

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und
Umwelt

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Algorithmische Analyse von Prozessketten in der Agrarlogistik

Valentin Johannes Heizinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. J. Schnyder

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H. Bernhardt
2. Univ.-Prof. Dr. J. F. Sauer

Die Dissertation wurde am 05.11.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 28.11.2014 angenommen.

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.

© 2015

Im Selbstverlag: Valentin Heizinger

Bezugsquelle: Technische Universität München
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
Am Staudengarten 2
85354 Freising

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Bernhardt für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit. Seine Anregungen und Hinweise sowie die eingeräumte Flexibilität während der gesamten Bearbeitungszeit waren von essentieller Bedeutung für die Umsetzung der gesteckten Ziele.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. J. F. Sauer für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters und bei Herrn Prof. Dr. J. Schnyder für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Mein Dank gilt auch den Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die erwiesene Unterstützung in allen Phasen der Arbeit. Wissenschaftliche Diskussionen und tatkräftige, praktische Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Meine Doktorandenzeit wird mir auch aufgrund der kollegialen Atmosphäre am Lehrstuhl in bester Erinnerung bleiben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung und das Verständnis während der Abfassung der Dissertation bedanken. Ohne die Entlastung in anderen Bereichen, vor allem durch meine Frau, wäre mir die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Freising, im Oktober 2014

Valentin Heizinger

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Agrarlogistik - Stand des Wissens und Stand der Technik	3
2.1	Logistikbegriff	3
2.2	Grundlagen der Agrarlogistik	4
2.2.1	Transportmengen und Problembereiche der Agrarlogistik in Deutschland	4
2.2.2	Internationale Schwerpunkte der Agrarlogistik	6
2.2.3	Transporttechniken und -verfahren	8
2.2.3.1	Verfahrensalternativen für den Transport von Siliergütern	9
2.2.3.2	Verfahrensalternativen Getreidetransport	10
2.2.3.3	Verfahrensalternativen Flüssigmistausbringung	11
2.2.3.4	Verfahrensalternativen Zuckerrübentransport	12
2.2.4	Transportkosten	12
2.3	Technische Lösungen	13
2.3.1	Globale Navigationssatellitensysteme	14
2.3.2	Agrarnavigation und Flottenmanagement	16
2.3.3	Telemetriesysteme und vernetzte Maschinensysteme	17
2.4	Simulation und Optimierung agrarlogistischer Prozesse	18
2.5	Datenmanagement und -analyse	21
2.5.1	Anwendungen in der Landwirtschaft	21
2.5.2	Zeitgliederung landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse	23
2.6	Reflexion der Problemstellungen: Ausblick in andere Forschungsbereiche	25
3	Zielstellung	27
4	Material und Methoden	31
4.1	Methodik und Technik der Datenaufzeichnung	31
4.1.1	Verwendete Technik zur Datenaufzeichnung	32

4.1.2	Eignung für den Praxiseinsatz	33
4.1.3	Standorte der Datenerfassung	35
4.2	Aufbereitung der Rohdaten	38
4.2.1	Rohdaten	38
4.2.2	Gauß-Krüger-Koordinaten	39
4.2.2.1	Wechsel des Bezugsellipsoids	40
4.2.2.2	Gauß-Krüger Projektion	42
4.3	Auswahl der Softwareumgebung	43
5	Entwicklung eines agrarlogistischen Analysesystems	45
5.1	Positionserkennung auf Schlägen	45
5.1.1	Entscheidungsalgorithmus: Befindet sich ein Fahrzeug auf einem gegebenen Schlag?	45
5.1.1.1	Punkt in Polygon: konvexer Fall	46
5.1.1.2	Punkt in Polygon: nicht-konvexer Fall	52
5.1.2	Automatisierte Ermittlung von Schlag-Polygonen	56
5.1.2.1	Befahrene und unbefahrene Flächenanteile	56
5.1.2.2	Einteilung in Einzelschläge	57
5.1.2.3	Erzeugung von Schlagkonturen	59
5.1.2.4	Randstreifen von Schlägen	62
5.2	Verwendetes Zeitgliederungsschema	63
5.3	Fahrzeugklassen	66
5.4	Verfahrensszenarien	68
5.5	Interne Datenstruktur	68
5.5.1	Fahrzeugbezogene Daten	69
5.5.2	Ortsfeste Strukturelemente	70
5.5.3	Übergeordnete Datenstrukturen	71
5.6	Analysealgorithmen zur Bestimmung von Betriebszuständen	72
5.6.1	Szenarien Silierguternte	73
5.6.1.1	Ernteverfahren mit Ladewagen	74
5.6.1.2	Einphasige Ernte mit Selbstfahrhäcksler im Parallelverfahren ohne Überladung	75
5.6.1.3	Dreiphasige Ernte mit Selbstfahrhäcksler im Parallelverfahren mit Überladung	80
5.6.2	Szenarien Getreideernte	85
5.6.2.1	Einphasige Getreideernte	86

5.6.2.2	Mehrphasige Getreideernte	88
5.6.3	Verfahren der Flüssigmistausbringung	89
5.6.3.1	Einphasige Flüssigmistausbringung	89
5.6.3.2	Mehrphasige Flüssigmistausbringung	90
5.7	Von Betriebszuständen zu Analyseergebnissen	92
5.7.1	Dynamische Visualisierung	92
5.7.2	Prozesszeitanalyse	94
5.7.3	Beladungszustände und Rückverfolgbarkeit	95
5.7.4	Geschwindigkeitsanalyse	97
5.8	Aufbau des Analyse-Tools	98
5.8.1	Positionsdaten importieren	99
5.8.2	Betriebszustände ermitteln	99
5.8.3	Darstellung, Speicherung und Export der Ergebnisse	101
5.9	Prüfung der Algorithmen	102
5.9.1	Visuell bestimmte Referenzdaten	102
5.9.1.1	Prüfung Szenarien Silierguternte	103
5.9.1.2	Prüfung Szenarien Getreideernte	108
5.9.1.3	Prüfung Szenarien Flüssigmistausbringung	112
5.9.2	Sensorbasierte Referenzdaten	114
5.9.2.1	Datengrundlage Ertragserfassung Feldhäcksler	114
5.9.2.2	Telemetriedaten Mähdrescher	117
6	Diskussion	123
6.1	Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des entwickelten Systems	123
6.1.1	Kritische Beurteilung der betrachteten Verfahren	123
6.1.2	Anwendung als Primärsystem	127
6.1.3	Anwendung als Sekundärsystem	128
6.1.4	Grenzen im Anwendungsbereich	129
6.1.5	Reflexion der Zuweisung von Betriebszuständen	131
6.2	Vergleichsbetrachtungen mit Systemen zur Verwendung von erweiterten Prozessinformationen	132
6.2.1	Eignung für die Gesamtanalyse von Prozessketten	132
6.2.2	Datenmenge und Datenübertragung	134
6.2.3	Ökonomische Aspekte	134
6.3	Möglichkeiten zur Weiterentwicklung	135
6.4	Ausblick	136

7	Zusammenfassung	137
8	Summary	139
	Literaturverzeichnis	141
	Anhang	152
A	Abbildungen und Tabellen	155
B	Abkürzungen	175
C	Mathematische Notationen	179
D	Verwendete Maßeinheiten	181

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verteilung von Transportmengen (links) und Transportleistungen (rechts) in der deutschen Landwirtschaft [Ber02]	5
2.2	Grundprinzip GNSS-Ortung, verändert nach [Bau11]	15
2.3	Möglichkeiten der Systemoptimierung	19
3.1	Prinzip der Analysemethodik	29
4.1	Überprüfung der Positionsgenauigkeit eines Datenloggers während der Fahrt; horizontale Abweichung zur Referenzposition; Datenlogger auf PKW-Dach (links) und im PKW-Innenraum (rechts)	34
4.2	links: Befestigung am Fahrzeug, rechts: Kunststoffdose mit Polsterung	35
4.3	Standorte der Datenaufzeichnung	37
4.4	Parameter des Ellipsoids [Höl98]	40
5.1	Nicht-konvexes Polygon (links), konvexes Polygon (rechts)	47
5.2	Nicht-konvexes Polygon mit verlängertem Kantenverlauf durch das Polygoninnere	48
5.3	Beispiel: konvexer Schlag als Schnittmenge durch Polygonkanten induzierter Halbräume; oberer Halbraum: blau, unterer Halbraum: rot	49
5.4	Nicht-konvexer Schlag mit einspringender Ecke, fälschliche Zuordnung der grauen Flächen	53
5.5	Bildung der konvexen Hülle (links), Unterteilung in mehrere konvexe Polygone (rechts)	53
5.6	Punkt-in-Polygon; Strahlmethode mit Sonderfällen	55
5.7	Teilschritte der automatisierten Polygonbildung: Wegpunkte (oben links), befahrene Rasterzellen (oben rechts), Einteilung in Einzelschläge (unten links), konvexe Schlag-Polygone mit Wegpunkten (unten rechts) [HB14]	58
5.8	Bildung einer nicht-konvexen Hülle; Triangulierung der Polygonpunkte (a), Umkreise der Dreiecke (b), Löschen einer Kante (c), nicht-konvexe Hülle (d)	60

5.9	Nicht-konvexe Hülle (links) und konvexe Hülle (rechts) eines automatisch ermittelten Schlages	61
5.10	Randstreifen um einen automatisch ermittelten Schlag; nicht-konvexer Ansatz (links) und konvexer Ansatz (rechts)	63
5.11	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Ladewagen	76
5.12	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Selbstfahrhäcksler	79
5.13	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Transporteinheit in einphasigen Häckselketten	81
5.14	Überladekorridor bei der Bodenaufnahme von Häckselgut	85
5.15	Hauptansicht des Analyse-Tools während der dynamischen Visualisierung .	92
5.16	Relative Prozesszeitanteile einer Prozesskette; Beispiel einer Häckselkette .	94
5.17	Symbole der Beladungszustände (von links): leer, Beladung begonnen, voll beladen	96
5.18	Ausgabetabelle zur Rückverfolgung von Einzelfuhren einer Häckselkette . .	97
5.19	Geschwindigkeitsanalyse; Beispiel einer Transporteinheit in einer Häckselkette ohne Überladung	98
5.20	Programmfenster zum Datenimport	100
5.21	Anzeigefenster für Schlagpositionen (links) und Silopositionen (rechts) . . .	101
5.22	Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Beladungszustände für einen Feldhäcksler mit Referenzdaten aus dem Ertragserfassungssystem	115
5.23	Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge mit Telemetrie-Referenzdaten	119
5.24	Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge während der Fahrt mit Telemetrie-Referenzdaten	121
5.25	Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge im Stand mit Telemetrie-Referenzdaten	121
A.1	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladeeinheit zur Bodenaufnahme	156
A.2	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme	157
A.3	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Feldtransporteinheit in dreiphasigen Häckselketten	158
A.4	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Straßentransporteinheit in dreiphasigen Häckselketten	159
A.5	Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Mähdrescher	160

A.6 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Transporteinheit in der einphasigen Getreideernte	161
A.7 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladewagen in der mehrphasigen Getreideernte	162
A.8 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Straßentransporteinheit in mehrphasigen Getreideernteketten	163
A.9 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Gülletankwagen	164
A.10 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände für eine Ausbringeinheit in der mehrphasigen Flüssigmistausbringung	165
A.11 Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Straßentransporteinheit bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung	166
A.12 Ausgabetable zur Analyse eines Einzelfahrzeugs einer Häckselkette	170
A.13 Hauptfenster der Analyse-Anwendung, Startansicht	170
A.14 Hauptfenster der Analyse-Anwendung mit Daten und Hintergrundkarte . . .	171

Tabellenverzeichnis

2.1	Transportkosten ausgewählter Verfahren. Datengrundlage: [KTB13]	13
2.2	Zeitgliederung des KTBL für landwirtschaftliche Arbeiten nach [Win14]	24
2.3	Einflussgrößen auf Logistik in unterschiedlichen Bereichen	26
4.1	Spezifikationen der verwendeten Datenlogger [Qst09], [Qst11]	32
4.2	Standorte der Datenaufzeichnung	36
4.3	Ausgewählte NMEA-0183-Datensatztypen	38
4.4	Ellipsoid-Parameter, verändert nach [Höl98]	40
4.5	Koordinatenbeispiele	43
5.1	Erweiterte Zeitgliederung des KTBL für landwirtschaftliche Arbeiten nach [Win14]; Erweiterungen grau hinterlegt	64
5.2	Fahrzeugklassen mit charakteristischen Hauptzeitbestandteilen	67
5.3	Szenarien der Verfahrensanalyse	68
5.4	Datenfelder des Structure-Arrays <i>Fahrzeugdaten</i>	69
5.5	Matrixaufbau im Feld <i>Daten</i> des Arrays <i>Fahrzeugdaten</i>	71
5.6	Beispiel einer Zeitreferenzmatrix zu einer Erntekette vom 30.09.2011 (Aus- schnitt) mit Lücke im Datensatz eines Fahrzeugs (rot markiert)	73
5.7	Betriebszustände eines Ladewagen-Gespans	75
5.8	Betriebszustände eines Selbstfahrhäckslers	78
5.9	Betriebszustände einer Transporteinheit in einphasigen Häckselketten	80
5.10	Betriebszustände von Straßentransporteinheiten, Überladeeinheit mit Boden- aufnahme und Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme in dreiphasigen Häck- selketten	83
5.11	Betriebszustände von Mähdrescher und Transporteinheiten bei der einphasi- gen Getreideernte	87
5.12	Betriebszustände eines Überladewagens in mehrphasigen Ernteketten für Getreide	89

5.13 Betriebszustände eines Gülletankwagens bei der einphasigen Flüssigmistausbringung	90
5.14 Betriebszustände bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung für Ausbringeinheit und Straßentransporteinheit	91
5.15 Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die Silierguternte mit Ladewagen	103
5.16 Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für einphasige Häckselketten für Selbstfahrhäcksler und Transporteinheit Feld und Straße .	104
5.17 Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bodenaufnahme) für Selbstfahrhäcksler, Transporteinheit Feld, Transporteinheit Straße und Überladeeinheit mit Bodenaufnahme	106
5.18 Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bunkeraufnahme) für Selbstfahrhäcksler, Transporteinheit Feld und Transporteinheit Straße	107
5.19 Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bunkeraufnahme) für Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme .	108
5.20 Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für einphasige Getreideernteketten für Mähdrescher und Transporteinheiten Feld und Straße	109
5.21 Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für mehrphasige Getreideernteketten für Mähdrescher, Überladewagen und Transporteinheit Straße	110
5.22 Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die einphasige Flüssigmistausbringung mit Gülletankwagen	112
5.23 Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die mehrphasige Flüssigmistausbringung für Ausbringeinheit und Transporteinheit Straße	113
5.24 Beladeorte einzelner Fuhren bei der Silomaisernte, Referenzierung über Ertragserfassungssystem	116
5.25 Algorithmisch identifizierte Überladevorgänge, Referenzierung über Telemetriedaten	118
A.1 Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Ernteketten für Siliergüter	167
A.2 Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Getreideernteketten	168

A.3	Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Verfahren der Flüssigmistausbringung	169
A.4	Dateninhalte Ertragserfassung Feldhäcksler	172
A.5	Dateninhalte Telemetriedatensatz Mähdrescher	173

1 Einleitung

Landwirtschaftliche Produktionssysteme decken ein weitreichendes Spektrum an Produktionsprozessen und Arbeitsanforderungen ab. Betriebe sind in ihrer Ausrichtung unterschiedlich spezialisiert. Häufig konzentriert sich die Produktion auf Tierhaltung, Marktfruchtbau oder Energieerzeugung. In bestimmten Regionen findet aber auch ein ausgeprägter Anbau verschiedener Sonderkulturen statt. In der Agrarlogistik vereinen sich als Teil landwirtschaftlicher Produktionsprozesse sämtliche Aufgaben und Anforderungen, die im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Transporten stehen. Ebenso wie die Produktionssysteme an sich sind auch die Rahmenbedingungen in der Agrarlogistik vielschichtig.

