
| Abbildung 34: Betrachtung des Mähdrusches als kapazitiven Feldprozess .....  | 40 |
| Abbildung 35: Wahl der Vorgewendebreite in Anhängigkeit von der gefahrenen Spur und der<br>Arbeitsbreite .....   | 41 |
| Abbildung 36: Erstellung des inneren Feldpolygons .....  | 42 |
| Abbildung 37: Erstellung der umrundenden Vorgewendespuren mit Vergrößerung .....   | 42 |
| Abbildung 38: Neuberechnung der Vorgewendefahrspuren .....   | 43 |
| Abbildung 39: Vergleich der konkaven Kantenverschiebung .....  | 44 |
| Abbildung 40: Verschobenes Grenzpolygon.....   | 44 |
| Abbildung 41: Spurgenerierung im inneren Feldpolygon .....   | 45 |
| Abbildung 42: Geglättete Fahrspuren im Feldinneren (blaue Polylinien).....   | 46 |
| Abbildung 43: Berechnung der Aushebepunkte.....  | 47 |
| Abbildung 44: Spurmuster mit Hindernis nach Klassifizierung (grün – neue Vorgewendelinie,<br>blau – Fahrspur im Feldinneren, rot – Vorgewendefahrspur) .....   | 48 |
| Abbildung 45: Weglängen verschiedener Wendemanöver .....   | 48 |
| Abbildung 46: Komplexes Beispiel einer Teilfeldreihenfolge bei Säprozessen.....  | 49 |
| Abbildung 47: Modulaufbau der nicht-kapazitiven Fahrstrategieberechnung .....  | 51 |
| Abbildung 48: Graphenmodellierung .....  | 52 |

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 49: Abschätzung der Wendeweglängen.....  | 53 |
| Abbildung 50: Darstellung des Nearest Neighbor Verfahren.....  | 53 |
| Abbildung 51: Beispiel 2-opt Vertauschung (Merz, 2008) .....   | 54 |
| Abbildung 52: Anforderungen an eine geplante Fahrspur: Beachtung des minimalen Wenderadius, der maximalen Querbesehleunigung und der maximalen Lenkgeschwindigkeit.....                | 55 |
| Abbildung 53: Darstellung der Krümmungsverläufe; links – Dubinskurve, rechts – CC-Pfad   | 56 |
| Abbildung 54: Genereller Fall einer CC-Wende .....   | 57 |
| Abbildung 55: CC-Wende für den Winkelunterschied $0 < \delta < \delta_{min}$ .....   | 58 |
| Abbildung 56: Konstruktion einer Omega-Wende .....   | 59 |
| Abbildung 57: Konstruktion eines Gap-Wendemanövers.....  | 59 |
| Abbildung 58: Konstruktion eines U-Turns.....  | 60 |
| Abbildung 59: Konstruktion eines VGW-minimierenden Wendemanövers .....   | 61 |
| Abbildung 60: Darstellung der Pfade mit CC-Kreismitelpunktabstand $d > R_{big} \cdot \cos(\mu)$ .....  | 62 |
| Abbildung 61: CC-Fahrwege von Position auf Spur .....  | 62 |
| Abbildung 62: Routenplanüberwachung.....   | 64 |
| Abbildung 63: Prototypischer Aufbau des Planungssystems mit Lenksystem-Anbindung.....  | 65 |
| Abbildung 64: Aufbau der Validierungsmethodik .....  | 67 |
| Abbildung 65: Abschätzung der Abarbeitungsrichtung (schwarzer Pfeil – approximierte Abarbeitungsrichtung, rot – aufgezeichnete Fahrspur).....  | 67 |
| Abbildung 66: Abschätzung der bearbeiteten Fläche.....   | 68 |
| Abbildung 67: Darstellung der Selbstüberschneidungen.....  | 69 |
| Abbildung 68: Beispielhafte Darstellung des Arbeitszeitvergleichs .....  | 76 |
| Abbildung 69: Box-Whisker-Diagramm zur Varianz des Einsparpotentials durch Routenplanung .....   | 77 |
| Abbildung 70: Vergleich zweier Ausrichtungen auf einem rechteckigen Feld; links: 9115 m Routenlänge mit 0,6491 h Arbeitszeit; rechts: 9430 m Routenlänge mit 0,7116 h Arbeitszeit..... | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 71: Vergleich zweier Fahrmodi auf einem kreisförmigen Feld; links: 3813 m<br>Routenlänge mit 0,31 h Arbeitszeit; rechts: 3645,82 m Routenlänge mit 0,25 h<br>Arbeitszeit..... | 79 |
| Abbildung 72: Vergleich zweier Fahrmodi auf einem konturförmigen Feld; links: 14029 m<br>Routenlänge mit 1,2 h Arbeitszeit; rechts: 13584 m Routenlänge mit 0,918 h<br>Arbeitszeit..... | 79 |
| Abbildung 73: Darstellung der geplanten Trajektorie (links) und des Verlaufs der Krümmung<br>und Krümmungsänderung (rechts) .....   | 82 |
| Abbildung 74: Vergleich der Vorgewendebreiten minimierende Wende (Index 1) sowie der<br>Omega-Wende (Index 2) .....   | 83 |
| Abbildung 75: Vergleich der Wendetypen mit Abstand $d = 3$ m und $d = 10$ m.....  | 85 |
| Abbildung 76: Wendewegvariationen mit variierendem Winkelunterschied (links) und<br>dazugehörige Wendeweglängen (rechts).....   | 87 |
| Abbildung 77: Wendewegvariationen mit variierendem longitudinalem Versatz (links) und<br>dazugehörige Wendeweglängen (rechts).....  | 87 |
| Abbildung 78: Wendewegvariationen mit variierendem lateralem Versatz (links) und<br>dazugehörige Wendeweglängen (rechts).....   | 88 |
| Abbildung 79: Darstellung des Verhältnisses von Polygonpunkten und Fläche zur<br>Berechnungszeit.....   | 89 |
| Abbildung 80: Schlaggröße in Hektar nach Bundesländern.....   | 91 |
| Abbildung 81: Fahrmodi-Untersuchung nach Bundesländern.....   | 92 |
| Abbildung 82: Unterteilung von Schlägen nach Bundesländern.....   | 93 |
| Abbildung 83: Untersuchung zu inneren Feldgrenzen .....   | 94 |
| Abbildung 84: Umgesetzte Module mit Wahrscheinlichkeit.....   | 95 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Vergleich diverser Optimierungsalgorithmen (Reinelt, 1994)..... | 50 |
| Tabelle 2: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 1 .....                | 71 |
| Tabelle 3: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 2.....                 | 72 |
| Tabelle 4: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 3.....                 | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 5: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 4.....                               | 74 |
| Tabelle 6: Vergleich diverser Fahrmuster .....   | 80 |
| Tabelle 7: Ergebnisvergleich diverser Fahrmuster.....                                    | 81 |
| Tabelle 8: Vorgewendebreitenvergleich verschiedener Eingangsparameter.....               | 84 |
| Tabelle 9: Vergleich verschiedener Wendemanöver in eine drei Meter entfernte Spur .....  | 86 |
| Tabelle 10: Vergleich verschiedener Wendemanöver in eine zehn Meter entfernte Spur ..... | 86 |
| Tabelle 11: Gemittelte Rechenzeiten der eingeführten Module.....                         | 90 |

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

|                     |   |
|---------------------|---|
| $R_{big}$           | Radius eines CC-Wendekreises                    |
| $a_{verzögerung}$   | Bremsbeschleunigung                             |
| $l_{verzögerung}$   | Verzögerungsstrecke                             |
| $l_{clothoid}$      | Klothoidenlänge                                 |
| $length_{fishtail}$ | Länge einer Fishtail-Wende                      |
| $length_{lrl,rlr}$  | Länge einer direkten Wende                      |
| $p_{max}$           | Laufparameter einer Klothoide                   |
| $t_{fishtail}$      | Zeit einer Fishtail-Wende                       |
| $t_{vs}$            | Lenkzeit  |
| $\kappa_{max}$      | Maximale Krümmung                               |
| $\sigma_{max}$      | Maximale Krümmungsänderung                      |
| AB-Fahrspur         | Geradenförmiger Fahrspurmodus eines Lenksystems |
| AB-Kontur           | Konturförmiger Fahrspurmodus eines Lenksystems  |
| BMWi                | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie    |
| B-Spline            | Basis-Spline in der numerischen Mathematik      |
| C#                  | Programmiersprache                              |
| C/A-Code            | Coarse/Acquisition-Code                         |
| C++                 | Programmiersprache                              |
| CAD                 | Computer Aided Design                           |
| CC                  | Continuous Curvature                            |
| $C_f$               | Fresnel-Integral                                |
| CTF                 | Controlled Traffic Farming                      |

|                     |  |
|---------------------|--|
| CVRP                | Capacitated Vehicle Routing Problem, Formulierung eines Optimierungsproblems                 |
| DGNSS               | Differential Global Navigation Satellite System  |
| DGPS                | Differential Global Positioning Service  |
| DLG                 | Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft  |
| DOP                 | Dilution of Precision  |
| EGNOS               | European Geostationary Navigation Overlay Service  |
| FI                  | Farthest Insertion Heuristik   |
| GALILEO             | europäisches globales Satellitennavigations- und Zeitgebungssystem                           |
| Geopal              | EU-Projekt   |
| GLONASS             | globales Navigationssatellitensystem des Verteidigungsministeriums der Russischen Föderation |
| GNSS                | Global Navigation Satellite System   |
| GP                  | Grenzpolygon   |
| GPS                 | Global Positioning Service   |
| GSM                 | Global System for Mobile Communications  |
| i                   | Iterator   |
| K-Turn              | Landwirtschaftliches Wendemanöver  |
| LGL                 | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen links gerade links  |
| LGR                 | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen links gerade links  |
| LRL                 | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen links rechts links  |
| LTL                 | Lenkzeit, Lock-To-Lock-Zeit  |
| $l_{\text{Zusatz}}$ | Zusatzlänge eines Sonderwendemanövers  |
| MARION              | BMW-Projekt „Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten“         |
| MSAS                | Multi-functional Satellite Augmentation System   |
| NAVSTAR-GPS         | Global Positioning System (offizielle Bezeichnung)   |
| NI                  | Nearest Insertion Heuristik  |
| NN                  | Nearest Neighbor Heuristik   |
| NTRIP               | Networked Transport of RTCM via Internet Protocol  |
| OCP                 | Optimal Control Problem  |
| OMNISTAR            | globaler Anbieter im Bereich der DGNSS-  |

---

|            |  |
|------------|--|
|            | Korrekturdatenübertragung  |
| OR         | Operations Research  |
| PC         | Personal Computer  |
| P-Code     | Precision-Code   |
| Pivot-Mode | Kreisfahrmodus   |
| PPS        | precision positioning code   |
| RGL        | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen rechts<br>gerade links                      |
| RGR        | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen rechts<br>gerade rechts                     |
| RIMS       | Ranging and Integrity Monitor Stations                                       |
| RLR        | Dubinskurve mit den Lenkbefehlen rechts<br>links rechts                      |
| $R_{min}$  | Minimaler Wenderadius  |
| RTCM       | Radio Technical Commission for Maritime<br>Services                          |
| RTK-GPS    | Real Time Kinematic, Echtzeitkinematik                                       |
| SBAS       | Satellite Based Augmentation System  |
| SBPL       | Search Based Planning Library  |
| SEP        | Spherical Error Probable   |
| $S_f$      | Fresnel-Integral   |
| StarFire   | kommerzieller Dienst im Bereich der<br>Sattelliten-Korrekturdatenübertragung |
| $t$        | Zeit   |
| UMTS       | Universal Mobile Telecommunications<br>System                                |
| USB        | Universal Serial Bus   |
| U-Turn     | Landwirtschaftliches Wendemanöver, auch<br>direktes Wenden                   |
| VBS        | Virtual Base Station   |
| VGW        | Vorgewende   |
| WAAS       | Wide Area Augmentation System  |
| WGS84      | World Geodetic System 1984   |
| WLAN       | Wireless Local Area Network  |
| $x$        | x-Koordinate   |
| $y$        | y-Koordinate   |
| $\delta$   | Gegenwinkel des CC-Wendekreises  |
| $\theta$   | Ausrichtung  |
| $\sigma$   | Lenkwinkeländerung   |
| $\Omega$   | Kreismittelpunkt   |

$\Omega$ -Turn,  $\Omega$ -Wende

$\kappa$

$\mu$

$\sigma$

Landwirtschaftliches Wendemanöver

Krümmung

Gegenwinkel des CC-Wendekreises

Krümmungsänderung

## 1 Einleitung

Die Landwirtschaft steht vor strukturellen Veränderungen; mit einem Bevölkerungswachstum auf neun Milliarden Menschen im Jahr 2050 muss die Lebensmittelproduktion erheblich steigen (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung, 2014). Die auf der Erde zur Verfügung stehenden Ackerflächen sind begrenzt. Während im Jahr 1950 noch 5600 m<sup>2</sup> Fläche pro Kopf für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung gestanden haben, werden es 2050 nur noch 1500 m<sup>2</sup> sein (Schmid & Goldhofer, 2013). Die Nachfrage nach Getreide und Fleisch stieg in den letzten zehn Jahren um jeweils fast 500 Mio. t, sodass eine Produktion von ungefähr 2,5 Mrd. t Getreide und 2,5 Mrd. t Fleisch im Jahr 2017 gefordert sein wird (Schmid & Goldhofer, 2013). Der Klimawandel mit Extremwetterereignissen, Erderwärmung, vermehrten Hochwassern und Kältewellen wird die Landwirtschaft der Zukunft prägen (Umweltbundesamt, 2014).

Auch die Erzeugung von Ersatzprodukten verknappender Rohstoffe rückt immer mehr in den Fokus der Landwirtschaft. Bereits fünf Millionen deutsche Haushalte werden durch Biogas erzeugten Strom versorgt (Landwirtschaftsverlag, 2014), 11 % der erneuerbaren Stromproduktion stammen aus Biogasanlagen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe eV, 2014). Diese Konkurrenz der Biomasse als Energielieferant zur Nahrungsmittelerzeugung macht eine höhere Effizienz der Landwirtschaft unausweichlich.

Die aufgeführten Einflüsse stellen nicht nur große Herausforderungen an die Züchtung neuer Nutzpflanzen, sondern ebenfalls an die Maschineneffizienz auf dem Feld, welche einer ständigen Verbesserung bedarf. Eine wichtige Neuerung ist dabei die Präzisionslandwirtschaft. Das Konzept einer informationsgeleiteten Betriebsführung will mithilfe von computergestützter Sensorik und Geoinformationen die Feldarbeit effizienter machen. Maßnahmen zur Landbewirtschaftung werden mit variablen Standort- und Betriebsparametern differenziert gesteuert. Ziel ist das Einsparen von Betriebsmitteln, eine erhöhte Effizienz der eingesetzten Mittel, eine Erhöhung der Ertragssicherheit und -qualität sowie eine höhere Nachhaltigkeit. Typische Maßnahmen des „Precision Farming“ sind dabei das kleinräumige Betrachten des Bodens und eine teilschlagbezogene Düngung und Kalkung sowie sensorbasierte Stickstoffdüngung und Applikation von Pflanzenschutzmitteln oder Flüssigmist. Die Ertragskartierung ist ein weiterer wichtiger Bereich, der den Landwirten als Entscheidungshilfe dient und das Auftragsmanagement vereinfacht. Die GNSS-Spurführung mithilfe von Parallelfahrssystemen verringert die Überlappung an Spurrändern, entlastet den Fahrer und ermöglicht das Arbeiten bei Nacht und schlechten Sichtverhältnissen und ist damit ebenfalls als Teil des Precision Farming zu nennen.

Die langjährige Nutzung der automatisch GNSS-basierten Spurführung hat zu neuen landwirtschaftlichen Bearbeitungsformen geführt. Dazu zählt die Streifenbodenbearbeitung (Strip-Till), die die Infiltrations-, Speicher- und Drämfähigkeit fördert. Unter Strip-Till wird die Bearbeitung eines schmalen Bodenstreifens um das Säeschar verstanden. Beim Maisanbau - Hauptanwendung der Streifenbodenbearbeitung - wird im Frühjahr ein schmaler Bodenstreifen gelockert und gegebenenfalls gedüngt. Kurze Zeit später wird in den bearbeiteten Streifen ausgesät. Die positiven Eigenschaften der Direktsaat werden mit einem minimalen Eingriff in die Bodenstruktur sowie einer intensiveren Bearbeitung des Bereiches der Kulturpflanzen verbunden (Kirchmeier & Demmel, 2013).

Neben der Streifenbodenbearbeitung rückt die Nutzung von permanenten Fahrspuren - auch Controlled Traffic Farming (CTF) genannt - in den Fokus verschiedener Landtechnikhersteller und Landwirte. Bei diesem Verfahren werden alle Maschinen auf dem Feld jedes Jahr mit derselben Fahrspurbreite verwendet, wodurch der Acker in befahrene und unbefahrene Bereiche unterteilt wird. Die vorgestellten Verfahren können nur durch eine Abfahrwiederholbarkeit angewandt werden, wie es durch den Einsatz von GNSS-Lenksystemen ermöglicht wird (Demmel, et al., 2015).

## 1.1 Zielsetzung

Die Belastung der Landwirte während der Feldarbeit ist hoch, da das Einstellen des Anbaugeräts, das genaue Spurführen des Traktors mit Anbaugerät und das Überwachen der Prozessparameter Aufgaben sind, die zeitgleich ihre Aufmerksamkeit erfordern. Mit der Entwicklung von automatischen Lenksystemen ist der Landwirt nicht mehr in der Fahrverantwortung, sondern muss lediglich das Fahrverhalten der Maschine überwachen, die Maschine kann beim Erreichen des Feldrandes automatisch in eine parallele Spur wenden (Claas AUTO TURN, 2015).

Die vorliegende Arbeit zeigt, wie ein automatisches Lenksystem dahingehend erweitert werden kann, dass das Feld teilautonom abgearbeitet wird. Ein Modell für die Arbeitszeitkalkulation wird gebildet und computergestützt Methoden entwickelt, die mithilfe dieses Modells Arbeitszeiteinsparungen während der Planung von Fahrspuren und Spurreihenfolgen bestimmen. Es wurde ein mobiler Testaufbau entwickelt, der die Methoden verwendet und so die freie Planung von Schlägen mit folgendem Fokus umsetzt:

- Unterteilung eines Schlages, sodass zusammenhängende Flächen mit einer gültigen Arbeitsrichtung entstehen
- Bestimmung von Bearbeitungsrichtungen, welche die Arbeitszeit minimieren

- Vorplanung von Wendeflächen
- Bestimmung der Wendezeit für Teilfeld- und Spursequenzen

Basierend auf der gewonnenen Datengrundlage wird der Testaufbau verifiziert und das Optimierungspotential bestimmt. Außerdem verlangt der Einsatz auf einem Fahrzeug kurze Rechenzeiten aller Methoden, was ebenfalls analysiert wurde.

## 2 Stand der Technik

Die Beschreibung des Standes der Technik gliedert sich in zwei Themengebiete. Das Funktionsprinzip von automatischen Lenksystemen globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) wird zuerst beschrieben. Solche Systeme gehören zum Standard-Equipment großer Ernte- und Landmaschinen und haben - belegt durch zahlreiche Untersuchungen - ihren Nutzen bewiesen (Stoll, 2006). Es soll die Funktion solcher Systeme beschrieben werden; die Systemkomponenten und die üblichen Fahrfunktionen werden ergänzend aufgeführt.

Im zweiten Teil wird das autonome Fahren auf landwirtschaftlichen Flächen beleuchtet. Forschungsprojekte und Ansätze kommerzieller Anbieter, die sich mit der Automatisierung und Roboterisierung landwirtschaftlicher Prozesse beschäftigen, werden vorgestellt. Gegenstand dieser Automatisierung sind die Feldteilung, die Fahrspurplanung, die Logistik auf dem Feld und die Trajektorienplanung. Diese Module werden im Einzelnen erläutert und die bedeutsamen Erkenntnisse dazu aufgeführt.

### 2.1 GNSS-Parallelfahrssysteme

Unter dem Begriff GNSS-Parallelfahrssysteme werden Fahrerassistenzsysteme verstanden, die eine Abweichung zu einer Leitlinie mithilfe eines via Satellit empfangenen Positionssignals visualisieren oder diese automatisch ansteuern und verfolgen. Die Systeme sind untergliedert in Lenkhilfen, Lenkassistenten und Lenkautomaten. Lenkhilfen zeigen den Unterschied zwischen gefahrener Fahrspur und Leitlinie an. Lenkassistenten und Lenkautomaten steuern das Fahrzeug automatisch, die Unterscheidung liegt in der Aktuatorik. Lenkassistenten führen das Fahrzeug mit einem elektrischen Lenkradmotor, während Lenkautomaten die Arbeitsmaschine mittels Eingriff in das hydraulische System der Lenkung führen (Stoll, 2006). Der Fahrer speichert im System eine Referenzfahrspur, diese verschiebt das System hin zur aktuellen Position. Die vom System unter Berücksichtigung der ermittelten GNSS-Position und Maschinenarbeitsbreite verschobene Referenzfahrspur wird auch Leitlinie genannt.

### 2.1.1 Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)

Ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS) dient der Positionsbestimmung und Navigation mithilfe des Signals von Satelliten. Die aktiven Systeme sind das GPS der USA, GLONASS der russischen Föderation und die im Aufbau befindlichen Systeme GALILEO der EU sowie BeiDou (vormals COMPASS) der Volksrepublik China. Die Satelliten eines GNSS haben eine Flughöhe von ca. 20000 km und werden in einer Konstellation von 24 bis 30 Satelliten verwendet (Köhne & Wößner, 2015). Um eine korrekte Position ermitteln zu können, müssen mindestens vier Satellitensignale gleichzeitig empfangen werden. In allen Fällen arbeiten die Systeme mit Funkcodes, mithilfe derer die genaue Position und Uhrzeit der Satelliten kommuniziert wird. Aus der Signallaufzeit ergibt sich die Entfernung zwischen Satellit und Beobachter. Die gemessene Zeitverschiebung entspricht der Laufzeit der Satellitensignale, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger (im Falle exakt synchronisierter Uhren). Anstatt den Empfänger zur Fehlerkorrektur mit hochgenauen Atomuhren auszustatten, wird der Fehler der Empfangsuhr ermittelt und bei der Positionsberechnung berücksichtigt. Es müssen immer vier Satellitensignale empfangen werden, damit vier Gleichungen die drei Raumkoordinaten und den Empfängeruhrenfehler bestimmen können. Das typische Koordinatensystem für GNSS ist WGS84. Aus den Raumkoordinaten können eine geographische Länge, eine geographische Breite und die Höhe über den definierten Referenzellipsoiden ermittelt werden (Torge, 2001). Abbildung 1 zeigt die Umlaufbahnen der Satelliten.

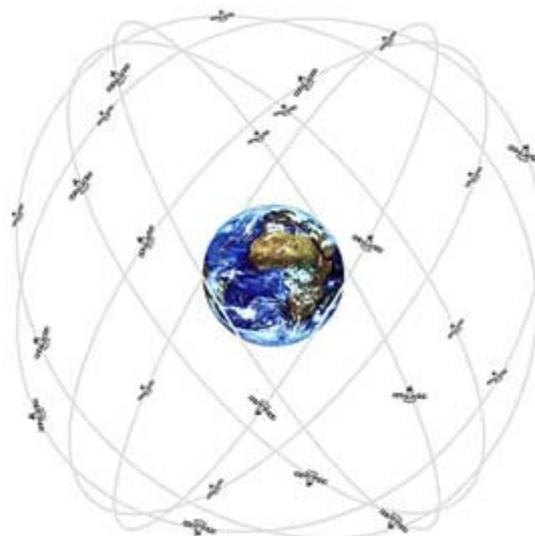


Abbildung 1: Umlaufbahnen der GPS-Satelliten (Köhne & Wößner, 2015)

Im Jahr 1973 gab das amerikanische Verteidigungsministerium die Entwicklung eines satellitengestützten Systems in Auftrag, welches die Navigation an jedem Ort der Welt

ermöglichen sollte. Das NAVSTAR-GPS ist als Ergebnis präsentiert worden. Auf sechs Bahnebenen in einer Umlaufbahn von 20183 km kreisen bis zu 31 Satelliten, von denen 21 in ständigem Einsatz sind. So kann sichergestellt werden, dass an jedem Punkt der Erde mindestens vier Satelliten gleichzeitig von einem Empfänger genutzt werden können. Die von den Satelliten ausgestrahlten Daten gliedern sich in einen zivilen, öffentlich zugänglichen Teil (C/A-Code = Coarse/Acquisition-Code) und einen nur militärisch nutzbaren (P-Code = Precision-Code), der deutlich präzisere Zeit- und Bahninformationen enthält. Das GPS stellt zwei verschiedene Signale bereit: Das L1-Signal mit einer Trägerfrequenz von 1575,42 MHz überträgt den C/A-Code, der die Bahndaten des Satelliten, die sogenannten Ephemeriden, und die Sendezeit überträgt. Die Position kann durch das L1-Signal auf  $\pm$  zwölf Meter genau bestimmt werden (Köhne & Wößner, 2015). Das verschlüsselte L2-Signal überträgt den militärisch genutzten P-Code.

Um die Positionsgenauigkeit landwirtschaftlicher GNSS-Anwendungen zu erhöhen, werden differentielle Techniken genutzt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Schema einer Positionsverbesserung mittels differentieller Korrektur. Eine stationäre DGPS-Empfangsstation berechnet die Differenz zwischen empfangenem GNSS-Positionssignal und der exakt bekannten Position der Referenzstation. Diese differentiellen Korrekturwerte werden in Form einer standardisierten Korrekturnachricht an den GNSS-Empfänger auf der Landmaschine übermittelt. In der Regel geschieht die Übertragung via Funk oder das Mobilfunknetz.

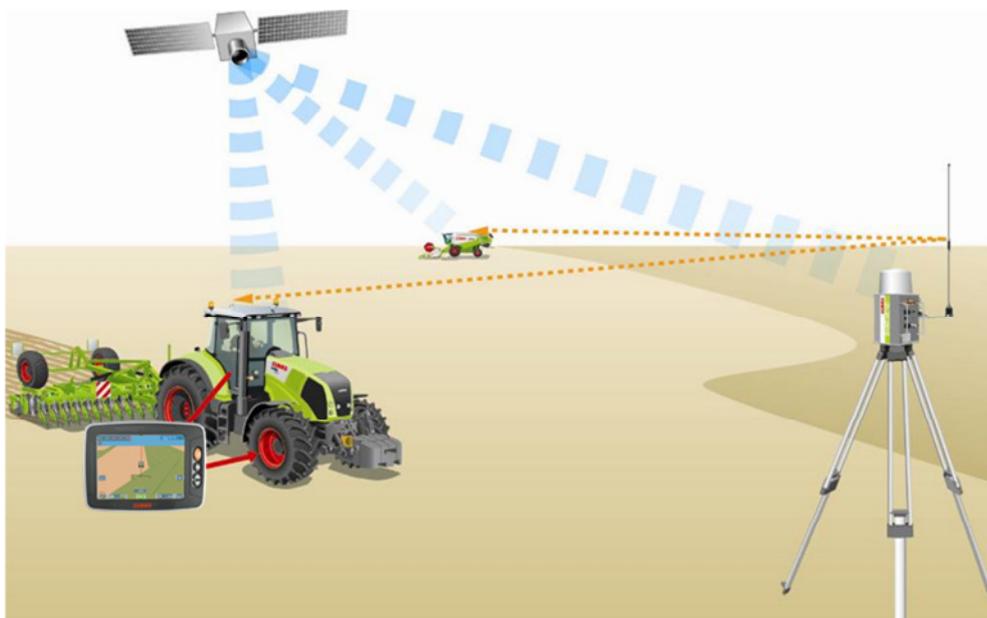


Abbildung 2: Prinzip des differentiellen GPS (Claas E-Systems, 2013)

Neben den in Abbildung 2 dargestellten mobilen Referenzstationen sind auch die überregional angebotenen Korrekturdaten (SBAS - Satellite Based Augmentation System) zu nennen, für

Europa beispielsweise steht das kostenlose Korrektursignal EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) zur Verfügung. An zahlreichen Orten in den USA, Europa und dem Pazifikraum wurden Empfangsstationen (sogenannte RIMS – Ranging and Integrity Monitor Stations) aufgebaut. Die Positionen der Referenzstationen sind exakt bekannt, wodurch für jede Station die Differenz zwischen ermittelter und realer Position bestimmt werden kann. Die Ionosphäre hat Einfluss auf die Signallaufzeit. Eine Signalverzögerung kann durch Zweifrequenzempfang ermittelt werden. Eine Art Karte für das Gesamtgebiet wird erstellt und an geostationäre Satelliten übermittelt. Diese übersenden die Korrektur an die GPS-Empfänger, welche das Signal auswerten. Weitere SBAS-Referenzen sind in den USA mit WAAS und in Japan mit MSAS verfügbar.

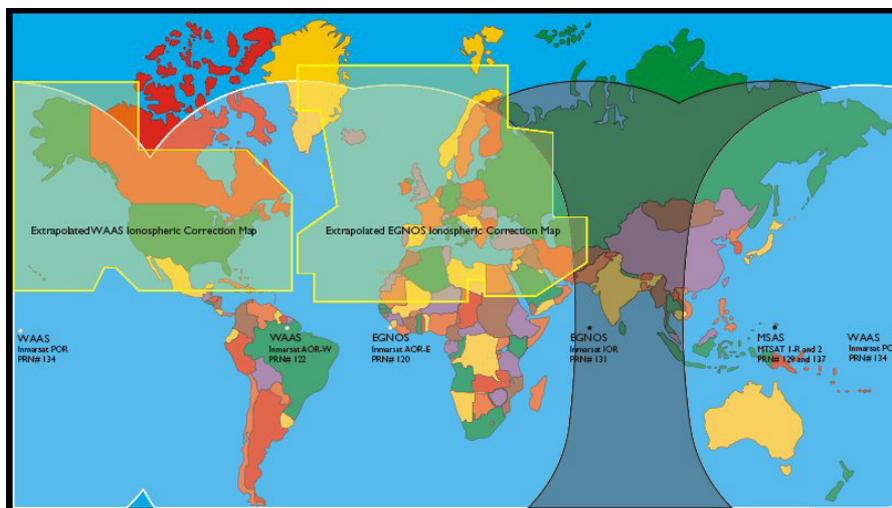


Abbildung 3: SBAS - Korrektursignale (Brunnert, 2006)

Gebührenpflichtige Korrekturdienste werden von kommerziellen Betreibern wie OmniSTAR oder StarFire angeboten. Die Satellitenkorrektursignale StarFire und OmniSTAR VBS (Virtual Base Station) bieten eine gleichbleibende Genauigkeit. Da nicht zwischen Referenzstationen gewechselt werden muss, bleibt das Signal ohne Positionssprünge. OmniSTAR HP kann nur von Zweifrequenz-GPS-Empfängern empfangen werden. Die horizontale Messgenauigkeit beträgt ca. 10 cm.

Für RTK-GPS werden zwei RTK-GPS-Empfänger und zwei Funkgeräte benötigt (Referenzstation und Traktor). Ein GPS-Empfänger wird als Referenzstation an einem bekannten Punkt aufgestellt, während der zweite Empfänger mobil auf der Landmaschine verbaut ist. Die selbst errichtete Referenzstation ermittelt die Korrekturdaten und überträgt diese per Funk an den mobilen Empfänger. Da der Abstand zwischen Referenzstation und Empfänger nur wenige Kilometer betragen darf, wird eine hohe Genauigkeit erreicht.

Bei der RTK-Korrektur wird außerdem zusätzlich noch die Übermittlung via Internet genutzt. Das Protokoll NTRIP ist der Protokollstandard (standardisiert durch RTCM - Radio Technical Commission for Maritime Services). GSM, WLAN und UMTS sind die gängigen Übertragungswege.

Um die Genauigkeit von GPS-Empfängern bewerten zu können, werden in der Regel zwei Kennwerte herangezogen, die Standardabweichung und die Pass-To-Pass-Genauigkeit. Die Standardabweichung dient der Beurteilung einer statischen 2D-GPS-Genauigkeit. Die GPS-Daten werden über einen längeren Zeitraum – in der Regel 24 h im Sekundentakt – aufgezeichnet. Die Abweichung zur tatsächlichen Position wird in Metern für jede GPS-Position berechnet. Danach wird für alle Abweichungen ein Fehlerkreis mit 95 prozentiger Wahrscheinlichkeit berechnet, in welchem 95 % der gemessenen GPS-Positionen liegen (AirForce, 1987). Bei einer dreidimensionalen Genauigkeitsberechnung wird der Wert des Kugelradius, innerhalb derer sich 50 % der Messergebnisse befinden, als Spherical Error Probable (SEP) bezeichnet (Aeronautics and Space Engineering Board, 1995). Üblich ist auch die getrennte Darstellung der Abweichung in x- und y-Richtung. Vereinfachend kann die reale Position als Mittelwert der gemessenen Positionen angenommen werden mit dem arithmetischen Mittel. Dann berechnet sich die Standardabweichung wie folgt (Knuth, 1997):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad [1]$$

mit

- $\sigma$  = Abstand zum Mittelwert, m
- $p$  = Position, x,y-Korrdinate
- $\bar{p}$  = Mittelwert-Position, x,y-Koordinate
- $n$  = Anzahl untersuchter Punkte

Die zweite in der Praxis oft angegebene Größe ist die Pass-to-Pass-Genauigkeit. Sie gibt die ermittelte Abweichung innerhalb eines kurzen – 15 minütigen – Zeitfensters wieder. Ebenfalls der Radius, in dem sich 95 % der Messergebnisse befinden, wird als Pass-to-Pass-Genauigkeit angegeben. Die Messabweichungen sind dementsprechend deutlich kleiner. Zhang (2002) hat die dynamische Genauigkeit diverser, landwirtschaftlich genutzter GPS-Empfangstechniken untersucht. Auch die DLG hat in einem Prüfbericht Methoden zur Bestimmung der statischen und dynamischen Analyse beschrieben (DLG, 2003).

Die Submeter-Klasse beinhaltet alle Korrektursignale mit einer Genauigkeit bis zu einem Meter. OmniSTAR VBS und WAAS erreichen eine Pass-To-Pass-Genauigkeit von 8-30 cm in den USA (Zhang, 2002), OmniSTAR VBS und Egnos erreichen eine Pass-To-Pass-Genauigkeit von 9-55 cm in Europa (Splettstößer, 2002). Die Genauigkeit hängt in erster Linie von der Algorithmik des Empfängers ab. Diese Genauigkeit reicht aus, um Pflanzenschutzapplikationen, Düngung, Bodenbearbeitung und beispielsweise die Halmguternte zu unterstützen (Brunnert, 2006). Die Dezimeter-Klasse beinhaltet Zweifrequenz-Empfänger, die mithilfe der Phasenmessung ionosphärische Einflüsse verringern. OmniSTAR HP mit einer Pass-To-Pass-Genauigkeit von 5-10 cm fällt in diese Kategorie. Das automatische Säen ist möglich (Schmittmann & Kam, 2010). Auch Einfrequenz-Empfänger mit Referenzstation können Genauigkeiten im Dezimeterbereich realisieren. Die genauesten Signale werden in die Zentimeter-Klasse eingeordnet. Das Zweifrequenz-RTK-GPS hat sowohl statisch als auch dynamisch eine Genauigkeit von 2 cm. Die Feldfahrt kann präzise zu unterschiedlichen Zeiten wiederholt werden, Techniken wie das Controlled Traffic Farming (CTF) werden ermöglicht. Beim CTF legt der Landwirt permanente Fahrspuren an und überfährt so nie bearbeitete Fläche. CTF wird vor allem in Australien auf 1 – 2 Millionen Hektar angewandt (Tullberg, 2006). Der Vorteil liegt darin, dass die Fahrspuren zwar sehr stark verdichtet, die übrigen Flächen allerdings nicht durch das Fahrzeuggewicht belastet werden.

Abbildung 4 zeigt die verschiedenen Korrekturdaten im Vergleich, die Genauigkeit ist als Pass-To-Pass-Genauigkeit angegeben.

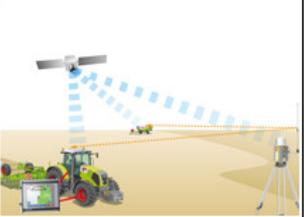
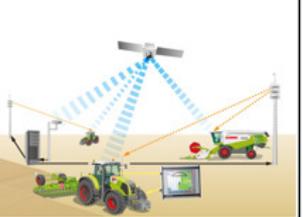
| Kostenlose satellitengestützte Korrektur (EGNOS, WAAS)                              | Kommerzielle satellitengestützte Korrektur (OmniSTAR, Starfire)                     | Mobile Referenzstation   | Korrektur mittels RTK   |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| ± 30 cm   | ± 5 - 10 cm   | ± 4 - 6 cm   | ± 2 - 3 cm  |

Abbildung 4: Genauigkeitsklassen von Korrekturdaten (Claas E-Systems, 2013)

### 2.1.2 Systemaufbau

Die Komponenten eines GNSS-Lenksystems werden in diesem Kapitel vorgestellt, um das Verständnis für die Routenplanung, die in ein bestehendes System eingreift, zu fördern.

Für das Befahren von Fahrspuren wird ein Regelkreis, bestehend aus Sensorik, Regelung und Aktuatorik, aufgebaut. Mittels einer Antenne und eines GNSS-Receiver wird das Positionssignal empfangen. Dieses kann via Funk- oder Internet-Korrektur - wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben - verbessert werden. Ein Bedienterminal ermöglicht die Mensch-Maschine-Interaktion. Graphisch werden die Fahrspuren angezeigt und Referenzlinien können ausgewählt sowie angelegt werden. Mithilfe der Sollspurabweichung, der aktuell ermittelten Position und des aktuellen Lenkwinkels werden die Querabweichungen und die Spurrückführung bestimmt sowie ein Lenkkommando an den Navigations-Controller übergeben. Dieser wandelt das Signal in eine Lenkventil-Stellspannung um, wodurch die Räder in die passende Ausrichtung gebracht werden. Abbildung 5 zeigt die Systemkomponenten eines GNSS-Lenkensystems.

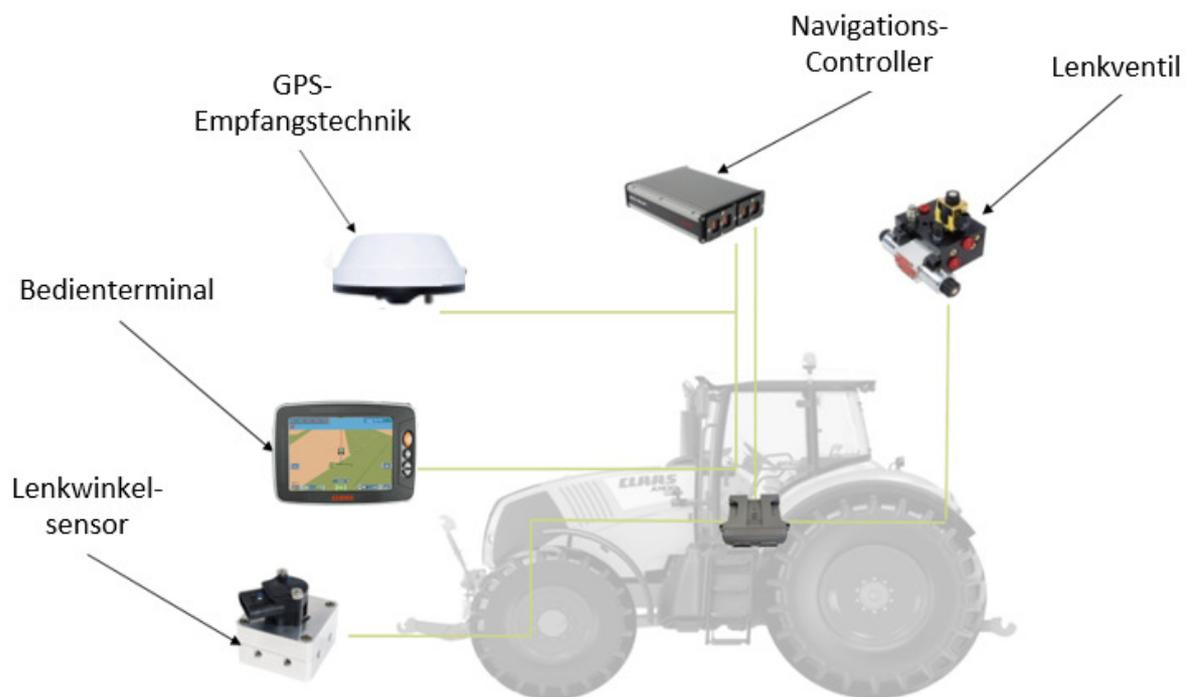


Abbildung 5: Systemkomponenten eines GNSS-Lenkensystems (CLAAS S10, 2015)

### 2.1.3 Fahrfunktionen

Dem GNSS-Lenkensystem muss eine Referenzfahrspur hinterlegt werden, welche in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite automatisch zur aktuellen Position hin verschoben wird. Die signifikanten Punkte der Geraden werden vom Fahrer während der Fahrt als aktuelle GNSS-Position in das System eingegeben oder mithilfe einer Farmmanagement-Software geladen. Die am häufigsten genutzte Referenzfahrspur ist eine Gerade (siehe Abbildung 6). Dies wird

damit begründet, dass die Querbewegung bei hohen Geschwindigkeiten klein gehalten werden kann.

Ein zweiter üblicher Fahrmodus ist die Kreisfahrfunktion. Wie in Abbildung 6 zu sehen, generiert das System eine Kreisfahrbahn nahe der aktuellen Position. Als Eingabeparameter werden der Kreismittelpunkt und die Arbeitsbreite als Verschiebeweite benötigt. Dieser Fahrmodus wird häufig für die Bewässerungslandwirtschaft genutzt (Sourell, 2007).

Der dritte Fahrmodus ist die Konturfahrfunktion. Wie in Abbildung 6 dargestellt, sind eine konturförmige Feldgrenze oder aber auch Hangneigung als Auswahlgrund für die Spurplanung anzunehmen (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2007). Beachtet werden muss, dass einige Sonderkulturen wie der Kartoffelanbau maschinenbedingt nicht mit derartigen Referenzen angelegt werden können. Dieser Fahrmodus stellt große Ansprüche an die Rechenalgorithmen, da sich aufgrund der Fahrgeschwindigkeit die Spurkrümmungen und somit die Spureigenschaften verändern, sodass sie nicht mehr zwingend zu den physikalischen Grenzen der Maschine passen (Magid, et al., 2008). Eine herstellerunabhängige Spurerstellung ist nicht gegeben. Jeder Hersteller verfolgt eigene Interpolationsansätze. Durch eine sogenannte Spline-Interpolation wird versucht, die gegebenen Stützstellen mithilfe stückweiser, stetiger Polynome zu interpolieren. Dementsprechend werden bei gleicher Referenz von verschiedenen Lenksystemen unterschiedliche Fahrspuren erzeugt.

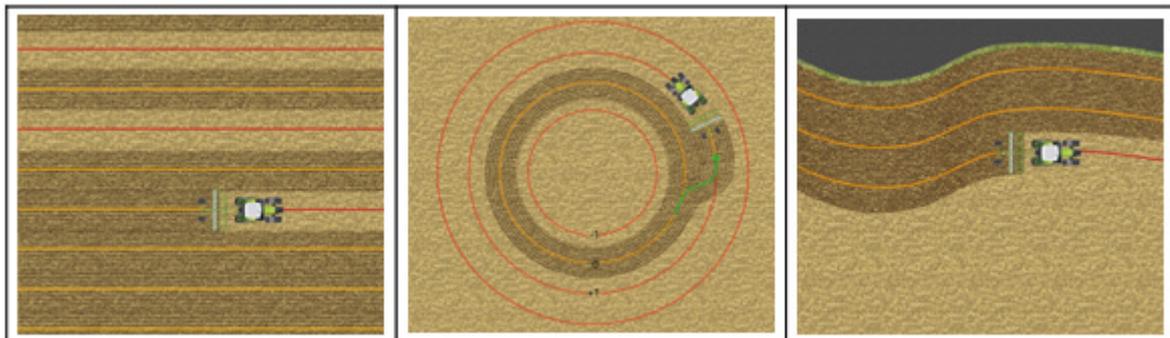


Abbildung 6: Fahrmodi (links - AB-Gerade, Mitte - Kreis, rechts - Kontur) (CLAAS S10, 2015)

## 2.2 Routenplanung in der Landwirtschaft

Hochpräzise autonome Fahrzeug- und Gerätesteuerung in Verbindung mit einer optimierten Vorplanung aller Fahrspuren auf dem Schlag sind die logische Konsequenz aus der GNSS-Lenkautomation. Die Routenplanung rückt in den Fokus heutiger Forschung und Entwicklung, um den Ansprüchen einer effizienteren und damit nachhaltigeren Landwirtschaft zu genügen.

Zwei Strömungen können dabei identifiziert werden. Scheuren (2014) und Brunnert (2006) fokussieren die Architektur eines Planungssystems und die Anwendung im Feldeinsatz. Choudhury und Singh (2009), Oksanen (2007), Bochtis und Sorensen (2010) und Jin (2009) betrachten Einzelschritte einer Routenplanung, zeigen Einsparungspotentiale auf und bestimmen Methoden, um Optimierungen zu realisieren.