Betrachtet man das innerdeutsche Transportaufkommen im Gesamten, so zeigt sich, dass in der Landwirtschaft bezogen auf die Transportmengen mehr Güter transportiert werden als mit Binnenschiffen oder auf der Schiene. Nur im Güterkraftverkehr werden höhere Werte erreicht [Göt+11].

Maßgeblichen Einfluss auf die Transportsysteme haben neben der Menge auch die zurückzulegenden Entfernungen. Bedingt durch vergleichsweise kurze Distanzen zwischen Start- und Zielort werden in der Landwirtschaft systembedingt weitaus kürzere Transportentfernungen erreicht als im Güterverkehr auf der Straße und Schiene oder per Schiff [Göt+11]. Strukturelle Veränderungen in der Landwirtschaft bewirken hier allerdings große Veränderungen. Die durchschnittlich bewirtschaftete Fläche hat sich für deutsche Betriebe im Zeitraum zwischen 1993 und 2012 von 29 auf 58 ha verdoppelt [Sta95], [Sta13]. Zunehmende Feld-Hof-Entfernungen sind dadurch oftmals unvermeidbar. Reformen in der Handelsstruktur und im Verarbeitungsbereich landwirtschaftlicher Erzeugnisse ziehen ebenfalls steigende Transportentfernungen in der Agrarlogistik nach sich. In der Zuckerrübenlogistik werden häufig Entfernungen von über 100 km zurückgelegt. Die Schließung von Fabrikstandorten hat dabei großen Einfluss auf die Entwicklungen [Str00], [Ber02].

In Verbindung mit dem Einsatz leistungsfähiger Arbeitsmaschinen fallen große Transportmengen oft in sehr kurzen Zeiträumen an. Die Bewältigung der Transportaufgaben macht daher die Verwendung vielgliedriger Maschinenverbunde nötig. Mit der Komplexität der Prozessketten nimmt gleichzeitig auch das Potential für mögliche Optimierungen zu. Im Vergleich zu industriellen Handelsgütern weisen landwirtschaftliche Transportgüter meist

einen geringen monetären Wert auf. Die ökonomische Bedeutung der Logistikkosten am Gesamtwertschöpfungsprozess ist daher wesentlich.

Im Sinne eines effektiven Produktionsprozesses und der Schonung vorhandener Ressourcen gilt es, Prozessketten in der Agrarlogistik möglichst effektiv zu gestalten. Dazu können Erfahrungswerte ebenso herangezogen werden wie Berechnungsmethoden. In jedem Fall werden Daten über die eingesetzten Systeme benötigt. In der vorliegenden Arbeit wird ein System entwickelt, mit dessen Hilfe Prozessketten aus der Agrarlogistik unter der Maßgabe einer universellen und kostengünstigen Anwendbarkeit analysiert werden können.

2 Agrarlogistik - Stand des Wissens und Stand der Technik

Die Agrarlogistik stellt ein vielschichtiges, praxisnahes Forschungsgebiet der Agrarwissenschaften dar. Die Neu- und Weiterentwicklung technischer Konzepte aus maschinenbaulicher Sicht trägt ebenso zu einer Effizienzsteigerung im landwirtschaftlichen Transportwesen bei wie prozessorientiert Verbesserungsmaßnahmen auf den Gebieten Kommunikation, Navigation sowie Auftragsplanung und -übermittlung. In der Forschung werden verschiedene simulationsbasierte und mathematische Optimierungsansätze für Prozessketten verfolgt. Aus Sicht der Qualitätssicherung wird dagegen eine lückenlose Dokumentation und Produkt-Rückverfolgbarkeit gefordert. Unterschiedliche Ansätze erzeugen oder benötigen entsprechende Systeminformationen, was die Notwendigkeit eines effizienten Datenmanagements verdeutlicht.

2.1 Logistikbegriff

Die ursprüngliche Bedeutung des Logistikbegriffs liegt im militärischen Bereich. Abgeleitet vom französischen *loger* (*jemanden irgendwo einquartieren*), wurde der Begriff als Sammelbegriff für alle Aufgaben benutzt, die mit der Unterstützung der Streitkräfte zusammen hängen. Ab den 50er Jahren wurde die Bedeutung ausgehend von den USA erweitert. Es waren nun auch wirtschaftswissenschaftliche Problemstellungen mit eingeschlossen. Seit den 70er Jahren wird das Wort *Logistik* auch im deutschen Sprachgebrauch verwendet [HD75], [Mei08], [Hel98]. Auf die militärischen Aspekte der Logistik wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Logistik kann aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. WILDEMANN [Wil97] zeigt dazu ein Spektrum auf, das von einem rein wissenschaftlichen Ansatz über einen problembezogenen Ansatz bis hin zu einem führungs- oder strategieorientierten Logistikverständnis reicht.

Da in dieser Arbeit dem Gutfluss innerhalb von landwirtschaftlichen Prozessketten große

Bedeutung zukommt, soll hier Logistik gemäß der flussorientierten Definition¹ von PFOHL verstanden werden [Pfo00]:

Zur Logistik gehören alle Tätigkeiten, durch die die raum-zeitliche Gütertransformation und die damit zusammenhängenden Transformationen hinsichtlich der Gütermengen und -sorten, der Güterhandhabungseigenschaften sowie der logistischen Determiniertheit der Güter geplant, gesteuert, realisiert oder kontrolliert werden. Durch das Zusammenwirken dieser Tätigkeiten soll ein Gutfluss in Gang gesetzt werden, der einen Lieferpunkt mit einem Empfangspunkt möglichst effizient verbindet.

Definitionsgemäß fallen somit sowohl mittelbare als auch unmittelbare Tätigkeiten zur Abwicklung von Gutflüssen in den Bereich der Logistik. Im Folgenden sollen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten der auf die Landwirtschaft bezogenen Logistik näher betrachtet werden.

2.2 Grundlagen der Agrarlogistik

In der Landwirtschaft tritt in unterschiedlichen Bereichen ein erhöhtes Transportaufkommen auf. Diese agrarlogistischen Schwerpunkte sowie die dafür in Frage kommenden Verfahrenstechniken bilden das Fundament für wissenschaftliche Untersuchungen in diesem Bereich.

2.2.1 Transportmengen und Problembereiche der Agrarlogistik in Deutschland

Die Landwirtschaft in Deutschland ist geprägt von einer großen Diversität der Betriebe bezüglich ihrer Betriebsform, -größe und -struktur. Entsprechend unterscheiden sich auch die Anforderungen an die Agrarlogistik. BERNHARDT [Ber02] gibt in umfangreichen Untersuchungen einen Überblick über die landwirtschaftliche Logistik in Deutschland, indem über 90 Betriebe in ganz Deutschland untersucht werden.

Bei Analyse der transportierten Mengen ergeben sich im Durchschnitt über alle untersuchten Betriebe vier große Transport-Schwerpunkte (siehe Abbildung 2.1, links): Fest- und Flüssigmist, Silage und Gras, Getreide (inklusive Körnermais) und Hackfrüchte [Ber02].

Transportmengen spiegeln den logistischen Aufwand nur unzureichend wider. Ganz entscheidenden Einfluss haben auch die zurückgelegten Entfernungen. Die als Produkt aus Transportmenge und Transportentfernung definierte Transportleistung gibt sowohl mengen-

¹Die flussorientierte Definition stellt den Gutfluss ins Zentrum der Betrachtung. PFOHL liefert daneben auch eine lebenszyklusorientierte und eine dienstleistungsorientierte Definition [Pfo00].

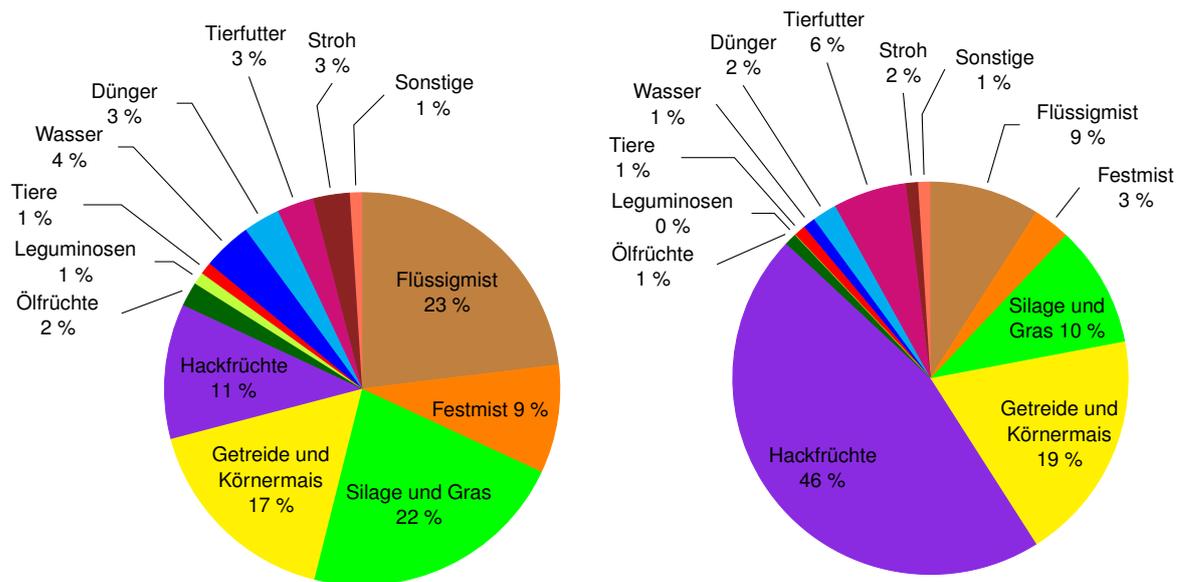


Abbildung 2.1: Verteilung von Transportmengen (links) und Transportleistungen (rechts) in der deutschen Landwirtschaft [Ber02]

als auch streckenabhängige Relationen wieder (siehe Abbildung 2.1, rechts). Besonders fällt dabei auf, dass der Anteil der Hackfrüchte annähernd die Hälfte der durchschnittlichen Transportleistungen ausmacht, bei den Mengen nur etwa 11 %. Der Grund dafür liegt in den großen Entfernungen, die zu den verarbeitenden Fabriken zurückgelegt werden müssen [Ber02].

Neben Transportmengen und -strecken wirken sich vor allem die Zeitspannen, in denen bestimmte Transportspitzen zu bewältigen sind, auf Planung und Auslegung der Logistik aus. Wochenweise Betrachtungen können darüber Aufschluss geben. Bezogen auf die Transportmengen ergeben sich für Marktfruchtbetriebe aufgrund eng begrenzter Erntezeitfenster Spitzen während der Getreideernte im Sommer. Bei der Hackfruchternte im Herbst übertrifft die zu transportierende Masse die Getreideernte insgesamt deutlich, allerdings verteilt sich das Aufkommen über einen längeren Zeitraum. In Futterbaubetrieben treten insbesondere während der Grassilage die höchsten Transportmengen auf. Die Ausbringung von Fest- und Flüssigmist sowie die Silomaisernte verteilen sich über einen etwas längeren Zeitraum. Das mengenmäßige Transportaufkommen in Veredelungsbetrieben weist drei charakteristische Spitzen auf: Im Frühjahr und im Herbst dominiert die Flüssigmistausbringung, im Sommer die Getreideernte [Ber02].

Analysen der wöchentlich anfallenden Transportleistungen weisen in erster Linie bei Marktfruchtbetrieben große Unterschiede zu den mengenbezogenen Betrachtungen auf.

Trotz der Verteilung über einen relativ großen Zeitraum werden während der Hackfrüchtereinte wöchentlich höhere Transportleistungen erbracht als während der Getreideernte, obwohl die wöchentlichen Mengen geringer sind. Grund dafür sind wiederum die extremen Transportentfernungen für Hackfrüchte. Bei den anderen Betriebsformen handelt es sich größtenteils um innerbetriebliche Transporte, sodass die qualitativen Unterschiede zwischen mengen- und leistungsbezogenem Transportaufkommen pro Woche deutlich geringer ausfallen [Ber02].

Insgesamt können die Bereiche Ernte von Getreide, Silagen und Hackfrüchten sowie die Ausbringung von Fest- und Flüssigmist als Schwerpunkte der Agrarlogistik in Deutschland angesehen werden.

2.2.2 Internationale Schwerpunkte der Agrarlogistik

Die weltweit landwirtschaftlich genutzte Fläche entspricht 2009 mit 4,9 Millionen Hektar etwa 38 % der gesamten Landfläche auf der Erde. Davon werden ca. 28 % für Ackerbau genutzt, 3 % für Gemüseanbau und 69 % für Wiesen und Weiden [FAO13]. Der Transport eines hohen Mengenaufkommens in engen Zeitfenstern über große Transportentfernungen führt zu agrarlogistischen Schwerpunkten. Diese werden von einer Vielzahl von Einflussparametern bestimmt und entstehen meist unter den besonderen Rahmenbedingungen einer Region. Weltweit betrachtet ist gerade in dünnbesiedelten Gebieten mit ausgeprägter landwirtschaftlicher Nutzung der Transport von Agrarprodukten zu zentralen Vermarktungspunkten häufig eine logistische Herausforderung. Aufgrund langer Transportentfernungen und Einschränkungen in der Infrastruktur sind Betrachtungen oft vor allem auf die Nacherntelogistik ausgerichtet.