Scheuren (2014) und Brunnert (2006) beginnen mit der Aufzeichnung der Feldgrenze. In beiden Arbeiten wird der Mähdrusch betrachtet, sodass das Freischneiden – das anfängliche, umrundende Ernten der Wendefläche – einen inneren Bereich definiert, welcher für die weitere Ernte durch das System geplant werden muss. Die Referenzlinien werden manuell gesetzt, es können Geraden und konturförmige Fahrspuren für das innere Feldpolygon flächendeckend erstellt werden. Jin (2009), Oksanen (2007) und Choudhury und Singh (2009) fügen einen zusätzlichen Zwischenschritt ein. Die Feldteilung soll zuerst Bereiche definieren, für die jeweils eine Referenzfahrspur gültig ist. Choudhury und Singh (2009) und Oksanen (2007) verwenden die zellulare Dekomposition (LaValle, 2006). Jin (2009) berechnet die Abdeckungskosten, die anhand statistischer Schlaganalysen abgeschätzt werden, für Bearbeitungsstrategien. Diese Kostenfunktion beurteilt Teilungen und Bearbeitungsrichtungen und die beste Konfiguration wird ausgewählt. Oksanen (2007) verwendet zur Referenzlinienwahl die Näherungsregel, dass die längste Außenkante der Feldgrenze als Arbeitsrichtung die beste ist. Jin (2009) generiert ausschließlich parallele Fahrspuren ohne Wendemöglichkeit, wohingegen Oksanen und Visala (2009) eine umrundende Wendefläche - auch Vorgewende genannt - mit einstellbarer Breite anlegen. Um automatisch zwischen den Spuren zu wenden, muss eine Spursequenz angelegt sein. Brunnert (2006) plant wiederholende Spurmuster - auch Beete genannt -, die vom Anwender bestimmt werden können. Scheuren (2014) verwendet ein Fahrmuster, welches berücksichtigt, dass zwei Mähdrescher gleichzeitig auf dem Feld arbeiten und die Möglichkeit zum Abtanken gegeben sein muss. Der Pfad des Überladewagens wird so geplant, dass die Mähdrescher nicht halten müssen und mit maximaler Auslastung arbeiten. Bochtis und Sorensen (2010) verwenden ein freies Spurmuster und können somit die Gesamtwendezeit deutlich reduzieren. Die Verfahren des Operations Research (Churchman & R., 1957) werden eingeführt, um Omega-Wenden zu vermeiden. Die Pfadplanung wird in den meisten Arbeiten zur Routenplanung als wichtige Aufgabe benannt. Brunnert (2006) plant Wenden mittels Kreissegmenten, die verbunden werden. Anschlusspunkte werden nicht weiter nachbearbeitet. Motion Primitives (Likhachev, 2013) werden von Scheuren (2014) verwendet. Oksanen (2007) und Choudhury und Singh (2009) erstellen modellbasierte Pfade (Evans, 2012). Die anschließenden Abschnitte gehen noch einmal detailliert auf die erwähnten Verfahren ein.

### 2.2.1 Forschungsvorhaben

Das BMWi-Verbundprojekt "marion" widmet sich der Intra- sowie der Infield-Transportlogistikproblematik (CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, 2014). Die Intrafieldlogistik beschäftigt sich mit dem Transport zwischen Feldern, die Infieldlogistik beschränkt sich auf die Prozessorganisation innerhalb eines Feldes. "marion" ist ein Synonym für mobile, autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten. Mähdrescher und Überladewagen sollen so kooperieren, dass die Ernte und der Ernteguttransport zum Feldrand automatisiert geschehen können. Das Anwendungsszenario eines Überladewagens sowie zweier Mähdrescher werden betrachtet; Hauptaugenmerk liegt auf der Maschinenauslastung der Mährescher. Es werden zwei Aufgaben beschrieben: Zuerst müssen befahrbare Pfade erstellt werden, die das gesamte Feld abdecken. Des Weiteren müssen die Treffpunkte für das Erntegutentladen auf den Überladewagen so bestimmt werden, dass beide Mähdrescher nicht zum Stillstand kommen.

Das Projekt Geopal beschäftigt sich mit einem GNSS-basierten Planungssystem für die landwirtschaftliche Logistik und im Speziellen den Biomasse-Logistikketten (CLAAS Agrosystems; LACOS; Aarhus University; LEE, 2014). Es sollen Fahrspuren im Feld optimal ausgelegt werden, sodass die Wendezeit minimal ist. Wird eine vorgeplante Route auf dem Feld nicht korrekt abgefahren, so soll eine Online-Neuberechnung angestoßen werden. Auch die Abstimmung zwischen Ladefahrzeugen und Erntefahrzeugen wird thematisiert. Das Projekt ist von der EU als Teil des 7th Research Framework Programms unter Leitung der Firma Claas gefördert worden. Abbildung 7 gibt den Aufbau und Inhalt des Projektes wieder. Wie in dieser Arbeit soll die Feldroute optimiert werden, allerdings werden andere Lösungswege verfolgt.

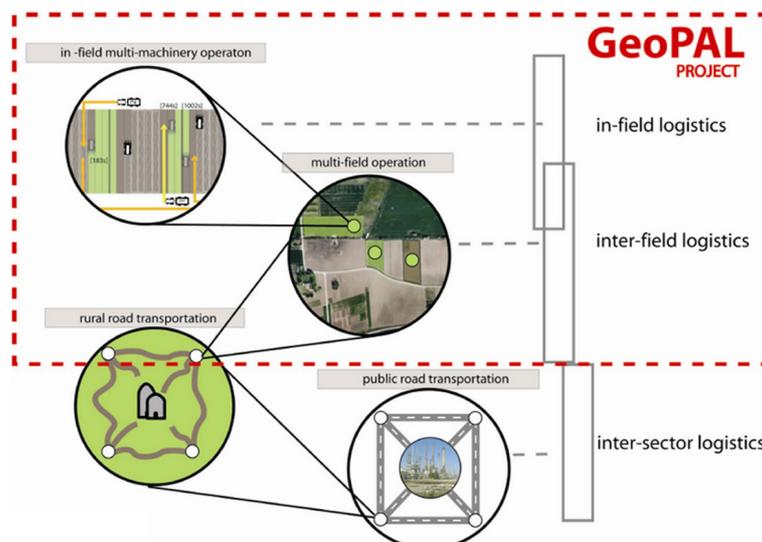


Abbildung 7: Systemaufbau des EU-Projektes Geopal

Die Firma ASI Robotics hat bereits marktreife Produkte für die autonome mobile Robotik veröffentlicht. Mittels des Kontroll- und Kommando-Remoteprogrammes Mobius können Maschinen vom PC gesteuert werden. Die konstruierten Pfade gehorchen den maschinenkinematischen Restriktionen; auch eine Punkt-zu-Punkt-Navigation ist möglich. In einer bekannten Umgebung werden automatisch Hindernisse umfahren und abfahrbare Fahrwege generiert. In der landwirtschaftlichen Anwendung bietet ein solches Planungsprogramm den Vorteil der Wiederholbarkeit von Fahrmustern, ein Datenimport der gängigen Formate ist ebenfalls möglich. Der autonome Traktor Forge mit GPS- und Lidar-Sensorik sowie funkbezogenem Korrektursignal und einem elektrischen Lenkrad kann autonom die Feldarbeit ausführen (Autonomous Solutions, Inc., 2014). Mit oder ohne Kabine kann das Fahrzeug mit 11,3 km/h über das Feld navigiert werden und auch mit am Frontlader verbauten Geräten das Feld bearbeiten (Abbildung 8).



Abbildung 8: Autonomer Roboter Forge (Autonomous Solutions, Inc., 2014)

Im Jahr 1999 präsentierte die Firma Geotec erstmals ihr System Agro Nav. Aufgeteilt ist die Software in das Planungssystem Agro Nav Plan, welches auf dem Hof-PC alle Vorplanungsschritte ermöglicht und Agro Nav Drive, welches die Maschine während der Feldfahrt überwacht. Als Eingabeparameter müssen die Feldgrenze und die Maschinenparameter bekannt sein. Ein auf AutoCAD basierendes User Interface ermöglicht es dem Anwender, vor der Feldarbeit Bearbeitungszonen, -ausrichtungen, Fahrstrategie und Wendemanöver zu planen. Von Vorteil sind die saisonunabhängige Vorplanung und die wiederholbare Abarbeitungsreihenfolge. Dagegen spricht jedoch die komplexe Oberfläche, die es nur geschultem Personal möglich macht, die Software korrekt zu bedienen. Auch kann während der Feldfahrt kein Einfluss mehr auf die vorgeplanten Fahrmuster genommen werden (Glasmacher, 2002).

In einem Partnerverbund zwischen den Firmen Bosch, Amazone, der Hochschule Osnabrück und der Universität Wageningen ist ein autonomer Feldroboter namens BoniRob entwickelt worden. Mittels GPS-Sensorik und Bildverarbeitung wurde eine Forschungsplattform umgesetzt, die für verschiedene Anwendungen - wie in Abbildung 9 zu sehen - verwendet werden kann (AMAZONEN-Werke H. Dreyer , 2014). Eine bekannte Umsetzung ist die Pflanzenphenotypisierungsapplikation (Goettinger, 2014). Aktuell wird in zwei Forschungsprojekten an dem Roboter weitergearbeitet. Das Projekt RemoteFarming.1 beschäftigt sich mit der mechanischen Regulation des Beikrauts im Bio-Möhrenanbau, also einer Systemintegration in den ökologischen Landbau. Das zweite Projekt beschäftigt sich damit, den Menschen als „Bildverarbeiter am Tele-Arbeitsplatz“ zu unterstützen, wobei die Sensorik und Aktuatorik auf der Maschine verbaut ist (Sellmann, 2014).



Abbildung 9: Verschiedene Anwendungen der Roboterplattform BoniRob

INTERREG (2015) ist ein europäisches Forschungsprojekt, das die Integration neuer Technologien in bestehende Landmaschinen zum Ziel hat. Dazu wird ein Rübenroder mit Sensorik und Planungssystem ausgestattet, welcher das Feld autonom abarbeiten soll. Der Fokus liegt dabei auf der Bodenschonung durch Minimierung von Fahrstrecken und Mehrfachüberrollungen.

## 2.2.2 Feldteilung

Schon das Unterteilen des Feldes in sinnvolle Teilbereiche gestaltet sich als anspruchsvoller Vorplanungsschritt. Im Folgenden werden die bekannten Ansätze aus Forschung und Wissenschaft vorgestellt.

Die Firma John Deere (Kondekar, 2011) hat 2011 einen Algorithmus zur Feldteilung beim europäischen Patentamt schützen lassen. Dabei wird zuerst die Feldgrenze identifiziert. Diese wird auf Unterteilbarkeit überprüft, wobei konkave Kanten das Kriterium für die Notwendigkeit weiteren Unterteilens sind. Es wird eine Trennlinie bestimmt, welche zwei konkave Kanten der Feldgrenze verbindet. Eine Kante ist konkav, wenn der im Polygon liegende Winkel  $\alpha$  eines gegen den Uhrzeigersinn gedrehten Polygons im Bereich  $180^\circ \leq \alpha < 360^\circ$  liegt. Gleichzeitig dürfen diese konkaven Kanten nicht benachbart sein. Abbildung 10 zeigt auf der linken Seite die ursprüngliche Feldgrenze. Auf der rechten Seite ist das unterteilte Feld dargestellt.

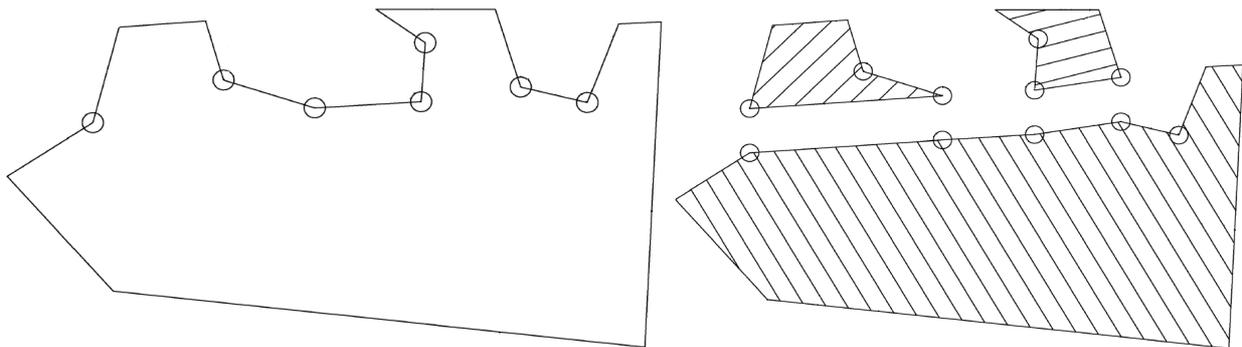


Abbildung 10: Vorgeschlagene Feldteilung aus John Deere Patent (Kondekar, 2011)

Jin (2010) hat ebenfalls eine Methode zur Feldteilung präsentiert. Ziel ist es, eine optimale Pfadplanung (OPP) für das gesamte Feld zu berechnen. Dazu wird ein ungerichteter topologischer Graph erstellt. Ausgehend von jedem Punkt des Grenzpolygons sowie der inneren Feldgrenzen, werden Geraden mit vordefinierter Winkelschrittweite erstellt (siehe Abbildung 11 links). Ein feinmaschiges Netz entsteht (Abbildung 11 Mitte), welches den Graphen repräsentiert. Mittels einer Tiefensuche (Turau, 2009) wird eine Trennlinie gefunden (Abbildung 11 rechts), die somit aus Grenzpunkten und Knoten des Graphen besteht.

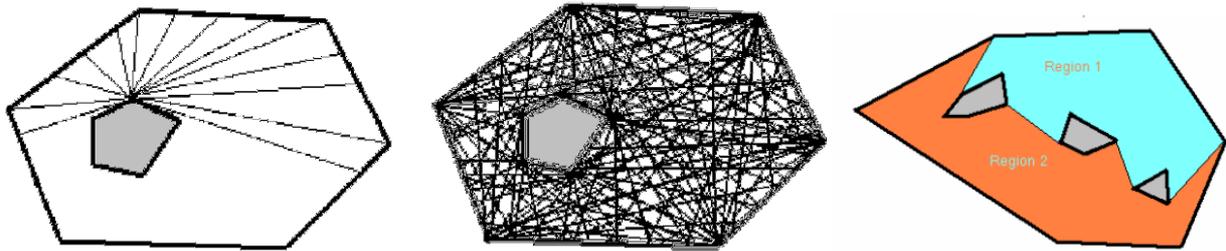


Abbildung 11: Vorgeschlagene Feldteilung nach Jin (2010)

Auch Oksanen und Visala (2009) haben sich mit dem Thema der Feldteilung beschäftigt. Das Ziel ist es, eine möglichst effiziente Route auf dem Feld zu finden. Zwei Ansätze werden verfolgt, um dies zu erreichen. Sie beruhen beide auf Greedy-Algorithmen, um schnelle Ergebnisse liefern zu können. Greedy-Algorithmen suchen schrittweise einen Folgezustand, der zum Wahlzeitpunkt das beste Resultat ergibt. Sie lösen somit viele Optimierungsprobleme nahe am Optimum, jedoch nicht immer optimal.

Der erste Ansatz betrachtet das Feld in einer Draufsicht. Ein komplex geformtes Feld soll in einfache, leicht befahrbare Bereiche unterteilt werden. Es wird ein zellulärer Dekompositions-Algorithmus (LaValle, 2006) verwendet, bei dem ein Polygon in kleine trapezförmige Zellen aufgetrennt wird. Nach dem Prinzip „divide et impera“ wird das Polygon der Feldgrenze solange in kleinere Zellen unterteilt, bis jede Zelle einen Bereich definiert, in dem mit geraden Fahrspuren gearbeitet werden kann. Danach werden die Zellen teilweise wieder zusammengefügt. Dies geschieht, wenn zwei Trapeze parallele Seiten haben und der Winkelunterschied zwischen den neu entstandenen Ecken weniger als  $70^\circ$  beträgt. Beispielhaft zeigt Abbildung 12 das fein zerteilte Feld (links) sowie die nachbearbeitete Teilung (rechts). Es können landwirtschaftliche Einflüsse wie Drainage durch Vorwahl der Dekompositionsrichtung berücksichtigt werden.

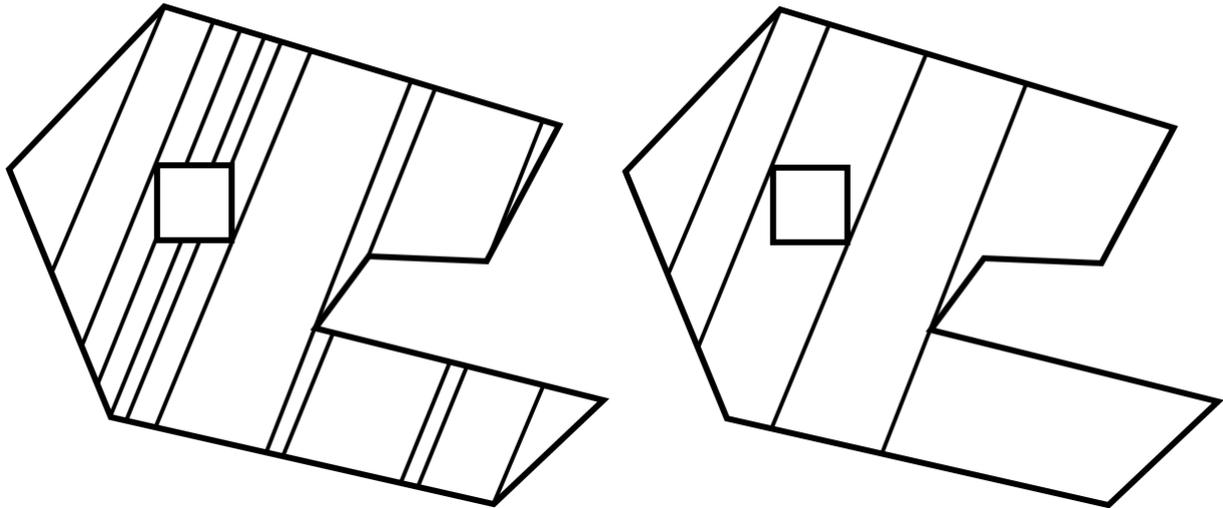


Abbildung 12: Zellulare Dekomposition (links) und resultierende, vorgeschlagene Feldteilung (rechts) nach Oksanen und Visala (2009) (erster Ansatz)

Der zweite Ansatz ermittelt ebenfalls inkrementell eine Lösung. Vom Startpunkt ausgehend wird eine erste möglichst lange Fahrspur gesucht, die entlang einer Feldgrenze verläuft und den maschinenbedingten Wenderadius berücksichtigt. Die bearbeitete Fläche wird für die nächste Suche entnommen, ausgehend von der Endposition der ersten Fahrspur wird der zweite Pfad gesucht. Diese Suche verläuft sukzessive bis die komplette Feldfläche durch Fahrspuren bedeckt ist. Die Berechnungszeit für solche Fahrspuren ist hoch (Oksanen & Visala, 2009).

Zhang et al. (2010) haben überdies ein Verfahren vorgestellt, welches die Pfadplanung und Spurführung von Master-Slave-Robotersystemen regelt. Das gesamte Feld wird dabei in sogenannte Sub-Regionen unterteilt. Die Ergebnisse sind mithilfe einer Simulation verifiziert worden.

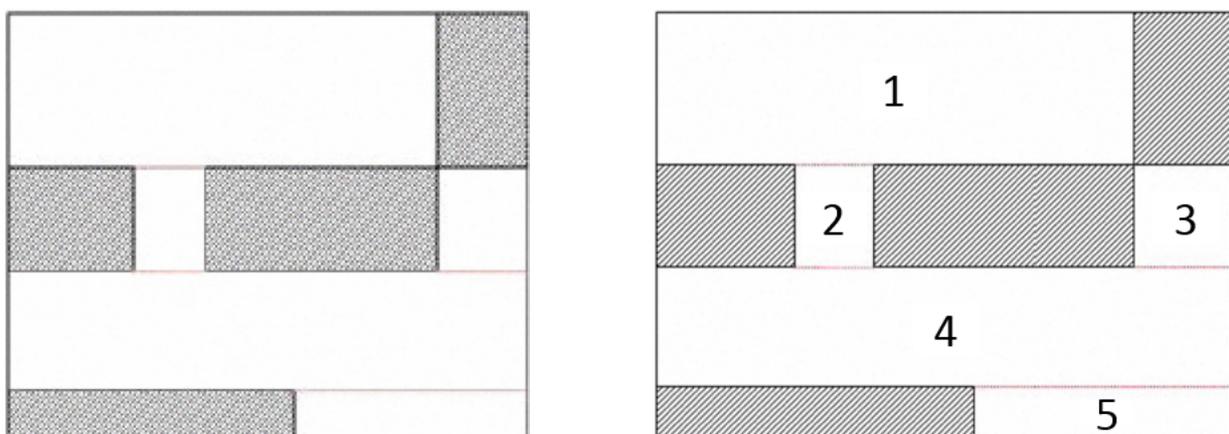


Abbildung 13: Vorgeschlagene Feldteilung und Reihenfolge nach Zhang et al. (2010)

Choudhury und Singh (2009) haben in ähnlicher Weise eine Feldteilung auf Basis der zellularen Dekomposition entwickelt. Zuerst wird das Feld fein zerteilt und im Anschluss wieder in geeignete Teilfelder zusammengelegt. Konkave Kanten und Hindernisse werden als Trennkriterium herangezogen, dabei wird das Feld solange weiter parzelliert bis es keine konkaven Ecken mehr gibt. Zu Beginn wird das Feld mit manuell vorgegebener Trennrichtung unterteilt, es werden Trapeze erstellt. Danach werden die Trapeze nach zwei Kriterien wieder zusammengefügt: Zwei Trapeze müssen eine parallele Kante haben, und die Vorgewende müssen annähernd im  $90^\circ$  Winkel angetroffen werden. Danach werden die Gesamtkosten nach einer Kostenfunktion für die gewählte Trennrichtung bestimmt. Verschiedene Trennrichtungen werden geprüft und die Trennrichtung mit den minimalen Gesamtkosten gewählt. Auch wurde in dem Artikel vorgestellt, wie Fahrspuren mithilfe von B-Splines um Hindernisse mittels Potentialfeldern und verschobener Spline-Kontrollpunkte gebogen werden können. Der Ansatz wurde als Offline-System ausgelegt; die Methoden sind nicht für eine Online-Anwendung während der Feldarbeit bestimmt.

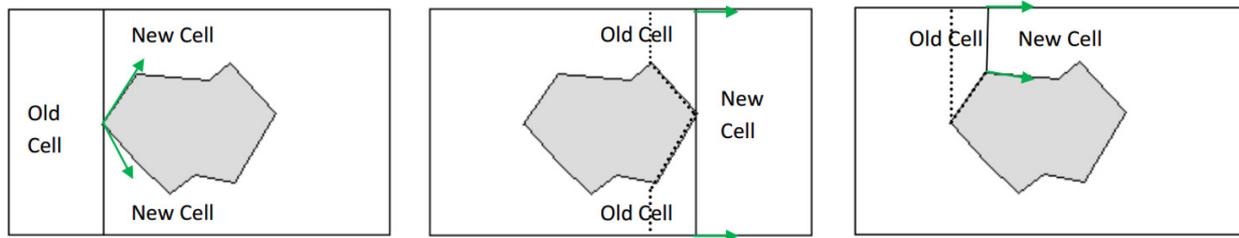


Abbildung 14: Feldteilung nach Choudhury und Singh (2009)

### 2.2.3 Flächendeckende Pfadplanung

Die Erstellung flächendeckender Fahrspuren auf dem Feld ist eine wesentliche Aufgabe der Routenplanung. Es muss berücksichtigt werden, dass Wendeflächen vorhanden sind und die erzeugten Fahrspuren müssen der restriktierenden Maschinenkinematik unterliegen. Jin (2009) hat in seiner Dissertation zwei Verfahren vorgestellt, um sowohl zweidimensionale, als auch dreidimensionale Pfade zu generieren, die das komplette Feld mit Fahrspuren abdecken. Abbildung 15 zeigt automatisch generierte 2D-Fahrspuren auf einem komplexen Feld. Dabei sucht der Algorithmus zu Beginn eine optimale Abarbeitungsrichtung ohne Feldteilung. Es werden die auf einem Rechenmodell basierenden Kosten für die gewählte Bearbeitung ermittelt. Jegliche Trennvorschläge werden ermittelt, ihre modellbezogenen Kosten bestimmt und miteinander verglichen. Kann eine Verbesserung festgestellt werden, so wird der neue Vorschlag beibehalten. Die Bereichsübergänge zwischen den Teilfeldern werden ebenfalls

untersucht. Falls die Ausrichtungen der Teilfelder sich ähneln, wird eine konturförmige Fahrspur über beide Teilfelder gewählt.

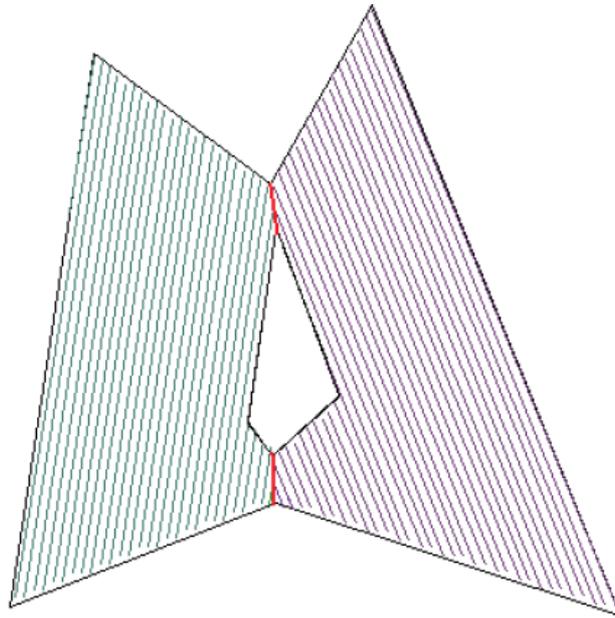


Abbildung 15: Geplante Fahrwege nach Jin (2009) mit farblich unterschiedenen Bereichen

Auch ein 3D-Spurmuster ist vorgestellt worden. Dabei hat Jin fünf Forschungsaufgaben identifiziert. Als erstes Problem wird die Modellierung des Terrains benannt. Dazu wird das Kriging-Verfahren verwendet, bei dem die unbestimmten Bereiche des Terrains durch Interpolation der umliegenden Geodaten bestimmt werden. Weiter ist der Topographie-Einfluss genauestens zu benennen. Der Einfluss der Bodenbeschaffenheit und der Unterschied einer 2D- und 3D- Projektion müssen bekannt sein. Der dritte Punkt ist die korrekte Teilung eines Terrains. Andere Aspekte als die Feldgrenze müssen betrachtet werden. Jin berechnet die Unterteilung mithilfe einer Kostenfunktion, basierend auf der Steigung, lokaler Höhenvarianz, Steigungslänge und der Bodenerosion. Als Letztes müssen Bearbeitungspfade gesucht werden. Hier sind wieder die Wendekosten, die Pfadkrümmung und die Bodenerosion zu berücksichtigen. Abbildung 16 zeigt eine ermittelte Feldteilung.

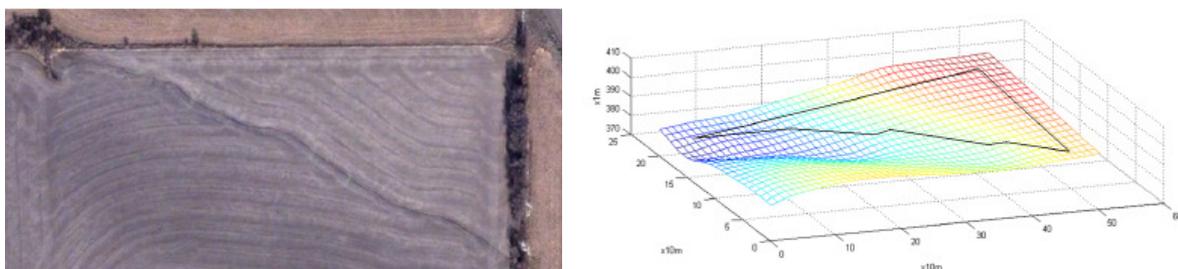


Abbildung 16: Digitales 3D-Modell eines Feldes nach Jin (2009); links: Luftaufnahme, rechts: 3D-Modell mit farblich gekennzeichneten Höhenunterschieden

Auch Oksanen (2007) hat sich mit der Felddatenerzeugung beschäftigt. Er unterscheidet einen Ansatz mit ausschließlicher Erzeugung von Geraden sowie einem rekursiven Online-Verfahren, dargestellt in Abbildung 17. Das erste Verfahren gliedert sich in verschiedene Unterschritte. Zuerst wird das Feld - wie in Kapitel 2.2.2 vorgestellt - unterteilt. Danach wird für jeden Bereich eine Bearbeitungsrichtung gesucht. Die Kosten für sechs verschiedene Ausrichtungen von 0 bis 180° in 30° Schritten werden berechnet. In den Winkelbereichen der drei besten Ausrichtungen wird eine feinere Untersuchung initiiert. Diese sukzessive Neuberechnung erfolgt solange, bis ein Ergebnis für eine vorgegebene Winkelauflösung gefunden worden ist. Wendeflächen werden ebenfalls eingeplant. An den Grenzsegmenten mit einem Winkelunterschied kleiner als 15 Grad zur Hauptbearbeitungsrichtung wird dabei kein Vorgewende angelegt. Die Anzahl an Vorgewendeschwaden - also Vorgewendereien mit abgelegtem Erntegut - muss dabei vorher bekannt sein und manuell eingegeben werden. Das zweite komplexere und dementsprechend auch rechenzeitintensivere Verfahren ermöglicht es, konturförmige Fahrspuren in einem Feld zu erzeugen. Die Fahrspuren werden dabei aus der bekannten Feldgrenze abgeleitet. Inspiriert ist dieser Ansatz von der Idee der modellprädiktiven Kontrolle (LaValle, 2006). Zur aktuellen Fahrzeugposition wird der kürzest entfernte, signifikante Polygoneckpunkt gesucht und die Fahrspur zu diesem erzeugt, der befahrene Bereich wird für die weitere Planung ausgeschlossen. Die Startausrichtung ist frei wählbar und soll keine oder eine Rückwärtsfahrt beinhalten. Dabei können Segmente auch ausgelassen werden. Die zeitliche Fahrt des Fahrspurmodells in Abbildung 17 ist farblich gekennzeichnet und verläuft vom blauen Start hin zum rot markierten Ende.

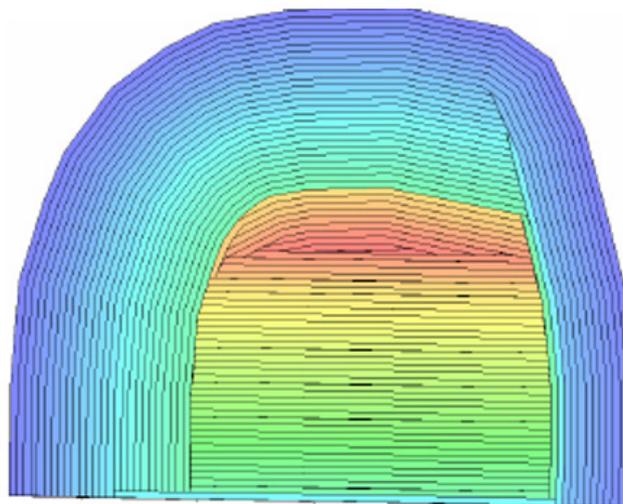


Abbildung 17: Online-Pfadplanung nach Oksanen (2007), Zeitverlauf der Feldfahrt durch farbliche Änderung gekennzeichnet

Hameed et al. (2010) haben Fahrspuren in Echtzeit unter Berücksichtigung der Feldgrenze generiert. Konvexe sowie konkave Feldgrenzen werden betrachtet und durch die vorgestellten Methoden können konturförmige und gerade Spuren erstellt werden. Es wird zu Beginn eine umrundende Vorgewendefläche angelegt. Das längste konturförmige Segment der Feldgrenze, die der Beschränkung durch den Maschinenwenderadius genügt, wird gesucht. Diese dient als Referenz und wird solange in Richtung der Feldmitte verschoben, bis das gesamte Feld mit Fahrspuren bedeckt ist. Abbildung 18 zeigt das Fahrspurmuster. Die Fahrspuren sind grün dargestellt. Die dickeren grünen Linien zeigen auf, an welchen Stellen die Fahrspuren nachbearbeitet werden mussten, damit keine Selbstüberschneidungen auftreten.

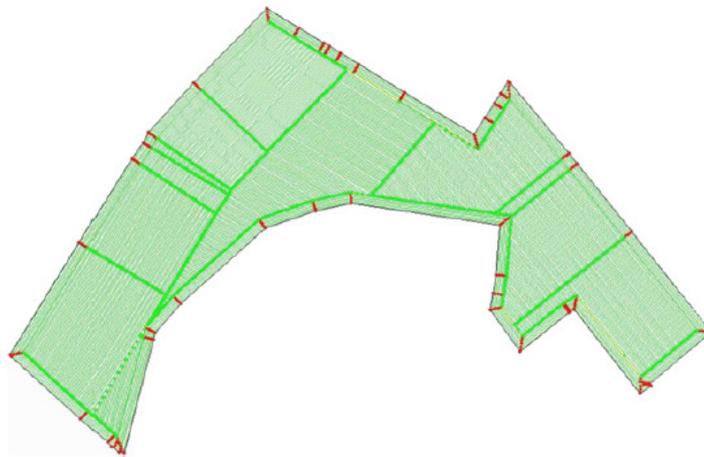


Abbildung 18: Fahrspurerzeugung nach Hameed et al. (2010)

Brunnert (2006) stellt eine dynamische Routenplanung vor mit dem Ziel, den Maschinenausnutzungsgrad zu verbessern. Ein modulares Konzept ist in MATLAB Simulink realisiert worden, wobei das System in Basisfunktionen und Erweiterungen getrennt ist. Unter die Basisfunktionen fallen eine Koordinatentransformation, die Fahrspurgenerierung und ein Lenkregler, der das Fahrzeug auf einer Sollspur führt. Erweitert wird dieses Grundsystem um eine Feldgrenzaufzeichnung, eine Felddatenverwaltung, eine Fahrmustergenerierung und eine Wendeautomation. Abbildung 19 zeigt die Anzeige des Prototypen, der die aufgezeigten Methoden verifizieren soll.

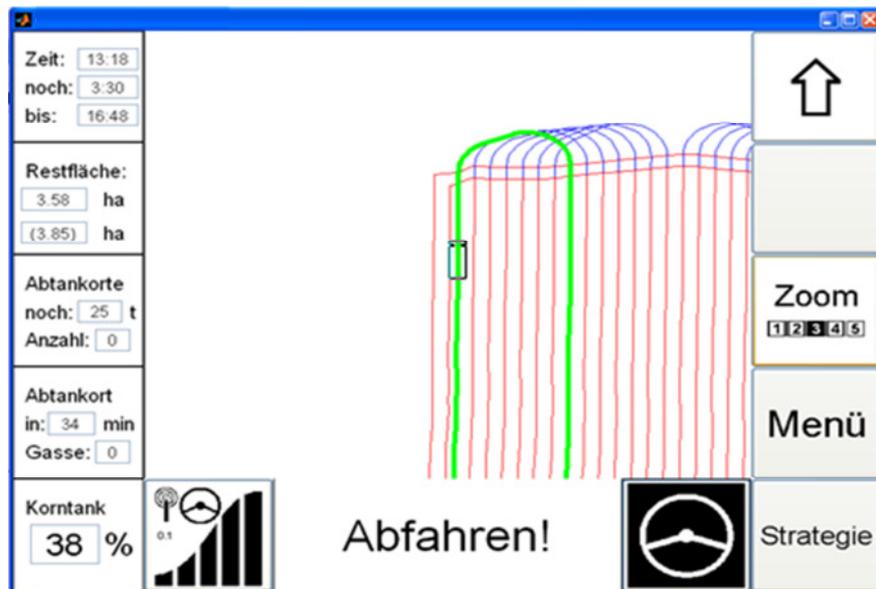


Abbildung 19: Ansicht eines Routenplanungs-Prototypen nach Brunnert (2006)

Spekken (2010) stellt eine Arbeit zur Minimierung der Arbeitszeit vor. Dabei sollen die Fahrstrecken auf dem Feld minimiert werden. Auch die Maschinenlade- und –entladevorgänge werden berücksichtigt. Mögliche Fahrspuren werden in das Feld gelegt, damit sie durch die abgeschätzten Weglängen hinsichtlich der Entlademöglichkeiten beurteilt werden können.

Zandonadi (2012) stellt ein Werkzeug zur Vorplanung der Feldarbeit vor. Mit seiner Software FieldCAT wird der Einfluss der Bearbeitungsrichtung und der Maschinenbreite auf verschiedene Feldgrenzen untersucht. Der Überlapp zwischen Spurenden und Vorgewendeflächen ist berechnet worden, sodass ein feldbezogener Nutzen von Section Control aufgezeigt werden kann. Felder werden unterteilt, wenn das Grenzpolygon konkave Winkel aufweist.

#### 2.2.4 Infield-Logistik

Die Optimierung der Abarbeitungsreihenfolge von Fahrspuren sowie das Bestimmen von Entladepunkten können die Maschinenauslastung erhöhen und somit die Arbeitszeit auf dem Feld minimieren. Das Projekt "marion" hat den Transport des Erntegutes mittels eines Ladefahrzeuges und zwei Erntemaschinen untersucht (Scheuren, 2014). Die Fahrzeugdaten, die Ertragsdaten der zu bearbeitenden Fläche sowie die Feldgrenze und alle Randbedingungen des Ernteprozesses müssen vorhanden sein. Mit den Eingangsgrößen wird ein Routenplan für jedes beteiligte Fahrzeug bestimmt. Die Planung ist in zwei Teile aufgetrennt. Zuerst muss die Fahrspurreihenfolge optimal berechnet werden, danach werden die Überladevorgänge berechnet. Die Optimierung der Überladevorgänge und der

Spurreihenfolge müssen in einer raumzeitlichen Betrachtung geschehen. Das System ist als Online-Verfahren ausgelegt und wird auf der Maschine eingesetzt, um auch auf Planänderungen eingehen zu können. Abbildung 20 zeigt eine simulierte Feldarbeit.

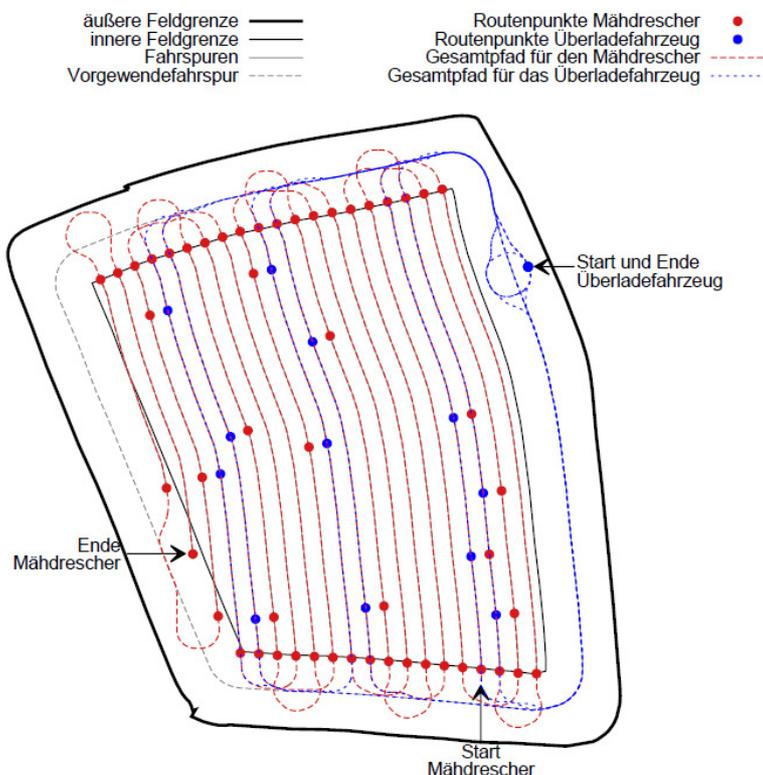


Abbildung 20: Schema der Planung des Projektes marion (Scheuren, et al., 2011)

Auch Ali (2010) präsentiert in seiner Dissertation ein Online-Planungssystem für die Getreideernte. Es können verschiedene Aufgaben identifiziert werden. Als erste Aufgabe ist das zeitliche Einplanen der Fahrzeuge vor der Feldarbeit zu lösen. Danach muss die Planausführung der Maschine auf dem Feld automatisiert werden. Die Überwachung des Fortschritts und das Erkennen von Planabweichungen ermöglichen eine Neuberechnung des Routenplans, falls dies nötig ist. Der Ernteprozess wird als Capacitated Routing Problem betrachtet. In erster Linie soll die nicht-produktive Zeit der Mähdrescher minimiert werden, wobei zur Bestimmung der Abladepunkte die Kapazität berücksichtigt werden muss.

Matsuo et al. (2002) stellten den selbstfahrenden Traktor Robotra vor, der auf einem Standard-Schlepper aufbaut. GPS-basiert wird das Fahrzeug in verschiedenen Fahrmodi geführt. Besonders hervorgehoben wird dabei ein Bodenbearbeitungs-Fahrmodus mit diagonaler Abarbeitungsrichtung zur Hauptausrichtung des Feldes.

Bochtis und Sorensen (2010) haben ein Logistikkonzept vorgestellt, welches zum Ziel hat, die nicht-produktive Zeit auf dem Feld zu minimieren. Die landwirtschaftlichen Anwendungen

werden kategorisiert und mithilfe von Methoden des Operations Research gelöst. Dabei wird das Problem abstrahiert und in eine gewichtete Graphendarstellung überführt. Es erfolgt eine Lösung mit heuristischen Verfahren der Tourenplanung. In der Tourenplanung sind eine definierte Anzahl an Knoten mit einer Kapazität zu beliefern, gleichzeitig hat das Fahrzeug nur eine begrenzte Lieferkapazität. Sie gehören zur Klasse der NP-vollständigen Probleme und sind somit nicht-deterministisch in Polynomialzeit lösbar. Die Spurreihenfolge wird so verändert, dass die Wendezeit minimiert werden kann. Das komplette System ist als High-Level-Lösungsansatz anzusehen, bei dem die organisatorischen Probleme, nicht jedoch eine korrekte Spurplanung und -führung behandelt werden. Abbildung 21 zeigt die Überführung in eine mathematische Graphenbeschreibung.

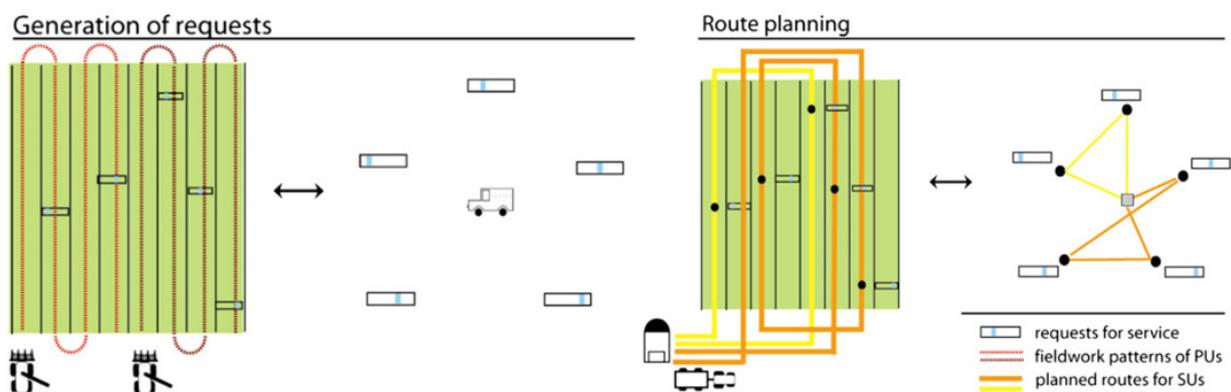


Abbildung 21: Logistikproblem modelliert nach Bochtis und Sorensen (2010), links – Graphenmodellierung des Feldprozesses, rechts – Routen nach Berechnungen mit VRP-Heuristiken

Ebenso stellt Blackmore (2004) einen Traktor vor, der autonom einen vordefinierten Routenplan abfährt. Ein Traktor (Hakotrac3000, 27 PS) wurde mit einem Lenksystem ausgestattet; die Routen werden mit der Software AgroNav vorgeplant. Die Feldgrenze wird dabei von der um das Feld fahrenden Maschine und dem empfangenen GPS-Signal aufgezeichnet. Im Anschluss wird die Abarbeitungsrichtung in der Planungssoftware gewählt. Via USB kann der erstellte Routenplan auf die Maschine transferiert werden, eine Wiederholbarkeit ist somit möglich.

### 2.2.5 Fahrwegsplanung

Ein letztes wichtiges Modul der Routenplanung ist die Fahrwegsplanung unter Berücksichtigung fahrzeugkinematischer Einflüsse. 1957 hat Lester Dubins erstmals die Pfadplanung für mobile Roboter mit Ackermannlenkung vorgestellt und dabei bewiesen, dass nur drei Fahrmodi – nämlich Geradeausfahrt, Links- und Rechtskurve maximalen

Lenkeinschlages – nötig sind, um alle Start-/Endpunkt-Konfigurationen erreichen zu können. Außerdem konnte Dubins (1957) beweisen, dass einer dieser Fahrwege auch den kürzest möglichen Fahrweg darstellt. Der kürzeste Fahrweg muss einer der folgenden sein: {LRL, RLR, LGL, LGR, RGL, RGR} (l – links, g – geradeaus, r – rechts). Die Planung wird in Abbildung 22 erläutert. Es werden an Start- und Endpunkt jeweils zwei Kreise tangential zur vordefinierten Start- und Endausrichtung mit dem minimalen Wenderadius gezeichnet. Danach werden die vier Tangenten an die Kreise gelegt. Einer der sechs entstandenen Pfade stellt dabei den kürzesten Fahrweg dar, welcher blau gekennzeichnet ist. Dies ist der große Vorteil von Dubinskurven, da keine andere Planungsmethode ähnlich kurze Wenden ermöglichen kann. Allerdings ist der Übergang zwischen Kreisen und Geraden nicht glatt, sodass das Fahrzeug anhalten und den Lenkwinkel ändern muss.

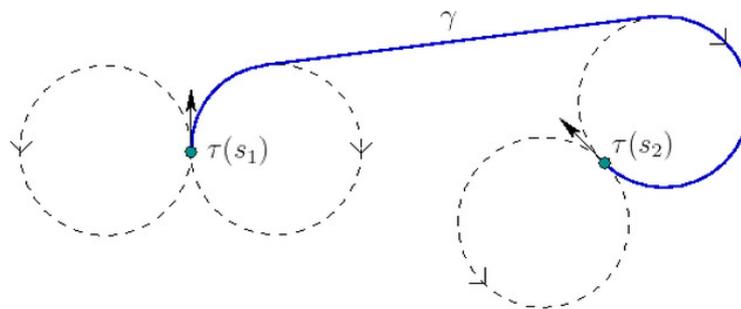


Abbildung 22: Dubinskurve (LaValle, 2006)

1990 haben Reeds und Shepp (1990) die Dubinskurven um die rückwärtigen Pfade ergänzt. Wieder werden dieselben Planungskreise verwendet, allerdings sind nun 48 verschiedene Wege denkbar. Der kürzeste Pfad stellt den kürzest möglichen Fahrweg dar, allerdings sind die Übergänge zwischen Kreisen und Geraden ebenfalls nur mit Fahrunterbrechung und Lenkwinkelverstellen befahrbar. Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt aus dem 1990 veröffentlichten Artikel.

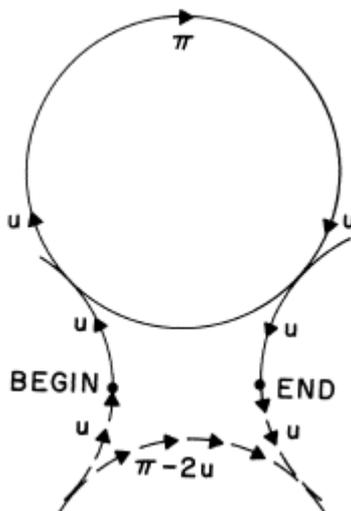


Abbildung 23: Reeds and Shepp Kurve (Reeds & Shepp, 1990)

Die suchbasierte Planung mittels Bewegungsprimitiven stellt ein probates Mittel dar, um Pfade für nicht-holonome Fahrzeuge (Oubati, 2009) zu planen. Abbildung 24 zeigt den Ablauf einer solchen Methode. Der mögliche Raum für den Pfad wird mit einem Gitter versehen. Daraus wird ein Graph konstruiert mit Weglängen zwischen den einzelnen Zellen. Auch der Start- und Endpunkt werden in den Graphen übernommen. Ein Suchalgorithmus sucht den kürzesten Pfad durch den Graphen vom Start- zum Endpunkt. Ein überschaubarer Speicheraufwand durch Sparse-Matrizen (Gilbert et al., 1992) ermöglicht die Planung befahrbarer Pfade. Eine Vielzahl zusätzlicher Bedingungen können berücksichtigt werden. Nachteile sind die erhöhte Rechenzeit und die Möglichkeit, dass in Sonderfällen kein korrekter Pfad gefunden werden kann. Viele Arbeiten - wie zum Beispiel Pivtoraiko und Kelly (2005) - verwenden die an der Carnegie Mellon University entwickelte Bibliothek zur Pfadplanung (SBPL).

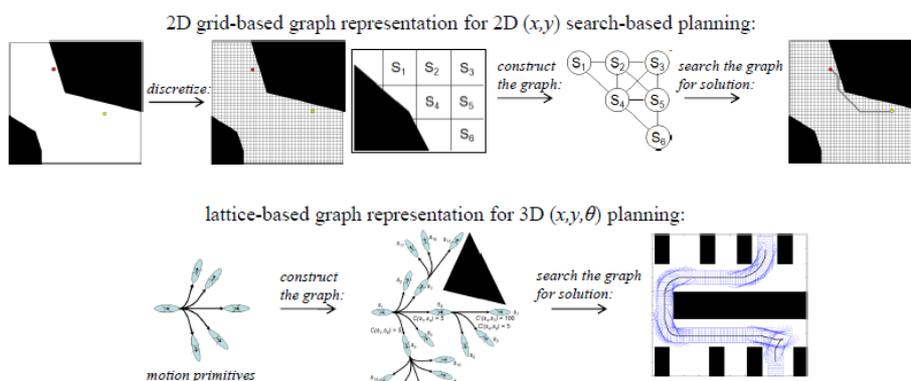


Abbildung 24: Suchbasierte Planung mit Bewegungsprimitiven (Likhachev, 2013)

### 2.2.5.1 Planung von Wendewegen

Auch die landwirtschaftliche Anwendung der Wendemanöverplanung wurde untersucht. Oksanen (2007) präsentiert eine Methode der Wendeweggenerierung mittels stückweiser Bezierspines. Dabei soll die Wendeweglänge minimiert werden. Als Modell dient die komplexe Traktor-Anhänger-Kombination, die als übliches Feldfahrzeug ausgemacht worden ist. Es wird als dynamisches System mit 6 Zuständen und 2 Eingängen modelliert, restriktiert wird dabei auf eine 2D-Bewegung. Die Methodik basiert auf der Berechnung einer zeitminimalen Wende mittels der Lösungsverfahren eines optimalen Steuerungsproblems. Um den Pfad korrekt als Referenzlinie wiederzugeben, wird der Fahrweg des Steuerungsproblems mittels stückweiser Bezier-Kurven dargestellt. Der Nachteil liegt darin, dass - wie in Abbildung 25 zu sehen ist - kreisrunde Fahrwegsstücke nicht korrekt dargestellt werden können.

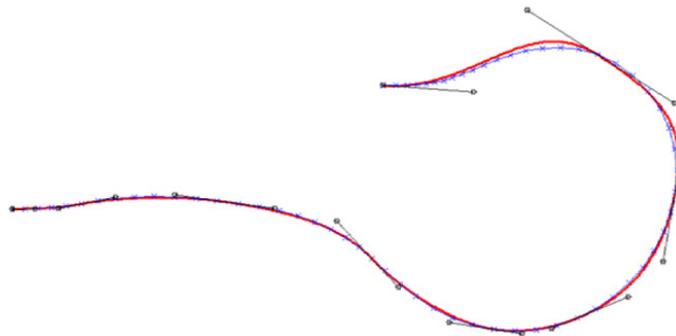


Abbildung 25: Wendebirne nach Oksanen (2007)

Scheuren (2014) zeigt eine Methode zum Erzeugen von Vorgewendepfaden für die Kinematik eines traktorähnlichen Fahrzeugs. Abbildung 26 zeigt den Ansatz mithilfe von gitterbasierten Bewegungsprimitiven. Um ein möglichst genaues Anschlussfahren an eine nächste Spur zu realisieren, wird ein feinmaschiges Gitter berechnet. Es wird ein Pfad zwischen Startspur in eine Vorgewendefahrspur geplant sowie ein Pfad aus der Vorgewendefahrspur in die Zielspur. Dies ermöglicht neben einer verkürzten Rechenzeit, dass vermehrt Bodenflächen in der Nähe der Vorgewendespuren von den Reifen überfahren werden, wohingegen andere Bereiche nicht durch das Fahrzeuggewicht belastet werden und der Boden somit geschont wird. Scheuren verwendet die schon erwähnte Open-Source-Bibliothek SBPL.

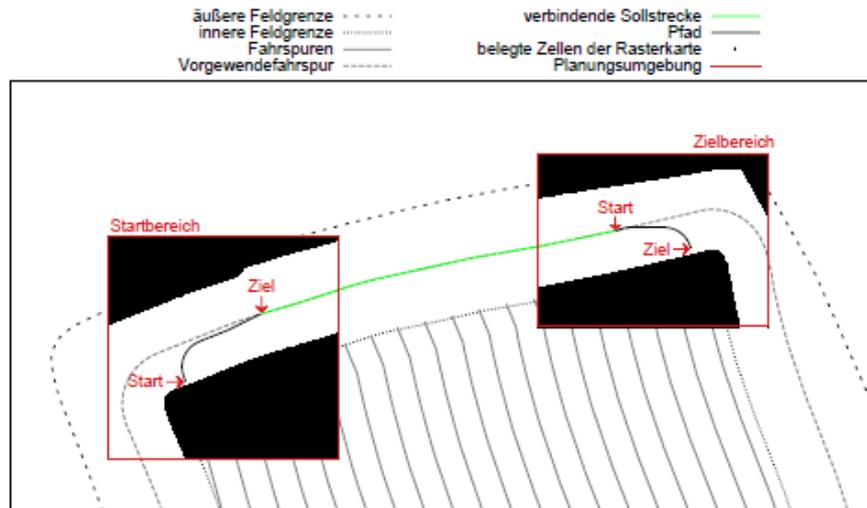


Abbildung 26: Vorgewendeplanung nach Scheuren (2014)

In der 2009 veröffentlichten Arbeit von Choudhury und Singh (2009) wird ebenfalls eine Pfadgenerierung für das Wenden vorgestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 dargestellt. Das Problem wird mittels einer optimalen Steuerung (Optimal Control Problem / OCP) modelliert. Das Fahrzeug wird durch das folgende Gleichungssystem beschrieben.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\kappa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \kappa \\ 0 \end{pmatrix} v + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \sigma \quad [2]$$

mit:

- $v$  = Geschwindigkeit,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
- $\sigma$  = Lenkwinkeländerung,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\theta$  = Ausrichtung,  $\text{rad}$
- $\kappa$  = Krümmung,  $\text{m}^{-1}$
- $\dot{x}, \dot{y}$  = Koordinate

Dabei generiert das OCP eine Reihe von Zuständen, die eine Kostenfunktion minimiert. Das Überfahren der Feldgrenze soll verhindert werden.

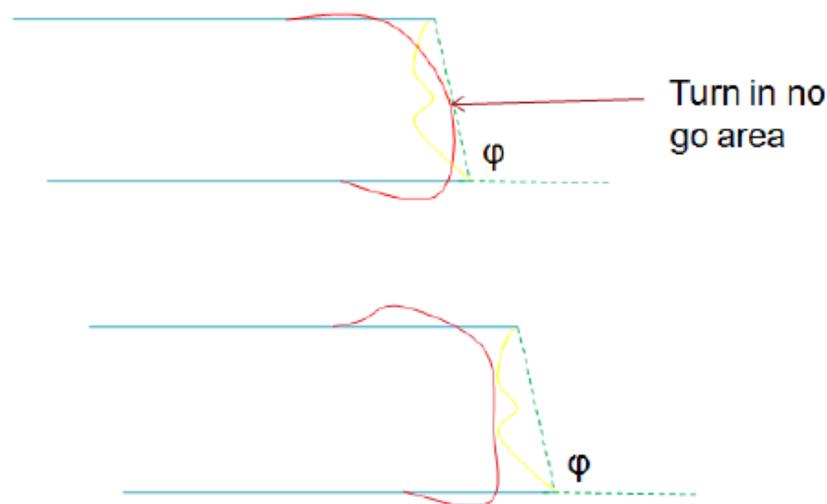


Abbildung 27: Wendemanöver unter Berücksichtigung der Feldgrenze (Choudhury & Singh, 2009)

### 2.3 Verwandte Forschungsgebiete

Viele Anwendungen wie beispielsweise die Inspektions-, Mäh- und Haushaltsrobotik beschäftigen sich ebenfalls mit dem Problem der flächendeckenden Pfadplanung. Die bekanntesten Fahrstrategien sollen im Folgenden aufgeführt werden:

- Amöben-Fahrstrategie: Der Roboter fährt vorwärts bis er auf ein Hindernis stößt. Er stoppt und ändert die Ausrichtung zufällig. Mit dem neuen Drehwinkel wird weitergefahren, bis erneut auf ein Hindernis getroffen wird. Diese Prozedur wiederholt sich eine gewisse Zeit, bis der Roboter zurück in die Ladestation fährt (Heidel, 2009).
- Spiralfahrstrategie: Der Roboter startet an einem Punkt und fährt spiralartig nach außen. Dieser Modus wird vor allem bei großen Flächen angewandt (Heidel, 2009).
- Abfahren der Wand: Der Roboter fährt geradeaus bis er auf die nächste Wand trifft. Dieser folgt er und umrundet somit den Raum. Diese Außenkontur fährt er - in Richtung Raummitte verschoben - wiederholt ab, bis der gesamte Raum abgefahren wurde (Heidel, 2009).
- Mäander-Fahrstrategie: Der Roboter versucht, in parallelen Bahnen zu arbeiten. Trifft der Roboter auf ein Hindernis, dreht er um 180 ° und fährt die benachbarte Spur an. Bei rechteckigen Räumen kann somit eine 100 % Abdeckung erreicht werden (Heidel, 2009).

Weiterführend sind in wissenschaftlichen Arbeiten die folgenden Strategien für die flächendeckende Pfadplanung bekannt:

- Wellenfront-Algorithmus (Lee, 1961): Ein Verfahren zur Pfadplanung stellen Zelinsky et al. (1993) vor. Zuerst wird die vorzuplanende Fläche diskretisiert und in Form eines Rasters repräsentiert. Danach wird der Wellenfront-Algorithmus angewandt. Dieser findet einen Weg von Ausgangs- zu Zielpunkt, die Rasterpunkte sind dabei alle vorher zu befahren.
- Spannbaum-Abdeckung: Flächendeckend werden Quadrate vordefinierter Größe im Raum angelegt. Für diese Quadrate wird ein minimaler Spannbaum berechnet. Dieser wird anschließend zu beiden Seiten um die Roboter-Arbeitsbreite verschoben. Es entsteht ein flächendeckender Pfad (LaValle, 2006).

### 3 Material und Methode

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Schritte angewandt wurden, um aus einem Traktor mit GNSS-Lenksystem eine teilautonome Arbeitsmaschine zu machen. Dabei wird ein Fahrspurmuster bestimmt, welches eine Feldbearbeitung mit minimaler Arbeitszeit ermöglicht. Auch die Spurreihenfolge soll so berechnet werden, dass möglichst wenig Wendezeit benötigt wird. Zuerst wird die Architektur aller Module im Zusammenwirken erläutert, bevor jedes Modul im Einzelnen näher betrachtet wird.

Eine dynamische Routenplanung soll den Fahrer dahingehend entlasten, dass er nur noch die Feldgrenze sowie Hindernisse mithilfe eines automatischen GNSS-Lenksystems aufzeichnen muss, ehe der Schlag autonom abgefahren werden kann. Um alle Felddaten optimal zu erzeugen, sind die in Abbildung 28 aufgeführten Arbeitsschritte notwendig.

Zu Beginn muss die Feldgrenze aufgezeichnet werden. Dazu wird das Feld einmal außen umfahren. Mithilfe der GNSS-Empfangstechnik des Lenksystems wird die aktuelle Position bereitgestellt und mit Nachbearbeitung kann die gefahrene Spur als Grenzpolygon verwendet werden. Der nächste Schritt behandelt die Feldteilung, in dem Teilbereiche für eine individuelle Bearbeitungsrichtung definiert werden. Verschiedene Maschinenparameter werden herangezogen, um die Bearbeitungsrichtungen mit minimaler Arbeitszeit zu bestimmen. Teilfeldpolygone und Arbeitsrichtungen werden verwendet, um die Fahrspuren für die gesamte Feldfläche inklusive Wendeflächen zu erstellen. Im letzten Planungsschritt werden die Reihenfolge der Teilfeldbearbeitung sowie die Spurreihenfolge in den Teilfeldern ermittelt. Eine Aufgabe, die während der Feldfahrt erfüllt werden muss, ist die Überwachung des Prozesses. Bei Planabweichung wird, ausgehend von der aktuellen Position eine neue Sequenz bestimmt. Bearbeitete Spuren werden nicht weiter betrachtet und es werden Wendevorgänge gestartet, sobald das Vorgewende erreicht wird.

### Feldumrandungsaufzeichnung

**Eingangsgrößen:** Aktuelle Position, Arbeitsbreite

**Ausgangsgrößen:** Feldgrenzpolygon

**Aufgabe:** Die gefahrene Spur wird so nachbearbeitet, dass die Feldgrenze als Polygon ausgegeben werden kann.



### Feldteilung

**Eingangsgrößen:** Feldgrenzpolygon

**Ausgangsgrößen:** Teilfeldpolygone

**Aufgabe:** Das Feld wird in sinnvolle Teile getrennt.



### Wahl der Bearbeitungsrichtung

**Eingangsgrößen:** Teilfeldpolygone, Maschinenparameter

**Ausgangsgrößen:** Bearbeitungsrichtungen

**Aufgabe:** Für jedes Teilfeld wird die beste Bearbeitungsrichtung anhand agronomischer Kriterien bestimmt.



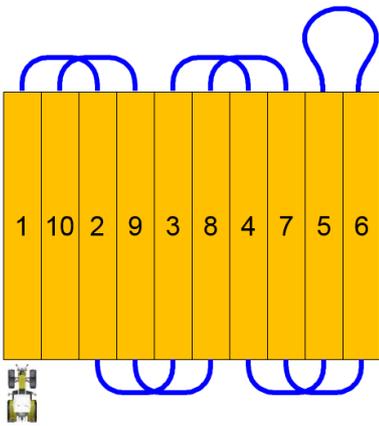
| Spurerstellung   |  |
|--|--|
| <p><b><u>Eingangsgrößen:</u></b> Teilfeldpolygone, Bearbeitungsrichtungen, Maschinenparameter</p> <p><b><u>Ausgangsgrößen:</u></b> Fahrspuren für Vorgewende und Feld</p> <p><b><u>Aufgabe:</u></b> Die Vorgewendespuren und Fahrspuren im Feld sollen für eine gegebene Bearbeitungsrichtung und Teilfelder bestimmt werden.</p>  |    |
| Fahrstrategieplanung   |  |
| <p><b><u>Eingangsgrößen:</u></b> Maschinenparameter, aktuelle Spurnummer, Status der Routenplanverfolgung</p> <p><b><u>Ausgangsgrößen:</u></b> Spursequenz</p> <p><b><u>Aufgabe:</u></b> Für die Maschinenparameter und Felddaten soll eine optimale Fahrstrategie gefunden werden.</p>  |   |
| Echtzeitüberwachung  |  |
| <p><b><u>Eingangsgrößen:</u></b> Aktuelle Position, Spursequenz, Fahrspuren, Teilfeldpolygone</p> <p><b><u>Ausgangsgrößen:</u></b> Status der Verfolgung des Routenplans, aktuelle Spurnummer / Teilfeld</p> <p><b><u>Aufgabe:</u></b> Die Verfolgung der Route wird überwacht und die nötigen Maßnahmen ergriffen, falls eine neue Strategie berechnet werden muss.</p> |  |

Abbildung 28: Systemaufbau einer modularen, dynamischen Routenplanung (Microsoft Bing; Nokia, 2015)

### 3.1 Felddatenaufzeichnung

Für eine automatisierte Routenplanung müssen Felddaten im Vorfeld erfasst werden, die im Folgenden aufgeführt werden. Zu den aufzuzeichnenden Größen zählen die Feldgrenze sowie Hindernisse. Wie in Abbildung 29 zu sehen ist, werden nicht direkt die Grenzen mithilfe der GNSS-Technik aufgezeichnet, sondern die gefahrene Trajektorie des Fahrzeugs. Die aufgezeichnete Spur muss also verschoben, gefiltert und vereinfacht werden.

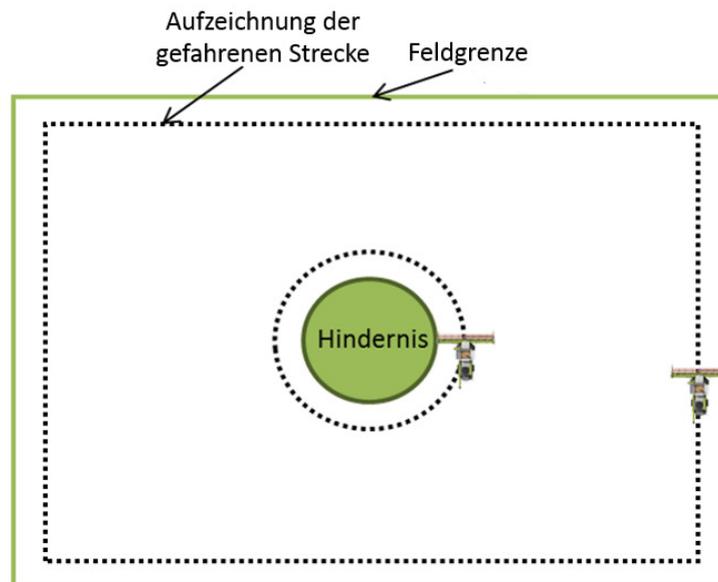


Abbildung 29: Aufzeichnung einer Feldgrenze und eines Hindernisses

#### 3.1.1 Nachbearbeiten von Polygonen und Polylinien

Zuerst muss sichergestellt werden, dass die Feldgrenze durch ein geschlossenes Polygon beschrieben wird, also der erste und der letzte Punkt des Polygons identisch sind. Eine weitere Besonderheit ist, dass das Grenzpolygon keine Selbstüberschneidungen beinhalten darf. Je nach Feldform und Feldoperation kann es sein, dass der Landwirt an Feldkanten durch eine Teilkreisfahrt oder durch Vor- und Zurücksetzen auf ein neues Spursegment fährt. Dazu muss eine Methode die gefahrene Spur so nachbearbeiten, dass nur die Feldgrenze als Polygon erhalten bleibt. Dies soll durch eine Filterfunktion gewährleistet werden. Danach muss das Grenzpolygon aufgrund der Vielzahl von Punkten simplifiziert werden. Im Anschluss wird das Polygon um eine halbe Arbeitsbreite nach außen verschoben.

##### 1. Filtern des Polygons

Die gefahrene Grenzspur stellt nicht zwingend die Feldgrenze dar. Häufig wird an Feldkanten durch rückwärtiges Fahren gewendet (sogenanntes K-Turn-Manöver). Somit muss die

aufgezeichnete Spur so ausgedünnt werden, dass ausschließlich die tatsächliche Feldgrenze wiedergegeben wird. Zuerst werden alle Selbstüberschneidungen der aufgezeichneten Spur ermittelt. Mit der Information der sich schneidenden Segmente kann ermittelt werden, wo Schnittpunkte eingefügt und nicht-relevante Punkte gelöscht werden müssen. Abbildung 30 soll die Schwierigkeit der Spurbearbeitung aufzeigen. Die Windungen der linken Abbildung werden gelöscht, das rechts abgebildete Polygon stellt die ermittelte Feldgrenze dar.

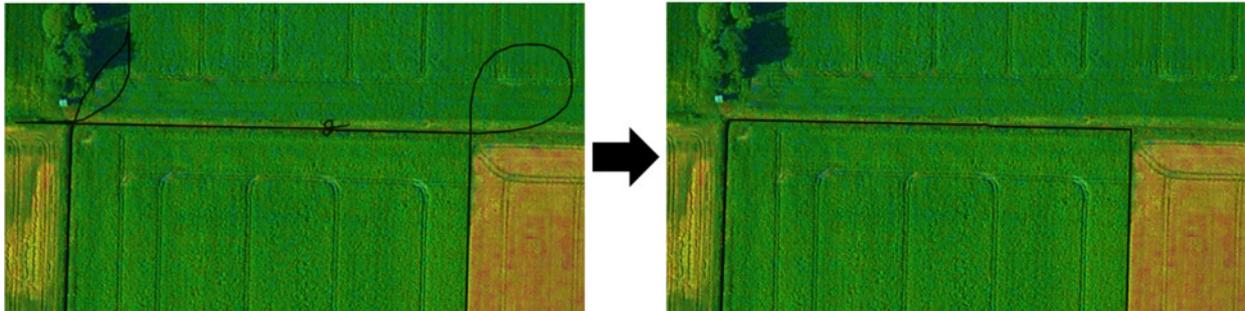


Abbildung 30: Filterung einer aufgezeichneten Spur (Microsoft Bing; Nokia, 2015)

## 2. Simplifizierung des Polygons

In der Regel wird das Positionssignal in Lenksystemen mit einer Frequenz von 1-10 Hertz aufgezeichnet, somit besteht ein Grenzpolygon nicht selten aus mehreren 1000 Punkten. Signifikant für das äußere Erscheinungsbild sind dabei jedoch meist wenige Dutzend Polygonpunkte. Im nächsten Schritt soll deshalb die Fahrspur so vereinfacht werden, dass nur noch signifikante Punkte bestehen bleiben. Es soll ein auf dem Gebiet der Vektorgrafik bereits häufig verwendeter Algorithmus verwendet werden. Mithilfe des Douglas-Peucker-Verfahrens wird die Spur vereinfacht (Douglas & Peucker, 1973). Das Erkennen der signifikanten Feldkanten in akzeptabler Rechenzeit von wenigen Millisekunden sind wesentliche Bewertungskriterien einer Polygonvereinfachung.

## 3. Polygonverschiebung

Als Letztes muss das erstellte Polygon nach außen verschoben werden. Dazu wird die Drehrichtung ermittelt und das Polygon - falls erforderlich - im Uhrzeigersinn gedreht. Im Anschluss kann der Verschiebealgorithmus verwendet werden, der in Kapitel 3.4 vorgestellt wird. Die Verschiebeweite entspricht einer halben Arbeitsbreite, da dies der Abstand zwischen bearbeiteter Flächengrenze und Antennenposition - also aufgezeichnete Position - ist. Abbildung 31 zeigt, wie das blaue Polygon zuerst gefiltert wird. Das entstandene grüne Polygon wird verschoben, sodass das rote Polygon die Feldgrenze wiedergibt. Die runden Kantenverschiebungen entstehen durch die Verschiebeoption, die ebenfalls näher in Kapitel 3.4.1.1 erläutert wird.

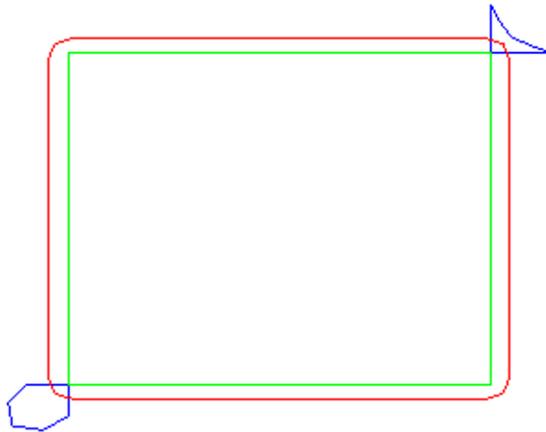


Abbildung 31: Methodik zur Aufzeichnung einer Feldgrenze; blau – gefilterte Schleifen, grün – gefilterte Aufzeichnung, rot – interpretierte Feldgrenze

### 3.2 Feldeinteilung

Nachdem alle benötigten Felddaten aufgezeichnet und nachbearbeitet worden sind, muss das Feld in geeignete Teilfelder getrennt werden. Teilfelder sind notwendig, um Bereiche zu definieren, für die ausschließlich eine Bearbeitungsrichtung Anwendung findet. Jedem Feld wird somit eine Liste von Teilfeldern zugeordnet und jedem dieser Teilfelder wiederum eine Bearbeitungsrichtung. Basis für die Feldeinteilung ist die zellulare Dekomposition (LaValle, 2006). Eine Trennung muss durchgeführt werden, sobald ein konkaver Winkel in der Feldgrenze enthalten ist. Eine Kante ist dann konkav, wenn der im Polygon innere Winkel  $\alpha$  eines gegen den Uhrzeigersinn gedrehten Polygons im Bereich  $180^\circ \leq \alpha < 360^\circ$  liegt.

Eine beispielhafte Feldeinteilung ist in Abbildung 32 zu sehen. Das Feld ist in drei Bereiche gegliedert worden. Dieses Beispiel soll genutzt werden, um die Einzelschritte der Methode zu erläutern.

Zuerst wird eine Trennrichtung bestimmt. Als Basis für die Trennrichtung wird die Ausrichtung des längsten Grenzpolygonsegments ermittelt, nach dem Prinzip „divide et impera“ wird das Feld sehr fein zertrennt und wieder in geeignete Teilfelder zusammengefügt.

An der konkaven Feldecke mit dem geringsten Abstand zur längsten Außenkante wird eine Gerade mit Dekompositionsausrichtung gezeichnet. Sie weist mindestens einen Schnittpunkt mit dem restlichen Feldpolygon auf (Schritt 1). Das Feld wird an diesem Trennschnitt in zwei Felder geteilt, welche erneut auf die Notwendigkeit zur Teilung untersucht werden. Der Vorgang wird sukzessive so lange wiederholt, bis die neu entstandenen Felder nicht weiter unterteilt werden können, da keine weiteren konkaven Kanten vorhanden sind (Schritt 2 – 5).

Die Besonderheit liegt darin, dass die Dekompositionsausrichtung nicht starr für alle Teilfelder gilt, sondern sich auf das betrachtete, zu trennende Teilfeld bezieht.

Im nächsten Schritt werden die entstandenen Teilfelder wieder geeignet zusammengefügt (Schritt 6). Zwei Teilfelder werden dann zusammengefügt, wenn sie entweder die gleiche beste Hauptausrichtung haben oder die längste Kante eines Teilfeldes an das zweite Teilfeld grenzt. In dem dargestellten Beispiel aus Abbildung 32 entstehen drei Teilfelder.

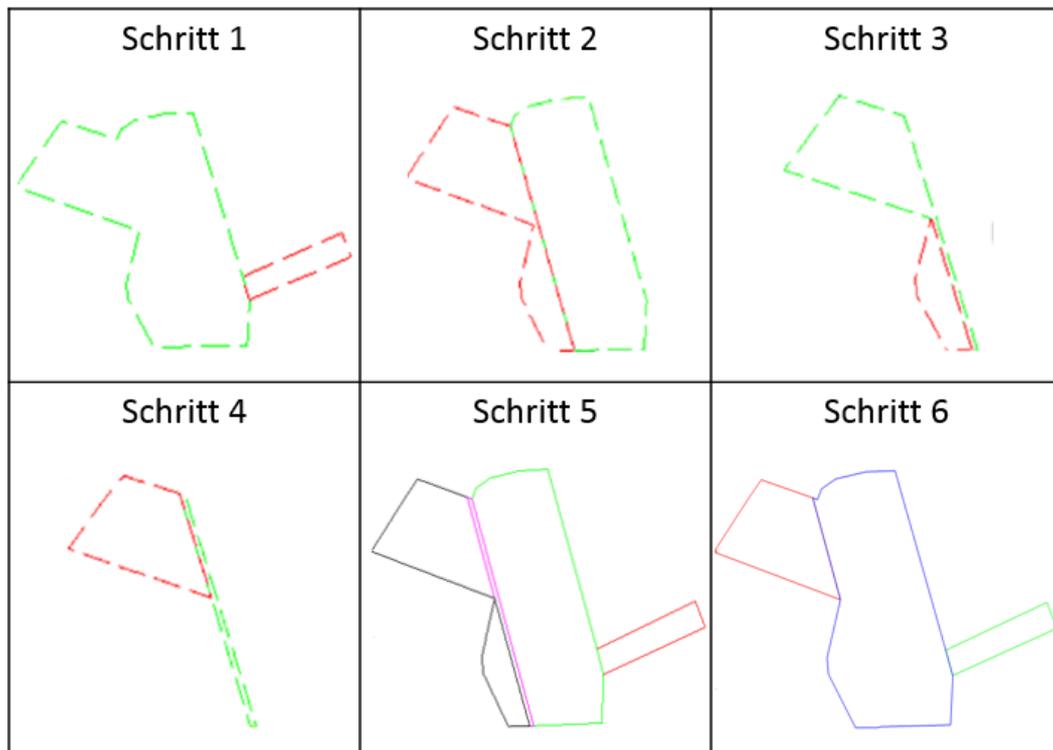


Abbildung 32: Ablauf der Feldteilung nach dem Prinzip „divide et impera“

### 3.3 Referenzlinienwahl

Nachdem das Feld aufgeteilt worden ist, soll nun die beste Bearbeitungsrichtung für jedes Teilfeld gefunden werden. Der erste Ansatz zeigt die Vorgehensweise für die Anwendung nicht-kapazitiver Feldprozesse auf. Die beste Bearbeitungsrichtung soll durch eine Arbeitszeitabschätzung und der Untersuchung aller Ausrichtungen der Grenzpolygonsegmente gefunden werden. Sind jedoch kapazitive Prozesse - also Prozesse mit begrenzter Ausbringungsmenge wie zum Beispiel der Gülleausbringung - auf dem Feld anzuwenden, so kann eine Bearbeitungsrichtung mit langen Fahrspuren dazu führen, dass einzelne Spuren mehrfach angefahren werden müssen, da das Tankvolumen für eine einmalige Fahrspurbearbeitung

nicht ausreicht. Dies wird im zweiten Teil dieses Kapitels mit angepasster Arbeitszeitabschätzung näher betrachtet.

### 3.3.1 Referenzlinienwahl nicht-kapazitiver Bearbeitung

Während eines landwirtschaftlichen Bearbeitungsjahres werden alle Operationen auf dem Feld mit einer Arbeitsrichtung getätigt. Dadurch wird sichergestellt, dass ein Spurmuster reihengebunden abgefahren und der Bestand beziehungsweise das Saatgut nicht durch mehrfaches Überfahren geschädigt wird. Die Wahl der Bearbeitungsrichtung muss alle Operationen im Erntejahr berücksichtigen und somit die gesamte Arbeitszeit pro Jahr minimieren. Der Landwirt nutzt meist die Faustregel, das längste Grenzsegment als Ausrichtung zu nehmen (Oksanen, 2007). Die vorgestellte Methode zeigt auf, wie die Ausrichtung mit minimaler Arbeitszeit und Routenlänge gefunden werden kann. Es werden alle Segmente der Feldgrenze als mögliche Bearbeitungsrichtung untersucht und eine modellbasierte Arbeitszeit abgeschätzt.

Als Erstes wird eine der Ausrichtungen eines Segments der Feldgrenze gewählt. Der signifikante Grenzpunkt wird bestimmt, von dem aus die Feldbreite und somit auch die Spuranzahl berechnet werden kann, siehe Abbildung 33 Schritt 2. Vom signifikanten Grenzpunkt ausgehend werden Linien mit der Ausrichtung des untersuchten Segments in das Feld gelegt und die Schnittpunkte mit der Feldgrenze bestimmt, es resultieren die Fahrspuren und Fahrspurlängen. Mit einer gegebenen Arbeitsgeschwindigkeit kann die Arbeitszeit für die Fahrspuren abgeschätzt werden.

Die Wendezeiten sollen ebenfalls approximiert werden. Der Winkel zwischen Fahrspur und Grenzpolygon wird ermittelt. Es soll je Schnittpunkt eine halbe Wende angenommen werden, sodass jede Fahrspur insgesamt eine Wende verursacht. Die Wende setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil der Wende ist ein Geradensegment, durch welches ein komplettes Fahrspurbearbeiten mit Anbaugerät garantiert werden kann. Danach wird eine Omega-Wende mit minimalem Wenderadius abgeschätzt, deren Weglänge hier durch einen halben Kreisumfang angenähert wird. Diese Abschätzung ist in Abbildung 33 (Schritt 4) graphisch dargestellt.

Als Letztes soll auch das Abarbeiten des Vorgewendes berücksichtigt werden. Dazu wird die Länge der Feldgrenze bestimmt, mit der Anzahl der Vorgewendespuren multipliziert und zur Gesamtroutenlänge hinzuaddiert. Um die Arbeitszeit abzuschätzen, werden die Routenlängen der Wendemanöver und die Routenlänge des Vorgewendebearbeitens durch die

Wendegeschwindigkeit dividiert. Daraus ergibt sich eine Vorgewende-Fahrtzeit. Formel [3] erläutert die gesamte Arbeitszeitabschätzung.

$$\text{Arbeitszeit} = \frac{l_{\text{Route,Feld}}}{v_{\text{Feld}}} + \frac{l_{\text{Route,Vorgewende}}}{v_{\text{Vorgewende}}} \quad [3]$$

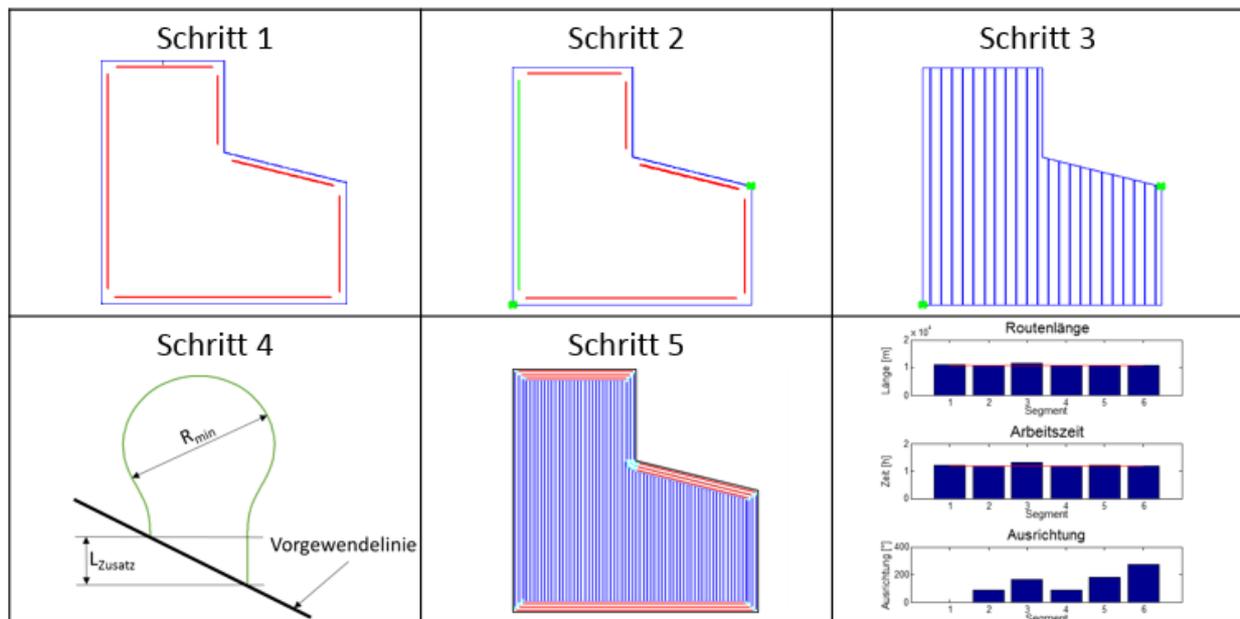


Abbildung 33: Ablaufdiagramm der Referenzlinienwahl

### 3.3.2 Referenzlinienwahl, basierend auf der Tankkapazität

Um auch die Tankkapazität der Landmaschine – wie beispielsweise die eines Mähdreschers – berücksichtigen zu können, wird ein weiterführendes Verfahren vorgestellt. Es soll neben der Routenlänge und der Arbeitszeit auch die Tankkapazität für die Referenzlinienwahl berücksichtigt werden.

Mit einer bekannten Ausbring- oder Erntemenge und einer bekannten Tankkapazität kann die maximal mögliche Weglänge bestimmt werden.

$$\text{Tankweglänge [km]} = \frac{\text{Geschwindigkeit [km h}^{-1}\text{]}}{\frac{\text{Ausbringmenge [kg h}^{-1}\text{]}}{\text{Tankkapazität [kg]}}} \quad [4]$$

Wie schon in dem in Kapitel 3.3 vorgestellten Verfahren wird auch hier die Bearbeitungsrichtung mit minimaler Arbeitszeit oder Routenlänge gesucht. Dazu werden alle Segmente der Feldgrenze als mögliche Bearbeitungsrichtungen untersucht. Ist eine simulierte Spur länger als die Tankweglänge, wird ein Be-/Entladeweg beziehungsweise -fahrzeit (pro

Tankweglänge) zum Depot zur Gesamtarbeitszeit und -routenlänge hinzuaddiert. Dies stellt die Strecke dar, die der Landwirt zusätzlich fahren muss.

Als Formel stellt sich dieser Sachverhalt wie folgt dar:

$$\begin{aligned} \text{Arbeitszeit} &= \text{Wendezeit} + \text{Fahrzeit}_{\text{Feld}} + \text{Fahrzeit}_{\text{VGW}} \\ &+ \frac{(\text{AUFRUNDEN}(\frac{\text{Spurlänge}}{\text{Tankweglänge}}) \cdot \text{Weg}_{\text{tank, leer-Depot}})}{\text{Entladegeschwindigkeit}} \end{aligned} \quad [5]$$

Die Weglänge zum Depot ist in der folgenden Abbildung 34 grün dargestellt. Es muss erst bis zum Ende der Spur gefahren werden, damit Erntebestand nicht überfahren wird. Dann wird gewendet und wieder über die Spur zum Depot zurückgefahren.

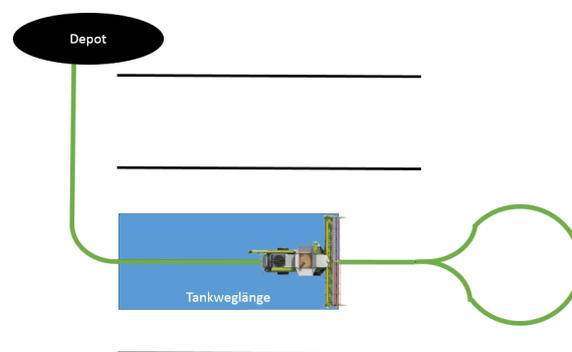


Abbildung 34: Betrachtung des Mähdrusches als kapazitiven Feldprozess

### 3.4 Spurmustergenerierung

Es wird nun das Verfahren vorgestellt, mit dem Fahrspuren in einem Feld erzeugt werden. Dabei muss die komplette Fläche des Feldes unter Berücksichtigung der Maschinenarbeitsbreite durch die erzeugten Spuren abgedeckt werden. Es werden Wendeflächen in Form von Vorgewendespuren berücksichtigt und abschließend Fahrspuren für den inneren Bereich generiert. Im Anschluss wird untersucht, ob Hindernisse innerhalb der Feldgrenzen vorhanden sind und somit das Fahrspurmuster beeinflussen. Falls dies der Fall ist, werden die Fahrspuren nachträglich bearbeitet, sodass sie nicht durch die Hindernisse führen.

#### 3.4.1 Vorgewendespurgenerierung

In einem ersten Schritt werden umrundende Vorgewende-Fahrspuren erzeugt. Sie dienen als Wendeflächen für die später erzeugten Fahrspuren im Feldinneren. Es müssen die

Feldgrenze, die Arbeitsbreite sowie die Vorgewendebreite bekannt sein. Die äußere Feldumrandung wird in Richtung der Feldmitte verschoben. Die Wahl der Vorgewendebreite hängt von den Wünschen des Anwenders und seinen Erfahrungen ab. Im Normalfall wird ein Vielfaches der Fahrgassenbreite gewählt. Alternativ kann jedoch auch eine Weite gewählt werden, die weniger Fahrspuren im Vorgewende erfordert, siehe Abbildung 35. Dazu soll die Vorgewendebreite einer halben Arbeitsbreite der Pflegeoperation plus einer Arbeitsbreite des Sägerätes entsprechen, sodass die Radspuren der Fahrgassen noch im Vorgewende bearbeitet werden können, jedoch das Spritzengestänge zur Feldinnenseite die Vorgewendelinie überschreitet. Es muss sichergestellt werden, dass das Wenden in diesem Bereich möglich ist.

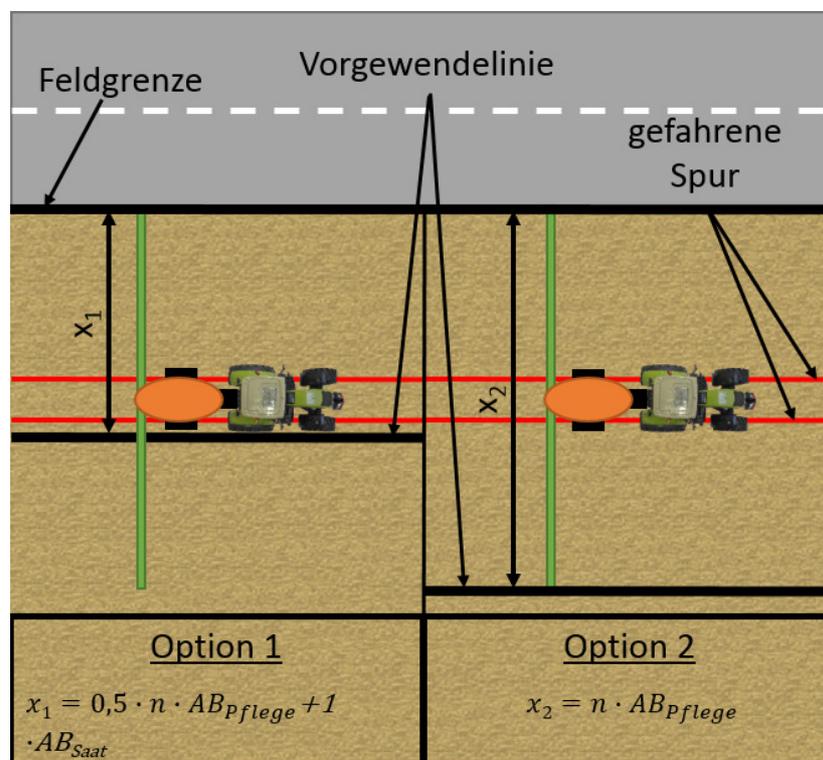


Abbildung 35: Wahl der Vorgewendebreite in Abhängigkeit von der gefahrenen Spur und der Arbeitsbreite

Die Vorgewendelinie ist keine Fahrspur, sondern umschließt eine Art inneres Hauptfeld, in das später die Geraden oder Polylinien (für die Fahrmodi AB-Kontur, Kontur) gelegt werden. Abbildung 36 zeigt die rote Vorgewendelinie sowie die blaue Feldgrenze. Der Bereich zwischen rotem und blauem Polygon ist die Vorgewendefläche.