Die Erzeugung von Getreide und Ölsaaten ist ein wichtiger Wirtschaftsfaktor in Australien. Etwa 10 bis 11 Millionen Tonnen von einer Gesamtproduktion von 35 Millionen Tonnen verbleiben im Inland. Der Großteil wird exportiert. Der Exportanteil bei Getreide liegt in den Bundesstaaten West Australia und South Australia bei 85 - 95 %. Die meisten Betriebe befinden sich 200 bis 600 km von der Küste entfernt [SCK14]. Für den Verkauf muss das Getreide über große Transportentfernungen von den Betrieben an die Küste gebracht werden. Der Hauptanteil wird auf der Schiene transportiert. Der Anteil des Straßentransports nimmt jedoch stetig zu [Agr10]. Zur Entkoppelung von Feld- und Straßentransport bietet sich während der Ernte bei großen Schlägen und großen Entfernungen die Verwendung von mobilen Behältern an. Deren optimale Verteilung stellt ebenfalls ein logistisches Optimierungsproblem dar [BBS08].

In Nordamerika werden im Jahresdurchschnitt von 2005 bis 2009 mit 73 Millionen Tonnen etwa 11 % der weltweiten Weizenproduktion erzeugt [Pro10]. In Kanada konzentriert sich der Weizenanbau vor allem auf den Westen. Dort werden etwa 90 % der Landesproduktion erzeugt. Ein Großteil davon wird exportiert [Pro10]. Das Transportwesen von Getreide in Kanada ist von politischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Im Western Grain Transportation Act (WGTA) von 1983 bis 1995 wird der Schienentransport von Getreide staatlich gefördert, um die erzielbaren Erlöse für Getreide zu erhöhen und somit ländliche Regionen zu stärken. Dies zieht eine starke Konzentration auf den Anbau von Weizen nach sich. Nach dem Ende des WGTA erfolgt eine stärkere Diversifizierung der Agrarproduktion [DPD06]. Zur Steigerung der Effizienz des Getreidetransports soll das Grain Handling and Transportation System (GHTS) dienen. In diesem staatlich initiierten System werden unter anderem durch umfangreiches Monitoring Getreidetransporte überwacht und geplant [MR11], [DPD06].

In den Vereinigten Staaten besitzt die Landwirtschaft 2007 mit 31 % den größten Anteil an der Gesamttransportleistung. Agrarprodukte werden vorwiegend mit LKWs transportiert. Der Anteil, bezogen auf die transportierten Massen, liegt bei 70 %. Dies ist unter anderem in der Infrastruktur begründet. Mehr als 80 % der Städte sind nur mit dem LKW zu erreichen [Cas+10], [DM14]. Dennoch ist der Schienentransport von Agrargütern in den Vereinigten Staaten in bestimmten Bereichen von großer Bedeutung. In Montana wird fast die gesamte Produktion an Getreide und Ölsaaten auf der Schiene transportiert. In North Dakota ist es mehr als 70 %, in Arizona, Oklahoma und South Dakota mehr als die Hälfte [Cas+10].

Gemessen an der Erntefläche übertrifft die Produktion von Mais in den Vereinigten Staaten mit über 35 Millionen Hektar 2013 die Weizenproduktion um mehr als das 1,5-fache [FAO14]. Von der im Inland verbleibenden Erntemenge werden hauptsächlich Futtermittel und Bioethanol hergestellt. Auch Maisstroh wird zur weiteren Verwendung genutzt [Mor+10]. 2010 wird erstmals mehr Mais für die Ethanolproduktion verwendet als für die Futtermittelherstellung [USD14]. Die Ernte- und Logistikkosten sind ein wesentlicher Teil der Gesamtverfahrenskosten. Effizientere Logistikverfahren werden angestrebt [Bio08], [Chu10].

Der Süden der Vereinigten Staaten ist eines der weltweit wichtigsten Anbaugelände für Baumwolle. Die maschinelle Ernte und die anschließende Logistik umfassen mehrere Schritte. Das Erntegut wird von einer Erntemaschine aufgenommen und entweder direkt oder über einen Überladewagen zum Feldrand gebracht. Dort wird das Material von einer weiteren Maschine zu großen Quaderballen gepresst, die den Laderaum eines LKWs ausfüllen und bis zum Abtransport am Feldrand verbleiben. Vor allem die Organisation des Abtransports bietet zahlreiche Ansätze für logistische Optimierungen [RCG03].

Nach der EU ist China der größte Getreideproduzent [Pro10]. In der Provinz Henan werden

ca. 25 % des Getreides des gesamten Landes produziert. Zahlreiche Unternehmen aus dem Nahrungsmittelbereich haben sich in den letzten Jahren in dieser Region niedergelassen. Dadurch sind auch die Ansprüche an die Getreide-Logistik gewachsen. Der Transport des Getreides vom Ort der Erzeugung zum Verkaufspunkt verursacht Kosten von 20 bis 30 % des Verkaufspreises. Der Großteil des Getreides wird in der Region auf der Straße transportiert. Transporte zwischen Provinzen erfolgen häufig als Sackware auf der Schiene zu höheren Kosten [Liu+13].

Zuckerrohr ist eines der weltweit wichtigsten Agrarprodukte. Mit mehr als zwei Milliarden Tonnen beträgt die Produktionsmenge an Zuckerrohr 2013 etwa das Dreifache von Weizen und mehr als das Achtfache von Zuckerrüben. Brasilien erzeugt etwa ein Drittel der weltweiten Produktionsmenge [FAO14]. Der Mechanisierungsgrad der Ernte variiert stark. 2008 / 2009 werden in Brasilien 63 % maschinell und 37 % von Hand geerntet [ELL12]. Zuckerrohr muss für die Verarbeitung transportiert werden. Abhängig von der Entfernung zur Fabrik haben Transportkosten einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtproduktionskosten [FZ14]. Die Verfahren in der Zuckerrohrlogistik decken ein weites Spektrum ab. In Südafrika werden direkte Transporte mit Traktoren zu den Fabriken ebenso praktiziert wie Verfahren mit Überladung auf LKWs an einer zentralen Überladestelle. In seltenen Fällen findet die Überladung auch auf die Schiene statt. Das Erntegut wird sowohl von Hand oder auch maschinell verladen [Mey06]. In Australien ist die Bahn das häufigste Transportmittel von Zuckerrohr. Eine gleichmäßige Gutanolieferung an den Fabriken ist für eine optimierte Produktion von großer Bedeutung. Mathematische Modelle können zur Optimierung eingesetzt werden [HD05]. Insbesondere in Brasilien werden große Mengen an Zuckerrohr zu Ethanol verarbeitet [FZ14], [MF08].

Die japanische Landwirtschaft ist aus agrarlogistischer Sicht ebenfalls beachtenswert. Die Produktion findet überwiegend in kleinen Strukturen statt. Der Großteil der Betriebe bewirtschaftet weniger als ein Hektar. Die Beschäftigten in der Landwirtschaft sind vorwiegend älter als sechzig Jahre [Sta10]. Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität durch autonome Maschinen und Maschinenverbunde werden dort bereits seit Anfang der 1990er Jahre untersucht [MNI92], [Mat+01].

2.2.3 Transporttechniken und -verfahren

Die stark variierenden Ansprüche an die Logistik, die aus unterschiedlichen Betriebsformen und -strukturen resultieren, spiegeln sich in der breitgefächerten Verfahrenstechnik wider. Auf die verschiedenen Ausprägungen und Anwendungsbereiche wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.3.1 Verfahrensalternativen für den Transport von Siliergütern

Bei der Ernte von Siliergütern entstehen verfahrensabhängig unterschiedliche Gutformen. Häckselgut wird beim Einsatz eines Feldhäckslers erzeugt. Erfolgt die Bergung mit einem Ladewagen, spricht man von Schnitt- oder Kurzgut. Bei vergleichsweise geringem Bedarf erweist sich mitunter auch Stückgut in Form von Silageballen als vorteilhaft [HT14].

Für den Transport von Häckselgut existieren in Abhängigkeit von Transportentfernung und Verfahrensleistung verschiedene Systeme. Man unterscheidet dabei zwischen ein-, zwei- und dreiphasigen Transportsystemen. Beim einphasigen Verfahren übernimmt ein Fahrzeug die Übernahme des Erntegutes vom Häcksler sowie den Transport auf dem Feld und auf der Straße zum Silo. Dazu können Traktoren mit Transportanhänger oder auch speziell für Fahrten auf unbefestigtem Gelände ausgerüstete Agrar-LKWs eingesetzt werden. Bei kurzen Entfernungen hat diese Variante viele arbeitswirtschaftliche und ökonomische Vorteile. Mit steigender Entfernung wird das Verfahren zunehmend unwirtschaftlicher. Dies kann durch den Einsatz der Agrar-LKWs nur zum Teil ausgeglichen werden. Negative Aspekte wie hoher Kraftstoffverbrauch und hoher Reifenverschleiß auf der Straße sowie Lärmbelästigung in Ortschaften sind zu bedenken. Generell ist auch die Verschmutzung von öffentlichen Straßen ein Problem, da die gleichen Fahrzeuge auf Acker und Straße eingesetzt werden [DS10].

Das zweiphasige Verfahren ist durch die Trennung zwischen Feld- und Straßentransport gekennzeichnet. In der ersten Phase wird das Erntegut von Häckslern mit Bunkersystemen oder angehängten Überladesystemen zwischengepuffert und am Feldrand in der Regel auf LKWs übergeladen. Bei größeren Entfernungen machen sich die höheren Transportleistungen bei niedrigerem Kraftstoffverbrauch von LKWs auf der Straße im Vergleich zu Standardtraktoren bemerkbar. Ebenso können die Fahrzeuge auf dem Feld auf maximale Bodenschonung ausgelegt werden sowie Straßenverschmutzungen weitgehend vermieden werden. Da es sich bei Überlade- und Bunkersystemen um Spezialmaschinen handelt, kann dieses Verfahren wirtschaftlich oft nicht konkurrieren [DS10].

Als ein- oder zweiphasige Verfahren werden Systeme bezeichnet, die sowohl in ein- als auch in zweiphasigen Prozessketten eingesetzt werden können. Traktoren mit Vorderwagen und Auflieger sind hier als Beispiel zu nennen. Mit diesen Gespannen kann im einphasigen Betrieb sowohl der Transport auf dem Feld als auch auf der Straße durchgeführt werden. Im zweiphasigen System wird der Auflieger am Feldrand an eine Sattelzugmaschine übergeben. Transporteinheiten, die eine eigene Überladevorrichtung mitführen, fallen ebenfalls in diese Kategorie. Wahlweise kann eine Überladung am Feldrand auf Straßentransporteinheiten durchgeführt werden oder direkt am Silo abgeladen werden [DS10].

Die höchsten Verfahrensleistungen werden bei dreiphasigen Systemen erreicht. Das Erntegut wird im Parallelverfahren durch Traktor-Gespanne von einem Selbstfahrhäcksler übernommen und zum Feldrand transportiert. Dort wird entweder eine Zwischenmiete angelegt und das Erntegut von Selbstfahr-Überladern beziehungsweise Radladern und Baggern auf LKWs verladen oder es kommt eine Überladeeinrichtung zum Einsatz, die direkt von einer Feldtransporteinheit beladen wird und das Gut auf LKWs überlädt. Dadurch können sehr hohe Verfahrensleistungen auch bei großen Transportentfernungen erreicht werden. Allerdings ist der personelle und technische Aufwand sehr hoch. Beim Anlegen von Zwischenmieten am Feldrand besteht die Gefahr von Verschmutzungen des Ernteguts [DS10].

Die Bergung von Anwelksilage mit einem traktorgezogenen Ladewagen ist als Alternative zum Einsatz eines Feldhäckslers zu sehen. Mit einem Ladewagen lassen sich Gutaufnahme und Transport mit einer Maschineneinheit durchführen. Gerade bei geringen Transportentfernungen und kleinen Strukturen ergeben sich Vorteile durch den reduzierten Maschinenaufwand. Doppelzweckladewagen können sowohl im alleinigen Betrieb als auch im Parallelverfahren in einer Häckselkette eingesetzt werden. Dadurch kann die Maschinenauslastung erhöht werden. Dies gilt sowohl für die jährliche Einsatzdauer als auch innerhalb einer Erntekette für Anwelksilage, wenn der Ladewagen je nach Bedarf als eigenständige Einheit oder als reine Transporteinheit fungiert [Hof14].

Verfahren zur Erzeugung von Silageballen zeichnen sich durch einen vergleichsweise geringen Technikaufwand aus. Für den Transport werden Transportanhänger eingesetzt. Die Ballen müssen maschinell verladen werden. Dies führt neben weiteren Aspekten zu insgesamt geringen Verfahrensleistungen. Der Einsatz dieses Verfahrens ist somit nur bei kleinen bis mittleren Betrieben und geringen Bedarfsmengen sinnvoll [HT14].

2.2.3.2 Verfahrensalternativen Getreidetransport

Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens in der Getreidelogistik wird maßgeblich beeinflusst von vorliegenden Schlagstrukturen, Transportentfernungen und Mähdrescherleistungen. Der einfachste Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass der Mähdrescher im Stand am Feldrand auf Transportanhänger entleert. Die Anhänger werden mit einem Traktor zum Silo oder Landhandel gebracht. Da durch Abtanken im Stand etwa 25 % der Mähdrescherleistung verloren gehen, wird in der Praxis auf kleineren und mittleren Betrieben oft versucht, den Mähdrescher möglichst häufig während der Fahrt zu bedienen. Zusätzlich am Feldrand abgestellt Anhänger können als zusätzlicher Lade-Puffer genutzt werden.

In Gegenden mit großflächiger Agrar-Struktur reicht die Transportleistung von Traktorgespans oft nicht aus. Durch den Einsatz von LKWs kann die Schlagkraft erhöht werden. Da

diese nicht auf dem Acker eingesetzt werden können und, aus Gründen des Bodenschutzes, auch nicht sollen, gleichzeitig aber der Mähdrescher nicht im Stand abtanken sollte, werden Überladewägen eingesetzt, die das Getreide auf dem Feld während der Fahrt vom Mähdrescher übernehmen und mit eingebauten Überladevorrichtungen am Feldrand wartende Straßentransporteinheiten beladen. Ein Überladewagen kann in der Regel zwei Großmähdrescher bedienen. Das Management einer solchen vielgliedrigen Erntekette stellt eine große Herausforderung dar, da Organisationsfehler und Stillstandszeiten große Auswirkungen haben können [Fei05]. Anstatt einer direkten Überladung auf die Straßentransporteinheit kann ein Überladewagen auch am Feldrand abgestellte Abrollcontainer oder Sattelaufleger beladen, wodurch Transportsysteme entkoppelt werden.

2.2.3.3 Verfahrensalternativen Flüssigmistausbringung

Abhängig von Schlagstrukturen, Ausbringmengen und Transportentfernungen existieren in der Flüssigmistausbringung verschiedene verfahrenstechnische Umsetzungen. Einphasige oder kontinuierliche Verfahren sind gekennzeichnet durch die Umsetzung von Transport- und Verteilungsaufgaben mit nur einem Fahrzeug. Dafür werden in der Regel Vakuumtankwagen oder Pumptankwagen verwendet. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Fahrwerk, das die gegensätzlichen Anforderungen von Straßenfahrt und Feldfahrt vereinen soll. Hier bietet sich besonders zur Realisierung geringer Rollwiderstände durch hohen Reifeninnendruck und geringer Kontaktfläche einerseits, maximale Bodenschonung durch geringen Innendruck und großer Kontaktfläche andererseits der Einsatz von Reifendruckregelsystemen an.