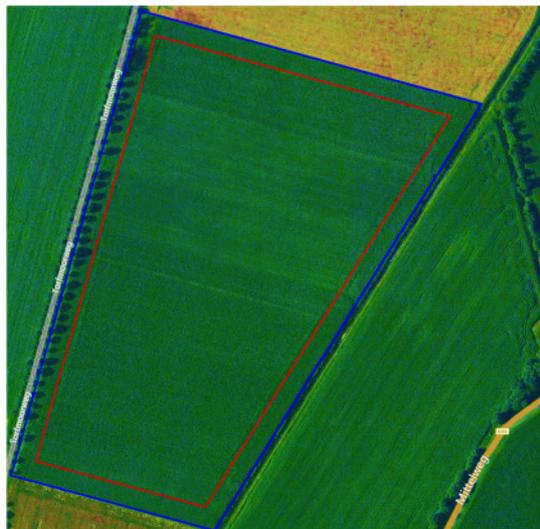


Abbildung 36: Erstellung des inneren Feldpolygons

Im nächsten Schritt werden umrundende Spuren in die Vorgewendefläche gelegt. Dabei wird die Feldgrenze mit der Arbeitsbreite in Richtung der Feldmitte verschoben. Die umrundenden Spuren werden später noch einmal nachbearbeitet, jedoch handelt es sich bereits um Teile der Fahrspuren, welche die Wendeflächen bedecken. Abbildung 37 zeigt die erzeugten Fahrspursegmente.

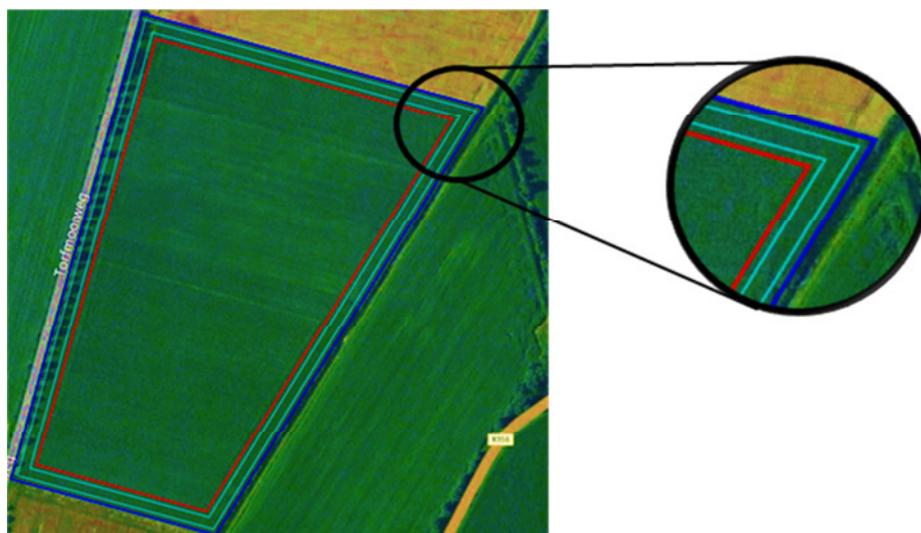


Abbildung 37: Erstellung der umrundenden Vorgewendespuren mit Vergrößerung

Die Vorgewendespuren werden weiter aufgetrennt und umgruppiert, zu sehen in Abbildung 38. Dieser Schritt geschieht erst nach dem Erstellen der Fahrspuren im Feldinneren. Mithilfe der Befahrbarkeitskriterien Krümmung und Krümmungsänderung wird das Polygon in befahrbare Teilsegmente aufgetrennt. Diese neuen Segmente werden auf Schnittpunkte mit

Feldfahrspuren untersucht. Sind keine Schnittpunkte vorhanden, so wird dieses Vorgewendespursegment nicht als Wendefläche angesehen (blau dargestellt in Abbildung 38).

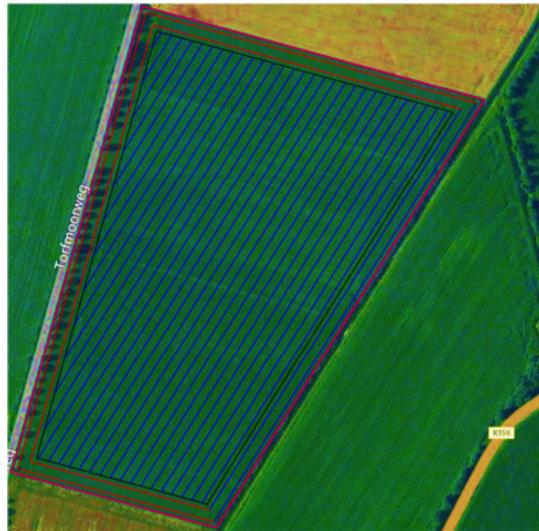


Abbildung 38: Neuberechnung der Vorgewendefahrspuren

### 3.4.1.1 Generierung umrundender Fahrspuren

Da das Wenden von Spur zu Spur eine Wendefläche erfordert, muss für das gesamte Feld eine solche Fläche geschaffen werden, welche - je nach Feldprozess - zu Beginn oder am Ende der Feldoperation bearbeitet wird. Für die Bearbeitung dieser Wendefläche müssen Fahrspuren erzeugt werden, die parallel zur Feldgrenze verlaufen.

Zuerst muss das Grenzpolygon (GP – das zu verschiebene Polygon) gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden. Der erste Punkt wird mit der in Gleichung 6 gezeigten Formel verschoben. Der verschobene Punkt lautet wie folgt:

$$Polygon_{VGW} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} GP(1)_x + Verschiebeweite \cdot \sin(Winkel_{GP(1)-GP(2)}) \\ GP(1)_y - Verschiebeweite \cdot \cos(Winkel_{GP(1)-GP(2)}) \end{pmatrix} \quad [6]$$

Für die Punkte 2 bis n-1 mit n als der Anzahl an Polygonpunkten erhält das neue, verschobene Polygon zwei Punkte pro Grenzpolygonpunkt, die durch die Gleichungen 7 und 8 beschrieben sind.

$$Polygon_{VGW} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} GP(i)_x - Verschiebeweite \cdot \sin(Winkel_{GP(i)-GP(i+1)}) \\ GP(i)_y + Verschiebeweite \cdot \cos(Winkel_{GP(i)-GP(i+1)}) \end{pmatrix} \quad [7]$$

Für den Fall konkaver Kanten im Grenzpolygon zwischen den zwei eingefügten Punkten sind zwei mögliche Überbrückungen für das verschobene Vorgewendepolygon vorgesehen,

dargestellt in Abbildung 39. Eine Möglichkeit stellt das Einfügen eines Kreissegmentes mit dem Radius der Verschiebeweite dar. Der spitze Zusammenschluss zweier Liniensegmente repräsentiert eine zweite Variante.

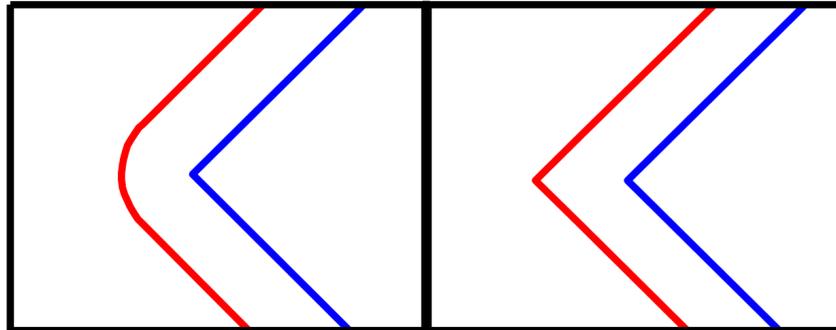


Abbildung 39: Vergleich der konkaven Kantenverschiebung

$$Polygon_{VGW} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} GP(i)_x + Verschiebeweite \cdot \sin(Winkel_{GP(i)-GP(i-1)}) \\ GP(i)_y - Verschiebeweite \cdot \cos(Winkel_{GP(i)-GP(i-1)}) \end{pmatrix} \quad [8]$$

Um das verschobene Polygon abzuschließen, muss der erste Punkt ein zweites Mal verschoben werden.

$$Polygon_{VGW} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} GP(1)_x - Verschiebeweite \cdot \sin(Winkel_{GP(n-1)-GP(1)}) \\ GP(1)_y + Verschiebeweite \cdot \cos(Winkel_{GP(n-1)-GP(1)}) \end{pmatrix} \quad [9]$$

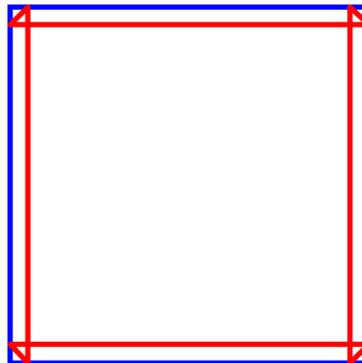


Abbildung 40: Verschobenes Grenzpolygon

Das Grenzpolygon ist in Richtung der Feldmitte verschoben und stellt sich beispielhaft in Abbildung 40 rot dar. Es ist nicht das gewünschte Ergebnis, da die entstandenen Selbstüberschneidungen noch herausgefiltert werden müssen.

Die Selbst-Schnittpunkte werden bestimmt und in das verschobene Polygon aufgenommen. Im Anschluss werden die Abstände zwischen Grenzpolygon und Vorgewendepolygonpunkten bestimmt. Ist der Abstand eines Vorgewendepolygonpunktes kleiner als die gewählte

Verschiebeweite, so wird dieser Punkt gelöscht. Im Anschluss wird mithilfe eines Douglas-Peucker-Filterverfahrens das neue Vorgewendepolygon auf die signifikanten Polygonpunkte reduziert.

### 3.4.2 Generierung der Feldfahrspuren

Neben den umrundenden Fahrspuren für die Wendeflächen müssen Fahrspuren für das innere Feld erzeugt werden. Sie decken den Großteil der Feldfläche ab. Die folgenden Kapitel erklären die verschiedenen Einzelschritte der Spurgenerierung. Die Methoden zeigen die Generierung gerader und konturförmiger Spuren.

#### 3.4.2.1 Berechnung gerader Feldfahrspuren

Innerhalb der Vorgewendelinie werden Fahrspuren mit dem Abstand der Arbeitsbreite zueinander erzeugt. Die in Kapitel 3.3 vorgestellten Methoden werden verwendet, um die Ausrichtung solcher Fahrspuren zu bestimmen. Die Schnittpunkte der inneren Feldumrandung und der Fahrspuren stellen die Start- und Endpunkte dar.

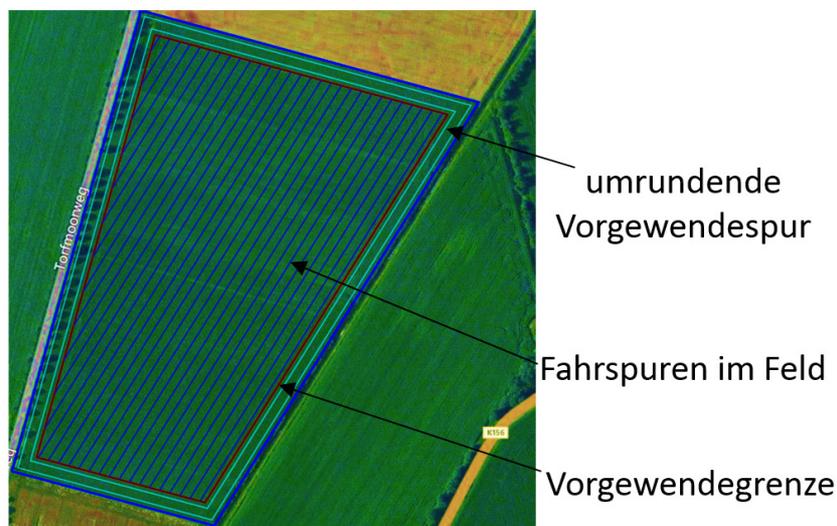


Abbildung 41: Spurgenerierung im inneren Feldpolygon

#### 3.4.2.2 Berechnung konturförmiger Feldfahrspuren

Neben geraden Fahrspuren werden aufgrund der Feldgrenze oder Hangneigung in der Praxis ebenfalls häufig konturförmige Fahrspuren angewandt. Es wird eine Methode gezeigt, die solche Fahrspuren erzeugt. Dabei wird die Feldgrenze auf Krümmungen an den Polygonpunkten untersucht. Überschreitet diese den minimalen Wenderadius der Maschine

(Kehrwert der maximalen Krümmung), so ist dies der Start- oder Endpunkt einer Kontur. Die entstandenen Teile der Feldgrenze werden - wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben - verschoben und gefiltert. Kurven oder konturförmige Fahrspuren verändern durch die Verschiebung ihre Spureigenschaften, sodass jede neue Feldkontur erneut auf maximale Krümmung und Krümmungsänderung untersucht werden muss. Falls nötig, wird die Spur mit dem deBoor-Algorithmus (Michigan Technological University, 2014) zur Kontrollpunktverschiebung geglättet. Abbildung 42 zeigt die geglätteten, konturförmigen Fahrspuren im Feldinneren.

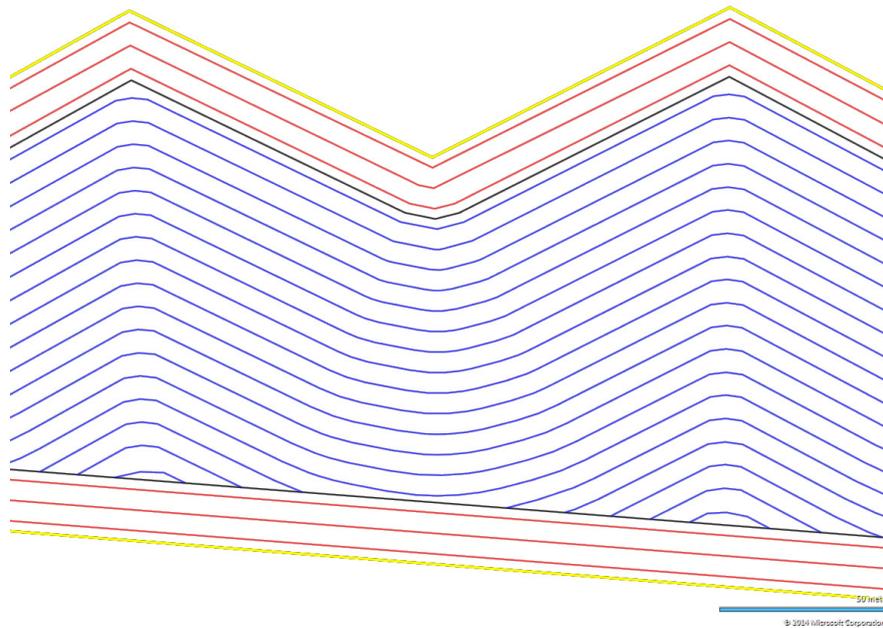


Abbildung 42: Geglättete Fahrspuren im Feldinneren (blaue Polylinien)

### 3.4.2.3 Berechnung exakter Aushebepunkte

Die berechneten Schnittpunkte zwischen Feldfahrspuren und Vorgewendelinie stellen nicht die Punkte dar, an denen die Bearbeitung beendet ist und somit das Anbaugerät ausgehoben werden kann. Dieser Punkt ist erst dann erreicht, wenn über die gesamte Breite des Arbeitsgerätes die innere Vorgewendelinie überfahren worden ist. Dazu werden die bereits berechneten Schnittpunkte zwischen Vorgewendelinie und Feldfahrspuren wieder aufgegriffen. Die in Abbildung 43 rot dargestellten Polygone, die die gemeinsame Fläche von Feldinnerem und Fahrspur abbilden, werden bestimmt. Die sogenannten Aushebepunkte sind die in Fahrspurausrichtung höchsten sowie niedrigsten Punkte der roten Polygone, welche in der folgenden Abbildung durch die roten Punkte dargestellt sind. Das Beispiel zeigt, dass pro Feldgerade mehrere kleine Polygone entstehen können. Dies kann ebenfalls durch den beschriebenen Methodenablauf abgebildet werden.

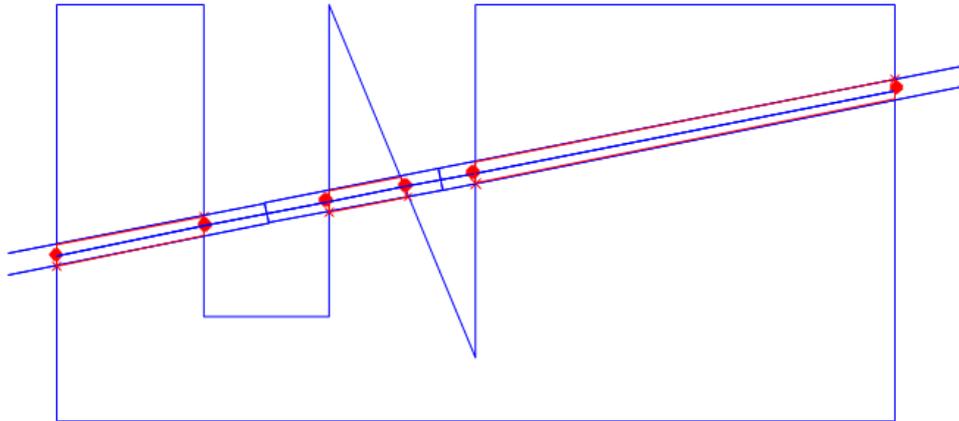


Abbildung 43: Berechnung der Aushebepunkte

### 3.4.3 Hindernisbetrachtung

Hindernisse machen eine Anpassung der Fahrspuren erforderlich. Um das Hindernis werden mit der in Kapitel 3.4.1.1 vorgestellten Verschiebealgorithmik Vorgewendefahrspuren erzeugt. Drei Klassen müssen - wie in Abbildung 44 gezeigt - unterschieden werden. In der ersten Klasse ist das Hindernis im Feld und weist keine Schnittpunkte mit der Feldgrenze auf. Die Schnittpunkte zwischen Hindernis-Vorgewendelinie und den Feldfahrspuren werden gesucht. Sie stellen die neuen Start- und Endpunkte der Fahrspuren dar. Im zweiten Fall soll sichergestellt werden, dass die Hindernisgrenze die Vorgewendefahrspuren des Feldes nicht schneiden. Werden Schnittpunkte erkannt, so wird ein neues inneres Feldpolygon erstellt (in Abbildung 44 (Mitte), grün gestrichelte Linie). Von diesem Feldpolygon ausgehend, werden die Fahrspuren - wie in den Kapiteln 3.4.1 und 3.4.2 beschrieben - erstellt. Gibt es keine Schnittpunkte zwischen Feldgrenze und Hindernis-Vorgewendelinie, jedoch zwischen der Feld-Vorgewendelinie und der Hindernis-Vorgewendelinie, so kann das Hindernis in die dritte Klasse eingeordnet werden. Die Vorgewendefahrspuren des Feldes schneiden dann die Vorgewendelinie des Hindernisses. An diesen Stellen werden die Spuren getrennt und der Teil der Vorgewendefahrspuren des Feldes, der innerhalb der Vorgewendelinie des Hindernisses liegt, gelöscht.

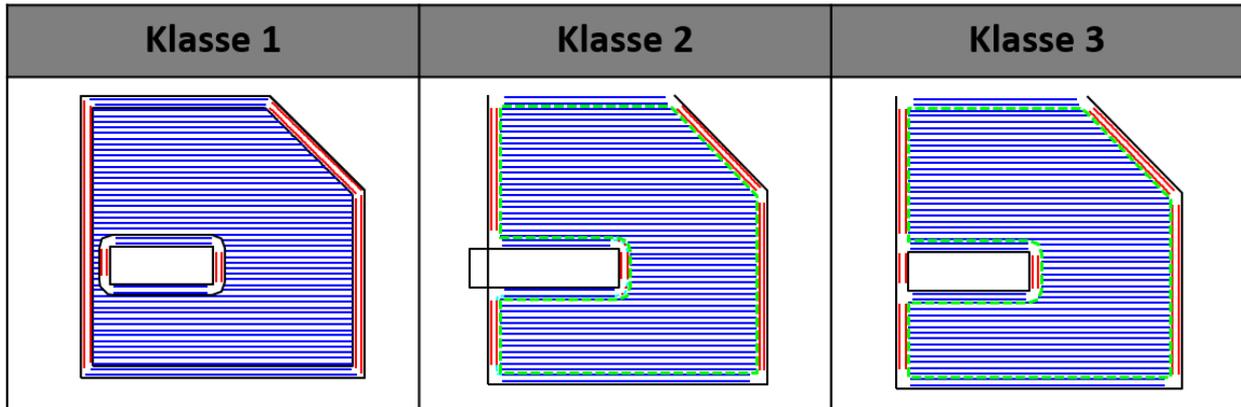


Abbildung 44: Spurmuster mit Hindernis nach Klassifizierung (grün – neue Vorgewendelinie, blau – Fahrspur im Feldinneren, rot – Vorgewendefahrspur)

### 3.5 Strategieberechnung

Nachdem die Fahrspuren flächendeckend für das gesamte Feld erstellt worden sind, wird in diesem Kapitel gezeigt, wie die Spurreihenfolge bestimmt wird. Anhand der Abbildung 45 wird gezeigt, wie die Spurreihenfolge optimiert wird. Es sind diverse Wendemanöver für ein übliches landwirtschaftliches Fahrzeug dargestellt. Es wird deutlich, dass für das gewählte Fahrzeug mit landwirtschaftlich üblichen Parametern beim Wenden in eine benachbarte Spur eine Omega-Wende nötig ist. Beim Wenden mit Überspringen zweier Spuren hingegen kann das Fahrzeug mit einer direkten Wende – U-Turn genannt - die neue Spur erreichen. Die Wendeweglänge unterscheidet sich in dem angegebenen Beispiel um knapp 23 Meter. Es wäre für das gezeigte Beispiel also eine Fahrstrategie optimal, die durchgängig eine Spurreihenfolge mit zweifachem Spurüberspringen ermöglicht.

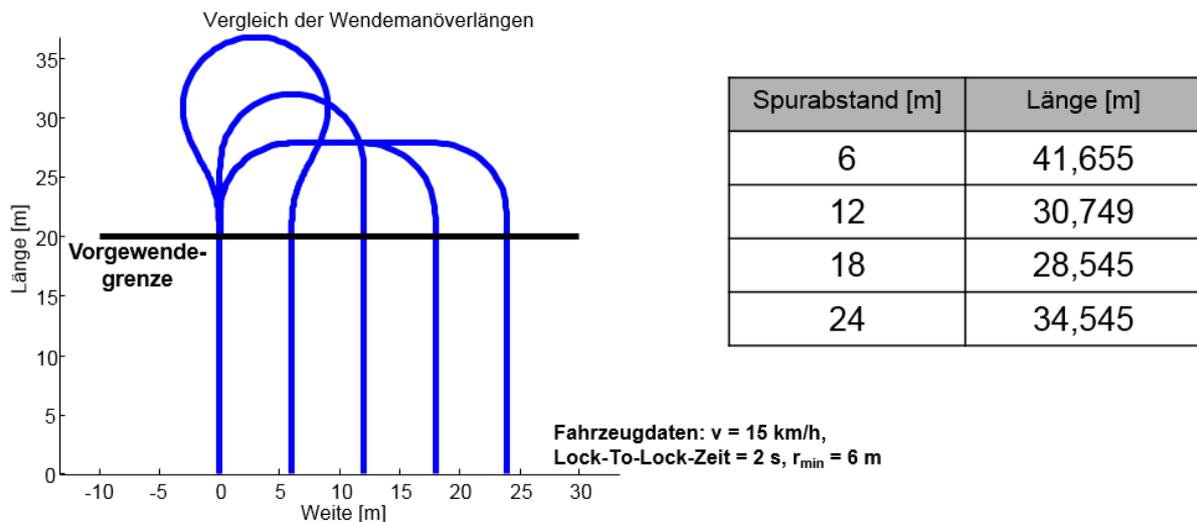


Abbildung 45: Weglängen verschiedener Wendemanöver

Um die Rechenzeit gering zu halten, soll jedes Teilfeld separat betrachtet und jedem Teilfeld eine optimale Reihenfolge der Fahrspuren zugeordnet werden. Deshalb soll vorher die Reihenfolge der Teilfelder so bestimmt werden, dass die unproduktiven Fahrwege möglichst kurz ausfallen und die bearbeitete Fläche nicht überfahren werden muss.

### 3.5.1 Berechnung der Teilfeldreihenfolge

Vor der teilautonomen Navigation auf dem Feld muss eine Reihenfolge der Teilfelder berechnet werden. Dabei muss je nach Anwendung sichergestellt werden, dass die Pflanzen durch die Feldfahrt nicht beschädigt werden. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei der Ernte nicht durch den Bestand gefahren wird und bei der Saat bereits gesäte Flächen nicht nachträglich überfahren werden.

Ein komplexes Beispiel eines unterteilten Feldes ist in Abbildung 46 zu sehen. Um eine Teilfeldreihenfolge automatisch zu erkennen, wird vom Startpunkt ausgehend die Gesamtfeldgrenze im Uhrzeigersinn untersucht und die Teilfeldwechsel auf dem Grenzpolygon werden abgespeichert. Dabei wird für jedes Grenzsegment das dazugehörige Teilfeld ermittelt. Für das Beispiel in Abbildung 46 wird die folgende Reihenfolge ermittelt: 5-4-5-3-2-1-2-3-5.

Die umschlossenen Teilfelder sind der Beginn der Bearbeitungsketten, von hier an werden die gespeicherten Reihenfolgen in Teile aufgetrennt (3-2-1-2-3 → 3-2-1). Der Startpunkt ist in Teilfeld 5, hier muss die Feldbearbeitung für die Saat enden. Mit den gegebenen Bedingungen wird die Reihenfolge 1-2-3-4-5 ermittelt. Im Falle eines Ernteprozesses muss abschließend noch einmal die Reihenfolge gedreht werden.

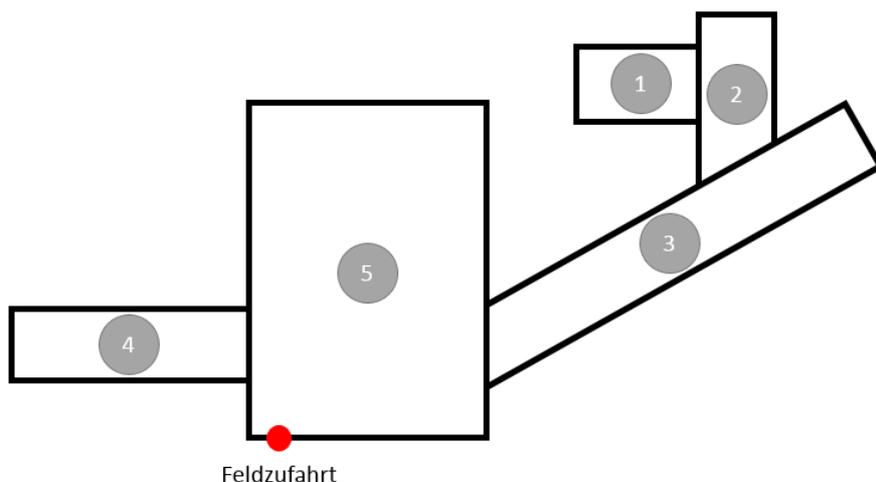


Abbildung 46: Komplexes Beispiel einer Teilfeldreihenfolge bei Säprozessen

### 3.5.2 Fahrstrategieberechnung

Das Problem, die optimale Spurreihenfolge zu berechnen, kann als Traveling Salesman Problem (TSP) modelliert werden. Bei diesem kombinatorischen Optimierungsproblem besteht die Aufgabe darin, den Besuch mehrerer Städte so zu organisieren, dass die Gesamtweglänge minimal ist. Typischerweise wird ein Traveling Salesman Problem mithilfe eines zweigeteilten Verfahrens gelöst (Churchman & R., 1957). Zuerst erstellt ein Eröffnungsverfahren eine Initialtour, diese wird im Anschluss durch ein zweites Verfahren optimiert (Verbesserungsverfahren).

Die Tabelle 1 zeigt das gewählte Verfahren (rot unterlegt) im Vergleich zu anderen möglichen Varianten (Reinelt, 1994). In 24 TSP-Formulierungen mit einer variierenden Knotenanzahl von  $n = 198 - 5934$  wurden die experimentell ermittelten Abweichungen zum Optimum berechnet.

Tabelle 1: Vergleich diverser Optimierungsalgorithmen (Reinelt, 1994)

| Heuristik                      | Zeit               | Abweichung zu Optimum |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>Nearest Neighbor (NN)</b>   | $O(n^2)$           | 26,27 %               |
| <b>Nearest Insertion (NI)</b>  | $O(n^2)$           | 20,98 %               |
| <b>Farthest Insertion (FI)</b> | $O(n^2)$           | 13,99 %               |
| <b>Greedy</b>                  | $O(n^2 + \log(n))$ | 11,96 %               |
| <b>Node Exchange</b>           | $O(n^2)$           | >100 %                |
| <b>NN &amp; 2-opt</b>          | $O(n^2)$           | 5,8 %                 |
| <b>NN &amp; 3-opt</b>          | $O(n^3)$           | 5 %                   |

Für das Problem der landwirtschaftlichen Routenplanung verspricht die Kombination aus NN- & 2-opt-Heuristik gute Ergebnisse in angemessener Rechenzeit. Wie für Optimierungsalgorithmen üblich, werden zuerst alle Möglichkeiten ermittelt. Eine Matrix mit den Wendeweglängen zwischen allen Fahrspuren wird erstellt. Um diese abschätzen zu können, müssen die Arbeitsbreite, der minimale Wenderadius sowie die Start- und Endpunkte der Fahrspuren bekannt sein. Der nächste Schritt besteht aus der Berechnung einer initialen Spurreihenfolge, das Nearest-Neighbor-Verfahren wird angewandt. Im Anschluss wird die initial berechnete Reihenfolge mit einem 2-opt-Verfahren verfeinert. Abbildung 47 zeigt die drei Module detailliert. Sie werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert vorgestellt.

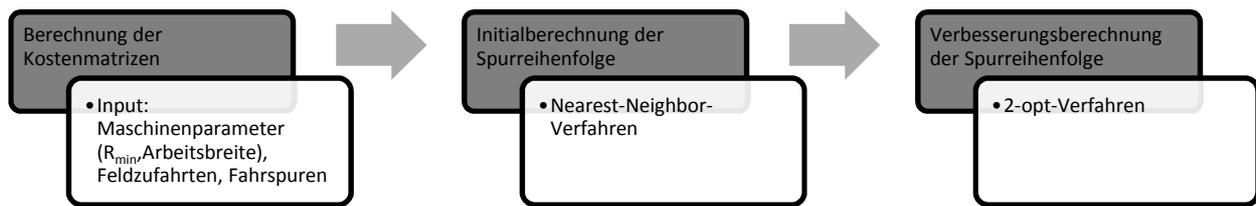


Abbildung 47: Modulaufbau der nicht-kapazitiven Fahrstrategieberechnung

### **Modellbildung und Kostenberechnung**

Um eine Fahrstrategie zu optimieren, muss das zu optimierende Kriterium bestimmt werden. Wie auch schon in den vorherigen Kapiteln soll die Arbeitszeit minimiert werden. Die vorgeplanten Fahrspuren müssen komplett abgefahren werden, weshalb ausschließlich die Wendezeit minimiert werden kann. Da die Wendewege überwiegend mit derselben Geschwindigkeit befahren werden, gibt die Wendeweglänge Aufschluss über die gefahrene Wendezeit. Um den Rechenaufwand minimal zu halten und eine Reihenfolgen-Neuberechnung in kurzer Zeit gewährleisten zu können, sollen die Wendeweglängen abgeschätzt und in einer Adjazenzmatrix abgelegt werden. Die möglichen Wendungen zwischen den Fahrspuren werden in eine Graphenmodellierung überführt. Dabei beschreibt jede Fahrspur einen Knoten, jede Wende stellt die Kante zwischen zwei Fahrspuren dar. Mit einem Laufparameter wird überprüft, in welchem Vorgewende das Fahrzeug wenden wird. Es wird der dem Vorgewende zugeordnete Graph verwendet, um die optimale Sequenz zu bestimmen. Abbildung 48 zeigt ein Beispielfeld mit vier Fahrspuren. Die Spuren sind zwei Vorgewenden zugeordnet (dargestellt als VGW 1 und VGW 2). Die Fahrspur 4 ist kürzer und verursacht somit verlängerte Wendewege, welche in der entsprechenden Adjazenzmatrix berücksichtigt werden (Abbildung 48, rot).

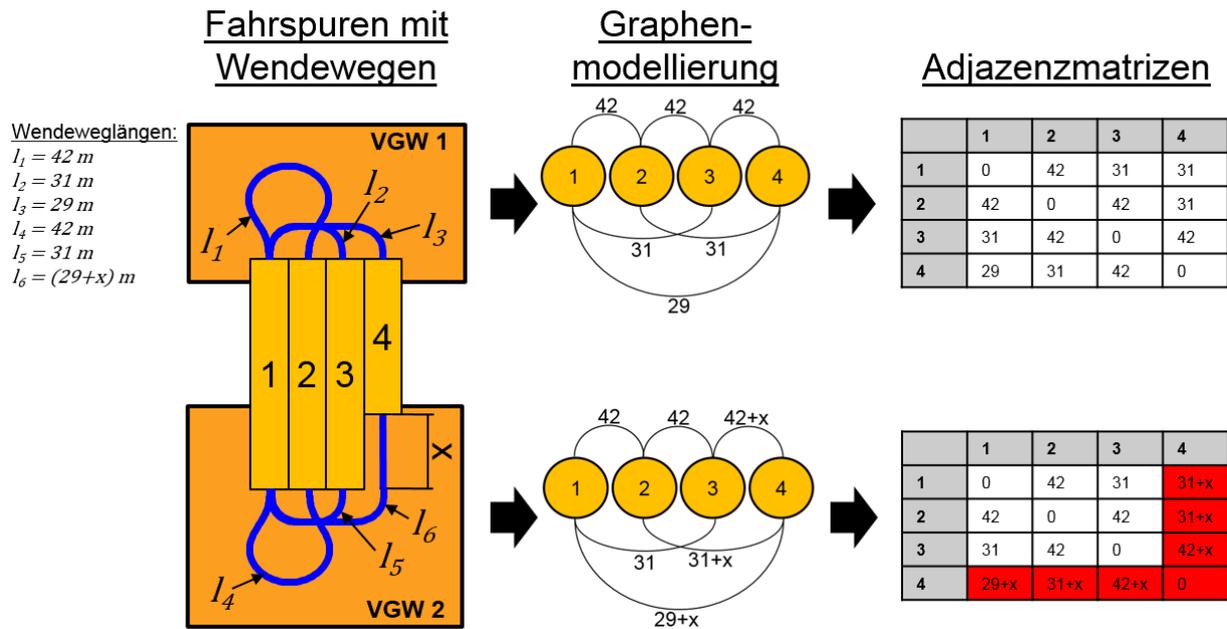


Abbildung 48: Graphenmodellierung

Für das aufgestellte Graphenmodell müssen als Einträge der Adjazenzmatrix die Wendeweglängen zwischen allen Fahrspuren bestimmt werden. Sie wurden in Abbildung 48 beispielhaft gezeigt und sollen im Folgenden detaillierter erklärt werden. Abbildung 49 zeigt die Approximation der Wendewegberechnung. Es werden konturförmige Pfade über die Start- und Endpunkte der Fahrspuren geplant. Wird beispielsweise der Abstand zwischen Fahrspur 2 und 4 gesucht, so werden der Abstände zwischen Fahrspur 2 und 3 sowie zwischen Fahrspur 3 und 4 berechnet und addiert. Durch die in Abbildung 49 dargestellte Strecke soll der Wendeweg so approximiert werden, dass ohne Überfahren der Feldgrenze gewendet würde. Auch der Einfluss des Wendetyps soll berücksichtigt werden. Bei einem Abstand  $d < 2 \cdot \frac{\text{Wenderadius}}{\text{Arbeitsbreite}}$  ist eine direkte Wende in einem Zug - auch U-Turn genannt - nicht möglich. Es ist eine Omega-Wende zu planen. Die Weglänge der Omega-Wende ist deutlich länger als die der direkten Wende, sodass sie vermieden werden sollte. Um die Wendeweglängen adäquat darzustellen, muss somit wie folgt unterschieden werden. Ist der Abstand  $d < 2 \cdot \frac{\text{Wenderadius}}{\text{Arbeitsbreite}}$ , so wird der Abstand mit dem Faktor 1,5 multipliziert. Dieser Faktor stellt eine gute Näherung von Omega-Wende zu euklidischem Abstand dar. Ist der Abstand  $d \geq 2 \cdot \frac{\text{Wenderadius}}{\text{Arbeitsbreite}}$ , so wird eine zusätzliche Weglänge von  $l_{\text{zusatz}} = 2\pi \cdot R_{\text{min}} - 2 \cdot R_{\text{min}}$  hinzuaddiert. Somit entspricht die Wendeweglänge annähernd einer direkten Wende.

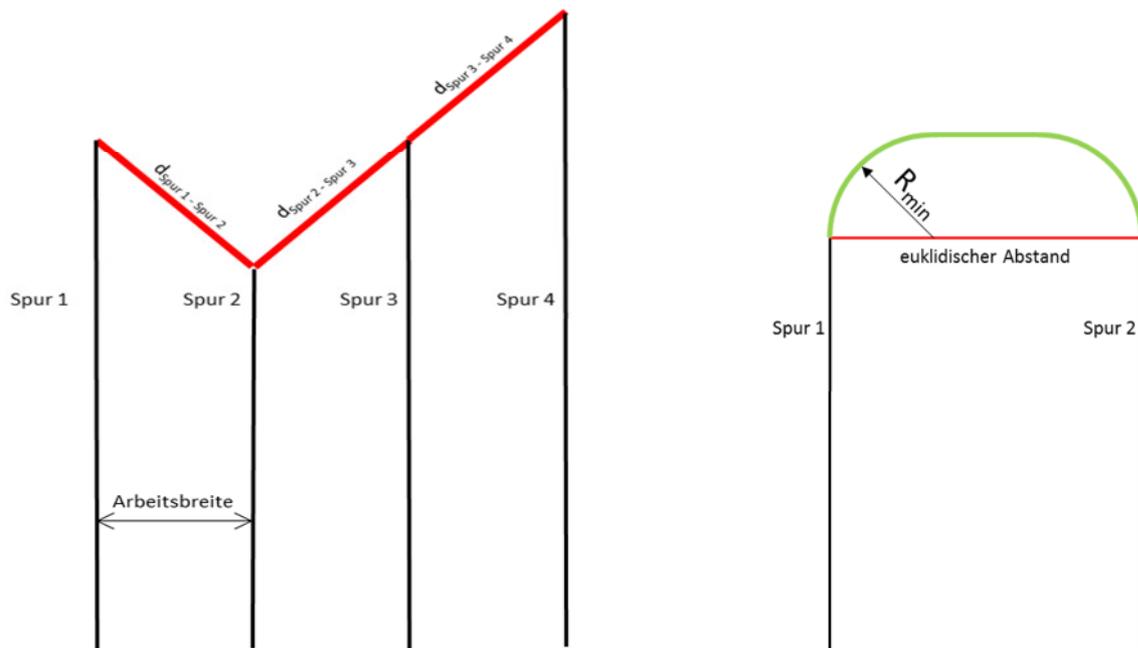


Abbildung 49: Abschätzung der Wendeweglängen

➤ **Initialverfahren Nearest-Neighbor**

Nachdem alle Wendeweglängen in einer Matrix abgelegt worden sind, wird eine erste Spurreihenfolge für das untersuchte Feld gesucht. Das Nearest-Neighbor Verfahren fügt ausgehend von einem Startknoten sukzessive den nächstgelegenen unbesuchten Knoten zu der Tour hinzu, bis alle Knoten besucht worden sind. In Abbildung 50 ist beispielhaft das Nearest-Neighbour-Verfahren in vier Schritten dargestellt.

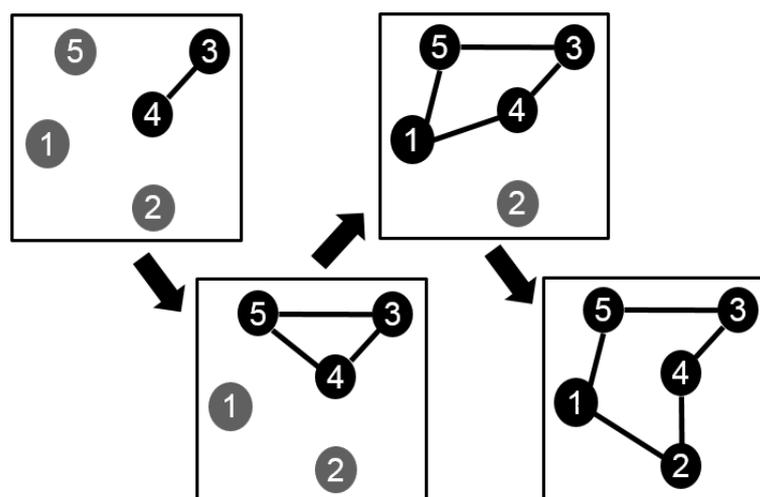


Abbildung 50: Darstellung des Nearest Neighbor Verfahren

### ➤ Verbesserungsverfahren 2-opt-Verfahren

Die initial geplante Route wird nun weiter verfeinert. Zu einer gegebenen Rundreise überprüft das 2-opt Verfahren systematisch alle Tauschmöglichkeiten jeweils zweier Kanten und zweier neuer Kanten. Die Kantenreihenfolge zwischen den alten Kanten wird dabei umgekehrt. In Abbildung 51 wird die linke Route verbessert, indem die Kanten  $d(1,2)$  und  $d(5,6)$  gelöscht und durch die Kanten  $d(1,5)$  und  $d(2,6)$  ersetzt werden.

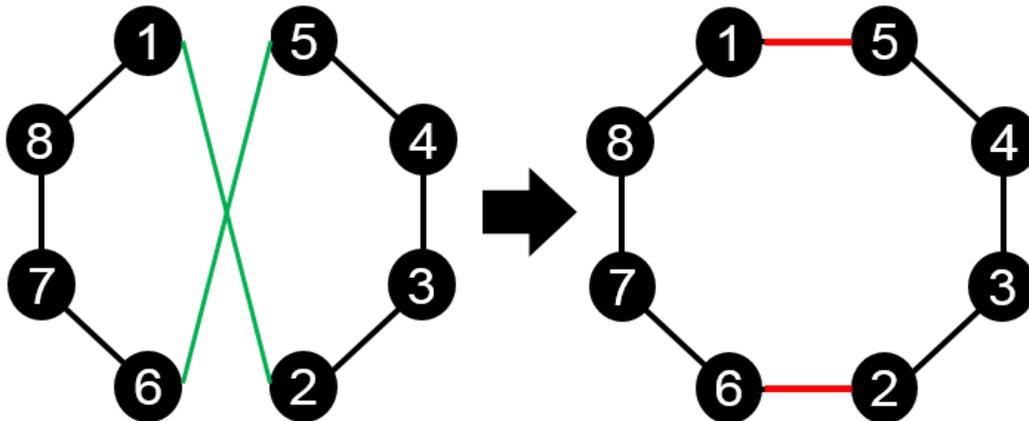


Abbildung 51: Beispiel 2-opt Vertauschung (Merz, 2008)

### 3.6 Pfadplanung

Das Planen befahrbarer Pfade ist eine relevante Aufgabe der mobilen Robotik. Damit automatische Lenksysteme eine Trajektorie abfahren können, muss ein möglichst realistischer Fahrweg abgeschätzt werden. Diese Fahrwege gehorchen im Wesentlichen drei Kriterien, die in Abbildung 53 dargestellt sind und vor der Planung bekannt sein müssen. Der minimale Wenderadius  $\frac{1}{\kappa}$  kann mit maximalem Lenkeinschlag und dem Radstand vom Lenksystem automatisch berechnet werden. Weiter ist die maximale Quereschleunigung  $a_{y,max}$  in Abbildung 52 (Mitte) dargestellt. Mit ihr wird der maximale Lenkeinschlag  $\frac{d\delta}{dt}$  durch die Geschwindigkeit eingeschränkt, sodass das Fahrverhalten stabil bleibt und das Fahrzeug weder unter- noch übersteuert. Die dritte einschränkende Größe ist die Lenkgeschwindigkeit, also in welcher Zeit die Aktuatorik von maximalem Links- zu maximalem Rechtseinschlag wechselt.

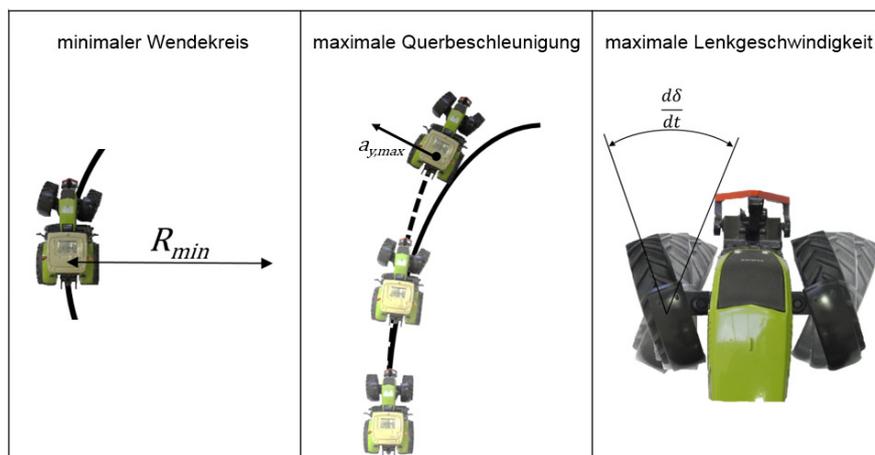


Abbildung 52: Anforderungen an eine geplante Fahrspur: Beachtung des minimalen Wenderadius, der maximalen Querbeschleunigung und der maximalen Lenkgeschwindigkeit

Das bekannte Verfahren der Continuous-Curvature Pfadplanung (CC-Pfadplanung) - 2004 von Fraichard und Scheuer (2004) vorgestellt – wird verwendet und für die landwirtschaftliche Anwendung genutzt. Es verspricht die Berücksichtigung der vorgestellten fahrzeugkinematischen Restriktionen. Aufgeteilt wird es in die Elemente CC-Kreis und CC-Pfad. CC-Kreise stellen das Grundelement dieser CC-Pfadplanung dar, die deshalb einleitend näher beschrieben werden. Es wird auch gezeigt, wie die Kalibrierwerte eines automatischen Lenksystems als Planungsgrößen herangezogen werden.