Bei längeren Entfernungen geht die Schlagkraft einphasiger Systeme deutlich zurück, da ein großer Teil der Arbeitszeit für Transportaufgaben aufgewendet werden muss. Auch das Mitführen der Verteilorgane über größere Distanzen erhöht das Leergewicht des Fahrzeugs und verringert somit die Nutzlast. Abhilfe kann die Trennung zwischen Transport und Ausbringung schaffen. In mehrphasigen oder absetzigen Verfahren werden LKW-Zubringer oder Traktoren mit Zubringfässern für den Flüssigmisttransport eingesetzt. Am Feldrand findet eine Überladung statt. Ein selbstfahrendes Ausbringfahrzeug oder ein gezogenes Ausbringfass werden für die Verteilung auf dem Feld eingesetzt. Alternativ dazu können bei mehrphasigen Verfahren auch Pufferbehälter am Feldrand eingesetzt werden, um die Ausbring- und Verteilfahrzeuge zeitlich zu entkoppeln. Bei sogenannten Verschlauchungssystemen kommt auf dem Feld ein reines Verteilfahrzeug ohne Tankbehälter zum Einsatz. Dieses wird über einen Schlauch von einer leistungsfähigen Pumpe am Feldrand versorgt. Dadurch kann eine maximale Bodenschonung erreicht werden. Insbesondere bei ungünstigen Bodenverhältnissen kommen diese Vorteile zum Tragen [Dür04], [Wun10].

2.2.3.4 Verfahrensalternativen Zuckerrübentransport

Agrarlogistisch weist die Zuckerrübenlogistik im Vergleich zu den bereits beschriebenen Schwerpunkten einige wesentliche Unterschiede auf. Die geernteten Rüben werden in der Regel in Mieten am Feld zwischengelagert. Der Transport kann einige Wochen, im Extremfall sogar Monate nach der Ernte erfolgen. Somit können Ernte und Transport in gewissen Grenzen unabhängig voneinander organisiert werden [Str00]. Der zweite wichtige Unterschied liegt in den Transportentfernungen. Untersuchungen von BERNHARDT ergeben durchschnittliche Transportentfernungen zur Zuckerfabrik von ca. 56 km, während die Entfernung zum Landhandel im Schnitt knapp 11 Kilometer (km) betragen, die Feld-Hof-Entfernung je nach Betriebsform zwischen etwa 2 und 7 km [Ber02].

Die Kenntnis über Menge und Ort der zu transportierenden Massen sowie die zeitliche Flexibilität erlauben eine detaillierte Vorausplanung der Rübenabfuhr. Lange Wegstrecken, die seit den 1990er Jahren aufgrund von Schließungen von Fabriken deutlich zugenommen haben, sprechen für den Einsatz von LKWs im Rübentransport. Der Anteil an Schienen- und Schleppertransporten ist infolge der Strukturveränderungen der Zuckerfabriken zurückgegangen. In der Regel wird die Zuckerrübenabfuhr überbetrieblich über Abfuhrgemeinschaften, Maschinenringe, Speditionen oder Lohnunternehmen organisiert [Str00], [Hoo01]. Ein hoher Logistikaufwand mit großen Transportentfernungen erfordert eine intensive Vorplanung der Rübenabfuhr. Durch die Zwischenlagerung der Rüben in Feltrandmieten können Mengen und Ablageorte in die Logistikplanung integriert werden. Daher hat sich der Zuckerrübentransport aus agrarlogistischer Sicht zu einem der fortschrittlichsten Bereiche entwickelt. Häufig werden papierlose Auftragsübermittlung, Flottenmanagementsysteme und automatische Fahrzeugidentifizierung eingesetzt.

2.2.4 Transportkosten

Für Erfolg und Zukunftssicherheit eines landwirtschaftlichen Betriebes sind nicht zuletzt ökonomische Gesichtspunkte ausschlaggebend. Im Sinne eines effizienten Wertschöpfungsprozesses muss es das Ziel jedes landwirtschaftlichen Unternehmers sein, möglichst detaillierte Kenntnisse über die Zusammensetzung von Verfahrenskosten zu besitzen. Der Anteil der Logistik an den gesamten Verfahrenskosten spiegelt sich im Wesentlichen in den Transportkosten wider. Tabelle 2.1 zeigt die Größenordnungen der allein für den Transport anfallenden Kosten auf Basis von Kalkulationsdaten.

Tabelle 2.1: Transportkosten ausgewählter Verfahren. Datengrundlage: [KTB13]

Entfernung [km]	Transportkosten							
	Getreide ^{1,2}		Silomais ^{1,3}		Flüssigmist ^{1,4}		Zuckerrüben ^{1,5}	
	[€/ha]	[€/t]	[€/ha]	[€/t]	[€/ha]	[€/t]	[€/ha]	[€/t]
1	10,85	1,36	93,24	1,86	31,78	1,27	-	-
5	16,09	2,01	138,60	2,77	48,18	1,93	-	-
10	22,44	2,80	190,64	3,81	67,58	2,70	-	-
20	35,00	4,37	298,22	5,96	106,68	4,27	-	-
50	-	-	-	-	-	-	1051	21,03

¹ Schlaggröße 10 ha; Lohnansatz 15 €/h; Dieselpreis 1,4 €/l

² Arbeitsverfahren Korntransport; Doppelzug Dreiseitenkippanhänger, je 18 t; Schlepper 102 kW; Ertrag 8 t/ha

³ Arbeitsverfahren Silomais häckseln; SFH 400 kW; Häckselgutwagen 40 m³; Schlepper 120 kW; Ertrag 50 t/ha

⁴ Arbeitsverfahren Gülletransport zum Feld; Gülletransportanhänger 21 m³; Schlepper 83 kW; Ausbringungsmenge 25 m³/ha

⁵ Arbeitsverfahren Zuckerrüben von Feldmiete zum Kunden; Sattelaufleger-Heckkipper 34 t; LKW-Sattelzugmaschine 300 kW; Entfernung Hof-Feld 1 km; Ertrag 80 t/ha

Die Kalkulationsrechnungen zeigen beispielhaft den Einfluss der Transportentfernung auf die Transportkosten. Ebenso wird deutlich, dass vor allem beim Umschlag von Gütern mit vergleichsweise geringem monetären Wert wie Silomais oder Flüssigmist Transportkosten besonders zu beachten sind. Speziell Betreiber von Biogasanlagen sind somit von dieser Problematik mehrfach betroffen, da Transportentfernungen häufig als relativ groß, der ökonomische Wert von Substraten und Gärrest dagegen als gering einzustufen ist.

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Transportkosten kann auch die (Schütt-) Dichte des betrachteten Transportgutes ausüben. Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft ermittelt für den Transport von Silomais neben mit Tabelle 2.1 vergleichbaren Ergebnissen auch einen Anstieg der Transportkosten für Silomais von rund 17 % durch Verwendung eines Raumgewichts von 0,30 t/m³ statt 0,35 t/m³ [MSD07].

2.3 Technische Lösungen

Die grundlegenden Problemstellungen der Agrarlogistik sind auf konkrete Anwendungsfälle aus der Praxis zurückzuführen. Landwirte und Lohnunternehmern können bei der Planung und Durchführung von Transportarbeiten inzwischen diverse kommerzielle Systeme nutzen.

Die Kenntnis über die Position eines Fahrzeuges stellt eine wichtige Grundinformation in der Agrarlogistik dar, weshalb zunächst die Möglichkeiten zur Positionsermittlung per Satellit erläutert werden.

2.3.1 Globale Navigationssatellitensysteme

Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) können zur Positionsbestimmung eines Empfangsgerätes unter Verwendung von Satelliteninformationen genutzt werden. Die wichtigsten Systeme sind das US-amerikanische GPS und das russische GLONASS. Neben diesen beiden etablierten Systemen werden künftig auch weitere GNSS verfügbar sein. In der EU wird an dem europäischen GNSS Galileo gearbeitet. Auch China entwickelt ein eigenes System, das Beidou genannt wird [Bau11].

Die Funktionsweise aller GNSS ist im Grundprinzip gleich und stammt vom amerikanischen GPS. Es handelt sich um passive Systeme, bei denen ein Empfänger Satelliteninformationen empfängt und daraus seine Position errechnet (vgl. Abbildung 2.2). Aus den Satelliteninformationen lassen sich im Empfänger über Signallaufzeitmessungen die Abstände zu den jeweiligen Satelliten errechnen. Über die im Signal ebenfalls enthaltenen Informationen über die Satellitenpositionen kann somit grundsätzlich über drei Satelliten durch Lösen eines mehrdimensionalen Gleichungssystems die Position des Empfängers in drei Raumrichtungen errechnet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Signallaufzeit exakt bestimmt werden kann, was eine sehr hohe Präzision der Empfängeruhr erfordert. In der Regel wird diese hohe Genauigkeit in der Empfängeruhr allerdings nicht erreicht. Daher wird die Ungenauigkeit der Empfängeruhr als zusätzliche Variable angesehen. Über mindestens vier Satelliteninformationen lassen sich somit in einem vierdimensionalen Gleichungssystem die Empfängerposition in drei Raumrichtungen und die Ungenauigkeit der Empfängeruhr errechnen [Bau11].

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung kann durch eine sogenannte relative GNSS-Positionierung erhöht werden. Dazu sind mindestens zwei Empfänger-Stationen nötig, eine Nutzerstation mit unbekannter Position und eine Referenzstation mit bekannter Position. Bei zeitgleicher Auswertung derselben Satellitensignale an Nutzer- und Referenzstation können durch Differenzbildung Ungenauigkeiten deutlich reduziert werden. Dadurch erhält man aber keine absolute Position, sondern relative Positionsvektoren von Nutzer- zu Referenzstation, diese aber mit vergleichsweise hoher Genauigkeit. Unter Verwendung der bekannten Position der Referenzstation kann die absolute Position der Nutzerstation errechnet werden, was in Echtzeit nur dann möglich ist, wenn zwischen Nutzer- und Referenzstation eine Kommunikationsverbindung besteht. In der Regel sendet die Referenzstation ein Korrektursignal aus.

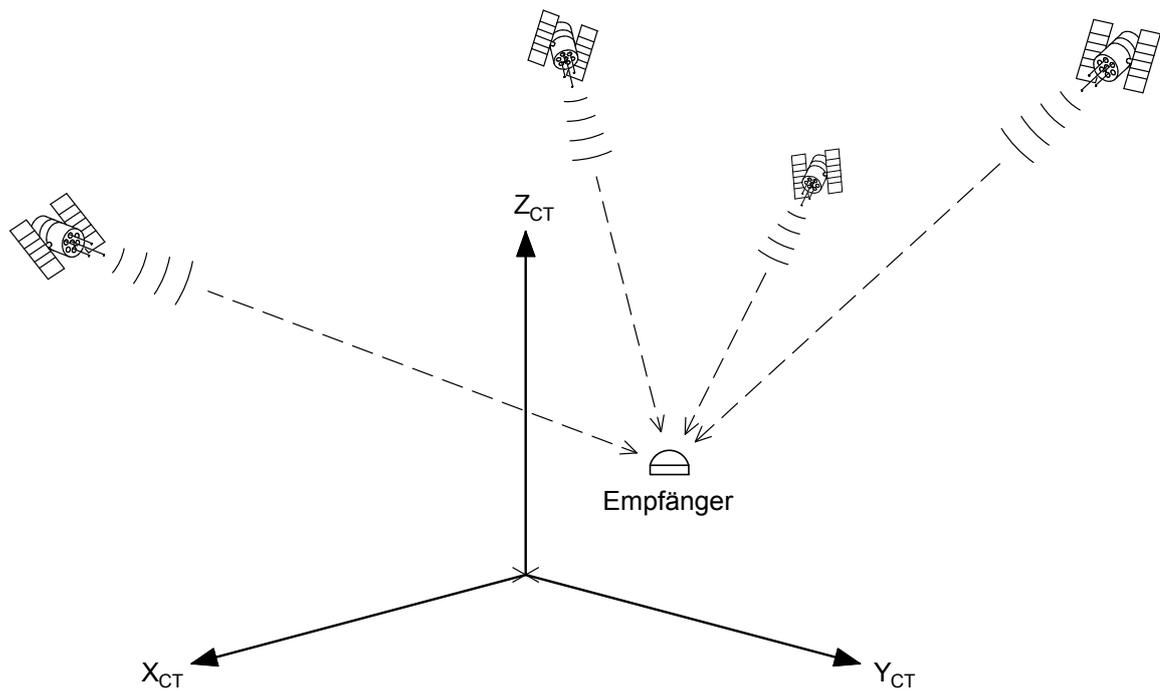


Abbildung 2.2: Grundprinzip GNSS-Ortung, verändert nach [Bau11]

Da die Fehler mit zunehmender Entfernung zur Referenzstation zunehmen, können mehrere Referenzstationen in einem Netzwerk verbunden sein. Nachträglich können Positionsdaten in einem Post-Processing korrigiert werden. Abhängig vom Korrektursignal werden die Systeme mit relativer GNSS-Positionierung als differentielles GNSS (DGNSS) oder Real-Time Kinematik (RTK) bezeichnet [Bau11], [ADE08]. Für das US-amerikanische GPS werden mit DGPS-Korrekturdiensten Genauigkeiten von 1 m und darunter erreicht. RTK-Korrekturdaten erzeugen Genauigkeiten im Zentimeterbereich [DD14].

Die Nutzung globaler Navigationssatellitensystemen zur weltweiten Bestimmung der aktuellen Position eröffnet in der modernen Landwirtschaft zahlreiche neue Anwendungsbereiche, die in den Bereich des Precision Farmings (Präziser Ackerbau) einzuordnen sind. GNSS können zur Betriebsdatenerfassung genutzt werden. Einmalig zu erfassende Daten wie die Konturen eines Schlages lassen sich mit Hilfe ständig verfügbarer Positionsinformationen ebenso effizient erheben wie zyklisch neu zu erfassende Daten wie beispielsweise georeferenzierte Ertragsmessungen in modernen Erntemaschinen. Diese Informationen können in der Betriebsführung mit anderen Informationen kombiniert werden. Bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln oder Dünger können die Ausbringmengen teilflächenspezifisch variiert werden. Für eine automatisierte Ausbringung nutzen entsprechende Geräte GNSS

für die Bestimmung ihrer Position. Sensorisch während einer Bewirtschaftungsmaßnahme erhobene Daten werden ebenfalls zur Bestimmung einer korrekten Applikationsmenge verwendet. GNSS-basierte Spurführungssysteme ermöglichen genaue Anschlussfahrten auch bei großen Arbeitsbreiten und entlasten dabei den Fahrer [DD14]. Aus agrarlogistischer Sicht ist vor allem der Nutzen von GNSS in Navigations- und Flottenmanagementsystemen sowie in Telemetrieanwendungen von Bedeutung.

2.3.2 Agrarnavigation und Flottenmanagement

Bei der Planung von Ernte- und Transportketten sind viele Betriebsleiter aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit betriebseigener Arbeitskräfte gezwungen, Fremdarbeitskräfte hinzuzuziehen. Auch der Einsatz teurer Spezialmaschinen lohnt sich nur im überbetrieblichen Einsatz. In vielen Fällen besitzen Fahrer deshalb keine ausreichenden Ortskenntnisse in ihrem Einsatzgebiet. Analoge Probleme treten auf beim Einsatz von Speditions-LKWs, beispielsweise beim Zuckerrübentransport, oder wenn örtlich von Jahr zu Jahr stark variierende Ernteerträge ab Feld zugekauft werden, wie bei größeren Biogasanlagen oft üblich. Um mangelnde Ortskenntnisse auszugleichen, können Navigationssysteme, ähnlich wie sie sich für PKWs etabliert haben, auch für landwirtschaftliche Zwecke eingesetzt werden. Spezielle Anforderungen an die Agrarnavigation werden dabei berücksichtigt. Das zugrundeliegende Kartenmaterial enthält auch Feld-, Wald- und Wiesenwegen sowie Beschränkungen bei Gewichten und Durchfahrtshöhen. Des Weiteren können Schlagkonturen und Feldeinfahrten hinterlegt sowie Fahrspuren aufgezeichnet werden [LAC13].

Flottenmanagementsysteme können für die Koordinierung ganzer Fahrzeugflotten eingesetzt werden. Informationen werden ausgetauscht zwischen den Bedieneinheiten verschiedener Fahrzeuge. Auch der Datenaustausch zwischen Fahrzeug und einer organisatorischer Zentrale ist möglich. Die Fahrer erhalten neben Navigationsanweisungen dadurch auch Informationen über Position und zum Teil auch Status der an der Flotte beteiligten Maschinen. Es ist möglich, Arbeitsaufträge vom Büro aus an Einzelfahrzeuge zu übermitteln. Gerade in komplexen Ernteketten, wie sie in der Rübenlogistik eingesetzt werden, ist dies von großer Bedeutung. Navigationsziele können auch automatisch aktualisiert werden, indem die Position der Leitmaschine als Grundlage verwendet wird. Flottenmanagementsysteme können sowohl in einem Terminal im Fahrzeug integriert sein, aber auch als Anwendung für Smart-Phones und Tablet-PCs ausgeführt sein [LAC13], [Böh13].

In der technischen Entwicklung am weitesten fortgeschritten sind Logistiksysteme in der Rübenabfuhr. Zum einen erzeugen hohe Masseerträge, lange Transportwege und nicht ortskundige LKW-Fahrer ein großes Potential für Assistenzsysteme, zum anderen wird

deren Entwicklung und Einsatz dadurch erleichtert, dass infolge der Entkopplung von Ernte und Transport Größe und Lage der Feldmieten bei der Logistikplanung als Eingangsgrößen verwendet werden können (vgl. Kapitel 2.2.3.4). Das in einem Gemeinschaftsprojekt für die Nordzucker AG entwickelte System der *Modularen Integrierten Rübenlogistik* (MIR) beispielsweise legt Stammdaten von Rübenanbauern im SAP-System des Unternehmens an. Mietenpositionen und weitere für die Planung relevante Informationen ergänzen den Datenbestand. Die Liefergemeinschaft kann auf die SAP-Daten bei der Planung der Logistik zurückgreifen und einen Abfahrplan erstellen. Während der Kampagne können mobile Geräte in den Fahrzeugen verwendet werden, um die Aufträge abzurufen und zu dokumentieren sowie die Identifikation der Transport-LKWs an den Fabriken sicherzustellen [KP03], [LAC13].

2.3.3 Telemetriesysteme und vernetzte Maschinensysteme

Neben der maschinenbaulichen Optimierung streben Landtechnikfirmen auch nach einer elektronischen Weiterentwicklung ihrer Produkte. Verschiedene Hersteller bieten meist webbasierte Fernzugriffssysteme, sogenannte Telemetriesysteme, für ihre Erzeugnisse an. Beispiele hierfür sind *JDLink*, *AGCCommand* oder *Claas Telematics*. Der Datentransfer zwischen Maschine und Server basiert auf Mobilfunktechnik. Über eine Internetverbindung sind diese Serverdaten für den Anwender nutzbar. Die Einsatzfelder von Telemetriesystemen sind vielfältig. Neben der Möglichkeit einer Ferndiagnose im Schadensfall liegt der primäre Nutzen für Anwender in der beinahe in Echtzeit erfolgenden Dokumentation von Maschinendaten, Prozesszeiten und - im Falle von Erntemaschinen - auch die Erfassung von Ertragsdaten. Bei parallelem Einsatz mehrerer typengleicher Maschinen, beispielsweise beim Mähdrusch im Komplex, hat der Betriebsleiter vom Büro aus die Möglichkeit, Leistungsdaten und Parameter der einzelnen Maschinen zu vergleichen und so die Maschineneinstellungen zu optimieren. Falls komplette Ernteketten mit einem Telemetriesystem ausgestattet sind, kann die Abfuhrlogistik überwacht und bei Problemen regulierend eingegriffen werden [Unb12]. Dabei gilt es aber zu bedenken, dass für Betrachtung kompletter Logistikketten die Systeme unterschiedlicher Hersteller kompatibel sein müssen.

Künftig wird die Vernetzung von Produktionssystemen weiter fortschreiten. Unternehmen arbeiten an vernetzten Maschinensystemen, die auch untereinander kommunizieren können. Dabei wachsen auch die Anforderungen an das Datenmanagement. Speicherort und Datenzugriff müssen an die Bedürfnisse angepasst werden [Pau+13], [AKB13].

2.4 Simulation und Optimierung agrarlogistischer Prozesse

Ein stetiges Streben nach Verbesserung von Produktionsprozessen gründet in der bestmöglichen Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Im Allgemeinen basieren durchgeführte Optimierungsmaßnahmen oft auf Erfahrungswerten und können entsprechend der bewirkten Veränderungen bewertet werden.

In Bereichen, in denen Zusammenhänge aufgrund ihrer Komplexität nicht mehr mit intuitiven Methoden zu durchschauen sind, bieten sich Verfahren der Systemanalyse an. In der Regel erfordert die Systemanalyse eine Modellierung des realen Systems. Analytische Verfahren erreichen eine vollständige Beschreibung des zu untersuchenden Systems über mathematische Gleichungen und Funktionen. In diesem Fall lässt sich der Systemzustand zu jedem Zeitpunkt ohne Zwischenschritte und mit vergleichsweise geringem Aufwand errechnen, allerdings kann die analytische Modellformulierung sehr komplex beziehungsweise sogar unmöglich sein. Alternativ dazu sind Methoden der simulatorischen Modellbildung anzusehen. Dabei werden logische Zusammenhänge in ein meist über eine Rechneranwendung ausführbares Simulationsmodell implementiert. Komplexe Systeme aus unterschiedlichen Bereichen können dadurch beschrieben werden. Die Grenzen für dieses Analyseverfahren sind bestimmt vom Aufwand für Modellbildung und vom Rechenaufwand für Simulationsexperimente [Pag+88].

Abhängig von ihren Eigenschaften können Modelle die Basis für Optimierungsverfahren bilden. Zunächst muss festgelegt werden, welche Parameter bei der Optimierung variiert werden dürfen und welches Optimierungsziel vorliegt. Über genetische und evolutionäre Verfahren lassen sich für Simulationsmodelle hinsichtlich der festgesetzten Zielgrößen optimierte Parameter ermitteln. Diese Verfahren basieren auf systematischen Parametervariationen und -rekombinationen. Die Optimalität des Ergebnisses kann in der Regel nicht formal belegt werden. Analytische Modelle dagegen lassen sich über mathematische Verfahren oft beweisbar optimieren. Eigenschaften wie Linearität, Konvexität oder Ganzzahligkeit des Modells haben Einfluss auf Existenz und Wahl eines geeigneten Verfahrens.

Die Komplexität eines Systems ist ausschlaggebend dafür, welche Form der Systemoptimierung gewählt werden sollte (vgl. Abbildung 2.3). Die Agrarlogistik stellt diesbezüglich einen interessanten Mischbereich dar. In klein strukturierten Bereichen mit kurzen Transportentfernungen und übersichtlichen Prozessketten scheint eine erfahrungsorientierte Planung und Optimierung der Transportverfahren als völlig ausreichend. Dagegen stößt man in der Logistikplanung für große Strukturen mit intuitiven Methoden schnell an Grenzen. In der ehemaligen DDR wurden bereits in den 1980er Jahren lineare Modellierungsansätze zur landwirtschaftlichen Transportoptimierung verfolgt, um die Transportverfahren auf den

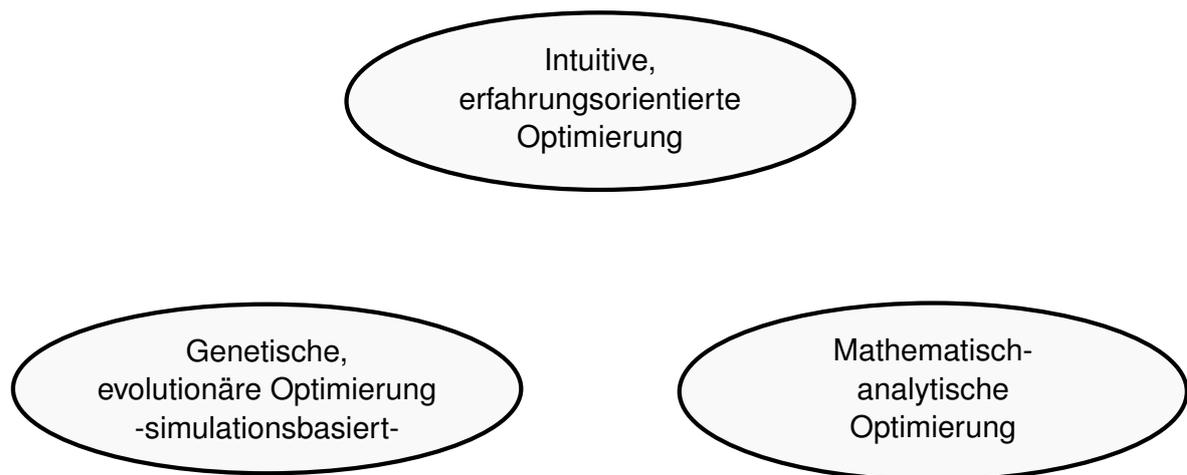


Abbildung 2.3: Möglichkeiten der Systemoptimierung

großstrukturierten landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaften effizienter zu machen [Lan83]. Fehlende Rechnerkapazitäten und Modellbeschränkungen infolge der linearen Modellierung können mögliche Ursachen darstellen, weshalb sich diese Ansätze nicht bis in die Praxis verbreitet haben.

Die wachsende Bedeutung der Agrarlogistik innerhalb der Landwirtschaft, bedingt durch Strukturveränderungen, bewirkt eine verstärkte Forschungsaktivität in den Bereichen Simulation und Optimierung von Prozessketten.

Da begrifflich in der Regel nicht unterschieden wird, findet man im Bereich Optimierung von Agrar-Logistik-Verfahren zahlreiche Studien, die auf Basis einer Ist-Analyse Potentiale für Verfahrensoptimierungen ableiten. Auf rechnergestützte, algorithmische Verfahrensoptimierung wird dabei meist verzichtet. Als Beispiel sei das *Handbuch Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen* des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie angeführt [Amo07]. Modellbildungs- und Simulationsverfahren für Probleme der Agrarlogistik zu entwickeln, ist Gegenstand unterschiedlicher Forschungsprojekte von Wissenschaftlern aus verschiedenen Nationen. NILSSON erstellt ein Modell, um die Strohbergung in Schweden zur Nutzung in zentralen Heizkraftwerken zu simulieren. Dieses Modell ermittelt über analytische Gleichungen anfallende Transportkosten sowie Energie- und Arbeitsaufwand bei der Strohbergung [Nil99]. STROHM erarbeitet für die Zuckerrübenlogistik analytische Ansätze, um den Transport von Zuckerrüben zu optimieren [Str00], BRUCHNER entwickelt auf Basis des kommerziellen Simulationssystems *AutoMod* ein dynamisches Holzerntemodell, das die Holzernte mit Harvester und Forwarder simuliert und visualisiert. Dieses System soll als Entscheidungsunterstützungs-

system bei der Planung der Holzernte dienen [Bru04a]. SONNEN entwickelt verschiedene Simulationsmodule, um Ernteprozessketten für Siliergüter zu simulieren. Dabei wird die Simulationsumgebung *eM-Plant* verwendet. Verschiedene Ernteprozesse können, mit entsprechenden Einschränkungen, simuliert werden. Schnittstellen zum Datentransfer oder zur Kommunikation existieren im dargestellten Entwicklungsstand keine. Optimierungsroutinen sind ebenfalls nicht eingebunden [Son07]. KÜBLER konzentriert sich in seiner Arbeit auf die Simulation verfahrenstechnischer Konzepte im Feldbau. Die hier entwickelten Verfahren beruhen auf einem Spurkonzept, wodurch einzelne Schläge entsprechend der Eingabedaten in Spuren unterteilt werden und auf denen die Maschinen virtuell ihre Arbeit verrichten. Die Algorithmen werden in der Simulationsumgebung *SIMPRO* erstellt [Küb09].

Die hier dargestellten Simulationsmodelle sind in Promotionsprojekten der genannten Autoren entwickelt worden. Eine Nutzung der entwickelten Systeme in kommerziellen Produkten wurde nicht vorangetrieben. Ursächlich dafür sind unter anderem rechtliche Hindernisse bei Verwendung kommerzieller Simulationsumgebungen sowie das Ausscheiden der Mitarbeiter nach Abschluss der Promotion.

An der Universität Turin forscht eine Gruppe von Wissenschaftlern bereits seit mehr als zehn Jahren an verschiedenen internationalen landwirtschaftlichen Simulationsprojekten. Die Betrachtungen erstrecken sich über vielerlei Teilgebiete der Agrarproduktion. Szenarien für die Maisstrohernte in Kanada [Ber+10] oder die Reisernte in Italien [BBP05] werden ebenso erforscht wie die Ausbringung von Flüssigmist [BB09], der Einsatz von Folienschlauchlagern bei der Getreideernte in Argentinien [Bus+11] oder mobile Getreidelager in der australischen Getreideernte [BBS08]. Die Modelle werden dabei auf der Basis der Umgebung *Extendsim* erstellt, womit diskrete Ereignissimulationen durchgeführt werden. Bestrebungen dieser Forschergruppe gehen dahin, Web-Applikationen zu erstellen, wodurch die in Datenbanken gespeicherten Simulationsergebnisse online verwendet werden können. Es soll damit Landwirten ein Entscheidungshilfsmittel bei der Verfahrensauswahl angeboten werden [BBP09], [Ber+10].