Vor allem für das Planen landwirtschaftlicher Wendemanöver wird das vorgestellte Verfahren in angepasster Form angewandt. Es werden verschiedene CC-Pfade vorgestellt. Durch die vorgestellten Pfade kann entweder die kürzeste Wende gefunden werden oder eine Wende so geplant werden, dass die benötigte Vorgewendebreite minimiert wird.

Die CC-Pfadplanung wird auch dafür verwendet, um einen Pfad von der Feldzufahrt zu einer Fahrspur zu finden. Dies wird in Kapitel 3.6.3 thematisiert.

### 3.6.1 CC-Kreise

Um einen Wendeweg zu generieren, muss zuerst das Grundelement solcher Pfade erklärt werden. Die in Kapitel 3.6.3 vorgestellten Wendewege bilden die Komposition dieses Grundelementes CC-Kreis.

In den meisten Fällen besteht ein CC-Kreis aus drei Teilen. Das einleitende Segment ist eine Klothoide mit maximaler Krümmungsänderung  $\sigma = +\sigma_{max}$ . Während dieses ersten Segments steigt die Krümmung von  $\kappa = 0$  auf  $\kappa = \kappa_{max}$ . Das zweite Segment ist ein Kreissegment mit der

Krümmung  $\kappa = \kappa_{max}$ . Abgeschlossen wird der CC-Kreis durch ein Klothoidensegment, welches die gegensätzlichen Eigenschaften zum einleitenden Segment hat. Die Krümmung sinkt von  $\kappa = \kappa_{max}$  auf  $\kappa = 0$  mit der minimalen Krümmungsänderung  $\sigma = -\sigma_{max}$ . Für zwei beispielhafte Pfade sind in Abbildung 53 die Krümmungsverläufe aufgeführt. Der Unterschied eines Pfades mit und eines Pfades ohne Klothoidenübergänge ist aufgezeigt.

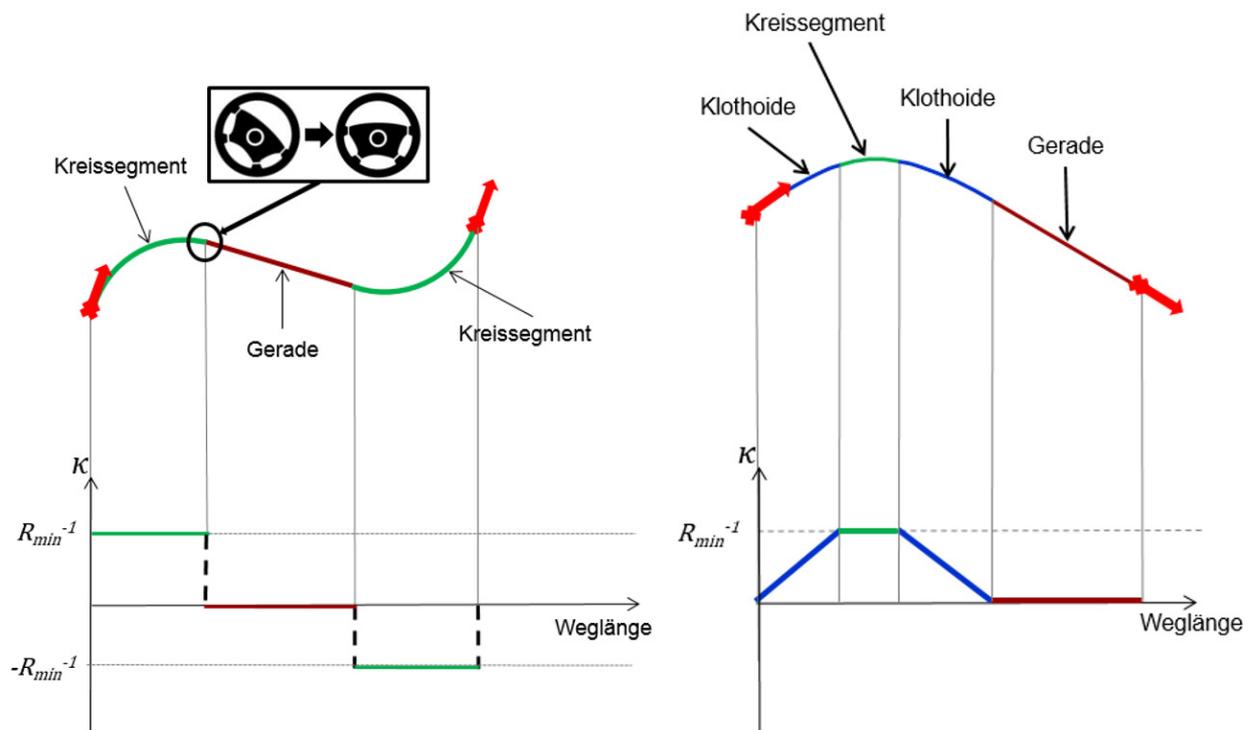


Abbildung 53: Darstellung der Krümmungsverläufe; links – Dubinskurve, rechts – CC-Pfad

Das charakteristische Merkmal einer Klothoide ist die lineare Krümmungsänderung, die die Krümmung proportional zu der Klothoidenlänge ändert. Kimia et al. (2003) beschreiben die Klothoidenpfadpunkte mithilfe der Fresnel-Integrale  $C_f$  und  $S_f$ . Der Kreismittelpunkt  $\Omega$  für die CC-Wende kann, ausgehend von den Fresnel-Integralen der einleitenden, am Startpunkt anliegenden Klothoide, bestimmt werden. Scheuer und Fraichard (1997) haben die Formeln mit dem Laufparameter  $p$  [ $0, p_{max} = \frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}}$ ] und den Basisklothoidenparametern  $x, y$  wie folgt beschrieben:

$$\Omega_x = x_{Klothoide} \left( \frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}} \right) - \kappa_{max}^{-1} \cdot \sin(\theta) \quad [10]$$

$$\Omega_y = y_{Klothoide} \left( \frac{\kappa_{max}^2}{\pi\sigma_{max}} \right) + \kappa_{max}^{-1} \cdot \cos(\theta) \quad [11]$$

Im Folgenden wird der generelle Fall einer CC-Wende aufgeführt. Der Radius  $R_{big}$  ist nach Fraichard und Scheuer (2004) definiert als der Abstand zwischen Kreismittel- und Startpunkt. Formel 12 zeigt den Zusammenhang.

$$R_{big} = \sqrt{(\Omega_x - y_{Klothoide}(0))^2 + (\Omega_y - y_{Klothoide}(0))^2} \quad [12]$$

Abbildung 54 zeigt die Konstruktionselemente eines CC-Kreises; es werden ebenfalls die Winkel  $\mu$  und der dazugehörige Gegenwinkel  $\delta$  gezeigt. Sie können wie folgt berechnet werden.

$$\mu = \pi - \delta = \text{atan}\left(\frac{\Omega_x - y_{Klothoide}(0)}{\Omega_y - y_{Klothoide}(0)}\right) \quad [13]$$

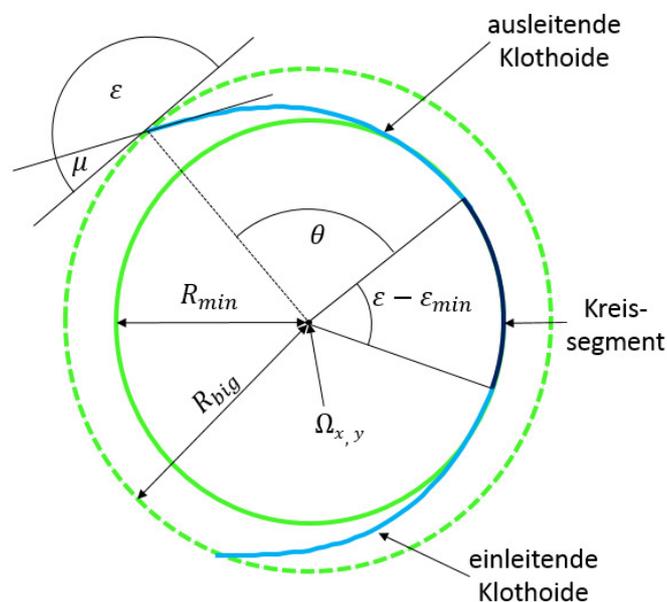


Abbildung 54: Genereller Fall einer CC-Wende

Der Winkel  $\delta$  gibt den Unterschied zwischen Start- und Endausrichtung an. Der minimale Winkelunterschied ist definiert als  $\delta_{min} = \kappa_{max}^2 \cdot \sigma_{max}^{-1}$ . Im Falle kleinerer Winkelunterschiede ( $|\delta| \leq \delta_{min}$ ) müsste so eine komplette Kreisumrundung geplant werden laut Fraichard und Scheuer (2004). Um diesen Pfad zu verhindern, haben sie einen Elementarpfad vorgestellt. Dieser Elementarpfad hat eine Krümmungsänderung  $\sigma \leq \sigma_{max}$ . Die geforderte Krümmungsänderung kann angegeben werden mit:

$$\sigma = \frac{\pi(\cos(\frac{\delta}{2})C_f(\sqrt{\frac{\delta}{\pi}}) + \sin(\frac{\delta}{2})S_f(\sqrt{\frac{\delta}{\pi}}))^2}{r^2 \sin^2(\frac{\delta}{2} + \mu)} \quad [14]$$

Damit können zwei achssymmetrische Klothoidenteile berechnet und zusammengesetzt werden.

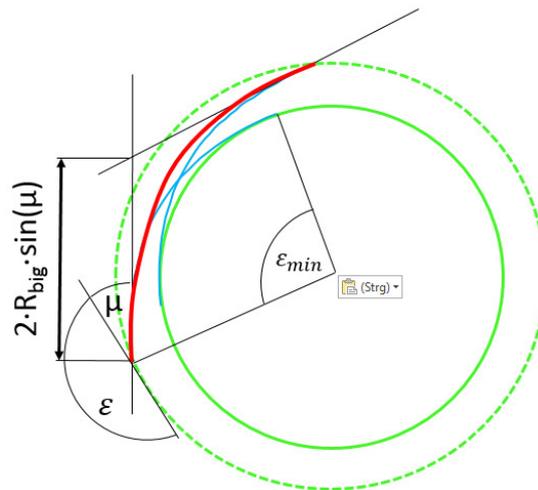


Abbildung 55: CC-Wende für den Winkelunterschied  $0 < \delta < \delta_{min}$

Um diese Idee der CC-Pfadplanung auf die Spurplanung von landwirtschaftlichen Maschinen zu übertragen, soll die folgende Formel eine Verbindung herstellen.

$$l_{Klothoide} = \frac{t_{Lenk}}{2} \cdot v \quad [15]$$

Die Klothoidenlänge kann als Produkt der Fahrgeschwindigkeit und der halben Lenkzeit von maximalem Rechts- zu maximalem Linkseinschlag beschrieben werden. Diese Werte sind heutigen Lenksystemen bekannt und können während der Fahrt ermittelt werden.

### 3.6.2 Wendewegplanung mithilfe von CC-Pfaden

Mithilfe von CC-Kreisen können für Landmaschinen abfahrbare Pfade generiert werden, welche durch einen minimalen Wenderadius und eine maximale Krümmungsänderung limitiert sind. Die beispielhaft aufgezeigten Wendemanöver sind für die Spurabstände  $d$  zulässig, die in den Überschriften durch die Wertebereiche angegeben werden.

#### 1. Omega-Wende ( $0 < d < 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu)$ )

Das erste vorgestellte Manöver ist die Omega-Wende, die dem griechischen Buchstaben Omega ähnelt und daher ihren Namen hat. Diese Wende ist üblich für kleine Arbeitsbreiten mit dem Anwenderwunsch, in eine benachbarte, parallele Spur zu wenden. Bildlich handelt es sich um eine links-rechts-links oder rechts-links-rechts Lenkkombination. Dieser CC-Pfad ist in Abbildung 56 dargestellt und kann durch drei CC-Kreise zusammengestellt werden. Wenn der

Abstand  $d$  zwischen Start- und Endpunkt größer als  $d \geq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu)$  ist, kann die Position des oberen, mittleren Kreises nicht geplant werden und die Omega-Wende ist nicht anwendbar. Alle weiteren geometrischen Zusammenhänge, die zur Planung nötig sind, werden in Abbildung 56 aufgeführt.

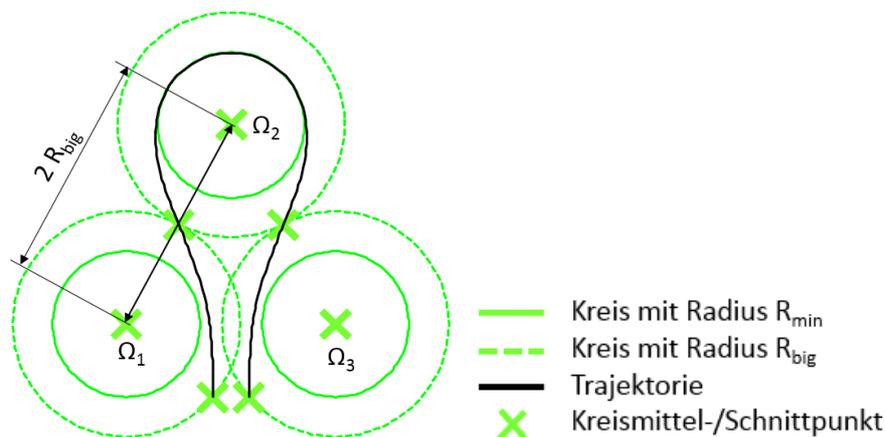


Abbildung 56: Konstruktion einer Omega-Wende

**2. Gap-Wende**  $(2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \leq d \leq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2})$

Ist der Abstand  $d$  zwischen Start- und Endpunkt  $2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \leq d \leq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$ , so ist die Omega-Wende nicht planbar. Der U-Turn ist ebenfalls noch nicht planbar, sodass eine Übergangslösung gefunden werden muss. Die sogenannte Gap-Wende wird geplant. Eine Rechts- bzw. Linkskurve mit drei CC-Kreisen wird geplant. Dabei ist der mittlere CC-Kreis mit einem Abstand  $x_{min}$  so geplant, dass frühestmöglich aus dem einleitenden CC-Kreis ohne Selbstumrundung herausgefahren und in den abschließenden CC-Kreis hineingefahren werden kann.

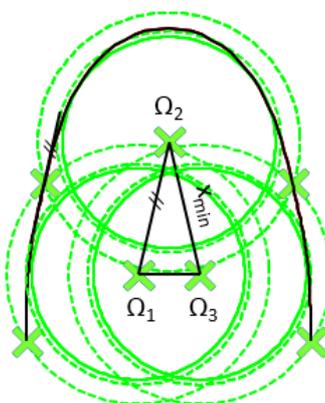


Abbildung 57: Konstruktion eines Gap-Wendemanövers

### 3. Direkte Wende $d \geq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$

Für alle Wendemanöver mit einem Spurbabstand  $d$  von  $d \geq 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$  ist eine direkte Wende (auch U-Turn genannt) zu planen. Dieser Wendetyp besteht aus einem einleitenden CC-Kreis, einem Geradensegment und einem abschließenden CC-Kreis. Die Länge des Geradensegments kann als  $l_{segment} = -\Omega_{x,start} - R_{big} \cdot \sin(\mu) + \Omega_{x,end} - R_{big} \cdot \sin(\mu)$  berechnet werden. Abbildung 58 zeigt die geometrischen Zusammenhänge, die für die Pfadplanung nötig sind.

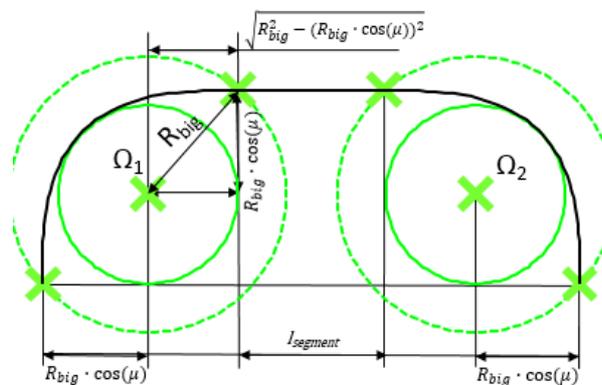


Abbildung 58: Konstruktion eines U-Turns

Nun soll noch eine Wendemöglichkeit aufgezeigt werden, die die Vorgewendebreite minimiert.

### 4. Vorgewende-minimierende Wende

Für einen Spurbabstand  $d$  von  $0 < d < 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$  ist eine weitere Wendeooption möglich, welche nicht die Minimierung der Wendeweglänge, sondern die Minimierung der Vorgewendebreite zum Ziel hat. Das Manöver ist in Abbildung 59 gezeigt. Bildlich gesprochen handelt es sich um eine links-rechts-gerade-rechts-Lenkombination. Der Abstand zwischen dem zweiten CC-Kreismittelpunkt  $\Omega_2$  und der Vorgewendegrenze entspricht  $d = R_{big}$ . Dieses Wendemanöver wird - trotz der verlängerten Gesamtweglänge - häufig von Mähreschern verwendet, da ihr Wendekreis sehr groß und die Lenkzeit sehr lang ist. Dies verursacht eine hohe Vorgewendebreite.

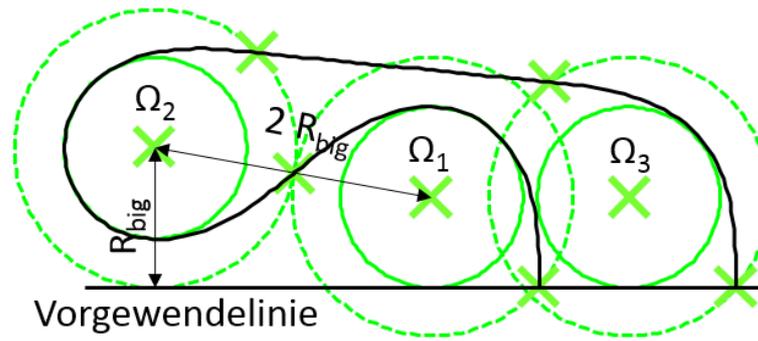


Abbildung 59: Konstruktion eines VGW-minimierenden Wendemanövers

Wegen der Vielzahl weiterer planbarer Manöver wird auf die Arbeiten von Sabelhaus et al. (2014) und Sabelhaus et al. (2013) verwiesen. Hier werden weitere Wendemanöver vorgestellt.

### 3.6.3 Sonderwegplanung mithilfe von CC-Pfaden

Da in vielen Situationen der Routenplanung Fahrwege benötigt werden, die das Fahrzeug von der aktuellen Position auf eine Fahrspur bringen, soll eine solche Funktion umgesetzt werden. Es werden die vier Lenkmöglichkeiten links-gerade-links, rechts-gerade-rechts, links-gerade-rechts, rechts-gerade-links für jeden Fall berechnet und immer der kürzeste Pfad ausgewählt. Der algorithmische Ablauf soll exemplarisch an der rechts-gerade-links-Lenkombination gezeigt werden, da dieser für alle Lenkmöglichkeiten ähnlich aufgebaut ist. Zuerst wird der CC-Kreis an der aktuellen Position bestimmt. Danach wird der Abstand  $d$  zwischen der Sollspur und dem Kreismittelpunkt berechnet. Ist der Abstand  $d \leq R_{big} \cdot \cos(\mu)$ , so berechnet sich der Kreismittelpunkt des zweiten Kreises zu:

$$\Omega_2 = \begin{pmatrix} \Omega_{1x} + 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \cdot \cos(\text{Ausrichtung}_{Linie}) - (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(\text{Ausrichtung}_{Linie}) \\ \Omega_{1x} + 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \cdot \cos(\text{Ausrichtung}_{Linie}) + (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(\text{Ausrichtung}_{Linie}) \end{pmatrix}. \quad [16]$$

Ist der Abstand  $d > R_{big} \cdot \cos(\mu)$ , so berechnet sich der Kreismittelpunkt des zweiten Kreises nach Gleichung 17.

$$\Omega_2 = \begin{pmatrix} \Omega_{1x} - 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \cdot \cos(\text{Ausrichtung}_{Linie}) - (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(\text{Ausrichtung}_{Linie}) \\ \Omega_{1x} - 2 \cdot R_{big} \cdot \cos(\mu) \cdot \cos(\text{Ausrichtung}_{Linie}) + (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(\text{Ausrichtung}_{Linie}) \end{pmatrix}. \quad [17].$$

Diese beiden ersten Fälle berechnen alle Pfade links sowie rechts der Geraden mit dem Mindestabstand  $R_{big} \cdot \cos(\mu)$  zur Zielspur. Ist der Abstand kleiner, so wird kein Geradensegment zwischen die beiden CC-Kreise eingefügt und der dritte Fall tritt ein. Abbildung 60 zeigt zwei beispielhaft geplante Pfade.

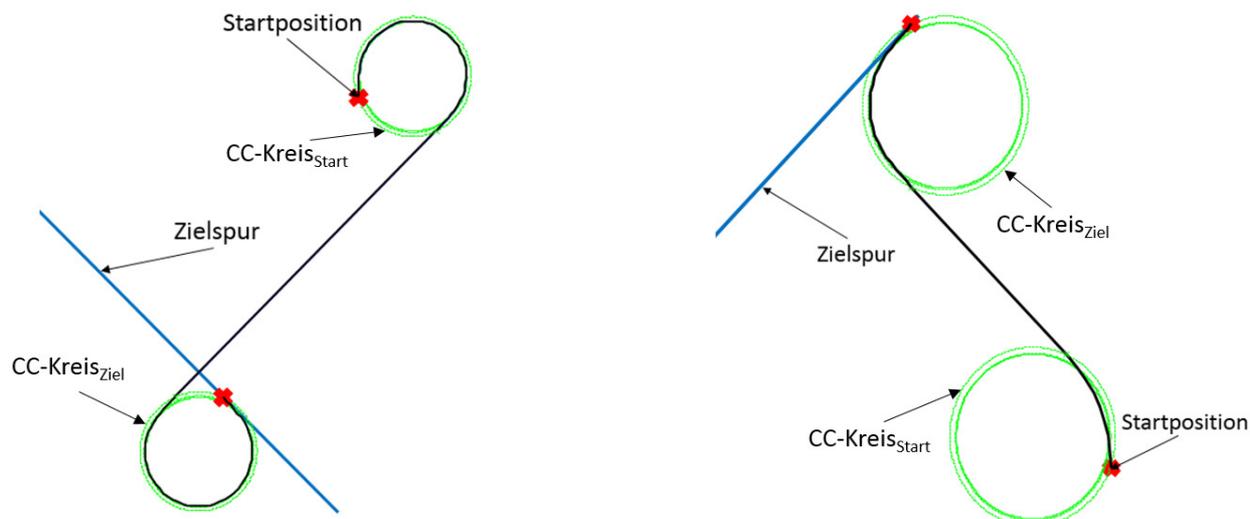


Abbildung 60: Darstellung der Pfade mit CC-Kreismittelpunktabstand  $d > R_{big} \cdot \cos(\mu)$

Des Weiteren muss noch überprüft werden, ob die beiden CC-Kreise sich schneiden, also  $d_2 \leq R_{big} \cdot \cos(\mu)$  mit  $d_2$  als Abstand zwischen den CC-Kreismittelpunkten. Ist dies der Fall, so muss der endende CC-Kreis dahingehend verschoben werden, dass er sowohl die Linie als auch den ersten Kreis tangiert. Dies bedeutet, dass der Mittelpunkt des zweiten Ziel-CC-Kreises wie folgt zu berechnen ist:

$$\Omega_2 = \begin{pmatrix} \Omega_{1x} + \sqrt{4 \cdot R_{big}^2 - (d + R_{big} \cdot \cos(\mu))^2 \cdot \cos(Ausrichtung_{Linie})} - (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(Ausrichtung_{Linie}) \\ \Omega_{1x} + \sqrt{4 \cdot R_{big}^2 - (d + R_{big} \cdot \cos(\mu))^2 \cdot \cos(Ausrichtung_{Linie})} + (d + R_{big} \cdot \cos(\mu)) \cdot \sin(Ausrichtung_{Linie}) \end{pmatrix} \quad [18]$$

Dieser Fall ist in Abbildung 61 zu sehen. Der zweite Ziel-CC-Kreis ist so an den ersten Kreis gelegt, dass er sowohl diesen als auch die Zielfahrspur tangiert.

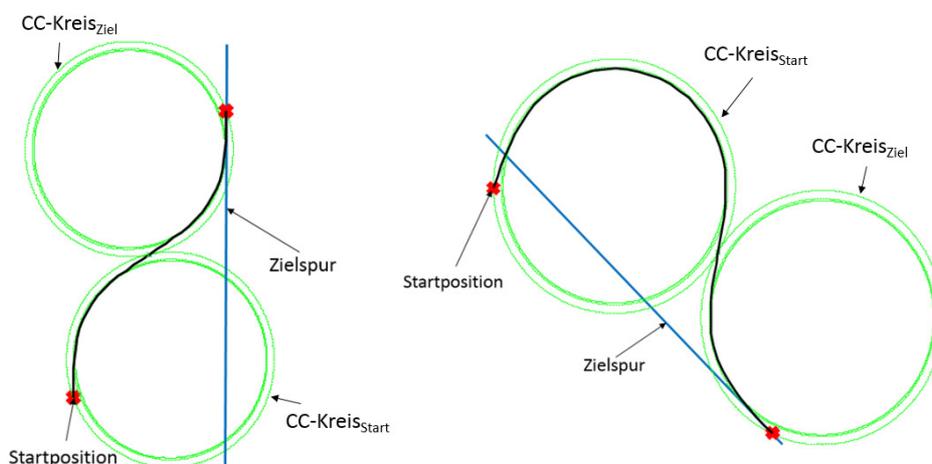


Abbildung 61: CC-Fahrwege von Position auf Spur

### 3.7 Echtzeitüberwachung

Die bisher vorgestellten Methoden zeigen auf, wie Fahrspuren, Wendewege und Spursequenzen bestimmt werden können. Ein Zustandsautomat muss nun dafür sorgen, dass die entsprechenden Schritte während des Feldeinsatzes zur richtigen Zeit eingeleitet werden. Neben dem Erkennen der aktuellen Zustände auf dem Feld muss der Routenplan geprüft und außerdem das Wenden rechtzeitig geplant und ausgeführt werden.

Als Eingangsgröße soll vom Lenksystem eine aktuelle Fahrzeugposition zur Verfügung gestellt werden. Davon ausgehend kann bestimmt werden, ob sich das Fahrzeug auf dem Feld befindet (Ray Casting Problem (LaValle, 2006)) und wenn dies der Fall ist, auf welchem Teilfeld sowie auf welcher Fahrspur es sich befindet. Die folgende Formel stellt die Berechnung der aktuellen Fahrspur dar.

$$\text{Spurnummer} = \text{RUNDEN}\left(\frac{\text{Abstand}_{\text{Referenzlinie-akt.Position}}}{\text{Arbeitsbreite}}\right) \quad [19]$$

Die dem aktuellen Teilfeld zugeordnete Referenzfahrspur wird an das GNSS-Lenksystem übergeben, sodass das automatische Lenken gestartet werden kann.

Die geplante Route muss mit der gefahrenen Route verglichen werden. Die Position jeder Spurnummernänderung wird gespeichert. Der Abstand zwischen diesem Punkt und der aktuellen Position wird bestimmt. Sobald dieser Abstand 10 % der Gesamtfahrspurlänge entspricht, gilt die Spur als „in Bearbeitung“. Wenn die erkannte Spur nicht der nächsten Fahrspur des Routenplans entspricht, so wird eine neue, von der erkannten Spur ausgehende Spursequenz berechnet.

Mit einem ähnlichen Prinzip wird überwacht, ob eine Fahrspur abgearbeitet ist. Ist der Abstand zwischen der ersten ermittelten Position auf der aktuellen Spur und der aktuellen Position größer als 85 % der Spurlänge, so gilt die Spur als abgearbeitet.

Das Wenden wird geplant, sobald der vorgestellte Abstand größer als 90 % der Gesamtpurlänge ist. Abbildung 62 zeigt graphisch die Abstandsermittlung.

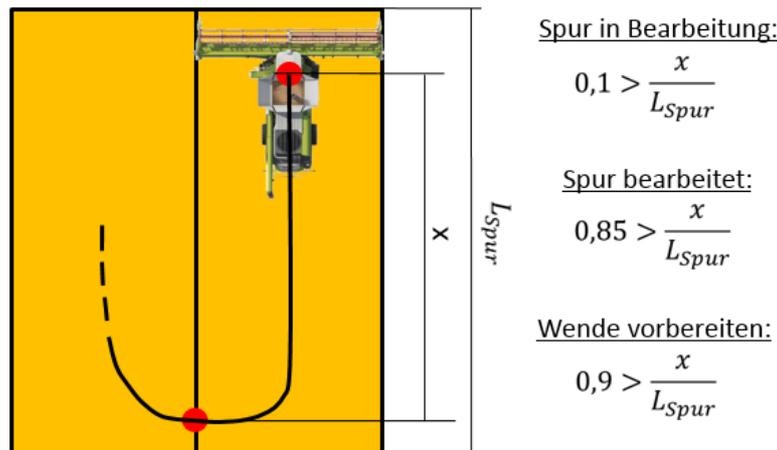


Abbildung 62: Routenplanüberwachung

### 3.8 Aufbau des mobilen Versuchsträgers

In den Kapiteln 3.1 bis 3.7 sind die Einzelschritte und ihre Lösungsverfahren vorgestellt worden. Um zu validieren, wie die Einzelmethoden in einem Gesamtkontext arbeiten, wurde ein Versuchsträger aufgebaut.

Ein Traktor (CLAAS AXION 940) wurde mit einem automatischen Lenksystem ausgestattet. Eine GNSS-Antenne der Marke Hemisphere A52 ermöglicht den Empfang von GPS-, GLONASS-, GALILEO-, BeiDou- und ebenfalls der SBAS-Korrektursignale. RTK-Korrektursignale werden dem System über eine mobile Referenzstation (CLAAS BASELINE HD) bereitgestellt und per Funk über die Antenne in Verbindung mit einem Modem übertragen. Die automatische Spurführung übernimmt der Navigationscontroller mit entsprechender Hydraulik-Komponente (CLAAS GPS PILOT). Als Terminal und Schnittstelle zum Planungssystem wird das Terminal CLAAS S10 verwendet. Dieses kommuniziert über eine USB-CAN-Schnittstelle (Vector CANcaseXL) mit dem Planungssystem. Die Abbildung 63 (rechter Teil) zeigt den Aufbau des Lenksystems und die Anbindung an das Planungssystem.

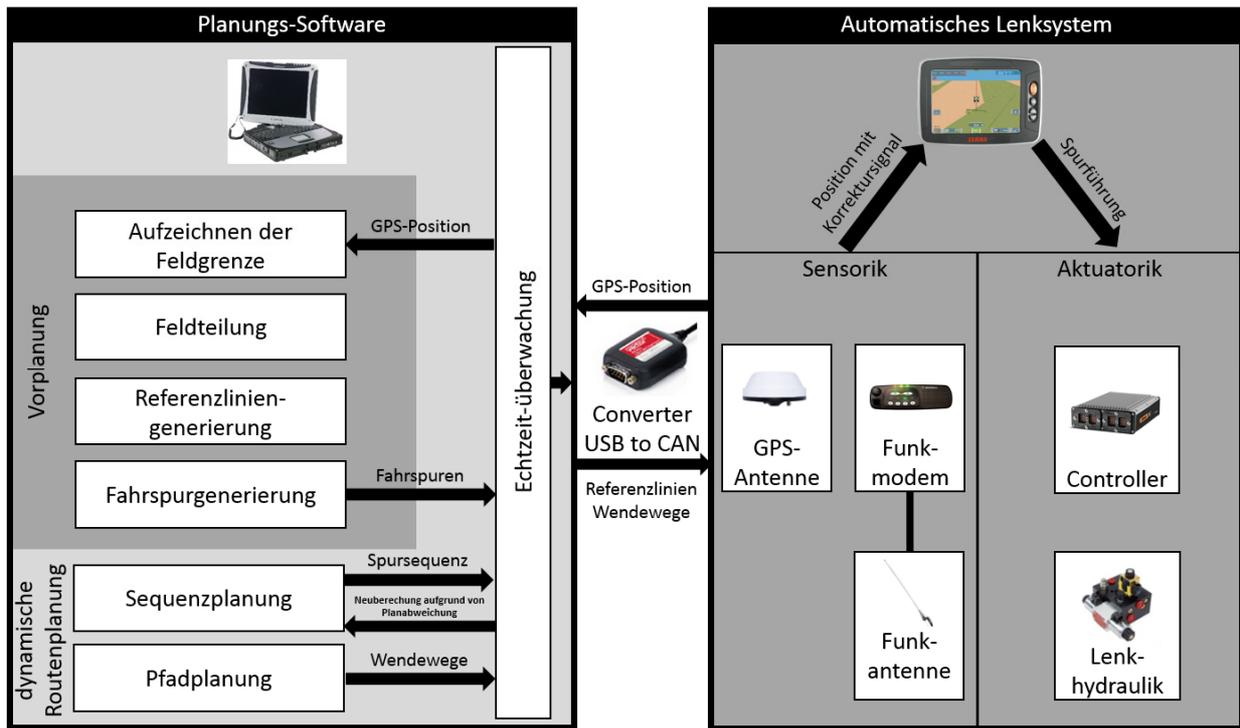


Abbildung 63: Prototypischer Aufbau des Planungssystems mit Lenksystem-Anbindung

Das Lenksystem empfängt die aktuell gültige Referenzlinie vom Planungssystem und kann diese automatisch abfahren. Beim Eintreten in die Vorgewendefläche wird dem Lenksystem vom Planungssystem eine Wende vorgeschlagen. Die GNSS-Position wird vom Lenksystem an das Planungssystem übertragen, damit die Planungsdaten erzeugt werden können. Als graphische Benutzerschnittstelle dient eine selbsterstellte WPF-Applikation (Entwicklungsumgebung MS Visual Studio), das Einbinden eines BingMap-Satellitenbildes ist möglich. Diese Visual C#-basierte Anwendung bindet die Algorithmen in Form einer C++-Klassenbibliothek ein. Hier sind die geometrischen Funktionen in Klassen wie Punkt, Linie, Polylinie und Polygon hinterlegt, die landwirtschaftsspezifischen Methoden wie das Teilen eines Schlages werden in den Klassen Teilfeld und Feld hinterlegt.

Das Planungssystem kann in zwei Basiskomponenten aufgetrennt werden: Vorplanung und Überwachung der Feldfahrt. Zuerst werden in einem Konfigurations-Assistenten die Fahrspuren für das Feld geplant. Die vorgestellten Methoden zur optimierten Feldteilung und zur Wahl der zeitoptimierten Referenzlinie werden eingesetzt, können jedoch über eine geeignete Nutzerschnittstelle manuell verändert werden.

Während der Fahrt muss die Route überwacht und Pfad- sowie Planneuberechnungen angestoßen werden. Das Fahrzeug wird auf dem Feld teilautonom geführt, nur die

Teilfeldwechsel sowie das Anfahren der Startspur und das Verlassen des Feldes können nicht autonom gefahren werden.

Der Anwender wird zu Beginn der Planung aufgefordert, die Feldgrenze aufzuzeichnen. Über drei Eingabemöglichkeiten kann diese dem System übergeben werden. Der Nutzer kann entlang der Feldgrenze die außen umrundende Spur abfahren. Das System bearbeitet die mittels GNSS-Empfängers aufgezeichnete Fahrspur nach. Weiter kann die Feldgrenze über das ISOXML-Austauschformat von einer Farmmanagementsoftware geladen oder über ein MS BingMap-Plugin auf dem Bildschirm gezeichnet werden. Auch die Maschinen- und Prozessparameter werden zu Beginn abgefragt, sie sind detailliert in Abbildung 28 aufgezeigt worden. Danach wird eine automatische Feldteilung vorgeschlagen und eine manuelle Nachbearbeitung angeboten. Die Referenzlinie ist im nächsten Schritt einzutragen. Die verschiedenen Möglichkeiten – also konturförmige oder gerade Spuren, durch Kapazität restriktierte oder nicht begrenzte Spuren – können Arbeitszeit minimal automatisch berechnet werden und im Anschluss manuell verändert werden. Alle Fahrspuren - also im Vorgewende und Feldinneren - werden auf Basis der gewählten Feldteilung und Referenzlinie generiert und die dazugehörigen Parameter wie Routenlänge und Arbeitszeit berechnet. Diese erzeugten Fahrspuren sind vor dem Feldprozess zu planen und bleiben unveränderlich.

Während der Fahrt müssen dynamisch diverse Methoden aufgerufen und Abläufe überwacht werden. Eine initial geplante Route – also Spuresequenz – wird angezeigt. Weicht der Anwender von dieser Route ab, wird ausgehend von der aktuellen Position eine Neuberechnung der Spurreihenfolge angestoßen und angezeigt. Sobald sich das Fahrzeug auf das Ende einer Fahrspur hin bewegt, wird eine Wende in die nächste Spur der Sequenz geplant und – sobald die Grenze zwischen Vorgewende und innerem Feld (siehe Abbildung 41) überschritten wird – abgefahren. Fährt der Anwender in ein weiteres Teilfeld, so wird die zugehörige Referenzfahrspur an das Lenksystem übertragen.

### **3.9 Validierungsmethodik**

In Kapitel 3.3 ist ein Modell vorgestellt worden, welches die Arbeitszeit für den Feldeinsatz mithilfe der Feldgrenze und den Maschinenparametern berechnet. Dieses Modell soll mit realen Felddaten verglichen und somit verifiziert werden.

Im Folgenden werden Methoden aufgezeigt, mit denen die benötigten Parameter aus den Aufzeichnungen extrahiert werden können. Abbildung 64 zeigt den Aufbau der Methodik. Neben der realen Arbeitszeit und der realen Routenlänge werden die Eingangsgrößen der

Simulation ermittelt. Durch das vorgestellte Modell Arbeitszeitsimulation kann mit den Eingabevariablen eine Arbeitszeit und die Routenlänge simuliert werden. Die Simulations- und die Realergebnisse werden verglichen.

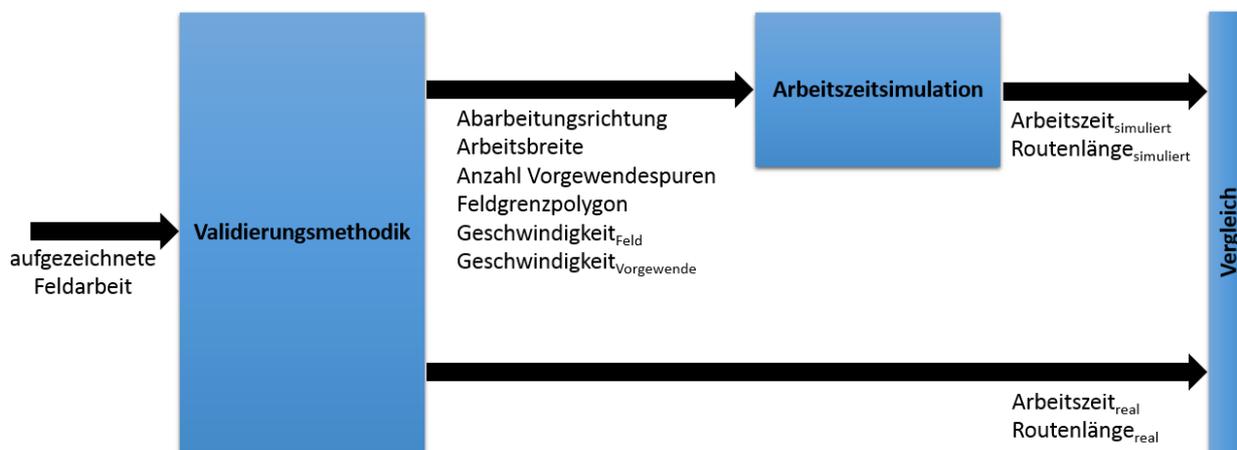


Abbildung 64: Aufbau der Validierungsmethodik

Im ersten Schritt wird die Bearbeitungsrichtung abgeschätzt. Sie ist ein Eingangsparameter der Arbeitszeitsimulation. Die Feldfahrt als aufgezeichnete Spur liegt der Berechnung zugrunde. Um Pausen zu filtern, wird eine Douglas-Peucker-Filterung (LaValle, 2006) durchgeführt und ein Minimalabstand von einem Meter zwischen den Punkten vorausgesetzt. Es werden alle Segmentausrichtungen der aufgezeichneten Polylinie bestimmt. Die am häufigsten erkannte Ausrichtung ist die Bearbeitungsrichtung im Feldinnenbereich. Unterteilte Felder können mit dieser Methode nicht identifiziert werden.

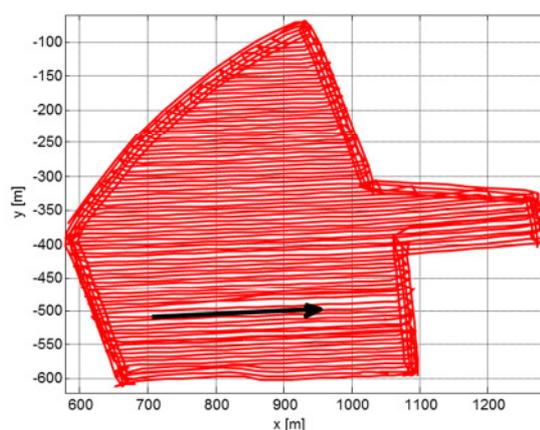


Abbildung 65: Abschätzung der Abarbeitungsrichtung (schwarzer Pfeil – approximierte Abarbeitungsrichtung, rot – aufgezeichnete Fahrspur)

Mit der berechneten Abarbeitungsrichtung kann im zweiten Schritt die reale Arbeitsbreite berechnet werden. Die Segmente mit Abarbeitungsrichtung werden dem Aufzeichnungsdatum nach aufgelistet und die Abstände zu den benachbarten Segmenten dieser Liste bestimmt. Das Maximum wird als Arbeitsbreite angesehen. Der ermittelte Wert ist keine Maschinenarbeitsbreite, sondern die Breite, mit welcher der Landwirt das Feld bearbeitet hat.

Die Arbeitsbreite wird herangezogen, um die Feldgrenze zu bestimmen. Um jedes Segment der aufgezeichneten Spur wird ein Polygon mit den Punkten  $P_1 \dots P_4$  - wie in Abbildung 66 zu sehen – mit dem Abstand einer halben Arbeitsbreite zur aufgezeichneten roten Spur erstellt. Die Vielzahl kleiner Polygone (in Abbildung 66 grün dargestellt) wird im Anschluss zusammengefügt, sodass die Feldgrenze durch ein großes Feld umrundendes Polygon wiedergegeben wird.

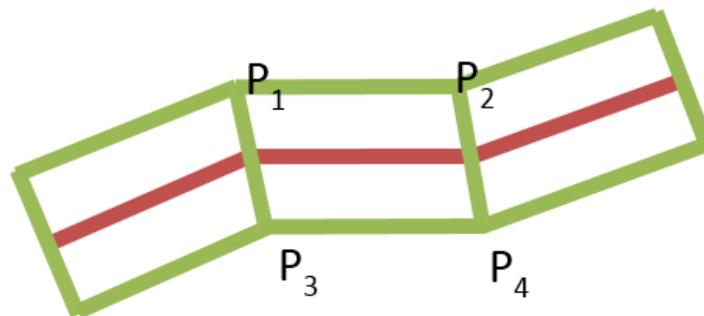


Abbildung 66: Abschätzung der bearbeiteten Fläche

Um die Vorgewendebreite zu ermitteln, wird die Anzahl der Fahrspuren im Vorgewende bestimmt. Die umrundenden Vorgewendespuren schneiden die inneren Fahrspuren, wenn der Fahrer im Feldinneren wendet und in eine benachbarte Spur einfährt. Die Selbstschnittpunkte und die Abstände dieser zur Feldgrenze werden berechnet. Abbildung 67 zeigt die ermittelte, rote Feldgrenze sowie die blau gekennzeichneten Schnittpunkte. In dem unten angegebenen Beispiel kann gezeigt werden, dass drei Vorgewendefahrspuren angelegt worden sind.

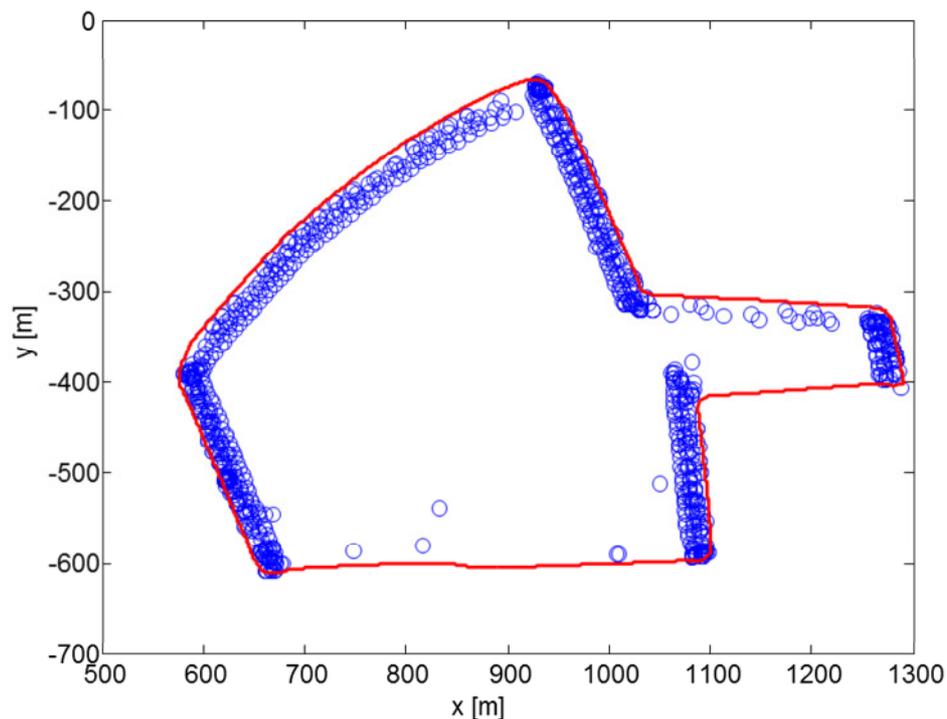


Abbildung 67: Darstellung der Selbstüberschneidungen

Um die Ergebnisse der Arbeitszeitsimulation mit der realen Arbeitszeit und Routenlänge vergleichen zu können, werden diese Realdaten ebenfalls aus der Aufzeichnung ermittelt. Die Arbeitszeit ist mit der Aufnahme­frequenz und der Länge des Aufzeichnens bekannt. Gleichung [20] zeigt den Zusammenhang:

$$\text{Arbeitszeit} = \frac{\text{Punkteanzahl}_{\text{aufgezeichnete Punkte}}}{\text{Aufnahmefrequenz}} \quad [20]$$

Die Routenlänge kann aus der Summe der einzelnen euklidischen Abstände zwischen den aufgezeichneten Positionen angenähert werden, wie in Gleichung [21] dargestellt.

$$\text{Routenlänge} = \sum_0^{\text{Punkteanzahl}} \sqrt{(\text{Spurpunkt}_{i+1,x} - \text{Spurpunkt}_{i,x})^2 + (\text{Spurpunkt}_{i+1,y} - \text{Spurpunkt}_{i,y})^2} \quad [21]$$

Die Geschwindigkeit ist der Quotient aus Routenlänge und der Arbeitszeit.

## 4 Ergebnisse

Mit den vorgestellten Methoden ist ein Planungssystem entwickelt worden, welches sowohl die Vorplanung des Feldes als auch die Routenplanung während der Feldfahrt übernimmt und so

den Schlag teilautonom abarbeiten kann. In dem folgenden Kapitel soll der Nutzen und die Anwendbarkeit eines solchen Planungssystems nachgewiesen werden.

In den folgenden Kapiteln werden die nun aufgezählten Untersuchungen vorgenommen:

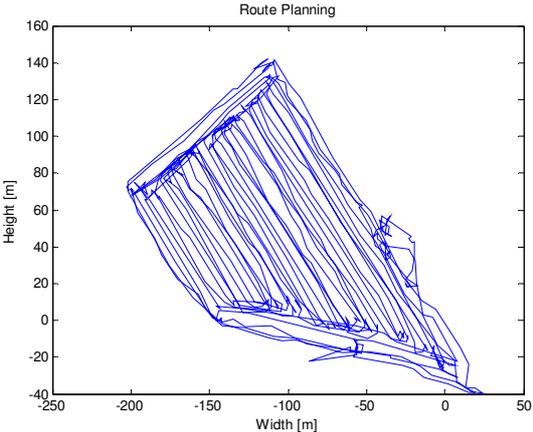
- Mithilfe eines Modells wurde die Arbeitszeit abgeschätzt. Dieses Modell soll anhand real aufgezeichneter Feldfahrten verifiziert werden.
- Das Optimierungspotential wird ermittelt. Untergliedert in Fahrspur- und Sequenzplanung wird anhand realer Schläge die prozentuale Arbeitzeiteinsparung ermittelt.
- Die geplanten Wendewege muss die Maschine automatisch abfahren. Es wird untersucht, ob dies möglich ist und die Maschinenrestriktionen eingehalten werden.
- Das Planungssystem soll während der Feldarbeit auf einem Maschinenterminal eingesetzt werden. Deshalb soll die Rechenzeit der einzelnen Methoden näher beleuchtet werden.
- Die realisierten Module berücksichtigen nicht alle Eigenschaften, die ein Schlag haben kann (beispielsweise der Einfluss großer Hindernisse auf die Feldteilung wird nicht betrachtet). Eine adäquate Zahl westeuropäischer Schläge wird untersucht, um die wichtigsten Feldeigenschaften zu bestimmen. Diese Daten werden ebenfalls dazu genutzt, um eine Aussage darüber zu machen, wie viele der untersuchten Schläge mit dem Planungssystem berechnet werden können.

#### **4.1 Verifikation des Arbeitszeitmodells**

Um die Bearbeitungsrichtung korrekt zu bestimmen, ist in Kapitel 3.3 ein Modell vorgestellt worden, welches die Arbeitszeit für ein Fahrspurmuster ermittelt und somit die zeitgünstigste Ausrichtung findet. Dazu wird in diesem Kapitel untersucht, wie groß die Abweichung zwischen realer und simulierter Arbeitszeit und Routenlänge ist. Die in Kapitel 3.9 vorgestellten Validierungsmethoden werden exemplarisch für vier Felder angewandt, um aus den Feldaufzeichnungen die Eingangsparameter für die Arbeitszeitsimulation zu gewinnen, dazu zählen die Feldgrenze, die Arbeitsbreite, die Vorgewendebreite, die Arbeitsgeschwindigkeit sowie die Abarbeitungsrichtung. Die folgenden vier Tabellen wird jeweils ein Feld betrachtet. Zuerst sind die Aufzeichnung und Simulation graphisch dargestellt. Danach werden die ermittelten Werte Arbeitsbreite und Vorgewendebreite aufgeführt. Der Vergleich kann anschließend mithilfe der Werte Routenlänge und Arbeitszeit durchgeführt werden; der prozentuale Unterschied wird ebenfalls aufgezeigt.

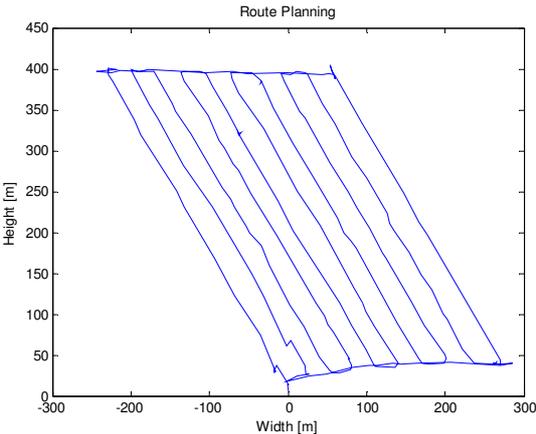
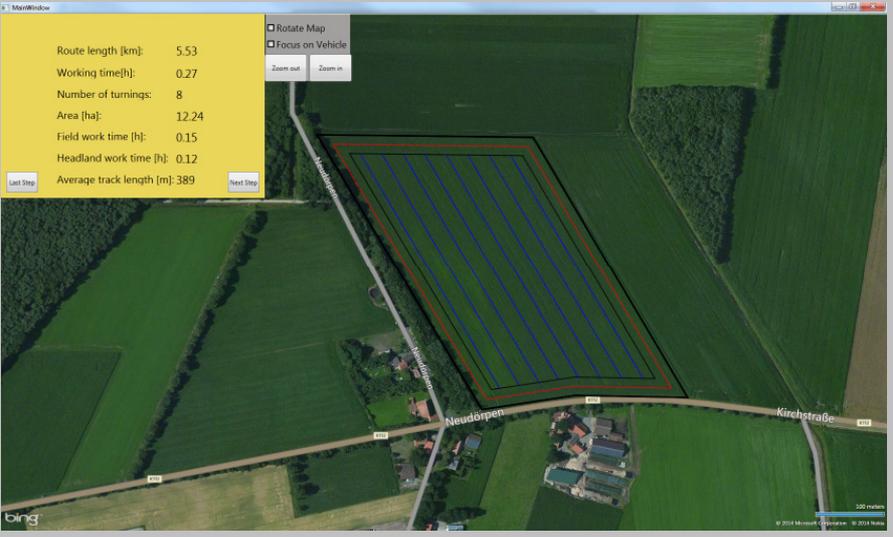
In dem ersten Beispiel wird eine Arbeitsbreite von 3,5 m sowie eine Vorgewendebreite von 14 m identifiziert. Damit berechnet sich eine simulierte Arbeitszeit von 0,4 h und eine Routenlänge von 5,96 km. Aus der Feldmessung ergibt sich eine reale Arbeitszeit mit 0,34 h und eine reale Routenlänge von 5,03 km. Somit wird die richtige Größenordnung getroffen, jedoch beträgt die Abweichung zwischen Simulation und Realdaten im ersten Beispiel ca. 15 %.

Tabelle 2: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 1

|                                    |  |                          |                               |
|------------------------------------|--|--------------------------|-------------------------------|
| <p><b>Aufzeichnung</b></p>         |   |                          |                               |
| <p><b>Simulationsergebnis</b></p>  |  |                          |                               |
| <p><b>Arbeitsbreite [m]</b></p>    | <p>3,5</p>   |                          |                               |
| <p><b>Vorgewendebreite [m]</b></p> | <p>14</p>  |                          |                               |
| <p><b>Ergebnisvergleich</b></p>    | <p><b>Aufzeichnung</b></p>   | <p><b>Simulation</b></p> | <p><b>Unterschied [%]</b></p> |
| <p><b>Arbeitszeit [h]</b></p>      | <p>0,34</p>  | <p>0,4</p>               | <p>15</p>                     |
| <p><b>Routenlänge [km]</b></p>     | <p>5,03</p>  | <p>5,96</p>              | <p>15,6</p>                   |

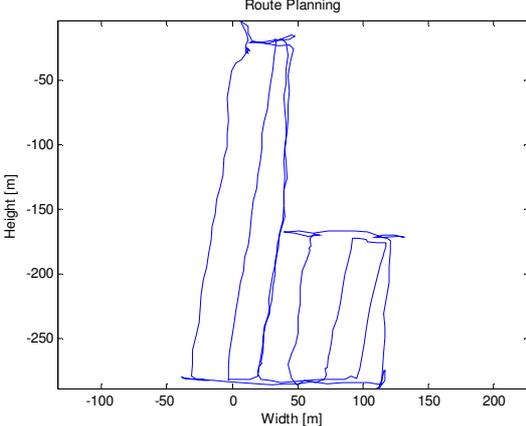
Im zweiten Beispiel ist eine Pflanzenschutzapplikation aufgezeichnet worden. Die Arbeitsbreite entspricht der Vorgewendebreite und beträgt 27 m. Die simulierte Arbeitszeit beträgt 0,27 h und weicht um 3,7 % von der realen Arbeitszeit ab, die mit 0,26 h ermittelt wurde. Bei der Routenlänge kommt es zu einer Abweichung von 4,5 %, die simulierte Routenlänge beträgt 5,53 km und die reale Routenlänge 5,28 km. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 2

|                                    |   |                          |                               |
|------------------------------------|---|--------------------------|-------------------------------|
| <p><b>Aufzeichnung</b></p>         |    |                          |                               |
| <p><b>Simulationsergebnis</b></p>  |  <p>Route length [km]: 5.53<br/>         Working time[h]: 0.27<br/>         Number of turnings: 8<br/>         Area [ha]: 12.24<br/>         Field work time [h]: 0.15<br/>         Headland work time [h]: 0.12<br/>         Average track length [m]: 389</p> |                          |                               |
| <p><b>Arbeitsbreite [m]</b></p>    | <p>27</p>   |                          |                               |
| <p><b>Vorgewendebreite [m]</b></p> | <p>27</p>   |                          |                               |
| <p><b>Ergebnisvergleich</b></p>    | <p><b>Aufzeichnung</b></p>  | <p><b>Simulation</b></p> | <p><b>Unterschied [%]</b></p> |
| <p><b>Arbeitszeit [h]</b></p>      | <p>0,26</p>   | <p>0,27</p>              | <p>3,7</p>                    |
| <p><b>Routenlänge [km]</b></p>     | <p>5,28</p>   | <p>5,53</p>              | <p>4,5</p>                    |

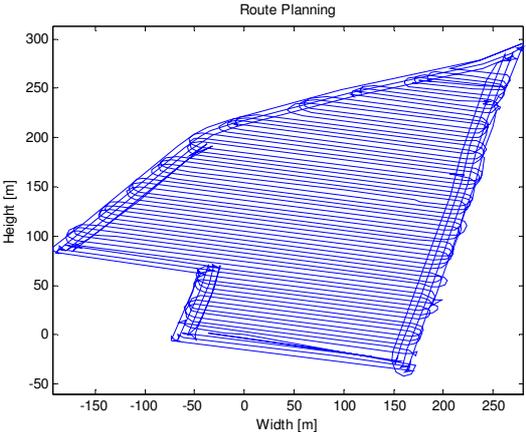
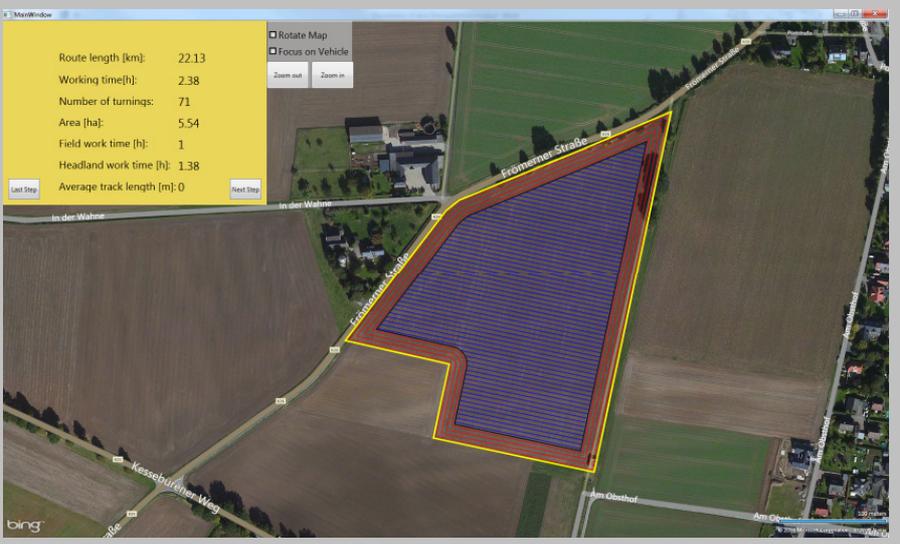
Auch das dritte Feld zeigt eine Pflanzenschutzapplikation. Die ermittelte Simulationsarbeitszeit beträgt 0,07 h mit einer Routenlänge von 2,07 km. Daneben zeigen die Realdaten eine Routenlänge von 2,21 km und eine Arbeitszeit von 0,08 h. Prozentual unterscheidet sich die Arbeitszeit um 12,5 %, wohingegen die Routenlänge um 6,3 % abweicht.

Tabelle 4: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 3

|                                    |  |                   |                        |
|------------------------------------|--|-------------------|------------------------|
| <p><b>Aufzeichnung</b></p>         |    |                   |                        |
| <p><b>Simulationsergebnis</b></p>  |  |                   |                        |
| <p><b>Arbeitsbreite [m]</b></p>    | 27   |                   |                        |
| <p><b>Vorgewendebreite [m]</b></p> | 27   |                   |                        |
| <p><b>Ergebnisvergleich</b></p>    | <b>Aufzeichnung</b>  | <b>Simulation</b> | <b>Unterschied [%]</b> |
| <p><b>Arbeitszeit [h]</b></p>      | 0,08   | 0,07              | 12,5                   |
| <p><b>Routenlänge [km]</b></p>     | 2,21   | 2,07              | 6,3                    |

Zuletzt wird ein Feld mit einer Arbeitsbreite von 4,5 m und einer Vorgewendebreite von 18 m untersucht. Damit berechnen sich die reale Arbeitszeit zu 2,58 h und die reale Routenlänge zu 24,16 km. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Arbeitszeit von 2,38 h und eine Routenlänge von 22,13 km. Der Arbeitszeitunterschied beträgt 7,8 % und die Routenlängenunterschied macht 8,4 % aus.

Tabelle 5: Vergleich des Arbeitszeitmodells an Feld 4

|                                    |  |                          |                               |
|------------------------------------|--|--------------------------|-------------------------------|
| <p><b>Aufzeichnung</b></p>         |   |                          |                               |
| <p><b>Simulationsergebnis</b></p>  |  |                          |                               |
| <p><b>Arbeitsbreite [m]</b></p>    | <p>4,5</p>   |                          |                               |
| <p><b>Vorgewendebreite [m]</b></p> | <p>18</p>  |                          |                               |
| <p><b>Ergebnisvergleich</b></p>    | <p><b>Aufzeichnung</b></p>   | <p><b>Simulation</b></p> | <p><b>Unterschied [%]</b></p> |
| <p><b>Arbeitszeit [h]</b></p>      | <p>2,58</p>  | <p>2,38</p>              | <p>7,8</p>                    |
| <p><b>Routenlänge [km]</b></p>     | <p>24,16</p>   | <p>22,13</p>             | <p>8,4</p>                    |

Die simulierte Arbeitszeit weicht in den untersuchten Beispielen um maximal 0,2 Stunden von der real ermittelten Arbeitszeit ab. Abweichungen kommen zum Beispiel durch GNSS-Messungenauigkeiten, abweichende Spursequenzen und Fahrpausen zustande und können nur schwer weiter eliminiert werden. Die bereitgestellte Genauigkeit liegt im Bereich der Fahrzeitberechnung anderer Anwendungen von Routenplanern (de Jong, 2012).

## **4.2 Optimierungspotential durch Vorplanung**

Bevor auf dem Feld gearbeitet werden kann, müssen die Fahrspuren geplant werden. In diesem Kapitel wird das Optimierungspotential einer Vorplanung untersucht. Dabei wird zuerst eine statistische Analyse von 100 Feldern in Deutschland gezeigt und bestimmt, ob die vorgestellten Methoden Optimierungen bewirken können und in welchem Bereich das Optimierungspotential liegt. Danach werden drei typische Feldformen mit optimierten sowie vom Anwender gewählten Bearbeitungsstrategien verglichen. Ein rechteckiges, ein kreisförmiges und ein konturförmiges Feld werden untersucht. Dies sind häufig anzutreffende Feldformen (Engelhardt, 2004). Weiter soll beurteilt werden, ob kontur- und kreisförmige Fahrspuren für diese häufig anzutreffenden Feldformen die Arbeitszeit minimieren können. Das in Kapitel 3.3 vorgestellte und in Kapitel 4.1 verifizierte Arbeitszeitmodell wird verwendet.

### **4.2.1 Statistische Analyse**

Um das Optimierungspotential besser abschätzen zu können, wurde eine statistische Analyse durchgeführt. Es wurden 100 Felder via Satellitenbilddaufnahme zufällig ausgewählt. Zu der vom Anwender gewählten Feldteilung sowie Bearbeitungsrichtung wurde eine Arbeitszeit abgeschätzt. Ebenfalls wurden für das gleiche Feld die optimale Feldteilung und Bearbeitungsrichtung bestimmt. Die Parameter Arbeitszeit und Routenlänge konnten mit der in Kapitel 4.1 verifizierten Methode simuliert werden. Das Verfahren ist in Abbildung 68 beispielhaft aufgezeigt. Die Vergleichsparameter des optimierten und des realen Fahrspurmusters sind aufgeführt und die verschiedenen Feldteilungen sowie Fahrspurausrichtungen zu sehen.

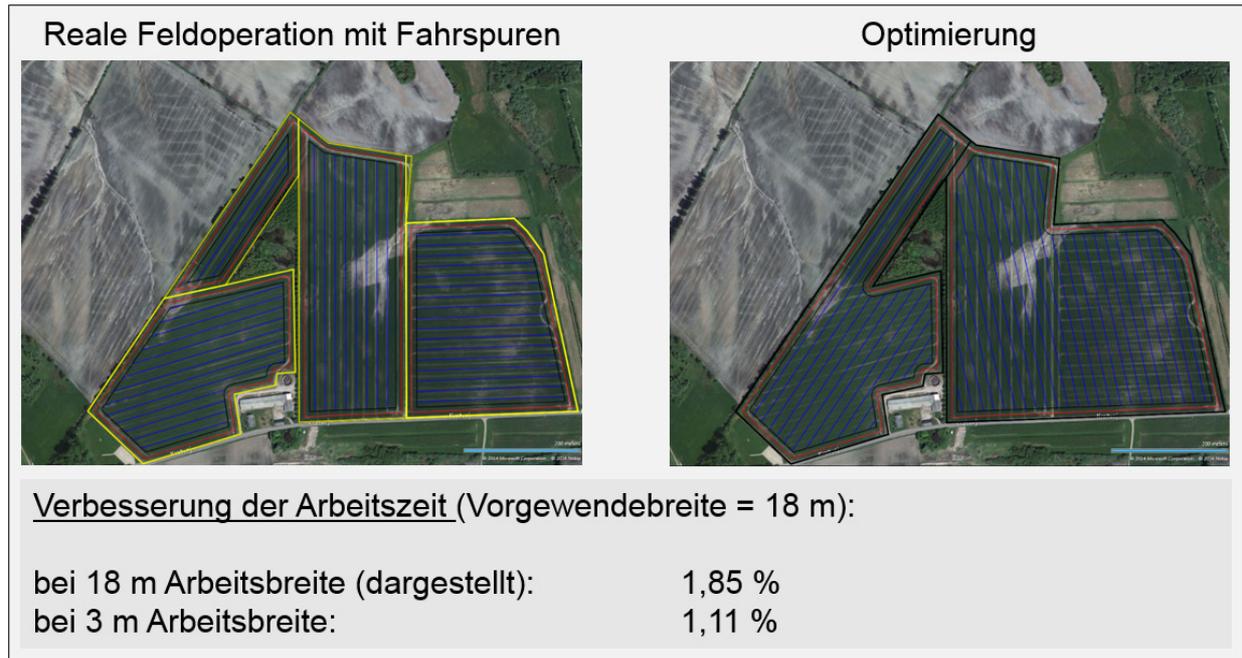


Abbildung 68: Beispielhafte Darstellung des Arbeitszeitvergleichs

Die durchschnittliche Arbeitszeitverbesserung wird mit der Gleichung 22 berechnet. Die durchschnittliche Arbeitszeiteinsparung für die 100 untersuchten Felder durch die Optimierungsalgorithmen der Vorplanung beträgt 6,14 %.

$$\sum_{i=0}^{\text{Anzahl Schläge}} \frac{\text{Arbeitszeit}_{\text{Landwirt\_simuliert}} - \text{Arbeitszeit}_{\text{optimal\_simuliert}}}{\text{Arbeitszeit}_{\text{optimal\_simuliert}}} \cdot 100 = 6,14 \% \quad [22]$$

Auch der Einfluss der Flächengröße wurde berücksichtigt. Dazu ist eine flächenbezogene Verbesserung - wie in Gleichung 23 gezeigt - berechnet worden. Die Optimierung beträgt 6,18 %, was annähernd der Optimierung pro Feld entspricht.

$$\sum_{i=0}^{\text{Anzahl Schläge}} \frac{\text{Verbesserung}(i) \cdot \text{Schlaggröße}(i)}{\varnothing \text{Schlaggröße}} \cdot 100 = 6,18 \% \quad [23]$$

Die Optimierung der Routenlänge wird ähnlich den Betrachtungen der Arbeitszeit untersucht. Es wird bei den untersuchten Feldern eine durchschnittliche Optimierung von 5,24 % festgestellt (siehe Gleichung 24).

$$\sum_{i=0}^{\text{Anzahl Schläge}} \frac{\text{Routenlänge}_{\text{Landwirt\_simuliert}} - \text{Routenlänge}_{\text{optimal\_simuliert}}}{\text{Routenlänge}_{\text{optimal\_simuliert}}} \cdot 100 = 5,24 \% \quad [24]$$

Es wurde ergänzend die flächenbezogene Verbesserung bestimmt. Es ergab sich eine Verbesserung von 5,01 %, also 0,23 % weniger als bei der Verbesserung pro Feld ermittelt worden ist (siehe Gleichung 23). Trotzdem scheint auch hier die Fläche nur eine untergeordnete Rolle bei der Optimierung zu spielen.

$$\sum_{i=0}^{\text{Anzahl Schläge}} \frac{\text{Verbesserung}(i) \cdot \text{Schlaggröße}(i)}{\text{ØSchlaggröße}} \cdot 100 = 5,01 \% \quad [25]$$

Weiter wurde untersucht, ob jeder Schlag gleichermaßen optimiert werden kann oder ob es eine Varianz gibt. Eine Box-Whisker-Darstellung veranschaulicht die Ergebnisse in Abbildung 69.

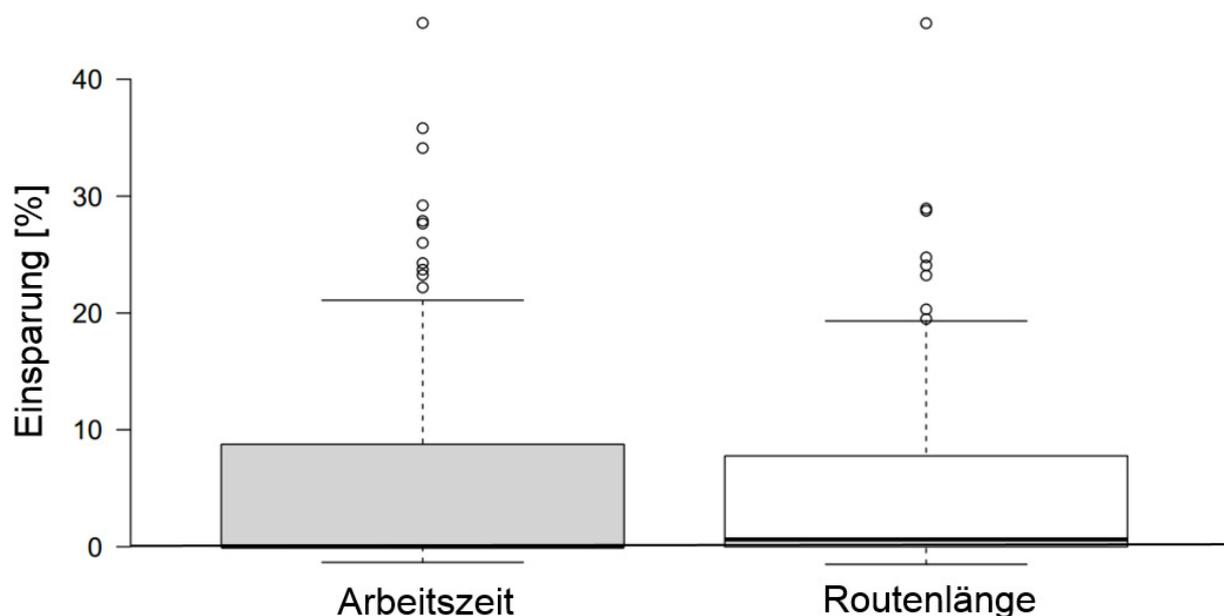


Abbildung 69: Box-Whisker-Diagramm zur Varianz des Einsparpotentials durch Routenplanung

Die Varianzanalyse zeigt, dass die Optimierung stark schwankt. 46,6 % der Felder sind nicht verbessert worden, da die Felder bereits mit optimalen Teilfeldern und Referenzlinien abgearbeitet worden sind. Ein Feld ist durch die in dieser Arbeit vorgestellten Vorplanungsmethoden länger bearbeitet worden als mit der real angewandten Abarbeitungsstrategie. Grund dafür ist eine vorgeschlagene Feldteilung, die zu kleine Teilbereiche erstellt hat, sodass nur ein kleiner Teil der Arbeitsbreite der Landmaschine effektiv im Einsatz ist.. Das Minimum liegt bei -1,35 % Zeiteinsparung bzw. -1,51 % Streckeneinsparung. Der Median der beiden Einsparungen liegt bei 0,45 % der Zeit und 0,76 % der Strecke. Maxima von 44,82 % Zeiteinsparung und 44,80 % Streckeneinsparung sind ermittelt worden. Die oberen Quantile liegen bei 9,58 % Zeit- und 8,06 % Streckenoptimierung, die unteren Quantile bei 0 %.

#### 4.2.2 Beispielhafte Untersuchung

Die in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Fahrfunktionen haben sich als Standard in heutigen Lenksystemen durchgesetzt. In diesem Unterkapitel wird untersucht, welchen Einfluss die

Feldform auf die Wahl der Referenzlinie hat. Mit dem verifizierten Arbeitszeitmodell soll die mit den vorgestellten Methoden optimal berechnete Gerade als Leitlinie gegenüber dem jeweiligen Fahrmodus analysiert werden. Es wird eine Vorgewendegeschwindigkeit von  $10 \text{ km h}^{-1}$  und eine Arbeitsgeschwindigkeit von  $15 \text{ km h}^{-1}$  gewählt. Die Arbeitsbreite beträgt  $9 \text{ m}$ , was auch der Vorgewendebreite entspricht.

#### 4.2.2.1 Beispiel 1: Algorithmus vs. AB-Geraden-Fahrfunktion

Als Erstes wird die Gerade als Referenzfahrspur untersucht; bei dem rechteckigen Feld aus Abbildung 70 sind zwei Ausrichtungen denkbar. Die simulierte Routenlänge im rechten Beispiel (Abbildung 70) beträgt  $9430 \text{ m}$  mit einer Arbeitszeit von  $0,7116 \text{ h}$ . Die Bearbeitungsrichtung des linken Beispiels entspricht der längsten Außenkante, was als landwirtschaftliche Näherungsformel allgemein bekannt ist (Engelhardt, 2004). Hier beträgt die Routenlänge  $9115 \text{ m}$  bei einer Arbeitszeit von  $0,6491 \text{ h}$ .

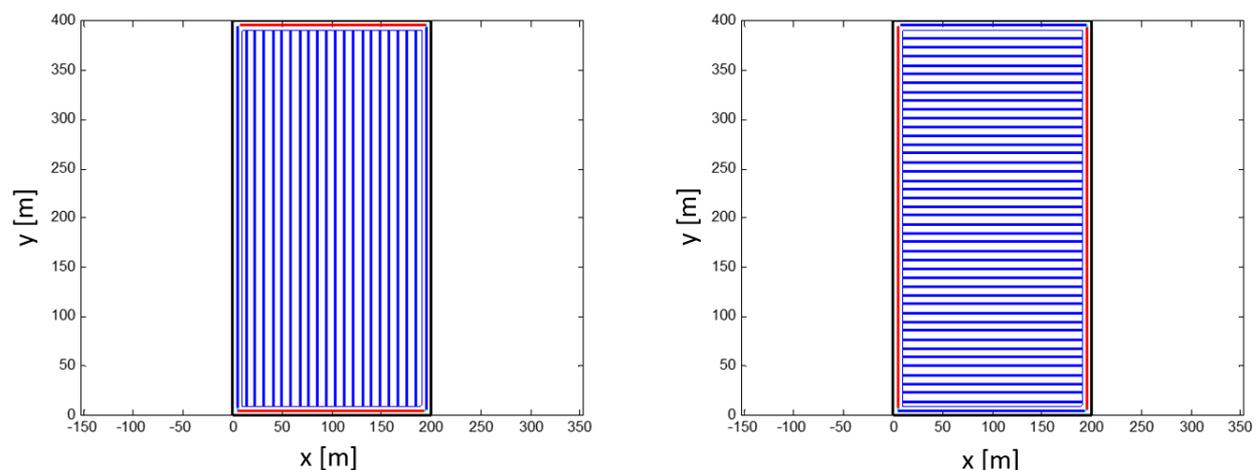


Abbildung 70: Vergleich zweier Ausrichtungen auf einem rechteckigen Feld; links:  $9115 \text{ m}$  Routenlänge mit  $0,6491 \text{ h}$  Arbeitszeit; rechts:  $9430 \text{ m}$  Routenlänge mit  $0,7116 \text{ h}$  Arbeitszeit

#### 4.2.2.2 Beispiel 2: Algorithmus vs. Kreis-Fahrfunktion

Der zweite untersuchte Fahrmodus ist der Kreisfahrmodus, der für die Bewässerungswirtschaft auf kreisförmigen Feldern genutzt wird. Die geradlinige Abarbeitung, die von den Optimierungsmethoden bestimmt worden ist, verursacht eine Routenlänge von  $3813 \text{ m}$  mit einer Arbeitszeit von  $0,31 \text{ h}$ . Der Kreisfahrmodus reduziert den Fahraufwand auf  $3645,82 \text{ m}$  und auch die Arbeitszeit kann auf  $0,25 \text{ h}$  reduziert werden. Der Einfluss einer kurvenförmigen Fahrt auf Verschleiß und Mehrverbrauch von Betriebsmittel kann mit dieser Untersuchung nicht betrachtet werden.

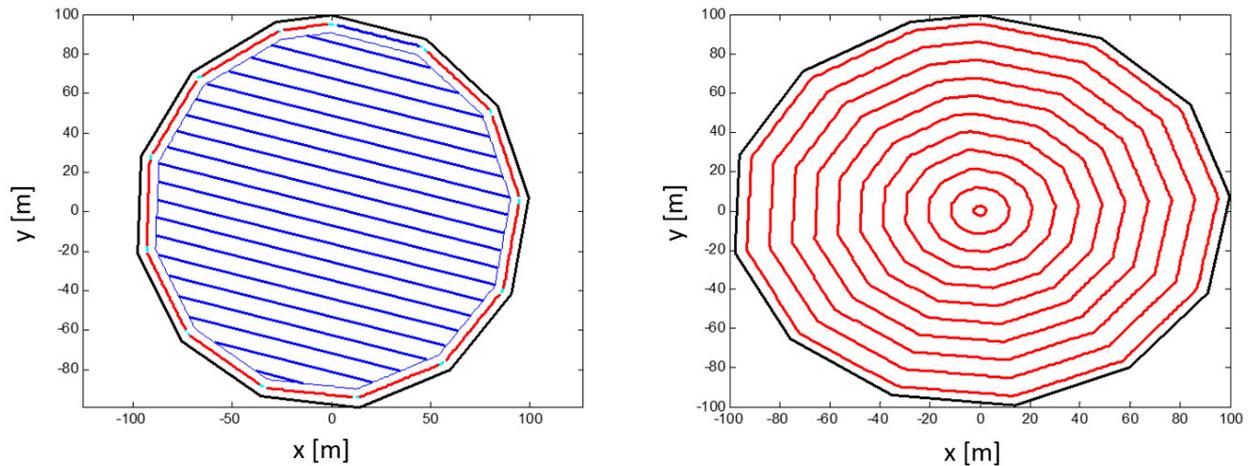


Abbildung 71: Vergleich zweier Fahrmodi auf einem kreisförmigen Feld; links: 3813 m Routenlänge mit 0,31 h Arbeitszeit; rechts: 3645,82 m Routenlänge mit 0,25 h Arbeitszeit

**4.2.2.3 Beispiel 3: Algorithmus vs. Kontur-Fahrfunktion**

Als Letztes soll das Abarbeiten mittels konturförmiger Leitlinien untersucht werden. Die optimale Geradenabarbeitung wird - dargestellt in Abbildung 72- ermittelt mit einer Routenlänge von 14029 m und einer Arbeitszeit von 1,2 h. Die konturförmige Abarbeitung minimiert den Aufwand; eine Routenlänge von 13584 m und eine dazugehörige Arbeitszeit von 0,918 h werden ermittelt.

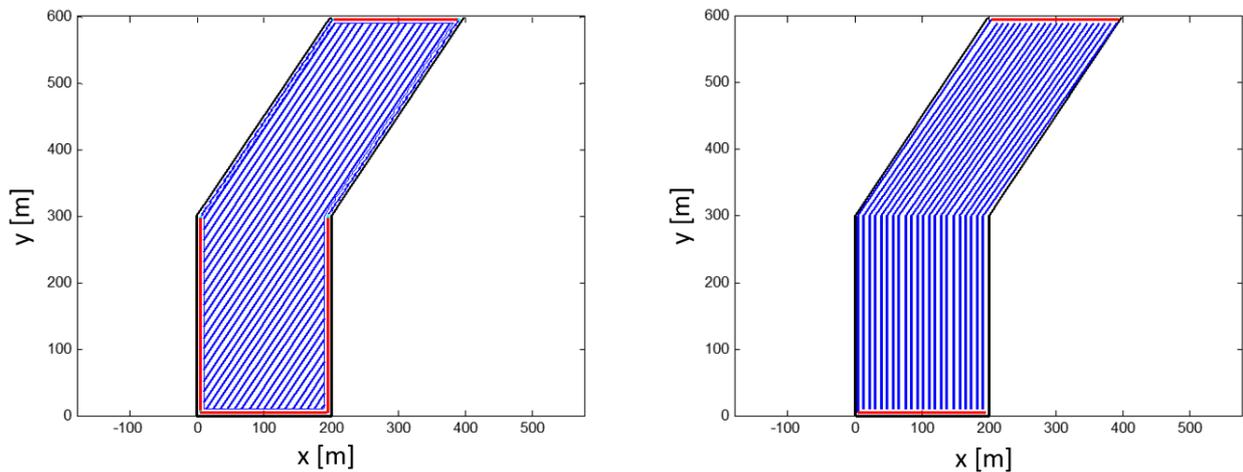


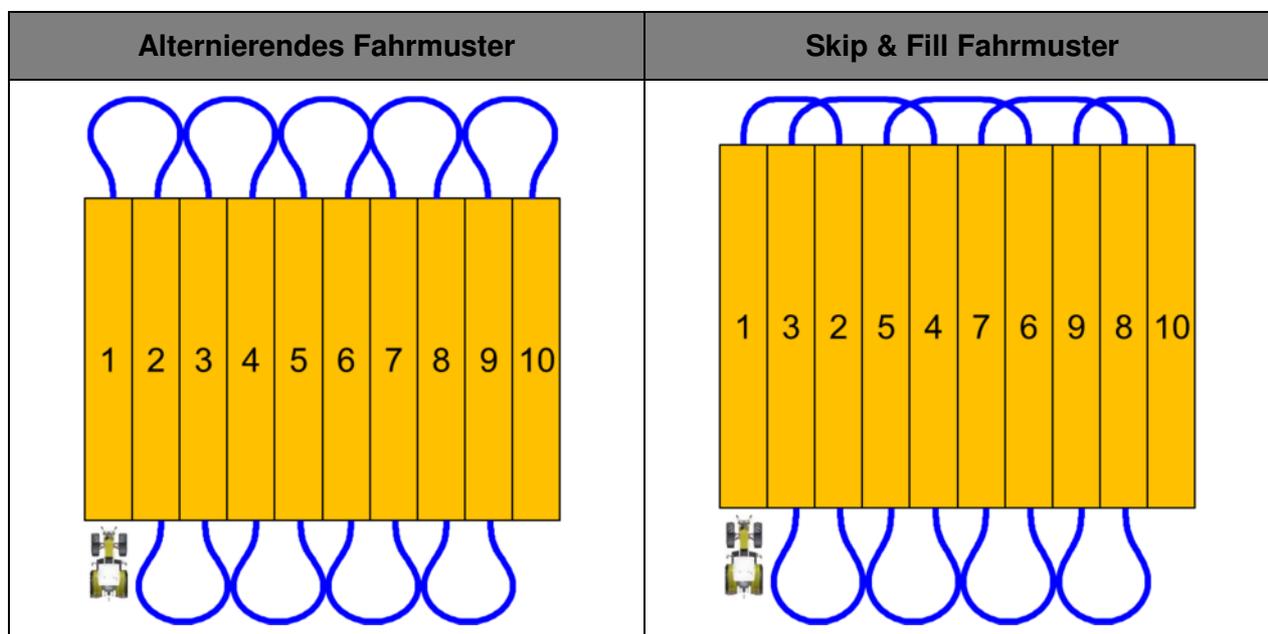
Abbildung 72: Vergleich zweier Fahrmodi auf einem konturförmigen Feld; links: 14029 m Routenlänge mit 1,2 h Arbeitszeit; rechts: 13584 m Routenlänge mit 0,918 h Arbeitszeit

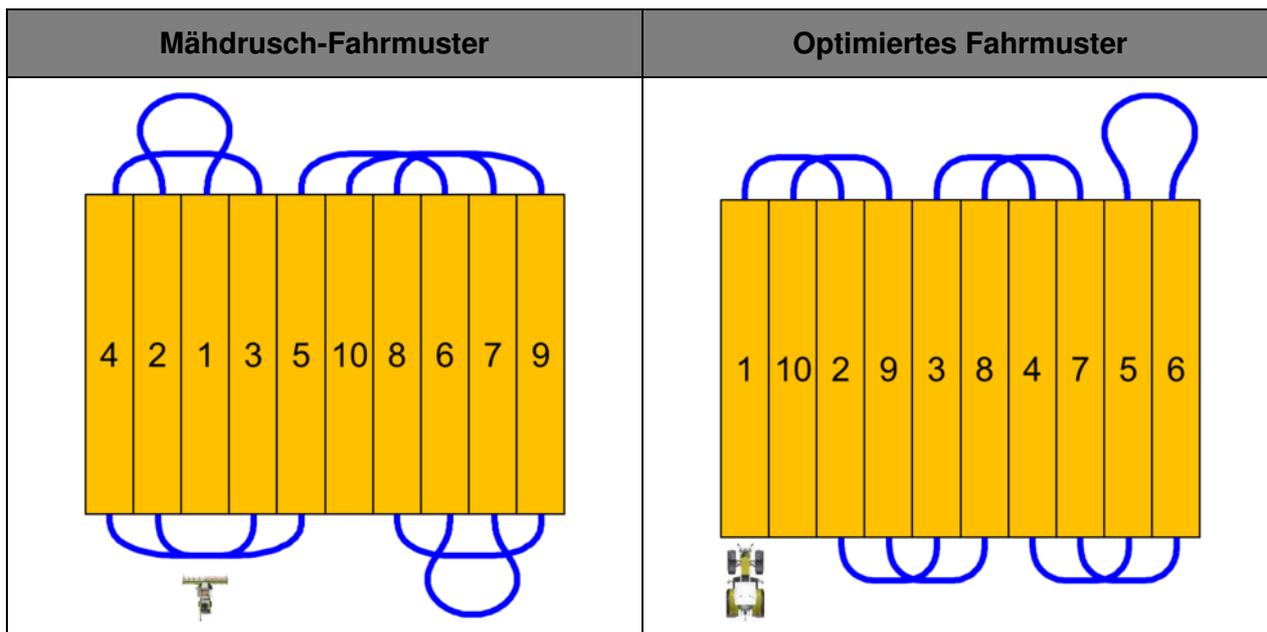
### 4.3 Optimierungspotential durch Fahrstrategieplanung

Neben der Optimierung der Fahrspurlängen auf dem Feld soll auch die Optimierung der Spurreihenfolge betrachtet werden. Dazu werden einige übliche Fahrmuster aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Wendeweglänge untersucht. Es sollen verschiedene Fahrmuster für zehn parallele Fahrspuren mit einer Arbeitsbreite von sechs Metern untersucht werden. Die untersuchten Fahrmuster sind:

- Das erste Muster wird alternierend vom linken Rand in Abfolge zur rechten Seite abgearbeitet.
- Das zweite Fahrmuster kann mit Lenksystemunterstützung gefahren werden (John Deere, 2015). Es wird eine benachbarte Fahrspur übersprungen, im Anschluss wird die ausgelassene Spur abgearbeitet, woher der Name „Skip and Fill“ rührt.
- Das dritte Fahrmuster findet beim Mähdrusch Verwendung, um möglichst oft das Überladen des Getreides auf ein seitlich fahrendes Fahrzeug zu ermöglichen.
- Als Letztes wird das - durch die in Kapitel 3.5.2 vorgestellte Methode - optimierte Fahrmuster untersucht. Tabelle 6 zeigt die verschiedenen Fahrmuster.

Tabelle 6: Vergleich diverser Fahrmuster





Mithilfe der in Kapitel 3.6 vorgestellten Pfadplanung sollen für ein typisches Fahrzeug mit den Parametern Geschwindigkeit 15 km h<sup>-1</sup>, einer Lenkzeit von zwei Sekunden und einem minimalen Wenderadius von sechs Metern angenommen werden. Abbildung 45 zeigt die einzelnen Wendewege (blau) für diverse Wendemanöver. Sie werden im Folgenden verwendet, um die Gesamtwendeweglängen in Tabelle 7 abzuschätzen. Das optimierte Fahrmuster kann eine Gesamtwendeweglänge von 302,15 m realisieren. Mit einer Wendewegverlängerung von 36,18 % schneidet das Mähdrescher-Fahrmuster mit 411,47 m als zweitbestes Verfahren ab. Allerdings ist der Vorteil zu berücksichtigen, dass länger während der Fahrt abgeladen werden kann als bei dem optimierten Verfahren. Das Verfahren „Skip and Fill“ schließt mit einem Mehraufwand gegenüber dem optimierten Verfahren von 45,41 % ab, was einer Gesamtwendeweglänge von 439,35 m entspricht. Das alternierende Fahrmuster schließt am schlechtesten mit einer Wendeweglänge von 474,9 m ab, was gegenüber dem optimierten Fahrmuster einen Mehraufwand von 57,17 % bedeutet.