Die Modellierung und Optimierung der Infield-Routenplanung für landwirtschaftliche Fahrzeuge wird von dänischen Forschern intensiv an der Universität in Aarhus untersucht. Verfahren aus der kombinatorischen Optimierung werden angewendet, um Algorithmen zur Lösung von Problemen der Infield-Logistik wie die möglichst effektive Organisation der Interaktionen zwischen Arbeitsmaschinen und Zubringer beziehungsweise Abfuhreinheiten zu entwickeln. Interaktive Infield-Navigationssysteme könnten künftig ebenso ein Anwendungsgebiet dieser Ergebnisse sein wie der Einsatz autonomer Feldfahrzeuge in der Landwirtschaft [BS09], [BS10], [BSV10].

Im Anwendungsfeld Landwirtschaft des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts *marion* ist die Infield-Logistik ebenfalls Forschungsgegenstand. Konkret geht es dabei um die Automatisierung des Überladevorgangs in der Getreideernte zwischen Mähdrescher und Überladewagen. Neben den hauptsächlich technischen Herausforderungen der autonomen Fahrzeugführung werden auch agrarlogistische Fragestellungen und Ziele berücksichtigt. Es sollen unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen und Einflüsse Strategien im System hinterlegt werden, die optimierte Überladevorgänge hinsichtlich Bewertungskriterien wie minimale Fahrstrecken, geringstmögliche Standzeiten oder Vermeidung von Bodenverdichtungen erlauben [CLA13].

2.5 Datenmanagement und -analyse

Vor dem Hintergrund immens wachsender Datenmengen und dem Wunsch nach Methoden, Wissen daraus abzuleiten, hat sich ein eigener Wissenschaftszweig gebildet. Für diese Richtung sind Bezeichnungen wie *Data Mining*, *Knowledge Discovery in Databases* oder *Datenmustererkennung* gebräuchlich. Mehrere Einzeldisziplinen wie Datenbankforschung, Statistik oder maschinelles Lernen werden verknüpft mit dem Ziel, neue Methoden für eine systematische Ableitung von Erkenntnissen aus Datenbeständen zu finden. Unter anderem strebt man im Data Mining die Entwicklung möglichst allgemein verwendbarer, aber auch möglichst autonomer, das heißt mit geringem Anwenderwissen auskommende Verfahren an. Die konträren Ziele Allgemeingültigkeit und Autonomie gilt es zu vereinen [Bis96]. Ähnlichkeiten in der Grundstruktur der Datenbestände deuten grundsätzlich auf die Übertragbarkeit von Analysemethoden hin.

2.5.1 Anwendungen in der Landwirtschaft

In der Landtechnik ist die Bedeutung des Datenmanagements mit zunehmender Nutzung elektronischer Komponenten in Maschinen stark gewachsen. Die Standardisierung ist vor allem bei der Datenübertragung von großer Bedeutung. Im Präzisionspflanzenbau stellt die Kommunikation von Arbeitsgerät mit Sensoren oder mit Speichermedien elektronischer Karteninformationen eine Grundvoraussetzung für die Bestimmung exakter Applikationsmengen dar. Ein erweitertes Informationsspektrum entsteht durch die Fusion von Sensor- und Kartendaten [Ost13]. Bereits seit Ende der 1980er Jahre wird an Konzepten und Standards gearbeitet [Aue89], [Aue93]. Aufbauend auf den im World Wide Web etablierten XML-Standard wird das ISOXML-Format nach der Norm ISO 11783-10 entwickelt. Besonderheiten der

Datenübertragung auf und von Mobil-Geräten, wie sie infolge der beschränkten Kapazitäten auftreten können, werden dabei neben anderen Gesichtspunkten berücksichtigt [Ste12]. Dieser Prozess ist keineswegs als abgeschlossen zu betrachten. Das Kooperationsprojekt *iGreen* mit 24 Partnern aus verschiedenen Bereichen, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, arbeitet an einer offenen Kommunikations- und Dateninfrastruktur, um einen effizienten Daten- und Wissensaustausch im Agrarsektor zu ermöglichen. Bereits vorhandene Standards wie ISOBUS und ISOXML werden verwendet, um Spezifikationen zum Datenaustausch zu entwickeln, die Hersteller künftig bei der Entwicklung ihrer Produkte verwenden können [Ber13], [DFK13].

Ein innovativer Ansatz in der landwirtschaftlichen Datenübertragung wird in dem Projekt *LaSeKo* durch die Entwicklung eines landwirtschaftlichen, selbstkonfigurierenden Kommunikationssystems verfolgt. Die Grundidee besteht darin, dass ein autonomer Datenfluss in der Getreideernte vom Mähdrescher zu einem Server erzeugt werden soll, ohne auf kostenpflichtige und mitunter nicht verfügbare Mobilfunktechnologien angewiesen zu sein. Die Lösung besteht darin, dass Maschinen über lokale Funknetzwerke miteinander kommunizieren und Daten austauschen können. Die entwickelte Kommunikationseinheit, die sogenannte *LaSeKo-Box*, kann über eine CAN-Schnittstelle auf Maschinendaten zugreifen und speichert diese in XML-Dateien. In diesem Format werden die Daten weitergegeben. Die Datenübertragung im System erfolgt durch Kommunikation von Maschinen im Nahbereich. Übertragene Informationen werden von Fahrzeugen weitertransportiert. Somit wird im *LaSeKo*-Projekt eine Synchronisierung von Datenflusses und Gutfluss erreicht [Rus12].

Vergleichbare Datenstrukturen, wie sie in der Logistik unter Verwendung von GNSS entstehen, können auch in anderen Bereichen der Agrarwissenschaften vorgefunden werden. BEYER und HAIDN verwenden in Studien zur Arbeitszeitanalyse in der Innenwirtschaft Systeme zur Ortung von Positionen in Gebäuden. Die erzeugten Positionsdaten werden in einer speziell erstellten SAS-Anwendung unter Verwendung zusätzlicher geografischer Informationen, zum Beispiel aus Stallplänen, und Kausalitätsbedingungen über Bewegungsmuster verschiedener Tätigkeiten ausgewertet. Die ermittelten Tätigkeitszustände und Arbeitszeitanalysen werden über eine Videoanalyse verifiziert [BH12].

Auch in der Tierhaltung ist die logische Auswertung von Bewegungsdaten von großer Bedeutung. Aktivitätsmessungen von Rindern dienen der automatisierten Brunsterkennung. Erkennungsraten von über 90 % sind dabei möglich, allerdings bei mitunter hohen Fehleraten [KTW02]. Die Früherkennung von Krankheiten bei Jungrindern stellt einen weiteren Anwendungsbereich der strukturierten Bewegungsdatenanalyse in der modernen Tierhaltung dar [Frö+11].

2.5.2 Zeitgliederung landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse

Verfahren in der Agrarlogistik stellen zeitgebundene und zeitlich strukturierte Prozesse dar. Viele verfahrenstechnische Bewertungsparameter beziehen zeitliche Aspekte unmittelbar mit ein. In arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen wird der Arbeitszeitaufwand meist bezogen auf einen Leistungsparameter angegeben (Akh/t , Akh/m^3 , Akh/ha). Um Verfahrensleistungen vergleichen zu können, bietet sich die Darstellung relativ zu einer zeitlichen Komponente an (t/h , m^3/h , ha/h). Ein klar definierter Zeitbezug ist hier unumgänglich, um die Vergleichbarkeit von Verfahrenskennwerten gewährleisten zu können [Her99].

Historisch begründet durch die Teilung Deutschlands nach dem zweiten Weltkrieg sind in Deutschland zwei Zeitgliederungen für landwirtschaftliche Arbeitsprozesse entstanden. Das Zeitschema nach KTBL [KTB05] war vor allem in Westdeutschland gebräuchlich. Dort wird unterschieden zwischen Hauptzeit, Wendezeit, Versorgungszeit, Verlustzeit, Wartezeit und Rüst- und Wendezeit. Die Zeitgliederung TGL 22289 [TGL70] stellt das entsprechende Pendant in der ehemaligen DDR dar. Im Vergleich zum KTBL-Schema ist diese Zeitgliederung deutlich detaillierter und auch strukturierter aufgebaut. Durch Verwendung numerischer Indizes ist eine weitere Untergliederung von Teilzeiten durch Einführen weiterer Indizes möglich. Nach der deutschen Wiedervereinigung werden in das Zeitschema nach KTBL auch entsprechende Bezeichnungen nach TGL 22289 integriert [Son07], [Her99].

Beide Zeitgliederungen erweisen sich unter modernen Gesichtspunkten als nicht optimal. Hauptkritikpunkt der KTBL-Gliederung ist der geringe Detaillierungsgrad. Im Zusammenhang mit einer automatisierten Prozessdatenerfassung zeigen sich auch in der TGL 22289 Schwachpunkte. Aufbauend auf der Zeitgliederung nach TGL 22289 erstellt SONNEN in seiner Arbeit ein angepasstes Zeitgliederungsschema, das speziell auch auf die automatisierte Prozessdatenerfassung mit angegliederter Schwachstellenanalyse ausgerichtet ist [Son07]. In der KTBL-Arbeitsgruppe *Arbeitswirtschaftliche Grundlagen* wird auch vor dem Hintergrund von vermehrten Forderungen aus der Landtechnikindustrie nach einer einheitlichen Zeitgliederung an einer Neuentwicklung gearbeitet. Diese soll insbesondere unkompliziert, ausreichend detailliert, erweiterbar, für alle landwirtschaftlichen Arbeiten geeignet und für automatisiert erhobene Daten anwendbar sein. In drei Hauptebenen wird zwischen Haupt-, Stör- und Nebenzeit unterschieden. Nach Bedarf können diese Zeiten in beliebig viele Gliederungsebenen unterteilt werden [Win14]. Die Notation verwendet „t“ mit entsprechenden numerischen Kennzahlen für die verschiedenen Teilzeiten (vgl. Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Zeitgliederung des KTBL für landwirtschaftliche Arbeiten nach [Win14]

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
t1 Hauptzeit	t11 Arbeitsverrichtungszeit t12 Wendezeit t13 Be- und Entladezeit t14 Ablaufbedingte Wartezeit t15 Einstellungszeit t16 Arbeitsbedingte Erholungszeit	t111 Arbeitsverrichtung im engeren Sinne t112 Lastfahrt t113 Leerfahrt t114 Kontrolle	t1121 am Arbeitsort t1122 Straße t1131 am Arbeitsort t1132 Straße
t2 Störzeit	t21 Funktionelle und technische Störzeit t22 Organisationsbedingte Störzeit t23 Witterungsbedingte Störzeit t24 Persönliche Verweilzeit	t211 Funktionelle Störung t212 Technische Störung	
t3 Nebenzeit	t31 Versorgungszeit t32 Arbeitsvorbereitungszeit t33 Arbeitsnachbereitungszeit t34 Wegezeit t35 Wartungszeit	t311 am Ausgangsort t312 am Arbeitsort t321 Rüsten t322 Arbeitsorganisatorische Absprache t331 Rüsten t332 Arbeitsorganisatorische Absprache t351 am Ausgangsort t352 am Arbeitsort	t3211 am Ausgangsort t3212 am Arbeitsort t3221 am Ausgangsort t3222 am Arbeitsort t3311 am Ausgangsort t3312 am Arbeitsort t3321 am Ausgangsort t3322 am Arbeitsort

2.6 Reflexion der Problemstellungen: Ausblick in andere Forschungsbereiche

Logistische Problemstellungen ergeben sich in sämtlichen Anwendungsbereichen, die von Materialfluss abhängig sind. Die Übertragbarkeit von Lösungsansätzen eines Gebietes auf ein verwandtes Problemgebiet hängt wesentlich von der Problemstruktur und den zugehörigen Einflussparametern ab. In Tabelle 2.3 werden wichtige Einflussgrößen gegenüber gestellt.

Rahmenbedingung der Agrarlogistik wie örtlich flexible Arbeitsmaschinen, schlecht prognostizierbare Transportmengen, Interaktionen zwischen mehreren sich in Bewegung befindenden Maschinen sowie eine großen Witterungsabhängigkeit erschweren die Adaption logistischer Lösungsmöglichkeiten aus anderen Bereichen. Die größten Übereinstimmungen in der grundlegenden Problemstellung gibt es mit der Logistik im Baugewerbe. Dort existieren ähnliche Ansätze zur Optimierung der Logistik wie sie auch in der Landwirtschaft vorzufinden sind. Telemetrie- und Flottenmanagementsysteme befinden sich dort in einem vergleichbaren Entwicklungsstand [GKS07].

Logistische Abläufe auf Baustellen sind nicht isoliert zu sehen, sondern bilden einen Teil des Gesamtkonzepts [Bru04b]. Forschungsansätze zur Optimierung der Logistik auf Baustellen integrieren Prozesssimulationen, ähnlich wie Simulationsmethoden in der Agrarlogistik (vgl. Kapitel 2.4), um die gerade auf Großbaustellen komplexen logistischen Abläufe im Vorhinein testen und optimieren zu können. Als Zielgröße kann eine möglichst hohe Auslastung von Maschinen wie Kränen oder Betonpumpen verwendet werden. Ein besonderes Augenmerk liegt im Bauwesen aber auch auf der Einhaltung von Terminen und Zeitplänen [HSK11].

Tabelle 2.3: Einflussgrößen auf Logistik in unterschiedlichen Bereichen

	Gütertransport LKW	Gütertransport Schiene	Gütertransport Schiff	Landwirtschaft	Bau-Logistik	Gutfluss industr. Fertigung
Verkehrsabhängigkeit	●			○	○	
Transportmengen bekannt	●	●	●	○	○	●
ortsfeste Ziele	●	●	●			●
ortsfeste Arbeitsmaschinen / Be-, Entladestationen	●	●	●			●
Interaktion zwischen Fahrzeugen in Fahrt				●	○	
Witterungsabhängigkeit				●	○	

● trifft zu

○ trifft mit Einschränkungen zu

3 Zielstellung

Primärziel in der Landwirtschaft ist die Erzeugung unterschiedlichster Agrarprodukte. Während des Produktionsprozesses werden an verschiedenen Stellen Informationen erzeugt oder benötigt. Als Träger dieser Informationen dienen Daten, die in der modernen Landwirtschaft in Bereichen wie Rückverfolgbarkeit, Qualitätsmanagement oder Prozessoptimierung zentrale Bedeutung erlangt haben. Agrarlogistische Herausforderungen gehen in der Regel einher mit einem hohen Transportaufkommen in einem beschränkten Zeitfenster. Dadurch werden in kurzer Zeit große Mengen an Informationen produziert, die zum einen in Form von Daten festgehalten werden müssen. Zum anderen müssen die so gespeicherten Informationen auch wieder aus den Daten entnommen werden, um sie geeignet nutzen zu können.

Die Datenerfassung kann in vielen landwirtschaftlichen Fahrzeugen durch Nutzen von CAN- oder anderen Datenschnittstellen auch unter Zuhilfenahme von GPS-Technik vergleichsweise leicht automatisiert werden. Auch die automatische Speicherung der Daten über mobilfunkbasierte Telemetriesysteme oder lokale Funknetzwerke ist in der Entwicklung weit fortgeschritten. Weit weniger erforscht ist dagegen die Aufbereitung dieser Daten, insbesondere wenn, wie in der Agrarlogistik, nicht Einzelfahrzeuge sondern Fahrzeugflotten im Einsatz sind. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an.

Die Schlüssigkeit dieser Herangehensweise zeigt sich an den in Kapitel 2 vorgestellten Systemen aus dem Bereich der Agrarlogistik. Moderne Dokumentations-, Telemetrie- oder Managementsysteme erzeugen große Mengen an Daten, dagegen benötigen intuitive und strukturierte Optimierungsansätze in der Agrarlogistik aufbereitete oder ausgewertete Rohdaten als Eingangsparameter.

Um Logistiksysteme möglichst allgemein und unabhängig von herstellerspezifischen Systemen analysieren zu können, wird als Minimalanforderung an den Datenbestand vorausgesetzt, dass Positionsdaten sowie Maschinenart aller an einer Prozesskette beteiligten Fahrzeuge vorliegen. Ein ähnlicher Ansatz, beschränkt auf einphasige Logistikketten für Silomais, wird auch in [DDS10] verwendet.

Die gewählte Einschränkung in der zu verwendenden Datengrundlage, die nur GNSS-Positionsdaten und Informationen über die Art der zugehörigen Maschine enthält, wirkt

sich weitreichend auf die zu entwickelnde Methode zur Analyse von agrarlogistischen Prozessketten aus. Die Datenerhebung in der Praxis kann vollkommen unabhängig von der technischen Ausstattung der eingesetzten Fahrzeuge erfolgen. Somit ist die Methodik komplett herstellerunabhängig und auch der Einsatz von Fahrzeugen, deren primärer Einsatzzweck nicht im landwirtschaftlichen Bereich zu sehen ist, stellt keine Einschränkung dar. Aus ökonomischer Sicht ist es von Bedeutung, dass aufgrund der geringen Anforderungen an die Messtechnik vergleichsweise kostengünstige Systeme eingesetzt werden können, die sich mit geringem Aufwand installieren lassen. Die dadurch gegebene Flexibilität in der Datenerfassung macht es möglich, Analysen auch kurzfristig durchzuführen und auf Änderungen in der Zusammenstellung der Maschinenverbunde auch nach Prozessbeginn reagieren zu können.

Ziel der Auswertung der Daten ist es, aus den vorhandenen Rohdaten aussagekräftige Prozessinformationen abzuleiten. Dazu sollen entsprechend den eingesetzten Maschinenarten Logistikszenerarien ermittelt und den Fahrzeugen zeitabhängig Betriebszustände zugewiesen werden, die weitere Auswertungen ermöglichen. In Anbetracht der Struktur der Datengrundlage ist es hier weitgehend unmöglich, aus einer Vielzahl von Informationen in einem Datensatz spezifische Einzelinformationen zu entnehmen. Die Aussagekraft der GNSS-Positionsdaten ist im Hinblick auf die Zuweisung von Betriebszuständen in agrarlogistischen Prozessketten eingeschränkt. Daher müssen weiterverwendbare Informationsgehalte über die Fusionierung von Einzeldatensätzen algorithmisch generiert werden, um darauf aufbauend Analyseergebnisse abzuleiten. Für die betrachtete Prozesskette können so Prozesszeiten ausgewertet, zustandsabhängige Geschwindigkeitsprofile erstellt und Einzelfahren zurückverfolgt werden. Für weitergehende Analysemethoden wie Optimierungsanwendungen oder ökonomische Bewertungssysteme können die erzeugten Informationen als Eingangsgrößen dienen.

Die erarbeiteten Auswertungsmethoden sollen in ein flexibel nutzbares Software-System integriert werden, mit dessen Hilfe landwirtschaftliche Logistiksysteme analysiert, visualisiert und bewertet werden können. Dabei werden insbesondere Verfahren aus den Bereichen Getreideernte, Ernte von Siliergütern und Flüssigmistausbringung fokussiert. Das System erhält die Bezeichnung *Logistik-Analyse*. Forschungsansätze aus [HB11b], [HB11a] [HB12b] und [HB12a] werden dabei berücksichtigt, verbessert und erweitert.

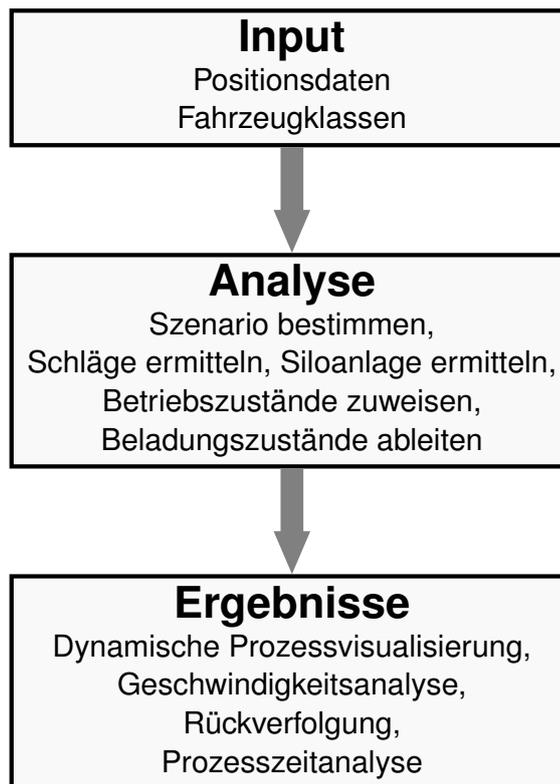


Abbildung 3.1: Prinzip der Analysemethodik

Die Kriterien und Anforderungen für die Entwicklung des Analysesystems *Logistik-Analyse* lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Geringe Anforderung an die Rohdatenbasis; Positionsdaten und Art der Maschine als Minimalvoraussetzung
- Ermittlung von logistischen Szenarien und Zuweisung von zeitabhängigen Betriebszuständen
- Visualisierung der Abläufe in einer Prozessketten
- Möglichkeit zur Analyse der Prozesszeiten aller Einzelfahrzeuge einer Prozesskette
- Rückverfolgbarkeit von Beladungsorten
- Exportfunktion von Maschinen- und Systemkennwerten zur Weiterverwendung als Eingabedaten für Optimierungsverfahren oder ökonomische Analysen

4 Material und Methoden

Das zu entwickelnde Analysesystem baut auf Prozessdaten aus der Agrarlogistik auf. Methodisch muss deshalb ein schlüssiges Konzept gefunden werden, um Daten zu generieren und dabei sowohl die Schwierigkeiten bei der Datenerhebung in der landwirtschaftlichen Praxis zu berücksichtigen als auch die Anforderungen aus Sicht der Datenauswertung zu erfüllen. Zur Entwicklung der Verfahren muss eine geeignete Softwareumgebung gefunden werden. Eine umfangreiche Datenbasis, die unterschiedliche Verfahren und Standorte abdeckt, bildet auch die Grundlage für eine Validierung der Analysemethoden und -algorithmen.

4.1 Methodik und Technik der Datenaufzeichnung

Im Vorfeld der Datenerhebungen werden die Anforderungen an die Messsysteme strukturiert. Folgende Bedingungen sind von der verwendeten Technik zu erfüllen:

- Eine Aufzeichnungsfrequenz von 1 Hz soll möglich sein.
- Es soll ein interner Datenspeicher vorhanden sein, der bei einem Wegpunkt pro Sekunde mindestens 24 Stunden aufzeichnen kann.
- Ein eingebauter Akku soll eine Betriebsdauer von mindestens 36 Stunden garantieren, damit auch nach mehrjährigem Gebrauch ein ganztägiger Einsatz sichergestellt ist.
- Die aufgezeichneten Daten sollen in verschiedenen Dateiformaten weiterverwendet werden. Insbesondere wird dabei auf die Ausgabe als .txt-Datei Wert gelegt, welche in allen gängigen Softwaresystemen zur Datenauswertung eingelesen werden kann.
- Eine möglichst hohe Genauigkeit ist wünschenswert. Es sollen jedoch komplette Ernteketten mit je einem Datenlogger pro Fahrzeug ausgestattet werden, weshalb die Kosten pro Gerät in vertretbarem Rahmen bleiben müssen.
- Der Einsatz unter typischen Bedingungen in der landwirtschaftlichen Praxis soll zuverlässig gewährleistet sein.

Tabelle 4.1: Spezifikationen der verwendeten Datenlogger [Qst09], [Qst11]

	BT-Q1000eX, BT-Q1000XT
Maximale Akku Laufzeit	bis 42 h
Speicherbare Wegpunkte	400.000
GPS Chip	MTK II GPS Module
Frequenz	L1, 1575,42 MHz
Kanäle	66 Kanäle
Empfindlichkeit	-165 dBm
Datum	WGS 84
Korrektursignal DGPS	WAAS, EGNOS, MSAS
Positionsgenauigkeit, ohne Korrektur, horizontal	3 m CEP (50 %)
Positionsgenauigkeit DGPS, horizontal	2,5 m CEP (50 %)
Genauigkeit Geschwindigkeit, ohne Korrektur	0,1 m/s
Genauigkeit Geschwindigkeit DGPS	0,05 m/s
Genauigkeit Zeit	50 ns RMS
Kalt-, Warm, Heißstart, durchschnittlich	35, 33, 1 s
GPS-Ausgabeprotokoll	NMEA 0183 (V3.01)
GPS-Strings, Grundeinstellung	GGA, GSA, GSV, RMC
GPS-Strings, optional	VTG, GLL
Schnittstellen	USB, Bluetooth

4.1.1 Verwendete Technik zur Datenaufzeichnung

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen fällt die Entscheidung auf Geräte der Firma *Qstarz International Co.,Ltd.* 2010 werden acht Datenlogger des Modells *BT-Q1000eX* angeschafft, 2012 zwölf des Modells *BT-Q1000XT*. Das erste Modell ist im Jahr 2012 nicht mehr erhältlich. Ausgewählte Produktspezifikationen des Herstellers werden in Tabelle 4.1 zusammengefasst [Qst09], [Qst11].

Die beiden verwendeten Logger unterscheiden sich technisch kaum. Ein nennenswerter Unterschied besteht darin, dass das Modell *BT-Q1000eX* bis zu einer Frequenz von 5 Hz Daten aufzeichnen kann, der Logger *BT-Q1000XT* dagegen nur bis 1 Hz. Beide Modelle können als USB- und Bluetooth-Receiver genutzt werden und erzeugen eine Ausgabe bis 5 Hz.

Zum Konfigurieren der Datenlogger und zum Auslesen der aufgezeichneten Daten ist eine spezielle Software nötig, die vom Hersteller mitgeliefert wird. Die Verbindung vom Rechner zum Gerät wird über USB hergestellt. Die wichtigsten Konfigurationseinstellungen legen die Beschaffenheit des Aufzeichnungsintervalls fest (zeit-, strecken- oder geschwindigkeitsbe-

zogen) sowie das Verhalten bei vollem Speicher (Protokoll stoppen oder überschreiben). Daneben können auch weitere Parameter ausgewählt werden, wie die Aufzeichnung bestimmter zusätzlicher GPS-Parameter oder Aktivierung eines Vibrationssensors, der das Gerät bei längerem Stillstand ausschalten soll. Dies erweist sich aber im Praxiseinsatz als ungeeignet, da insbesondere die Vibration von LKWs auf der Straße zum Teil so gering ist, dass es zu fälschlichen Abschaltungen kommt.

Aufgezeichnete Daten können über die mitgelieferte Software ausgelesen werden. Sie werden zunächst in das Programm importiert und dort unter Verwendung einer Hintergrundkarte visualisiert. Anschließend können die Daten als Projektdatei gesichert und über eine Export-Funktion in vielen gängigen Dateiformaten wie .nmea, .csv oder .kmz abgespeichert werden. Der Datenspeicher des Datenloggers kann in diesem Programm geleert werden.

4.1.2 Eignung für den Praxiseinsatz

Die Eignung der Datenlogger zur Dokumentation von Wegstrecken landwirtschaftlicher Fahrzeuge, insbesondere bezogen auf die horizontale Positionsgenauigkeit, wird mit einer dynamischen Vergleichsmessung getestet. Ein PKW wird dazu mit einem *Trimble* RTK-GPS-Empfänger *AgGPS®FmX™* mit Antenne auf dem Dach ausgestattet. Zwei Datenlogger des Modells *BT-Q1000eX* werden bei der Messung mitgeführt, einer ebenfalls auf dem Dach des Fahrzeugs, der andere im Fahrzeuginnenraum. Die Messungen finden an zwei verschiedenen Tagen statt, jeweils über eine Fahrzeit von etwa 30 Minuten bei einer Strecke von 30 km. Als Referenzangabe dient die Position des RTK-Empfängers.

Die gemessenen horizontalen Abweichungen von der RTK-Position sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die farblich unterschiedlich gekennzeichneten Klassen mit zugehörigen Radien spiegeln die Anteile der gemessenen Positionen wider, deren Abweichungen einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten. Da es aus technischen Gründen nicht möglich ist, mehrere Messsysteme vertikal exakt übereinander zu platzieren, ist ein Teil der gemessenen Abweichungen dem Messaufbau geschuldet. Dieser Fehler liegt im Dezimeterbereich. Die Messdaten wurden dahingehend nicht bereinigt.