Tabelle 7: Ergebnisvergleich diverser Fahrmuster

| Fahrmuster    | Reihenfolge         | Wendeweglänge [m] | Mehraufwand (%) |
|---------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Alternierend  | 0-1-2-3-4-5-6-7-8-9 | 474,9             | 57,17           |
| Skip & Fill   | 0-2-1-4-3-6-5-8-7-9 | 439,35            | 45,41           |
| MD-Fahrmuster | 2-1-3-0-4-7-8-6-9-5 | 411,47            | 36,18           |
| Optimal       | 0-2-4-6-8-9-7-5-3-1 | 302,15            | 0               |

#### 4.4 Pfadplanungsergebnisse

Sobald das Fahrzeug von der Spur in die Vorgewendefläche fährt, soll eine automatische Wende geplant und gefahren werden. Es muss geprüft werden, ob die generierten Pfade den Maschinenrestriktionen bzgl. Kinematik gehorchen. Wegen der Vielzahl an vorgestellten Pfadplanungsmanövern (Kapitel 3.6.2) werden hier exemplarisch nur die Ergebnisse eines Omega-Wendemanövers hinsichtlich der Befahrbarkeit vorgestellt. Es wird das Wenden in eine benachbarte Spur untersucht. Die wichtigsten Parameter für eine Trajektorienbewertung sind die Krümmung sowie die Krümmungsänderung (Fraichard & Scheuer, 2004). Diese Parameter können ohne kinematisches Fahrzeugmodell und –simulation berechnet werden, sie sind ausschließlich von der Fahrspur abhängig. Zur Analyse werden ein kubischer Spline und die dafür übliche Krümmungsberechnung verwendet. Die Krümmungsänderung wird aus der zeitbezogenen Krümmung abgeleitet.

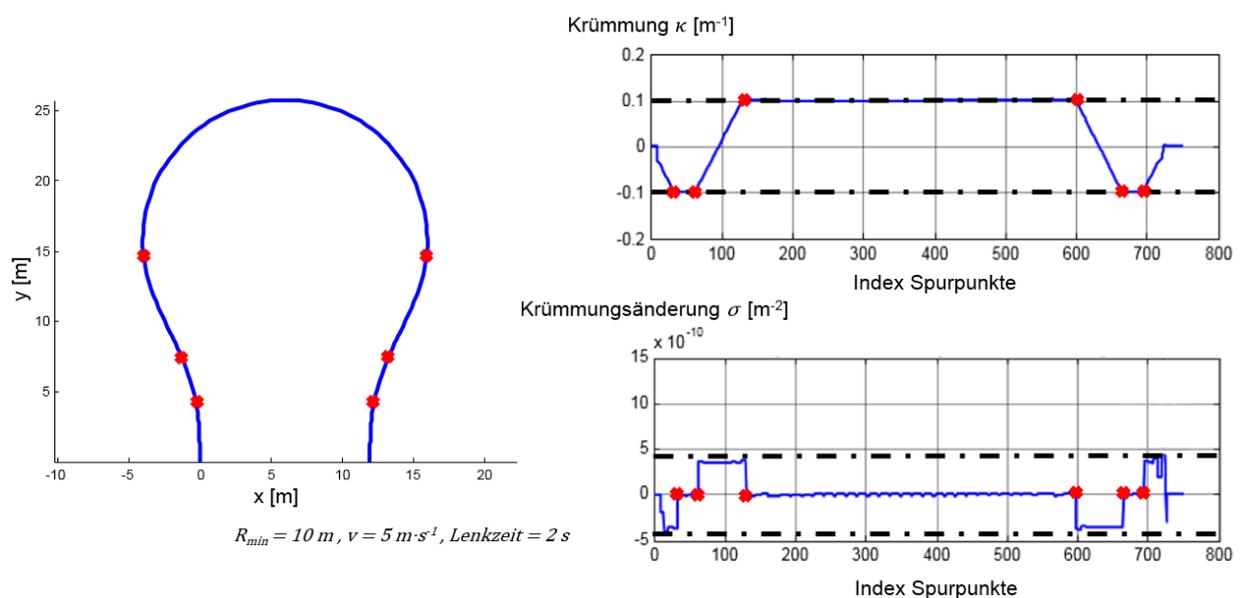


Abbildung 73: Darstellung der geplanten Trajektorie (links) und des Verlaufs der Krümmung und Krümmungsänderung (rechts)

In Abbildung 73 (rechts) ist zu sehen, dass sich die Krümmung und Krümmungsänderung, wie in Kapitel 3.6 vermutet, verhält. Die Krümmung bewegt sich im Bereich zwischen -0,1 und 0,1 m<sup>-1</sup>, was dem Kehrwert des angegebenen Radius von 10 m entspricht. Die Krümmungsänderung ist limitiert mit  $\sigma_{max} \approx 0,05 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Die Krümmung und Krümmungsänderung sind kontinuierlich und innerhalb der geforderten Grenzen. Es konnten also die Maschinenparameter eingehalten werden.

Die verschiedenen, möglichen Wendetypen werden im Folgenden untersucht. Im Hinblick auf die Vorgewendebreite werden zwei Typen mit der Restriktion des ausschließlich Vorwärtsfahrens miteinander verglichen - der Vorgewendebreite minimierende Wendetyp und die Omega-Wende. Die Pfade sind in Abbildung 74 dargestellt. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse für die Eingangsparameter Geschwindigkeit  $v = 6 \text{ km h}^{-1}$ , minimaler Wenderadius  $R = 6 \text{ m}$  und einer variablen Lenkgeschwindigkeit, auch Lock-To-Lock-Zeit (LTL) genannt, von  $LTL = 2 \dots 8 \text{ s}$ . Sowohl die Geschwindigkeits- als auch die Lenkgeschwindigkeitsänderung haben Einfluss auf die Länge der Klothoide (ausführlich erklärt in Kapitel 3.6.1), weshalb nur einer der beiden Größen variiert wird.

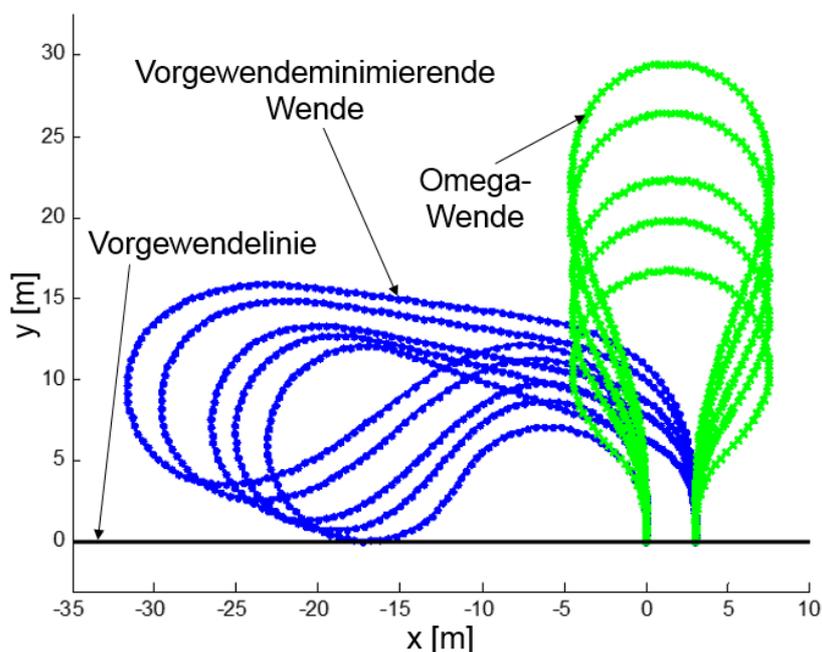


Abbildung 74: Vergleich der Vorgewendebreiten minimierende Wende (blau, Index 1) sowie der Omega-Wende (grün, Index 2)

Tabelle 8: Vorgewendebreitenvergleich verschiedener Eingangsparameter

| <b>V=6 km h<sup>-1</sup>,<br/>R=6 m</b>     | <b>LTL=<br/>2 s</b> | <b>LTL=<br/>4 s</b> | <b>LTL=<br/>6 s</b> | <b>LTL=<br/>8 s</b> | <b>LTL=<br/>10 s</b> |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Pfadlänge<sub>1</sub> [m]</b>            | 73,79               | 81,87               | 94,92               | 105,60              | 117,34               |
| <b>Pfadlänge<sub>2</sub> [m]</b>            | 42,9585             | 51,1286             | 63,74               | 74,17               | 84,87                |
| <b>ΔPfadlänge [m]</b>                       | 30,83               | 30,74               | 31,18               | 31,43               | 32,47                |
| <b>Vorgewendebreite<sub>1</sub><br/>[m]</b> | 12,35               | 13,33               | 15,84               | 17,96               | 20,36                |
| <b>Vorgewendebreite<sub>2</sub><br/>[m]</b> | 17,32               | 21,64               | 27,93               | 33,11               | 38,38                |
| <b>ΔVorgewendebreite [m]</b>                | 4,97                | 8,30                | 12,1                | 15,15               | 18,01                |

Tabelle 8 zeigt die berechneten Vorgewendebreiten sowie Pfadlängen für variierende Lock-To-Lock-Zeiten. Der Index 1 beschreibt das in Abbildung 74 blau dargestellte Vorgewendebreite minimierende Wendemanöver, der Index 2 beschreibt die grün gekennzeichnete Omega-Wende. Der Wendetyp 1 hat eine signifikant höhere Pfadlänge von 38 bis 72 %. Dagegen steht eine minimierte Vorgewendebreite von 40 bis 88 %.

Für eine Distanz  $d \geq 2 \cdot R \cdot \cos(\mu) + 2 \cdot \sqrt{R_{big}^2 - (R_{big} \cdot \cos(\mu))^2}$  wird ausschließlich der U-Turn als Wendetyp genutzt. Für das Wenden in Spuren mit kleinerem Spurbestand sind wiederum vier Wendetypen planbar (die Spezialtypen Vorgewendebreite minimierender Wendetyp sowie Gap-Turn werden nicht weiter betrachtet). Abbildung 75 zeigt die vier Manöver. Die drei betrachteten Ergebnisparameter sind die Fahrzeit, die Wendeweglänge und die benötigte Vorgewendebreite.

Um die Fahrzeit approximieren zu können, werden einige weitere Eingangsgrößen angenommen. Der Fishtail-Turn beinhaltet eine Verzögerung von 6 auf 0 km h<sup>-1</sup> sowie eine Beschleunigung von 0 auf 6 km h<sup>-1</sup>. Die Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecke müssen ermittelt werden und von der totalen Distanz abgezogen werden. Die restliche Distanz wird mit 6 km h<sup>-1</sup> befahren. Die folgenden Formeln zeigen noch einmal generell die Berechnung der Arbeitszeit.

$$\Delta v = v_{start} - v_{Stillstand} = 6 \text{ km h}^{-1} \quad [26]$$

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a_{Verzögerung}} = \frac{6 \text{ km h}^{-1}}{3,6 \cdot 1,5 \text{ m s}^{-2}} = 0,74 \text{ s} \quad [27]$$

$$l_{Verzögerung} = \frac{1}{2} \cdot a_{Verzögerung} \cdot \Delta t^2 = 0,4107 \text{ m} \quad [28]$$

$$l_{Fishtail} = l_{Fishtail} - 4 \cdot l_{Verzögerung} \quad [29]$$

$$t_{Fishtail} = \frac{l_{Fishtail}}{v} + 4 \cdot \Delta t \quad [30]$$

$$t_{lr,rlr} = \frac{l_{lr,rlr}}{v} \quad [31]$$

mit:

$a$  = Verzögerung,  $1,5 \text{ m s}^{-2}$

$v$  = Geschwindigkeit,  $6 \text{ km h}^{-1}$

$l$  = Weglänge, m

$t$  = Zeit, s

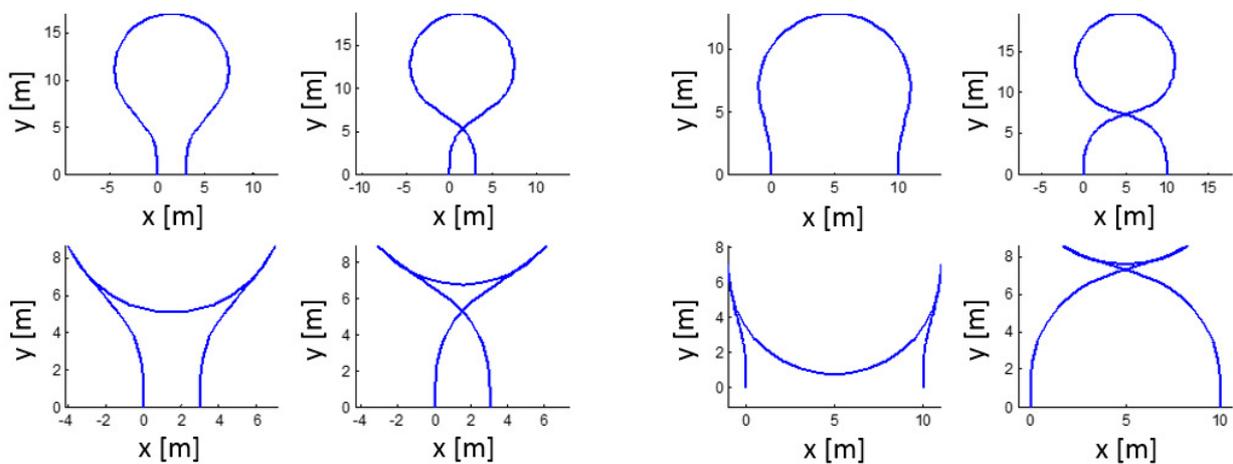


Abbildung 75: Vergleich der Wendetypen mit Abstand  $d = 3 \text{ m}$  und  $d = 10 \text{ m}$

Die Abbildung 75 zeigt die Fahrwege der zu untersuchenden Wendetypen. Beispielhaft ist das Wenden in eine drei Meter und eine zehn Meter benachbarte Spur untersucht worden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 zu sehen. Bei der kleineren Wendeweite von drei Metern hat der Fishtail-Turn die kürzeste Wendeweglänge, die kürzeste Wendezeit sowie die kleinste Vorgewendebreite. Jedoch ändert sich das Bild bei einem Wendeabstand von

zehn Metern. In diesem Fall hat die Omega-Wende den kürzesten Wendeweg und die kürzeste Arbeitszeit. Nur im Falle einer minimalen Vorgewendebreite ist der Fishtail-Turn weiterhin die beste Wahl.

Tabelle 9: Vergleich verschiedener Wendemanöver in eine drei Meter entfernte Spur

| <b>V=6 km h<sup>-1</sup>, R=6 m, Omega-Wende<br/>Abstand 3 m</b> | <b>Omega-Wende</b> | <b>Wende mit<br/>Windung</b> | <b>Fishtail-Turn<br/>mit Windung</b> | <b>Fishtail-Turn</b> |
|--|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| <b>Wendeweglänge [m]</b>   | 43,5145            | 50,2719                      | 33,51                                | 33,5093              |
| <b>Arbeitszeit [s]</b>   | 26,1035            | 30,1571                      | 22,5692                              | 22,5688              |
| <b>Vorgewendebreite [m]</b>                                      | 17,07              | 18,77                        | 8,913                                | 8,643                |

Tabelle 10: Vergleich verschiedener Wendemanöver in eine zehn Meter entfernte Spur

| <b>V=6 km h<sup>-1</sup>, R=6 m, Omega-Wende<br/>Abstand 10 m</b> | <b>Omega-Wende</b> | <b>Wende mit<br/>Windung</b> | <b>Fishtail-Turn mit<br/>Windung</b> | <b>Fishtail-Turn</b> |
|---|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| <b>Wendeweglänge [m]</b>  | 32,6717            | 57,3816                      | 33,5097                              | 33,5178              |
| <b>Arbeitszeit [s]</b>  | 19,5991            | 34,3816                      | 20,1018                              | 20,1067              |
| <b>Vorgewendebreite [m]</b>                                       | 12,58              | 19,58                        | 8,56                                 | 7,031                |

Im letzten Schritt werden der Einfluss eines Winkelunterschiedes zweier Spuren sowie ein lateraler und longitudinaler Versatz zwischen Start- und Endpunkt untersucht. Das Fahrzeug wird mit Standard-Maschinenparametern definiert, die Geschwindigkeit beträgt 15 km h<sup>-1</sup>, die Lock-To-Lock-Zeit vier Sekunden und der minimale Wenderadius ist sechs Meter. Eine Winkeldifferenz von -45° bis +45° soll untersucht werden. Abbildung 76 zeigt die Wendemanöver sowie die Fahrspurlängen in einem Histogramm. In diesem Vergleich soll nur die Wendeweglänge untersucht werden, da sich die Arbeitszeit je Wendetyp immer gleich berechnet. Wenn die Ausrichtung der Zielspur in Richtung der Startspur zeigt, wird die Weglänge verkürzt. Im Umkehrschluss führt ein Winkelunterschied < 180° dazu, dass der Gesamtwendeweg verlängert wird.

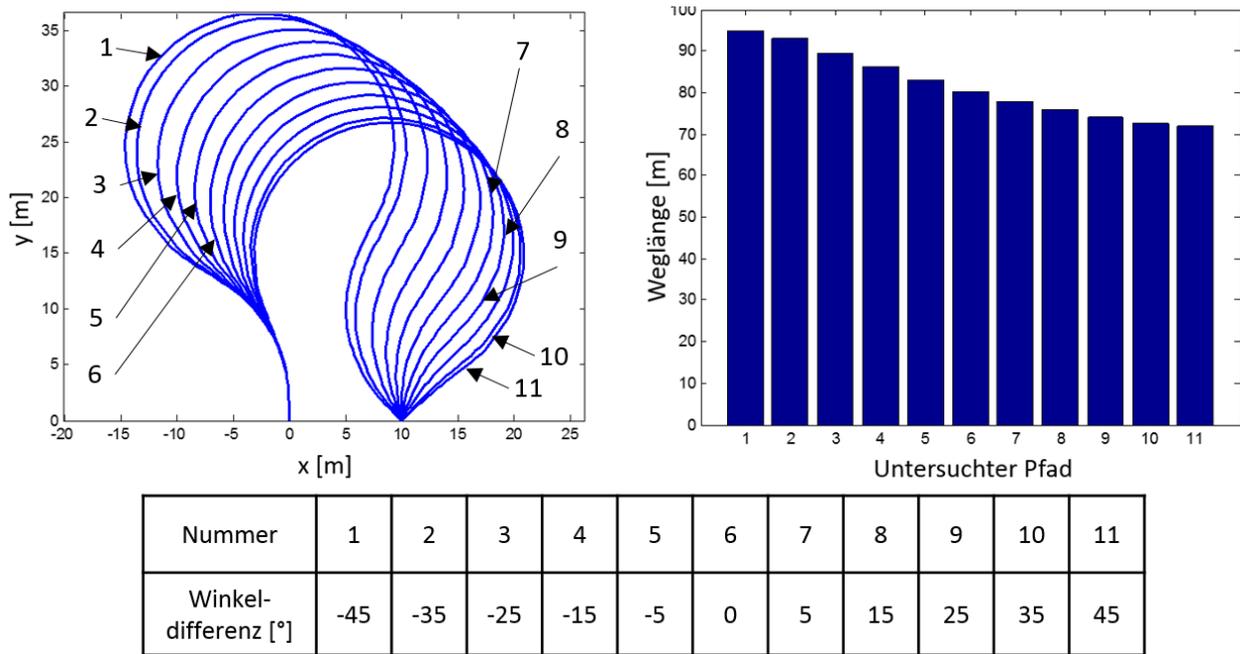


Abbildung 76: Wendewegvariationen mit variierendem Winkelunterschied (links) und dazugehörige Wendeweglängen (rechts)

Des Weiteren wird der longitudinale Versatz von -10 bis +10 Metern in einer Schrittweite von zwei Metern zwischen Start- und Endpunkt untersucht (Abbildung 77). Sowohl bei positivem als auch bei negativem Spurversatz kommt es zu einer Verlängerung des Wendeweges, die näherungsweise dem longitudinalen Versatz entspricht.

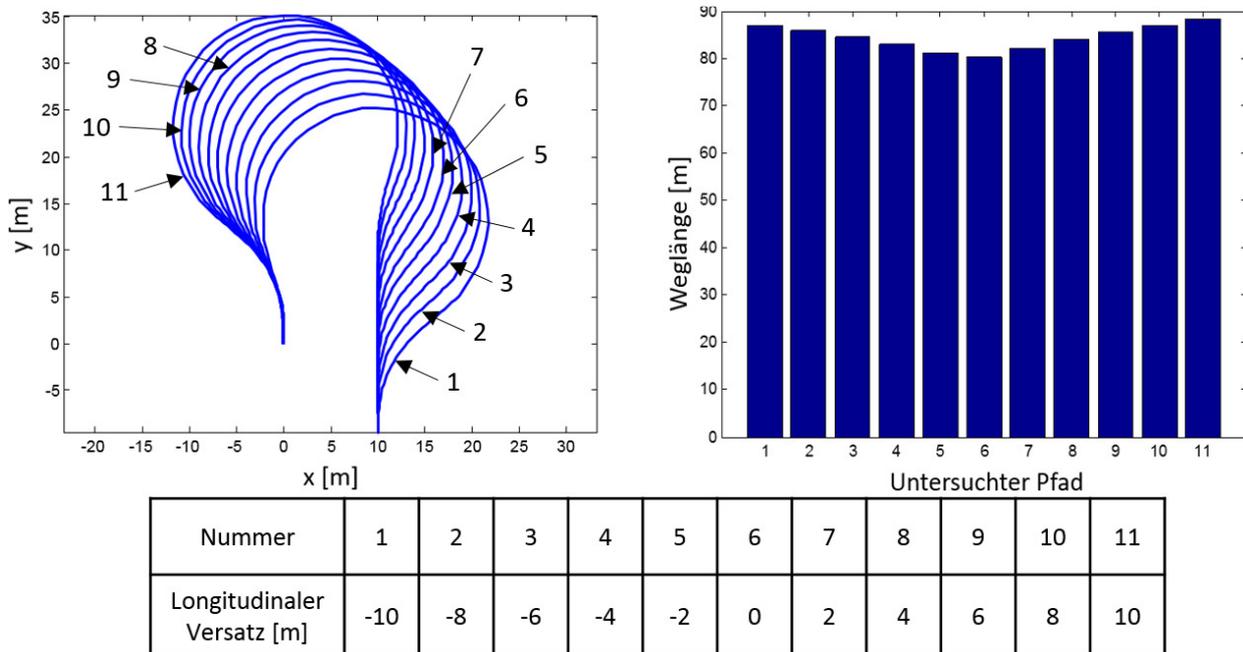


Abbildung 77: Wendewegvariationen mit variierendem longitudinalem Versatz (links) und dazugehörige Wendeweglängen (rechts)

In Kapitel 3.5.2 ist erläutert, dass die laterale Wendeweite ein wichtiges Indiz für die Weglänge ist. Abbildung 78 zeigt den Zusammenhang, es wird der laterale Versatz mit einer Weite von einem bis 35 Metern mit einer Schrittweite von einem Meter untersucht. Es kann in dem Histogramm gesehen werden, dass die kürzeste Weglänge mit 27 Metern durch den U-Turn (an der Grenze zum Gap-Turn) realisiert wird. Danach wird die Wendeweglänge um den lateralen Spurversatz verlängert. Die Omega-Wende hat eine hohe Weglänge, die mit dem Spurversatz von 47 auf circa 33 Meter abnimmt. Der Gap-Turn ist kürzer als die Omega-Wende und länger als der U-Turn. Er verhält sich unabhängig zum lateralen Spurversatz, die Weglänge liegt bei annähernd 30 Meter.

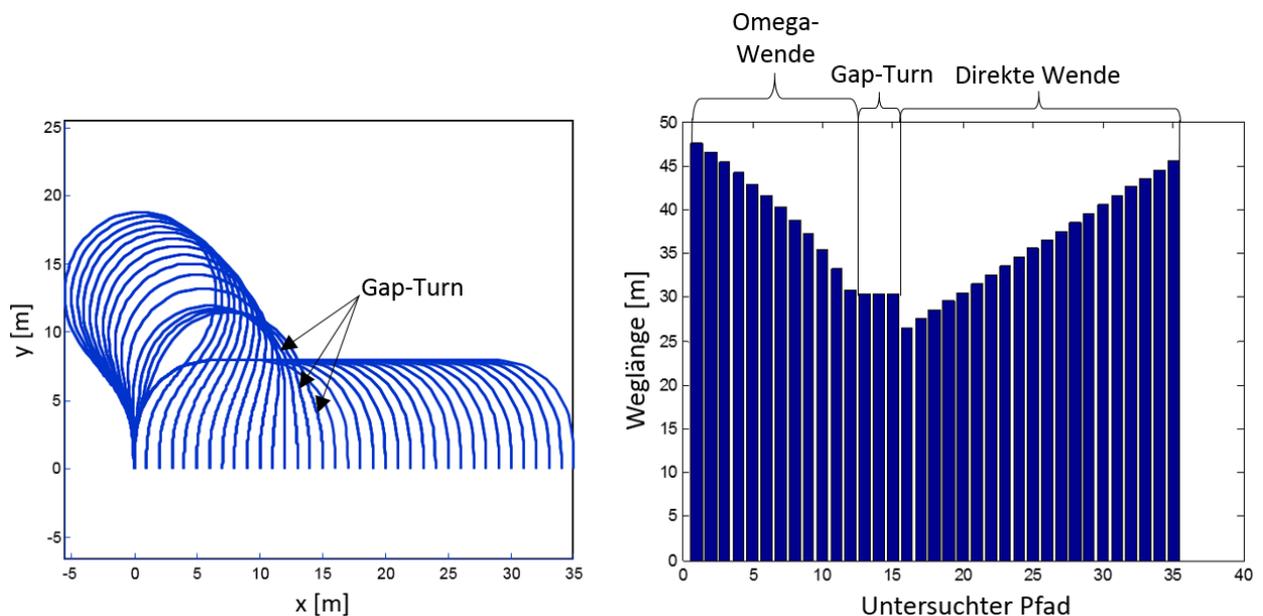


Abbildung 78: Wendewegvariationen mit variierendem lateralem Versatz (links) und dazugehörige Wendeweglängen (rechts)

#### 4.5 Berechnungszeiten

Neben dem Optimierungspotential einer Routen- und Spurplanung muss ebenfalls geprüft werden, ob die Methoden in akzeptabler Zeit Ergebnisse berechnen können. Dies ist deshalb wichtig, weil die Zielplattform ein Maschinenterminal - wie beispielsweise ein GNSS-Lenksystem - ist und dieses nur begrenzte Rechenressourcen zur Verfügung stellt. Die vier Module Feldteilung, Referenzlinienwahl, Spurerstellung und Sequenzberechnung werden im Folgenden einzeln untersucht. Abbildung 79 zeigt das Verhalten der Berechnungszeit zu der Anzahl an Polygonpunkten und der Feldfläche, das untersuchte Polygon ist die Feldgrenze. Es werden nochmals 100 Felder untersucht, um einen guten statistischen Mittelwert bilden zu können.

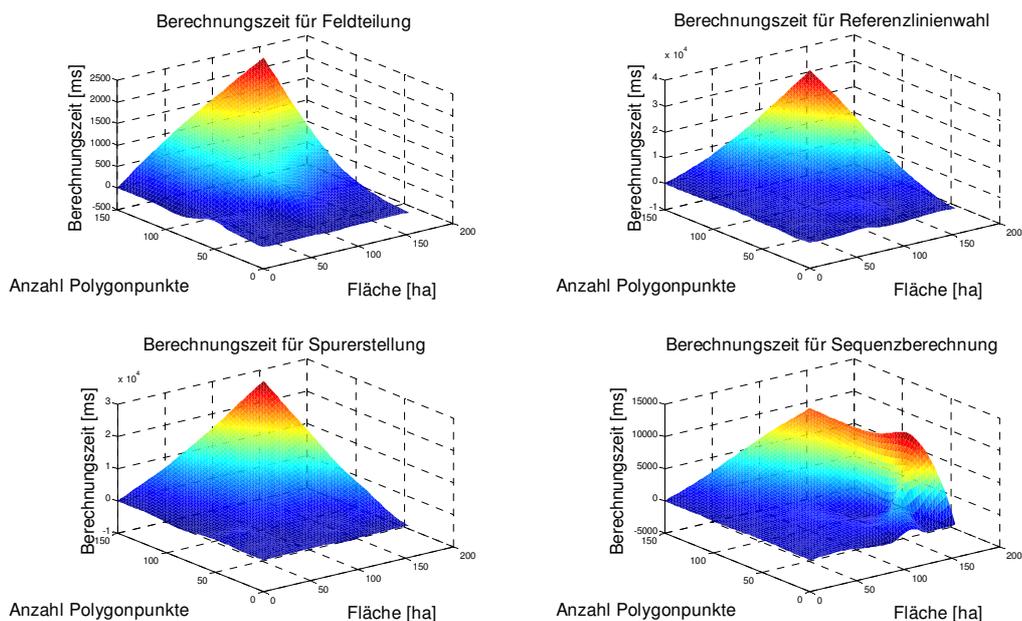


Abbildung 79: Darstellung des Verhältnisses von Polygonpunkten und Fläche zur Berechnungszeit

Aus Abbildung 79 wird ersichtlich, dass die Rechenzeit annähernd exponentiell mit der Anzahl an Polygonpunkten und der Feldfläche ansteigt. Die Feldteilung benötigt für einen 190 ha großen Schlag mit 120 Polygonpunkten ca.  $2 \cdot 10^3$  ms. Hier ist der Einfluss der Feldfläche kleiner als auf die weiteren Module. Dies basiert auf dem Verhalten der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methode, die die Feldteilung auf Basis der Geometrieform bestimmt. Die Methodik zur Referenzlinienwahl benötigt mehr Zeit, um ein Ergebnis zu liefern. Für einen Schlag von 190 ha mit 120 Polygonpunkten benötigt die Berechnung  $3 \cdot 10^4$  ms, was ca. der fünfzehnfachen Rechenzeit der Feldteilung entspricht. Auch die Spurerstellung benötigt für eine äquivalente Berechnung eine Zeit von  $2,75 \cdot 10^4$  ms. Die Sequenzberechnung ist unabhängig von der Anzahl der Polygonpunkte. Wie die in Kapitel 3.5 vorgestellte Methodik zeigt, ist keine Abhängigkeit von der Feldgrenze gegeben; es werden ausschließlich die Start- und Endpunkte der Fahrspuren verwendet, um die Strategie zu bestimmen. Für eine Fläche von 190 ha benötigt der Algorithmus  $0,9 - 1,1 \cdot 10^4$  ms.

Da die Berechnungszeit sowohl von Feldfläche als auch vom Grenzpolygon abhängt, soll eine neue Variable eingeführt werden (Gleichung 32):

$$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\text{Berechnungszeit}(i)}{\text{Fläche} \cdot \text{Anzahl Polygonpunkte}}}{n} \left[ \frac{\text{ms}}{\text{ha} \cdot \# \text{polygonpunkte}} \right] \quad [32]$$

Für die untersuchten Felder soll die Berechnungszeit in Relation zu der Fläche und den Feldgrenzpunkten dargestellt werden. Das Mittel über 100 untersuchte Felder wird in der Tabelle 11 dargestellt. Die Feldteilung benötigt 0,15 ms, um für einen Hektar und eine Feldgrenze mit einem Polygonpunkt einen Vorschlag zu berechnen. Die Spurerstellung sowie auch die Sequenzberechnung benötigen 0,9 ms pro ha und pro Grenzpolygonpunkt. Die Referenzlinienwahl beansprucht 1,14 ms pro ha und Grenzpolygonpunkt.

Tabelle 11: Gemittelte Rechenzeiten der eingeführten Module

| Modul           | Feldteilung | Ref.-Linienwahl | Spurerstellung | Sequenzberechnung |
|-----------------|-------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Rechenzeit [ms] | 0,15        | 1,14            | 0,9            | 0,9               |

#### 4.6 Statistische Schlaganalyse

Für das Fahrspur- und Routenplanungssystem sind eine Vielzahl Methoden vorgestellt worden. Jedoch werden nicht alle Eigenschaften – wie beispielsweise Hindernisse – in jedem Planungsschritt berücksichtigt. In einer statistischen Analyse sollen westeuropäische Schläge näher untersucht werden. Dadurch soll gezeigt werden, wie viele Schläge durch das vorgestellte Planungssystem optimiert werden. Die untersuchten Kriterien sind im Folgenden aufgelistet:

- Schlagteilung: Wie viele verschiedene Bearbeitungsrichtungen werden auf einem Schlag angewandt? Eine Schlagteilung beschreibt Feldbereiche, in denen je eine Bearbeitungsrichtung angewandt wird.
- Fahrmodus: Welcher Fahrmodus wird angewandt (AB-Gerade, Kontur)? Weiter wird der Einfluss der Hangneigung und der Schlaggrenze auf die Wahl des Fahrmodus betrachtet.
- Hindernisse: Wie oft tauchen Hindernisse im Schlag auf? Die Hindernisse sollen durch Form und Größe klassifiziert werden.
- Schlaggröße: Wie groß sind die Schläge deutscher Landwirte?

Um die genannten Kriterien zu ermitteln, werden Satellitenbilder genutzt. Die notwendigen Feldeigenschaften wie Fahrgassen, Hindernisse und Feldgrenzen können auf dem Fotomaterial erkannt werden. Die Schlaggrenzen sind ebenfalls eindeutig identifizierbar. Für 13 deutsche Bundesländer (Berlin, Bremen und Hamburg werden ausgeschlossen) werden je hundert Felder ausgewählt. Die Auswahl erfolgt zufällig und über die gesamte Landesfläche verteilt. Die Koordinaten werden mithilfe der universalen Merkatorprojektion und den Bessel-

Ellipsoiden in ein kartesisches Koordinatensystem mit Meterindex überführt. So kann die Fläche mithilfe der Gaußschen Trapezformel bestimmt werden.

Die Fläche soll nicht nur allgemein einen Überblick über die Größe der Felder geben. Es sollen die weiteren Untersuchungen schlagbezogen, aber auch flächenbezogen aufgezeigt werden können. Es gibt zwar bereits Informationen über die Größe der Betriebe in Deutschland (Deutscher Bauernverband, 2015), jedoch werden die Schläge eines Betriebes zusammengefasst und nicht die Einzelfläche jedes Schlages betrachtet.

Das folgende Diagramm zeigt die ermittelten Feldflächen. Die durchschnittliche Größe eines Schlages in Westdeutschland beträgt 5,13 ha, die kleinsten Felder sind mit 2,74 ha in Bayern aufzufinden. Die Feldgrößen der Bundesländer Westdeutschlands variieren von 3,11 ha bis 10,91 ha in Schleswig-Holstein. Werden nur die ostdeutschen Felder betrachtet, so ergibt sich ein anderes Bild. Die durchschnittliche Größe eines ostdeutschen Schlages beträgt 41,42 ha, also 36,29 ha größer als das durchschnittliche Feld Westdeutschlands.

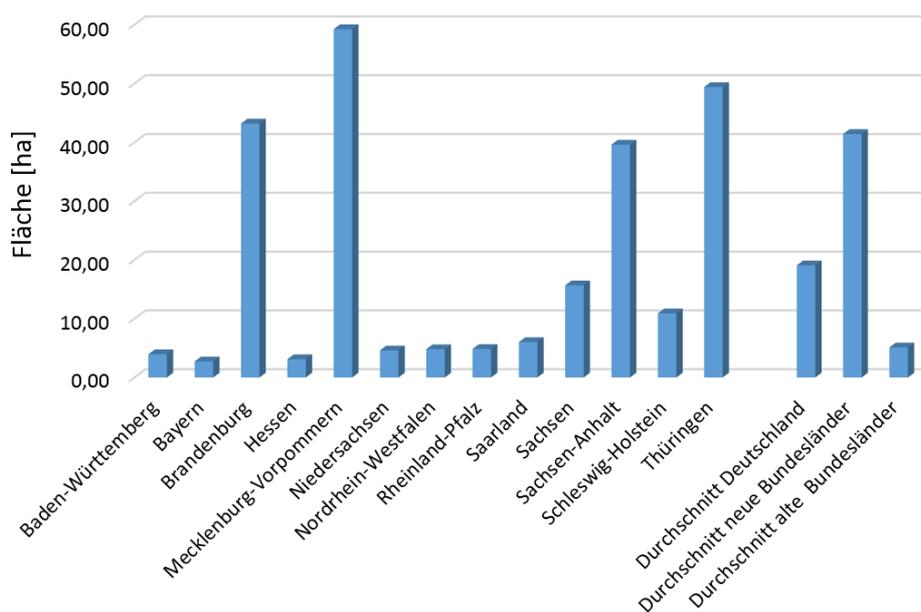


Abbildung 80: Schlaggröße in Hektar nach Bundesländern

Automatische Lenksysteme können nicht nur das Fahrzeug auf der Spur führen, es können auch Sollspuren geplant werden. Dabei werden diverse reale Fahrstrategien durch die Fahrmodi AB-Linie für Geraden, Pivot-Modus für die Kreisfahrbahn der Bewässerungswirtschaft und der Konturfahrmodus für das Abfahren komplexer kurvenförmiger Spuren abgebildet. Abbildung 81 zeigt die Häufigkeit der Fahrmodi von ca. 1300 untersuchten Feldern. Der überwiegend genutzte Fahrmodus ist die AB-Linie mit 91,4 %. Nur in Bayern und dem Saarland ist ein Anteil an Konturen von mehr als 20 % zu sehen. Während im Westen

11,88 % aller Felder per Kontur bearbeitet werden, sind es in den neuen Bundesländern nur 3,42 %. Die angegebenen Prozentzahlen sind auf die Anzahl an Schlägen bezogen. Es macht jedoch in diesem Kontext Sinn, die ermittelten Werte auch auf die Flächengrößen zu beziehen. In diesem Kontext werden 96,55 % der in Deutschland bearbeiteten Fläche mit geradlinigen Spuren abgefahren. Weiter wird geprüft, weshalb die Bundesländer Saarland und Bayern einen deutlich höheren Anteil an Konturen aufweisen als in den anderen Bundesländern. Ein plausibler Grund stellt das hangparallele Bearbeiten von steigungsintensiven Feldern dar. Mithilfe öffentlich zugänglicher SRTM-Daten wurden topographische Karten der Felder erstellt. Das Ergebnis zeigt, dass 37,78 % der Felder mit konturförmigen Fahrspuren parallel zu Höhenlinien bearbeitet werden. 57,78 dieser Felder haben konturförmige Fahrspuren, die parallel zu Segmenten der Feldgrenze liegen. 4,5 % dieser Felder können nicht eingeordnet werden.

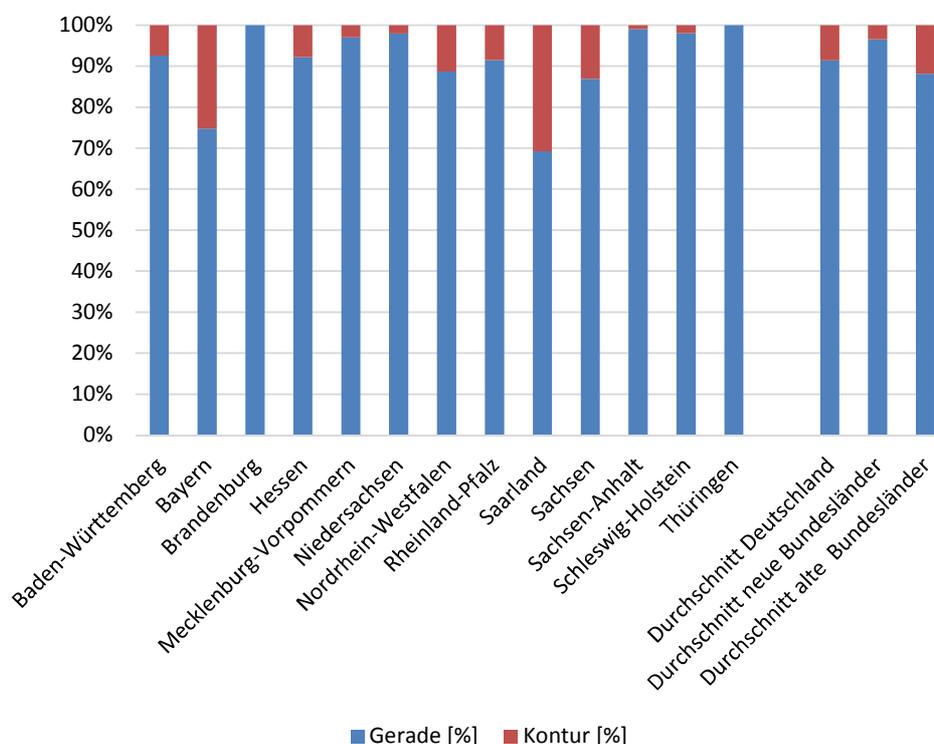


Abbildung 81: Fahrmodi-Untersuchung nach Bundesländern

Aufgrund der Feldform kann es Sinn machen, verschiedene Feldbereiche zu definieren, in denen jeweils eine Bearbeitungsrichtung angewandt wird. Diese Unterteilung von Feldern soll untersucht werden, Abbildung 82 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. 7,16 % der Schläge Westdeutschlands werden von Landwirten getrennt. In Ostdeutschland werden 7,91 % der Schläge unterteilt. Hier ist die Differenz klein, sodass der bundesdeutsche Durchschnitt bei 7,45 % liegt. Wird geprüft, wieviel Fläche – und nicht wie viele Schläge - prozentual getrennt

werden, kommt man zu dem Ergebnis, dass 8,4 % der untersuchten Fläche unterteilt werden. Es kann somit kein nennenswerter Zusammenhang zwischen Feldgröße und Feldeinteilung erschlossen werden.

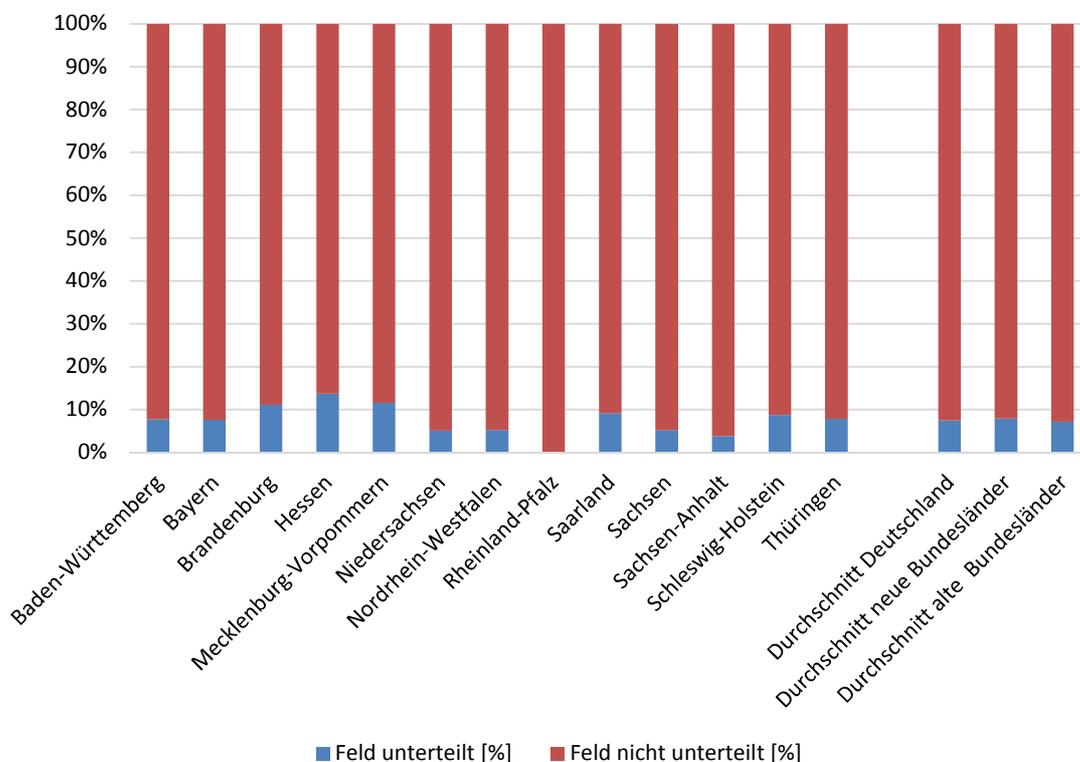


Abbildung 82: Unterteilung von Schlägen nach Bundesländern

Zuletzt soll untersucht werden, wie viele der untersuchten Felder innenliegende, nicht zur bearbeitenden Fläche gehörende Feldteile haben. Dazu werden diese inneren Feldgrenzen noch weiter klassifiziert. Die erste Klasse beinhaltet die punktförmige innere Feldgrenze wie beispielsweise Strommasten oder Windmühlen. Diese Feldgrenzen haben keinen signifikanten Einfluss auf die Bearbeitungsrichtung und die Feldteilung. Große innere Feldgrenzen, die auch schon für die Feldteilung und die Wahl der Bearbeitungsrichtung eine große Rolle spielen, stellen die zweite Gruppe dar. Eine dritte Gruppe betrachtet Wege oder Baumreihen, die in das Feld hineinragen. Die Untersuchung hat gezeigt, dass 81 % der untersuchten Schläge keine inneren Feldgrenzen haben. 14 % beinhalten kleine Feldgrenzen und 2 % große Feldgrenzen. Nur 3 % der Felder zeigen weg- oder streifenförmige innere Feldgrenzen auf. Flächenbezogen wird die Statistik entzerrt. 68,23 % der untersuchten Fläche beinhalten keine inneren Feldgrenzen, 21,92 % weisen kleine Feldgrenzen auf. 6,13 % der Fläche ist durch wegförmige innere Feldgrenzen gekennzeichnet, 3,72 % durch große Feldgrenzen.

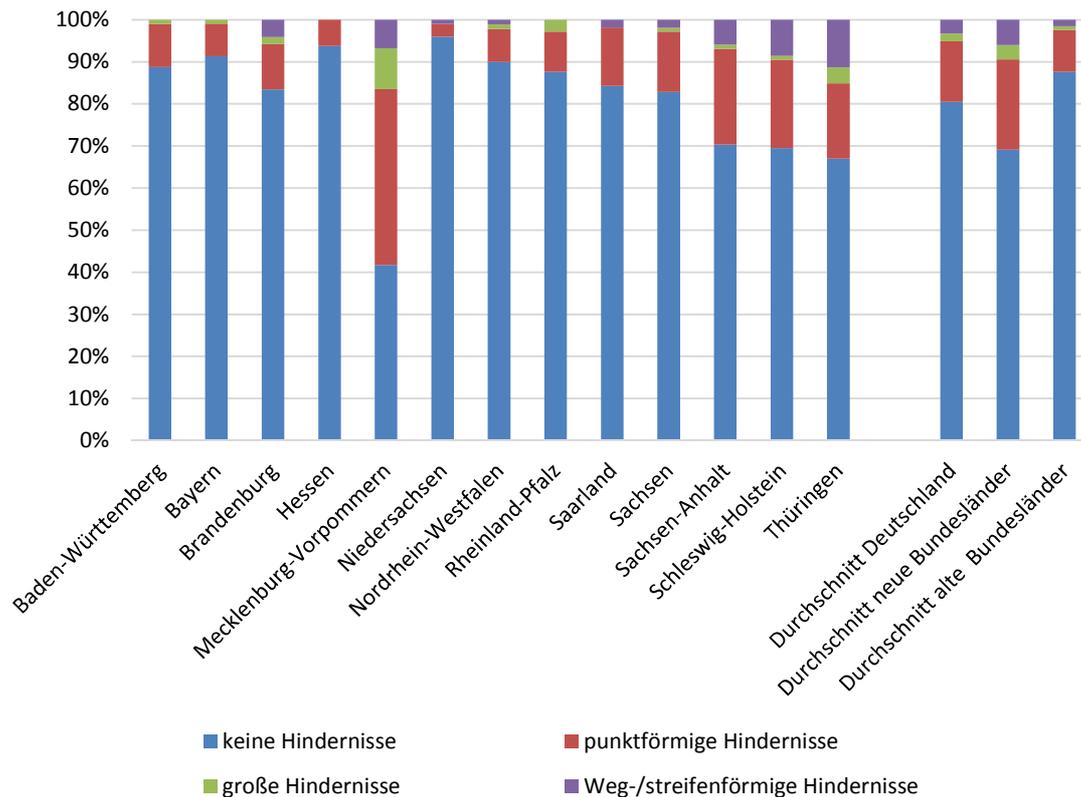


Abbildung 83: Untersuchung zu inneren Feldgrenzen

Die Statistik zeigt, dass es zwischen west- und ostdeutschen Feldern große Unterschiede gibt. Ostdeutsche Schläge sind im Durchschnitt neunfach größer als die westdeutschen Schläge. Der Großteil der Schläge ist mit Geraden abgearbeitet worden. Vor allem große Schläge werden eher mit AB-Linien gefahren. Kleine Schläge werden weitestgehend mit AB-Linien bearbeitet. Allerdings wird mit konturförmigen Fahrspuren gearbeitet, wenn es die Schlagform oder das Höhenrelief erfordert. Die Unterteilung eines Schlages kann nicht aus der Größe eines Feldes abgeleitet werden.

In der Abbildung 84 werden alle nötigen Module einer nicht-kapazitiven Feldbearbeitung aufgezeigt. Die vorher beschriebenen Eigenschaften, die das Feld charakterisieren, sollen nun im Hinblick der vier Vorplanungsmodule Feldteilung, Referenzlinienwahl, Spurerstellung und Sequenzberechnung betrachtet oder ausgeblendet werden. Die ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten werden genutzt, um aufzuzeigen, wie viele der Schläge mit den vorgestellten Methoden vorgeplant werden können.

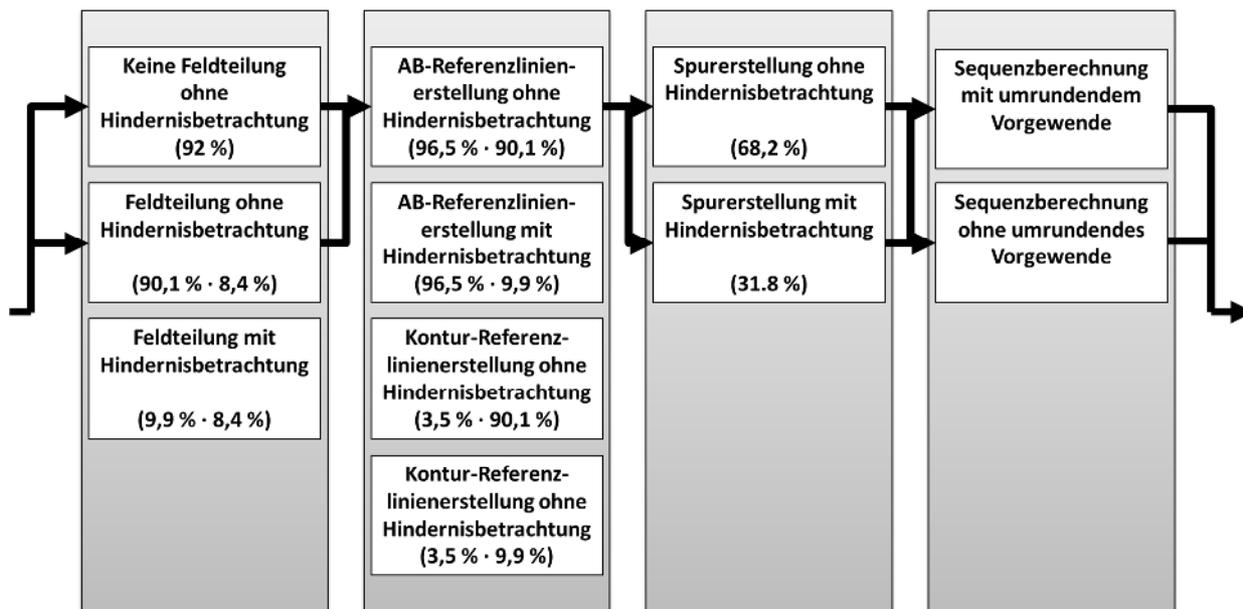


Abbildung 84: Umgesetzte Module (mit Angabe der Wahrscheinlichkeiten)

Durch die Routenplanung eines Feldes mit AB-Linien ohne Feldeinteilung und ohne die Betrachtung von inneren Feldgrenzen können 54,32 % der vorgefundenen Felder mithilfe des Planungssystems vorberechnet werden. Kommt nun noch das Modul Feldteilung hinzu, können 58,81 % der Felder geplant werden. Punktförmige innere Feldgrenzen haben keinen Einfluss auf die Feldeinteilung bzw. Referenzliniensuche, sondern müssen ausschließlich bei der Spurerstellung berücksichtigt werden. Wird auch die Spurerstellung unter Berücksichtigung der inneren Feldgrenzen ausgeführt, können 86,22 % der geprüften Felder vorgeplant werden. Die Erweiterungen sollen als Pakete für nicht-kapazitive Feldoperationen mit absteigendem Einfluss noch einmal aufgelistet werden:

1. Berücksichtigung von AB-Linien (54,32 % aller Fälle abgedeckt)
2. Berücksichtigung punkt- und wegförmiger innerer Feldgrenzen (79,64 % aller Fälle abgedeckt)
3. Feldteilung (86,22 % aller Fälle abgedeckt)
4. Berücksichtigung großer innerer Feldgrenzen, die Einfluss auf Bearbeitungsrichtung und Feldteilung haben (96,55 % aller Fälle abgedeckt)
5. Berücksichtigung von AB-Konturen (100 % aller Fälle abgedeckt)

Durch die implementierten und in Kapitel 3 vorgestellten Methoden kann somit eine Abdeckung von 86,22 % aller Felder erreicht werden.

## 5 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit ist ein teilautonomer Roboter auf Basis eines GNSS-Lenkensystems, welches die Aufgaben des GNSS-Empfanges und der automatischen Spurführung übernimmt, vorgestellt worden. Bis dato sind nur vollautonome Agrarroboter in Forschungsprojekten aufgebaut oder einzelne Optimierungsprobleme modelliert worden. Das vorgestellte System gliedert sich in eine Vorplanung und eine dynamische Planung während der Feldoperation. Jede Methode ist mit klaren Schnittstellen als Modul aufgebaut worden, sodass der Landwirt jeden durch die Methoden geplanten Schritt nachträglich ändern kann. Dies ist für die Anwenderakzeptanz wichtig, da Einflüsse wie Drainageleitungen nicht in einer Optimierung berücksichtigt werden können. Auch das jederzeitige Eingreifen in das Abfahren der Feldstrategie ist durch das Lenksystem gegeben, eine Planneuberechnung wird bei Abweichung angestoßen. Eine weitere wichtige Neuerung ist die Betrachtung einer Fahrspur- und Routenplanung als Kompromiss zwischen minimaler Rechenzeit und Optimierung. Die Sequenzberechnung konnte bereits als Optimierungsproblem formuliert werden (Burger et al., 2014), jedoch konnte in dieser Arbeit der Rechenaufwand mit einer neuen Graphenmodellierung minimiert werden. Die Arbeitszeit ist als Optimierungskriterium identifiziert worden. Dies ist für die Sequenzberechnung nicht neu (Bochtis & Sorensen, 2010), allerdings gibt es aus Forschung und Wissenschaft nur wenige Beiträge zur Arbeitszeitsimulation landwirtschaftlicher Operationen auf Basis einer Feldgrenze und der eingesetzten Maschine (Kübler & Pickel, 2006). In dieser Arbeit wurde die Arbeitszeit zur Vorplanung optimaler Spuren genutzt. Die aus der Wissenschaft bekannten Verfahren zum Vorplanen der Fahrspuren basieren auf abstrakten Kostenfunktionen (Jin, 2009) (Oksanen, 2007) oder überlassen dies dem Anwender mithilfe einer Benutzerschnittstelle (Brunnert, 2006), (Scheuren, 2014).

Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden sollen im Kontext anderer wissenschaftlicher Arbeiten beleuchtet werden. Zu Beginn wird eine Methode vorgestellt, die eine Feldgrenze aufzeichnet. Mittels Schnittpunktsuche und Simplifikation wird eine aufgezeichnete Spur so nachbearbeitet, dass ein feldumrundendes Polygon ohne Selbstüberschneidungen entsteht. Diese Methode kann für jegliche Feldoperation angewandt werden. Jedoch kann das Überschneiden von Start- und Endaufzeichnung dazu führen, dass das korrekte Polygon nicht einwandfrei identifiziert wird. Die Methodik des Filterns einer Feldgrenze gehört zum Stand der Technik. Bei neuen Generationen von Lenksystemen mit Wendeautomation an der Feldgrenze wird eine aufgezeichnete Feldumrundung nachbearbeitet und beim Überfahren beispielsweise als Auslöser für automatisches Wenden verwendet. In der Wissenschaft wird dieses Thema

ebenfalls beleuchtet. Jin (2009) simplifiziert die aufgezeichnete Grenze mittels Douglas-Peucker Algorithmus. Dadurch kann er die Punktemenge reduzieren, allerdings sind Nebeneffekte wie zum Beispiel das Anschlussfahren in eine neue Richtung mit mehrmaligem Umsetzen des Fahrzeugs nicht berücksichtigt worden. Dies ist in der praktischen Anwendung nicht zu verhindern, sodass seine Methode nicht in einem Planungssystem eingesetzt werden kann. Scheuren (2014) zeigte ein anderes Konzept. Die Besonderheit des Mähdrusches ist das sogenannte Freischneiden des Feldes, also das Abarbeiten des Vorgewendes vor dem eigentlichen Feldbearbeiten. Dieses wurde aufgezeichnet, das entstandene umschlossene Polygon beschrieb den durch das Planungssystem noch zu bearbeitenden Teil. Dies kann im Mähdrusch angewandt werden und konnte im Feldeinsatz verifiziert werden. Für die weiteren Operationen wie beispielsweise die Saat ist das Verfahren nicht anwendbar.

Die vorgestellte Feldteilung ist in dieser Form noch nicht bekannt und wurde patentiert. Auch für komplexe Feldgrenzen ist in annehmbarer Zeit - in wenigen Millisekunden - eine agronomisch sinnvolle Teilung erzeugt worden. Allerdings zeigt die statistische Analyse, dass nur wenige deutsche Schlagformen überhaupt erst eine Teilung nötig machen. In Skandinavien müssen hingegen eine Vielzahl der Felder unterteilt werden (Oksanen 2007). Er verwendet eine Feldteilung basierend auf zellulärer Dekomposition. Die Trennrichtung war für alle Schnitte gleich und variiert nicht für die weiter unterteilten Bereiche. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da die abgetrennten Teilfeldformen neue Anforderungen an weitere Trennschnitte stellen. Im Gegensatz dazu kann die in dieser Arbeit vorgestellte Methode die Form des untersuchten Teilfelds berücksichtigen. Die simple Berechnung verursacht nur geringen Zeitaufwand, sodass in kurzer Zeit ein Ergebnis erzielt werden konnte. Jin (2010) stellte eine weitere Methode des Unterteilens vor. Akzeptable Ergebnisse konnten berechnet werden und Hindernisse wurden - im Gegensatz zu der in dieser Arbeit vorgestellten Methode - berücksichtigt. Allerdings war die Berechnung sehr zeitintensiv und somit ist der Einsatz im Umfeld eines Maschinenterminals nicht möglich. Choudhury und Singh (2009) konnten agronomisch sinnvolle Feldbereiche definieren. Wegen des hohen Rechenaufwandes ist das System jedoch nur als Vorplanungswerkzeug auf dem Hof-PC anzuwenden. (Kondekar, 2011) verwendet als Unterteilungskriterium ebenfalls konkave Kanten. Allerdings liefert der Trennschnitt zwischen zwei nicht bekannten konkaven Kanten keine agronomisch sinnvollen Trennschnitte.

Ebenfalls war die automatische Referenzliniengenerierung in dieser Form noch nicht bekannt. Der Vorgang des Generierens von Linienkandidaten aus der Feldgrenze, das Abschätzen der Arbeitszeiten und die Auswahl des Minimums wurden patentiert. Die in vielen Arbeiten verwendete Regel „die längste Kante gilt als beste Richtung“ (Oksanen, 2007) konnte anhand

diverser Beispiele widerlegt werden. Deshalb wurde ein Arbeitszeitmodell modelliert und mittels Realdaten verifiziert. Somit konnte mit vorgegebener Referenzlinie eine Arbeitszeit approximiert werden und durch Generieren solcher Referenzlinienkandidaten aus der Feldgrenze ein arbeitszeitminimales Fahrspurmuster bestimmt werden. Einflüsse bedingt durch das Höhenrelief konnten nicht, Maschinenparameter jedoch konnten berücksichtigt werden. Scheuren (2014) und Brunnert (2006) zeigten eine manuelle Referenzlinienwahl auf. Die Referenzlinien-Kandidaten wurden aus der Feldgrenze generiert, somit war die Auswahl identisch zu der in dieser Arbeit gezeigten Methodik. Auch Jin (2009) beschäftigte sich mit der automatischen Bestimmung der Referenzlinie. Mithilfe einer abstrakten Kostenfunktion wurde in einer rekursiven Suche ein Vorschlag gefunden. Es konnten sehr gute Ergebnisse ermittelt werden, allerdings war der Rechenaufwand hoch und die Methode ist nicht während einer Feldoperation einsetzbar. Basierend auf einer Schlaganalyse zeigte Oksanen (2007) eine Kostenfunktion und bestimmte somit geradenförmige Referenzlinien, die nahe am Arbeitszeitminimum lagen.

Auch die Methodik des Spurerzeugens von Vorgewende- und Feldfahrspuren wurde patentiert. Mittels der vorher automatisch oder manuell bestimmten Teilfelder und Referenzlinien kann das Feld komplett abgedeckt werden. Es gibt keine Betrachtung des Höhenreliefs, also wird der Hangeinfluss nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten wird auf den Einsatz von Open-Source-Quellcode verzichtet. Dadurch kann ein Mehraufwand ausgeschlossen und die Rechenzeit minimiert werden. Jin (2009), Scheuren (2014) und Brunnert (2006) planen ebenfalls Fahrspuren, allerdings vernachlässigen sie die Vorgewendespuren und -flächen. Nur Oksanen (2007) plant ein feldumrundendes Vorgewende, vernachlässigt dabei jedoch die praktische Anwendbarkeit. Es konnten nicht immer alle Fahrspuren angefahren werden, ohne beispielsweise bei der Ernte über den Bestand zu fahren. Dies konnte durch das hier verwendete Teilfeld umrundende Vorgewende sichergestellt werden. Die vorgestellte Methode betrachtet nicht das Höhenrelief für die Spurplanung. Dies ist ein Vorteil in Jins (2009) Verfahren, welches anhand eines digitalen 3D-Modells Fahrspuren ermittelt. Hameed et al. (2010) konnten Fahrspuren unter Berücksichtigung von Wendeflächen erstellen. Die Erstellung zur Feldgrenze paralleler Spuren verursacht Teilfelder und die Ergebnisse sind agronomisch sinnvoll. Allerdings werden immer konturförmige Fahrspuren erstellt. Dies ist für einige Operationen – Kartoffelanbau beispielsweise – nicht zulässig.

In der Planberechnung auf dem Feld gibt es diverse Optimierungspotentiale. Die vorgestellte Arbeit zeigt einen Ansatz, der ein Wendzeit minimales, freies Fahrspurmuster mit den Methoden des Operations Research plant. Dies ist allerdings nicht für den Mähdrusch zulässig, da das Abtanken zur linken Seite muss hierbei berücksichtigt werden.

Zuerst wird eine Reihenfolge der Teilfelder bestimmt, sodass das Befahren des Bestandes verhindert wird. Danach wird je Teilfeld die Spurreihenfolge bestimmt. Wie auch in den meisten anderen wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit diesem Thema befassen, wird eine Graphenmodellierung angewandt. Allerdings wird die Spur als Knoten abgebildet und nicht das Feld diskretisiert wie beispielsweise in der Arbeit von Scheuren (2014) oder anderen Modellierungen wie der von Bochtis und Sorensen (2010). Dies wird damit begründet, dass das ausschließlich schnellstmögliche Abfahren von Spurmustern einfacher modelliert werden kann als der Ernteprozess. Die vorgestellte Methodik kann die Sequenz in akzeptabler Zeit berechnen, was für den Einsatz während der Feldarbeit wichtig ist. Komplexere Prozesse wie der Mähdrusch mit Mehrmaschinenkommunikation wurden nicht optimiert. Scheuren (2014) muss für die Mähdrusch-Betrachtung Überladepunkte auf den Spuren definieren. Auch Bochtis und Sorensen (2010) berücksichtigen Tankkapazitäten und müssen andere Algorithmen wie die „Vehicle Routing Problem“ üblichen Lösungsverfahren anwenden. Ein erhöhter Rechenaufwand ist die Folge.

Die Überwachung des Prozesses wird in dieser Arbeit sehr einfach ausgeführt. Es wird lediglich geprüft, ob auf einer Spur gearbeitet wird, die Spur abgearbeitet ist und ob eine Wende vorgeschlagen werden muss. Die Überwachung eines Ernteprozesses mit Multimaschinen-Kommunikation beurteilt Scheuren (2014) als schwierig, da mehrere Routenpläne Neuberechnet werden müssen. Somit kann festgehalten werden, dass sich nur die Überwachung nicht-kapazitiver Prozesse ohne Mehrmaschinen-Abhängigkeiten einfach gestaltet.

Die Trennung der vorgestellten Module garantiert eine manuelle Überschreibbarkeit jedes einzelnen Schrittes. Dies kann zum Beispiel nötig sein, wenn aufgrund von Erosion hangparallel gearbeitet werden soll. Jin (2009) hat ebenfalls ein Konzept aufgezeigt, um Felddaten vorzuplanen. Dabei benannte er die Schritte Aufbereiten der Feldgrenze, Feldteilung und Spurgenerierung. Es ist allerdings nicht durch einen Versuchsaufbau praktisch abgesichert worden. Theoretische Beispiele verifizierten die Methode und eine schnelle Berechnung ist nicht gefordert worden. Oksanen (2007) stellte einige Module zum Planen von Routen vor. Die Feldteilung, die Spurerstellung und das automatische Generieren von Wendewegen sind vorgestellt worden; die Berechnung der Spurreihenfolgen und die Überwachungsfunktionalität fehlten somit. Ein Prototyp, der die Module in einen Kontext setzt und miteinander interagieren lässt, ist nicht aufgebaut worden. Die Module sind lediglich gesondert und theoretisch betrachtet worden. Scheuren (2014) stellte in seiner Arbeit einen Roboter zur automatischen Getreideernte vor. Es ist keine Feldteilung vorgenommen worden und die Referenzfahrspur ist manuell vom Anwender ausgewählt worden. Die betrachtete Prozesskette beschreibt den

Mähdrusch mittels zweier Mähdrescher und einem Überladefahrzeug. Hier ist eine feste Fahrspursequenz vorgeschrieben, damit das Abladen während des Erntens realisiert werden kann. Auch Brunnert (2006) zeigt eine dynamische Routenplanung für den Mähdrusch. Der grundsätzliche Ablauf besteht aus Grenzaufzeichnung, freier Fahrspurplanung und einer festen Spurreihenfolge. Beide Arbeiten haben nicht die Minimierung der Arbeitszeit im Fokus, sondern die Maximierung des Maschinenausnutzungsgrades. Die Kapazitäten von Maschinentanks werden in dieser Arbeit nur bedingt berücksichtigt.

Automatische Vorplanungen sowie dynamische Routenplanung auf dem Feld bieten großes Einsparungspotential. Die Analysen haben gezeigt, dass durch automatisch berechnete Fahrspuren 5 % Arbeitszeit eingespart werden kann. Die Wendezeit kann durch automatische Spursequenzberechnung um ca. 50 % minimiert werden. Die Methoden haben gezeigt, dass trotz komplexer oder großer Felder die Rechenzeiten nicht über den Millisekundenbereich hinaus steigen. Auch konnte das Ziel erreicht werden, die Funktionen des Lenksystems einzubinden, um automatisch auf dem Feld zu fahren und die Wenden anzusprechen. Ausschließlich die Planungsschritte werden von der Software übernommen und die Rechenergebnisse durch eindeutig beschriebene Austauschformate an das Lenkterminal übergeben. Die Modularität mit klar definierten Ein- und Ausgängen ermöglicht es, weitere Themengebiete nachträglich in die Software einzubinden. Das verwendete Arbeitszeitmodell wird mit Realdaten verglichen und eine Abweichung von ca. 10 % festgestellt. Dies liegt in einem akzeptablen Bereich. Es wird ebenfalls angedacht, die gefahrene Routenlänge als Optimierungskriterium heranzuziehen. Für das Minimieren von Bodenverdichtungen ist dies auch das Mittel der Wahl, allerdings ist bei den hohen Kosten der Maschinen und kleinen Arbeitsfenstern die Einsatzzeit zu minimieren. In vielen Fällen waren die Ergebnisse jedoch schon äquivalent, sodass diese Wahl nur geringen Einfluss auf die optimierten Fahrspuren hat.

Es konnten nicht alle Anwendungen vorgeplant werden. Die kapazitiven Ernteprozesse sind wegen ihrer Komplexität ausgeschlossen worden. Auch die Prozesse mit mehreren Maschinen sind ausgeklammert worden, da hier weitere Themen wie Maschinenkommunikation (M2X, M2M) offen sind. Kapazitive Prozesse wie die Gülleapplikation konnten nur bedingt berücksichtigt werden und müssen genauer dargestellt werden, vor allem in der Strategieplanung müssen hier auch die einzelnen Fahrspuren teilweise bearbeitet werden können. Aktuell werden die Fahrspuren als Ganzes betrachtet. Als Letztes ist aufgeführt worden, dass 13 % der untersuchten Schläge nicht vollständig durch die Software vorgeplant werden können, beispielsweise wegen großer im Feld befindlicher Seen oder Waldflächen, die Einfluss auf die Vorplanungsschritte haben. Auch der Einfluss geneigter Flächen ist nicht

betrachtet worden; hangparallele Konturen können nicht aus den Höhenlinien abgeleitet werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine stetig wachsende Weltbevölkerung, veränderte Ernährungsgewohnheiten, die Verknappung von Betriebsmitteln und die zunehmende Bedeutung von nachwachsenden Rohstoffen zwingen die Landwirtschaft zum Umdenken. Seit Jahren hält die Automatisierungstechnik Einzug in landwirtschaftliche Prozesse. Beispielsweise mithilfe von GNSS geführten automatischen Lenksystemen können die Äcker effizienter und tageszeitunabhängig abgearbeitet werden.

In dieser Arbeit ist gezeigt worden, wie diese Standardausstattung großer Landmaschinen dazu genutzt werden kann, die Fahrverantwortung vom Maschinenführer zu lösen und die Fahrstrategie auf dem Feld durch mathematische Algorithmen effizienter zu gestalten. Die vorgestellte Systemarchitektur stellt eine Variante dar, die gegebenen Funktionen des Lenksystems und weitere benötigte Module so zu verbinden, dass ein teilautonomes Fahren auf dem Feld ermöglicht wird. Danach werden die einzelnen Algorithmen vorgestellt. Als Erstes wird eine Aufzeichnung der Feldgrenze sowie der im Feld befindlichen Hindernisse durchgeführt. Im Anschluss werden die Fahrspuren für das Feld in mehreren Schritten erzeugt. Das Feld wird in Bereiche unterteilt, die jeweils mit einer Ausrichtung bearbeitet werden sollen. Danach wird die beste Ausrichtung für jedes Teilfeld bestimmt. Basierend auf einem Modell für die Berechnung der Arbeitszeit und der Routenlänge sind zwei mögliche Konzepte vorgestellt worden. Das erste Konzept betrachtet nicht-kapazitive Feldoperationen, also Prozesse, bei denen keine Fahrzeugkapazität - wie zum Beispiel der Korntank eines Mähdreschers - geleert oder gefüllt wird. Im zweiten Konzept – der Ausrichtungsberechnung für kapazitive Feldoperationen – sind dem Arbeitszeitmodell der Einfluss der Lade- oder Entladefahrten zum Depot hinzuaddiert worden. Basierend auf den berechneten Ausrichtungen - bzw. Referenzlinien wie sie im Kontext von Lenksystemen genannt werden – und den dazugehörigen Teilfeldern ist eine Methode vorgestellt worden, die alle Fahrspuren erstellt. Sequenziell werden zuerst die Vorgewendespuren, also die Fahrspuren, die die Wendeflächen vor oder nach der Feldoperation bedecken, erzeugt. Danach werden basierend auf der besten Ausrichtung parallele Fahrspuren im Teilfeld erstellt. Ein weiteres Modul ist die Pfadplanung. Dabei ist eine Methode gezeigt worden, die Wendewege zwischen den Fahrspuren erzeugt. Außerdem sind durch diese Methode Sonderfahrwege wie das Anfahren eines Abladepunktes am Feldrand planbar. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der hochgenauen Abfahrbarkeit solcher geplanten Trajektorien. In einem letzten Modul werden Methoden für die Echtzeitüberwachung aufgeführt. Sie sollen in einer Art Zustandsautomaten den Bearbeitungsgrad der Fahrspuren überwachen, das automatische Wenden auslösen und bei

Planabweichungen entsprechende Neuberechnungen der Fahrrouen bereitstellen. Auch die automatische Verifizierung dieser Methodiken erfordert spezielle Verfahren zum Extrahieren der benötigten Daten wie der Feldgrenze oder der Arbeitsbreite aus Datenaufzeichnungen.

Weiterführend sind statistische Analysen durchgeführt worden, welche die Notwendigkeit der Entwicklung der Einzelmodule aufzeigen. 2013 wurden in Deutschland 16,7 Mio. ha Fläche von 285000 Betrieben landwirtschaftlich genutzt (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2014). Es konnte mittels Satellitenbildanalyse gezeigt werden, dass das durchschnittliche westdeutsche Feld eine Fläche von 5,13 ha und das ostdeutsche Feld eine Fläche von 41,42 ha hat. Die in einem Lenksystem umgesetzten Fahrmodi „Gerade“ sowie „(AB-)Kontur“ sind ebenfalls untersucht worden. 91,4 % der untersuchten Felder werden mittels AB-Fahrspuren bearbeitet. 7,45 % der untersuchten Felder sind von den Landwirten geteilt worden, auf denen mit unterschiedlichen Ausrichtungen je Feldbereich geplant worden ist. 81 % der Felder beinhalten keine Hindernisse. Mit diesen Werten konnte eine Anwendbarkeit der vorgestellten Routenplanung auf 86,22 % aller untersuchten Felder hergeleitet werden. Danach wurde das in vielen Methoden angewandte Arbeitszeitmodell verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichung zu den realen Daten im Bereich zwischen 3,4 und 15 % liegt. Das Verbesserungspotential durch eine automatische Datenaufbereitung ist mit 6 % der Arbeitszeit- und 5 % Routenlängenminimierung ermittelt worden. Eine hohe Varianz ist festgestellt worden. Annähernd 50 % der Felder werden bereits optimal bearbeitet. Im nächsten Schritt ist die Spursequenz betrachtet worden. Es wurden typische Fahrmuster untersucht und mit einer optimalen Spurreihenfolge verglichen. Dabei konnte das berechnete Fahrmuster eine Wendewegminimierung von ca. 57 % zu einem alternierenden Muster und eine Minimierung von ungefähr 45 % zu einem für Lenksysteme typischen „Skip & Fill“-Fahrmuster bestimmt werden. Die Methodik der präzisen Fahrspurplanung ist auf Befahrbarkeit geprüft worden. Auch der Einfluss der Wendegeschwindigkeit und der ventilbedingten Lenkgeschwindigkeit sind untersucht worden. Verschiedene Wendemanöver sind verglichen und signifikante Unterschiede festgehalten worden. Abschließend wurden die Rechenzeiten der zusätzlich eingesetzten Module bestimmt, um die Integration in bestehende Lenksystem-Hardware zu verifizieren. Der Einsatz auf den Maschinen verlangt eine unkritische Echtzeitfähigkeit, welche eingehalten werden konnte.

Wird abschließend die Methodik und das realisierte Planungssystem betrachtet, so wird ersichtlich, dass es viele Möglichkeiten der Erweiterungen gibt.

Ein autonomer Feldroboter ist in naher Zukunft nicht realisierbar. Deduziert muss vom Allgemeinen auf die Feinheiten des Feldprozesses hin automatisiert werden. Der allgemeinste Fall ist vorgestellt worden, wodurch bereits ein Großteil der landwirtschaftlichen Operationen

zur Routenplanung beschrieben werden kann. Auch die Betrachtung des gesamten Prozesses auf dem Feld ist immanent wichtig für eine Planung. Die Felddaten gelten nur für alle zu einer Kampagne gehörenden Feldarbeiten und sind nicht unabhängig.

## 7 Literaturverzeichnis

AERONAUTICS AND SPACE ENGINEERING BOARD, 1995. The Global Positioning System: A Shared National Asset. NATIONAL ACADEMY PRESS., Washington, D.C.

AIRFORCE, 1987. Circular Error Probable (CEP). Air Force Operational Test and Evaluation Center Technical Paper

ALI, O., 2010. Operational Planning for Outdoor Engineering Processes. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven

BLACKMORE, S., 2004. Development of a deterministic autonomous tractor. Proceedings of the CIGR – International Commission of Agricultural Engineering, Peking

BOCHTIS, D. & SORENSEN, C., 2010. The vehicle routing problem in field logistics: Part I & II. Biosystems Engineering 105: 180-188

BRUNNERT, A., 2006. Konzeption einer dynamischen Routenplanung als Assistenzsystem für Erntemaschinen. Dissertation, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH, Aachen

BURGER, M., HUISKAMP, M. & KEVICZKY, T., 2014. Complete Field Coverage as a Multi-Vehicle Routing Problem. Proceedings of the Agricontrol Helsinki: 97-102

CHURCHMAN, C. & Ackhoff, R., 1957. Introduction to Operations Research. Oldenbourg Verlag, Wiley

CLAAS E-SYSTEMS, 2013. Easy-Forum 2013. Fachvortrag auf der Agritechnica 2013, Hannover

DE JONG, A., 2012. Quality of real-time travel time. Dissertation, Twente University

DOUGLAS, D. & PEUCKER, T., 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. The Canadian Cartographer. Bd. 10, Nr. 2: 112-122

DUBINS, L., 1957. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics 79: 497-516

ENGELHARDT, H., 2004. Auswirkungen von Flächengröße und Flächenform auf Wendezeiten, Arbeitserledigung und verfahrenstechnische Maßnahmen im Ackerbau. Dissertation, Justus-Liebig-Universität, Gießen

FRAICHARD, T. & SCHEUER, A., 2004. From Reeds and Shepp's to Continuous-Curvature Paths. IEEE Transactions on Robotics and Automation 20 (6): 1-14

GIES, 2009. Fahrzeugtechnik 3. Vorlesungsumdruck, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH, Aachen.

GILBERT, J. R., MOLER, C. R. & SCHREIBER, R., 1992. Sparse matrices in MATLAB: design and implementation. SIAM J. Matrix Anal. Appl. 13: 333-356

GLASMACHER, H., 2002. AGRO NAV Plan - Software for planning and evaluation of the path and work of field robot. Proceedings of the Automation Technology for Off-Road Equipment Chicago: 405-411

GOETTINGER, M., SCHOLZ, C., GRZONKA, S., MOELLER, K., STROTHMANN, W. & RUCKELSHAUSEN, A., 2014. GNSS-based navigation for the multipurpose field robot platform BoniRob to measure soil properties. Proceedings of the 72nd International Conference Agricultural Engineering 11: 263-270

HAMEES, I., BOCHTIS, D., SORENSEN, C. & NOREMARK, M., 2010. Automated generation of guidance lines for operational field planning. Biosystems Engineering 107: 294-306

JIN, J., TANG, L., 2010. Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces. Transactions of the ASABE 53 (1): 283-295

JIN, J., 2009. Optimal field coverage path planning on 2D and 3D surfaces. Dissertation, Iowa State University, Iowa

KIMIA, B., FRANKEL, I. & POPESCU, A.-M., 2003. Euler Spiral for Shape Completion. International Journal of Computer Vision 54 (1/2/3): 159-182

KNUTH, D., 1997. The Art of Computer Programming Volume 2. Addison-Wesley Longman, Amsterdam

KONDEKAR, R., 2011. Method and System for Determining a Planned Path of a Vehicle. Europäische Patent-Nummer: EP2446725A1

- KÜBLER, S. & PICKEL, P., 2006. Development of modular software to simulate farming processes. Proceedings of the CIGR, VDI-Berichte Nr. 1958: 631 ff
- LAVALLE, S. M., 2006. Planning Algorithms. Cambridge University Press, Illinois
- LEE, C. Y., 1961. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. IRE Transactions on Electronic Computers. Nr. 2: 346-365
- MAGID, E., KEREN, D., RIVLIN, E. & YAVNEH, I., 2006. Spline-Based Robot Navigation. International Conference on Intelligent Robots and Systems Peking: 2296 - 2301
- MATSUO, Y., YAMAMOTO, S. & YUKUMOTO, O., 2002. Development of Tilling Robot and Operation Software. Proceedings of the Automation Technology for Off-Road Equipment Chicago:184-189
- OKSANEN, T., 2007. Path planning algorithms for agricultural field machines. Dissertation, Aalto university of technology, Helsinki
- OKSANEN, T. & VISALA, A., 2009. Coverage Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. Journal of Field Robotics 26 (8): 651-668
- OUBBATI, M., 2009. Einführung in die Robotik. Vorlesungsumdruck, Universität Ulm
- PIVTORAIKO, M. & KELLY, A., 2005. Efficient constrained path planning via search in state lattices. Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space
- REEDS, J. A. & SHEPP, L. A., 1990. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. Pacific Journal of Mathematics 145 (2),: 367-393
- REINELT, G., 1994. The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. Lecture Notes in Computer Science 840. Springer-Verlag, Berlin
- RUCKELSHAUSEN, A. et al., 2009. BoniRob-an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. Precision agriculture 9: 841
- SABELHAUS, D., RÖBEN, F., MEYER ZU HELLIGEN, L. & SCHULZE LAMMERS, P., 2013. Using Continuous-Curvature Paths to generate feasible headland turn manoeuvres. Biosystems Engineering 12: 399-409

- SABELHAUS, D., RÖBEN, F., MEYER ZU HELBIGEN, L. & SCHULZE LAMMERS, P., 2014. Pfadplanung von landwirtschaftlichen Fahrmanövern unter Berücksichtigung fahrzeugkinematischer Restriktionen. Tagung, Land.Technik Berlin 2014: 247-255
- SCHEUER, A. & FRAICHARD, T., 1997. Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles. International Conference On Intelligent Robots and Systems Grenoble: 1-7
- SCHEUREN, S., 2014. Prozessoptimierte Planung für kooperative mobile Roboter. Dissertation, Institut für Informatik AG Wissensbasierte Systeme, Osnabrück
- SCHEUREN, S. et al., 2011. The problem of Spatio-temporally constrained motion planning for Cooperative Vehicles. Proc. 26 Workshop Planen, Scheduling und Konfigurieren, Entwerfen (PuK2011)
- SCHMITTMANN, O., KAM, H. & SCHULZE LAMMERS, P., 2010. Position Steered Sowing of Sugar Beet - Technology and Precision. Proceedings of 2nd International Conference on Machine Control & Guidance 9 (03): 199-205
- SELLMANN, F., BANGERT, W., GRZONKA, S., HÄNSEL, M., HAUG, S., KIELHORN, A., MICHAELS, A., MÖLLER, K., RAHE, F., STROTHMANN, W., TRAUTZ, D., RUCKELSHAUSEN, A., 2014. RemoteFarming.1: Human-machine interaction for a field-robot-based weed control application in organic farming. 4th Conference on Machine Control & Guidance, 3,: 36-42
- SPEKKEN, M., 2012. Optimizing routes on agricultural fields minimizing maneuvering and servicing time. Precision Agriculture 14 (2): 224-244
- SPLETTSTÖBER, H., 2002. Feldversuche der Landwirtschaftskammer Schleswig Holstein. Landpost, Stuttgart
- STOLL, A., 2006. Untersuchungen zur automatischen Erntemaschinenführung mit Satellitennavigation und Leitlinienplanung. Dissertation, Institut für Agrartechnik, Uni Stuttgart
- TORGE, W., 2001. Geodesy 3. De Gruyter, Berlin
- TULLBERG, J., 2006. CTF makes Tracks in Australia. Engineering & Technology for a Sustainable World 13(4). American Society of Agricultural Engineers ASABE Resource Magazine

TURAU, V., 2009. Tiefensuche. Algorithmische Graphentheorie, 3. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag: 94-98, München

ULLRICH, A., HERTZEBERG, J. & STIENE, S., 2014. ROS-Based Path Planning and Machine Control for an Autonomous Sugar Beet Harvester. Proceedings of International Conference on Machine Control & Guidance, Braunschweig

ZANDONADI, R. S., 2012. Computational tools for improving route planning in agricultural field operations. Dissertation, Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Kentucky

ZELINSKY, A., JARVIS, R. A., BYRNE, J. & YUTA, S., 1993. Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot. Proceedings of International Conference on Advanced Robotics: 533-538

ZHANG, P., QIAO, J. & ZHANG, H., 2010. Path Planning and Tracking for Agricultural Master-slave Robot System. International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (1): 55-58

ZHANG, Q., 2002. Dynamic Performance Evaluation of DGPS Receivers for Parallel Tracking. Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers 47: 321-329

## **Online Veröffentlichungen**

AMAZONEN-Werke H. Dreyer, 2014. BoniRob – Forschung zur Feldrobotik., <http://www.amazone.de/1857.asp>

ASPO DEUTSCHLAND, 2014. PEAK OIL ?. <http://aspo-deutschland.blogspot.de/p/peak-oil.html>

AUTONOMOUS SOLUTIONS INC., 2014. The Forge ASI Robotics Platform. <http://www.asirobots.com/products/forge/>

CHOUDHURY, S. & SINGH, S., 2009. A Coverage Planning Algorithm for Agricultural Robots. <http://www.frc.ri.cmu.edu/~sanjibac/Research/bspline/report.pdf>

CLAAS AUTO TURN, 2015. <http://app.claas.com/2013/lenksysteme/de/autoturn.php>

CLAAS S10, 2015. GPS PILOT. <http://www.claas.de/produkte/easy/lenksysteme/gps-lenksysteme/automatische-systeme>

CLAAS SELBSTFAHRENDE ERNTEMASCHINEN, 2014. marion - mobil.kooperativ.effizient.  
[www.projekt-marion.de](http://www.projekt-marion.de)

CLAAS AGROSYSTEMS; LACOS; AARHUS UNIVERSITY; LEE, 2014. Geopal Projekt.  
<http://www.geopal-project.eu/#home>

DEMMELE, M., KIRCHMEIER, H., MÜLLER, M., 2015. Innovationen im Ackerbau.  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Permanente\\_Fahrwege\\_und\\_Streifenbearbeitung.pdf](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Permanente_Fahrwege_und_Streifenbearbeitung.pdf)

DEUTSCHE STIFTUNG WELTBEVÖLKERUNG, 2014. Datenreport 2014.  
[http://www.weltbevölkerung.de/uploads/tx\\_aedswpublication/Datenreport\\_2014\\_Stiftung\\_Weltbevölkerung.pdf](http://www.weltbevölkerung.de/uploads/tx_aedswpublication/Datenreport_2014_Stiftung_Weltbevölkerung.pdf)

DEUTSCHER BAUERNVERBAND, 2015. Situationsbericht. <http://www.bauernverband.de/33-betriebe-betriebsgroessen>

DLG, 2003. Prüfbericht 5148F. <http://www.dlg-test.de/tests/5148F.pdf>

EVANS, L., 2012. An Introduction to Mathematical Optimal Control Theory.  
<https://math.berkeley.edu/~evans/control.course.pdf>

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2014. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien.html>

DEUTSCHE METEOROLOGISCHE GESELLSCHAFT, 2014. Stellungnahme zur Klimaproblematik. [http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/klimod/forschung/ipcc/Klimastatement\\_dmg\\_2007\\_09\\_10.pdf](http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/klimod/forschung/ipcc/Klimastatement_dmg_2007_09_10.pdf)

HEIDEL, G. C., 2009. Autonom fahrende Fahrzeuge und Roboter. <http://www.cs.hs-rm.de/~linn/fachsem0910/heidel/heidel.pdf>

INTERREG, 2015. Projekt Agrobot. <http://www.smartbot.eu/project-information/agrobot/>

KIRCHMEIER, H. & DEMMELE, M., 2013. Streifenlockerung - Strip Tillage.  
[http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt\\_1\\_vortrag\\_streifenbearbeitung\\_schallfeld\\_februar\\_13.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt_1_vortrag_streifenbearbeitung_schallfeld_februar_13.pdf)

KÖHNE, A. & WÖBNER, M., 2015. Umlaufbahnen der GPS Satelliten.  
[www.kowoma.de/gps/Umlaufbahnen.htm](http://www.kowoma.de/gps/Umlaufbahnen.htm)

LANDWIRTSCHAFTSVERLAG, 2014. Energie News Biogas.  
<http://www.topagrar.com/news/Energie-News-Biogas-versorgt-mehr-als-5-Millionen-Haushalte-690916.html> Top Agrar, Landwirtschaftsverlag

LIKHACHEV, M., 2013. Search-based Planning with Motion Primitives.  
[http://www.cs.cmu.edu/~maxim/files/tutorials/robschooltutorial\\_oct10.pdf](http://www.cs.cmu.edu/~maxim/files/tutorials/robschooltutorial_oct10.pdf)

LUTZ, L., 2014. Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten Fahrzeugen.  
[http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/07\\_Lutz.pdf](http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/07_Lutz.pdf). Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München

MERZ, D. P., 2008. Moderne heuristische Optimierungsverfahren. Vorlesungsumdruck, Uni Tuebingen. [http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/lehre/ss03/vs\\_mh/mh-v1.pdf](http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/lehre/ss03/vs_mh/mh-v1.pdf)

MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, 2014. De Boor's Algorithm.  
<http://www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs3621/NOTES/spline/de-Boor.html>

MICROSOFT BING; NOKIA, 2015. Satellitenbildmaterial. <https://www.bing.com/maps/>

SCHMID, W. & GOLDHOFER, H., 2013. Getreide Agrarmärkte 2013.  
[https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lel/Abteilung\\_4/Agrarm%C3%A4rkte%202013/Text/02%20Getreide.pdf](https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lel/Abteilung_4/Agrarm%C3%A4rkte%202013/Text/02%20Getreide.pdf)

SOMMER, V., 2005. Lokalisierung und Kartenbildung für autonome mobile Roboter basierend auf der Korrelation von Entfernungsprofilen an Referenzpositionen.  
[hochschule.de/fileadmin/user/sommer/Forschung/Forschungsbericht05.pdf](https://www.hochschule.de/fileadmin/user/sommer/Forschung/Forschungsbericht05.pdf)

SOURELL, H., 2007. Bewässerungstechnik in landwirtschaftlichen Großbetrieben.  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Block1\\_2\\_Sourell\\_2.pdf](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Block1_2_Sourell_2.pdf)

STATISTISCHES BUNDESAMT, 2014. Landwirtschaftliche Betriebe.  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/LandForstwirtschaft.html>

THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2007. Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor (C-Faktor) sowie Erosionsschutzfaktor (P-Faktor).  
<http://www.tll.de/verstola/content/verstola/methodik/dabag/c-faktor.html>

UMWELTBUNDESAMT, 2014. Globale Landflächen und Biomasse.  
[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale\\_landflaechen\\_biomasse\\_bf\\_klein.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_biomasse_bf_klein.pdf)