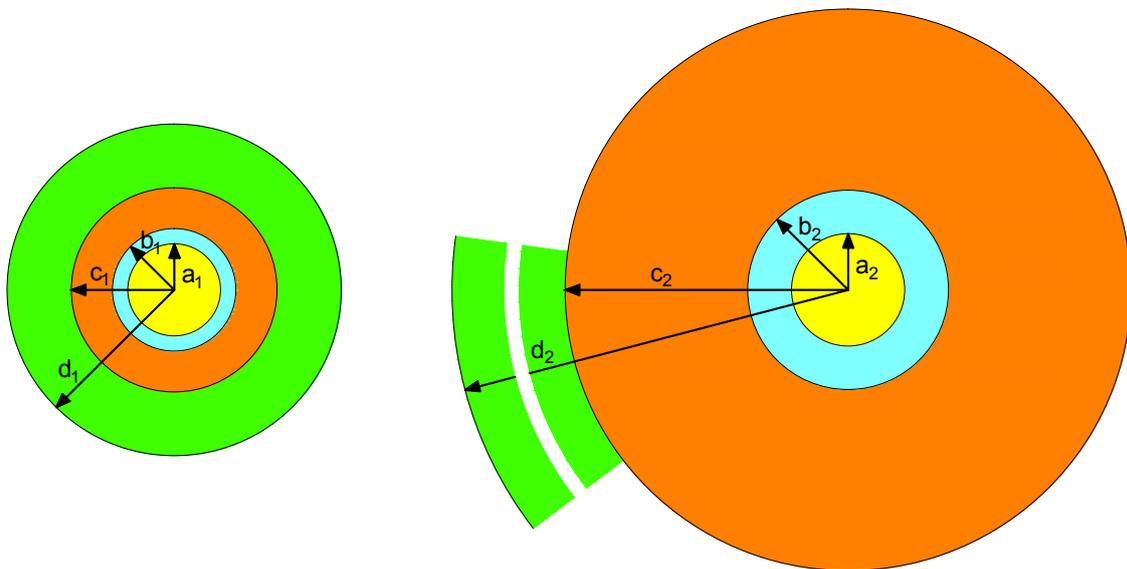
Bei Montage des Datenloggers auf dem Fahrzeugdach weisen 99 % der gemessenen Positionen einen Abstand von weniger als 6,5 m bezogen auf den RTK-Referenzwert. 90 % der Werte liegen in einem Umkreis von höchstens 4,0 m. Falls der Datenlogger im Inneren des Fahrzeugs mitgeführt wird, weichen etwa 10 % der Positionen um mehr als 11 m vom RTK-Wert ab. Daher werden die Datenlogger bei den durchgeführten Datenerhebungen stets außen an den jeweiligen Fahrzeugen angebracht.

Datenlogger auf PKW-Dach

$$\begin{aligned} a_1 &= 1,8 \text{ m} \\ b_1 &= 2,4 \text{ m} \\ c_1 &= 4,0 \text{ m} \\ d_1 &= 6,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Datenlogger in PKW-Innenraum

$$\begin{aligned} a_2 &= 2,2 \text{ m} \\ b_2 &= 3,9 \text{ m} \\ c_2 &= 11,0 \text{ m} \\ d_2 &= 32,2 \text{ m} \end{aligned}$$



Anteil der im Bereich enthaltenen Messpositionen:

20 %

50 %

90 %

99 %

Abbildung 4.1: Überprüfung der Positionsgenauigkeit eines Datenloggers während der Fahrt; horizontale Abweichung zur Referenzposition; Datenlogger auf PKW-Dach (links) und im PKW-Innenraum (rechts)

Um die Datenlogger im Einsatz vor Verschmutzungen, Feuchtigkeit und Erschütterungen zu schützen, werden sie in handelsübliche Abzweigdosen für Elektroinstallationen verpackt und darin mit Schaumstoff gepolstert (vgl. Abbildung 4.2, rechts). Im Hinblick auf eine mögliche zusätzliche Abschirmung ist zu beachten, dass es sich um Kunststoffdosen handelt. An vorhandenen Ösen können die Dosen inklusive Logger entweder mit Kabelbindern oder mit Gewebeklebeband an Fahrzeugen befestigt werden (vgl. Abbildung 4.2, links). Die Zielsetzung in Bezug auf die Datenerhebung, Rüstzeiten möglichst gering zu halten, wird vollständig erfüllt.



Abbildung 4.2: links: Befestigung am Fahrzeug, rechts: Kunststoffdose mit Polsterung

4.1.3 Standorte der Datenerfassung

Die Aufzeichnung von Positionsdaten agrarlogistischer Verfahrensketten erstreckt sich über einen Zeitraum von etwa drei Jahren von Herbst 2010 bis Herbst 2013. Verfahrensketten in der Getreideernte, der Ernte von Siliergütern sowie der Ausbringung von Flüssigmist werden dabei analysiert. Die Daten werden in unterschiedliche Agrarregionen Deutschlands erhoben. In Tabelle 4.2 sind die Standorte im Einzelnen aufgelistet. Deren geografische Lage wird in Abbildung 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.2: Standorte der Datenaufzeichnung

Datum	Verfahrenskette	Spezifizierung	PLZ
06.10.2010	Häckselkette Silomais	einphasig	84172
09.10.2010	Häckselkette Silomais	einphasig	84172
10.10.2010	Häckselkette Silomais	einphasig	84172
27.06.2011	Häckselkette Ganzpflanzen	einphasig, Agrar-LKW	94104
01.10.2011	Häckselkette Silomais	einphasig, Agrar-LKW	94354
08.06.2012	Häckselkette Grünland	einphasig, Agrar-LKW	92693 ¹
10.07.2012	Getreideernte	einphasig	85402
19.07.2012	Getreideernte	einphasig	82140
07.08.2012	Getreideernte	mehrphasig, Telemetriedaten	38895 ²
08.08.2012	Getreideernte	mehrphasig, Telemetriedaten	38895 ²
12.09.2012	Häckselkette Silomais	mehrphasig, Bodenmiete	14827 ³
14.09.2012	Häckselkette Silomais	mehrphasig, Bunkeraufnahme	31249 ³
17.09.2012	Häckselkette Silomais	mehrphasig, Bunkeraufnahme	06420 ³
19.09.2012	Häckselkette Silomais	mehrphasig, Bodenmiete	39307 ³
06.10.2012	Häckselkette Silomais	mehrphasig, Bunkeraufnahme	25899 ³
08.04.2013	Flüssigmistausbringung	einphasig	85402
15.04.2013	Flüssigmistausbringung	einphasig	85402
24.04.2013	Flüssigmistausbringung	mehrphasig	85402
07.06.2013	Silagebergung Grünland	Ladewagen	87480 ⁴
27.09.2013	Häckselkette Silomais	einphasig	85232
08.10.2013	Häckselkette Silomais	einphasig, Ertragserfassung	94116

¹ Rohdatenquelle: [Vet13]² Rohdatenquelle: [Str13]³ Rohdatenquelle: [Wut13]⁴ Rohdatenquelle: [Lfl13]

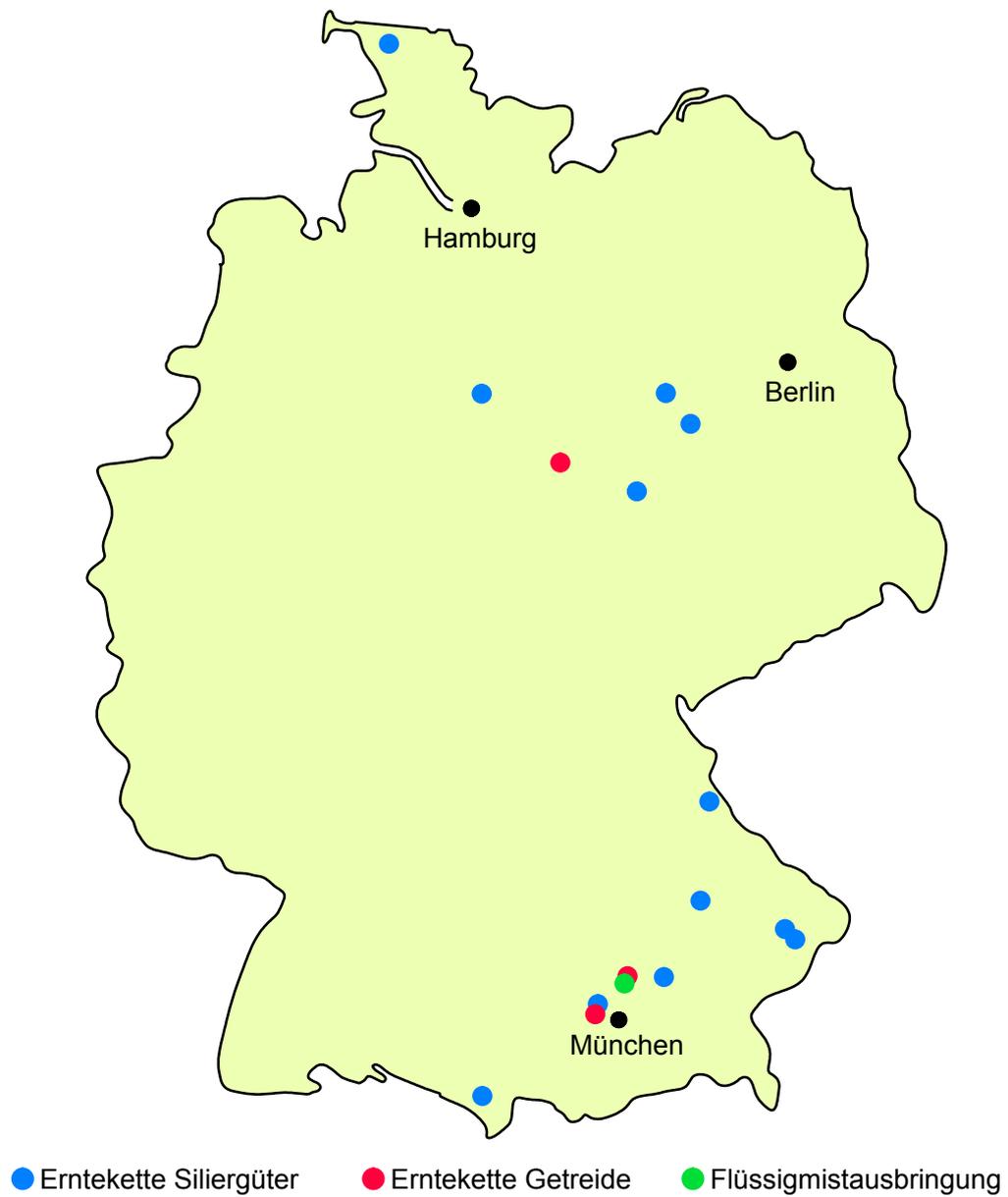


Abbildung 4.3: Standorte der Datenaufzeichnung

Typ	Hauptinhalte
GGA	Uhrzeit, Positionskoordinaten, Höhe über NN, Positions-Qualitätsparameter
RMC	Uhrzeit, Positionskoordinaten, Geschwindigkeit, Datum, Richtung
VTG	Geschwindigkeit
GSA	Satelliteninformationen
GLL	Uhrzeit, Positionskoordinaten

Tabelle 4.3: Ausgewählte NMEA-0183-Datensatztypen

4.2 Aufbereitung der Rohdaten

Anhand der aufgezeichneten Positionsdaten werden in dem zu entwickelnden Analysesystem Prozessketten der Agrarlogistik untersucht. Die für die Datenaufzeichnung verwendeten Datenlogger geben Positionsinformationen im NMEA-Format aus, das von handelsüblichen Geräten in der Regel unterstützt wird. Um die Dateninhalte für die Analyse weiterverwenden zu können, müssen die Rohdaten aufbereitet werden. Die Aufbereitung beinhaltet die Extraktion der benötigten Informationen und die Berechnung der Gauß-Krüger-Koordinaten aus geographische Länge und Breite. Mit diesen in die Ebene projizierten Koordinaten lassen sich Rechenoperationen auf Basis von Positionsdaten effizient ausführen.

4.2.1 Rohdaten

Der von der US-amerikanischen *National Marine Electronics Association* (NMEA) 1983 veröffentlichte *Standard for Interfacing Marine Electronic Devices*, bezeichnet als NMEA-0183, bezieht sich zunächst auf den Datenaustausch zwischen Instrumenten für marine Anwendungen, etabliert sich aber auch als Standard für den Datenaustausch von Satellitennavigationsgeräten. Da NMEA-0183-Datensätze ausschließlich aus druckbaren ASCII-Zeichen einschließlich der für den Zeilenwechsel verwendeten Steuerungszeichen *Carriage Return* und *Line Feed* bestehen, sind sie in Standard-Editoren lesbar. Jeder Datensatz erstreckt sich über genau eine Zeile, wobei die Einzelinformationen durch Kommas getrennt sind. Das Format sieht verschiedene Arten von Datensätzen vor, welche unterschiedliche Informationen enthalten können. Die erste Informationseinheit in jeder Zeile beginnt mit \$ und spezifiziert den Datensatz durch Angabe der Art des Empfangsgeräts (zum Beispiel *GP* für GPS-Empfänger) und des Typs des Datensatzes [Bau11]. Tabelle 4.3 zeigt eine Auswahl von Datensatztypen mit den wichtigsten dazugehörigen Informationsgehalten.

Die im folgenden Datenbeispiel in den Datensatztypen GGA und RMC rot hervorgehobenen Einzelinhalte werden für die Auswertungen verwendet und müssen aus den Datensätzen extrahiert werden. Längen- und Breitengrad liegen im NMEA-0183-Standard als kombinierter, ungetrennter Wert aus Gradangabe und Winkelminute vor. Dezimalen beziehen sich auf die angegebenen Winkelminuten. Für weitere Rechenschritte erweist es sich als sinnvoll, die Positionsangaben in ein Format umzurechnen, das nur aus dezimalen Gradangaben besteht. Die Geschwindigkeitsangabe erfolgt im RMC-Datensatz in der Einheit Knoten. Auch hier bietet sich eine Umrechnung an.

```
$GPGGA,092003.00,4823.9432,N,01143.7842,E,1,00,0.0,493.986,M,0.0,M,,*66
```

Datensatztyp	Uhrzeit (UTC)	Breitengrad	Nord / Süd	Längengrad	Ost / West	Qualität	Anz. Satelliten	HDOP	Höhe über NN	Höhe über Geoid	Prüfsumme
--------------	---------------	-------------	------------	------------	------------	----------	-----------------	------	--------------	-----------------	-----------

```
$GPRMC,092003.00,A,4823.9432,N,01143.7842,E,0.01162,87.939,130214,,*05
```

Datensatztyp	Uhrzeit (UTC)	Status	Breitengrad	Nord / Süd	Längengrad	Ost / West	Geschwindigkeit	Kurs	Datum	Prüfsumme
--------------	---------------	--------	-------------	------------	------------	------------	-----------------	------	-------	-----------

4.2.2 Gauß-Krüger-Koordinaten

Die Angabe von Längen- und Breitengrad als Positionsangabe bezieht sich immer auf die Oberfläche eines Ellipsoids, einer mathematische Beschreibung der Gestalt der Erde als Rotationskörper einer Ellipse [Gro76].

Geographische Koordinaten, das heißt die Angabe von geographischer Länge und Breite, erweisen sich in der Handhabung in mehrerlei Hinsicht als umständlich. In die Ebene projizierte Koordinaten haben demgegenüber deutliche Vorteile, sei es bei der visuellen Darstellung der Positionen auf der Zeichenebene oder bei der Berechnung von Abständen zweier Punkte. In der vorliegenden Arbeit hat die Entwicklung logischer Zusammenhänge zwischen Positionsdaten verschiedener Fahrzeuge oder die Positionserkennung auf Schlägen zentrale Bedeutung. Viele Rechenoperationen können ausschließlich oder, fallabhängig, mit deutlich reduziertem Aufwand an in die Ebene projizierten Koordinaten ausgeführt wer-

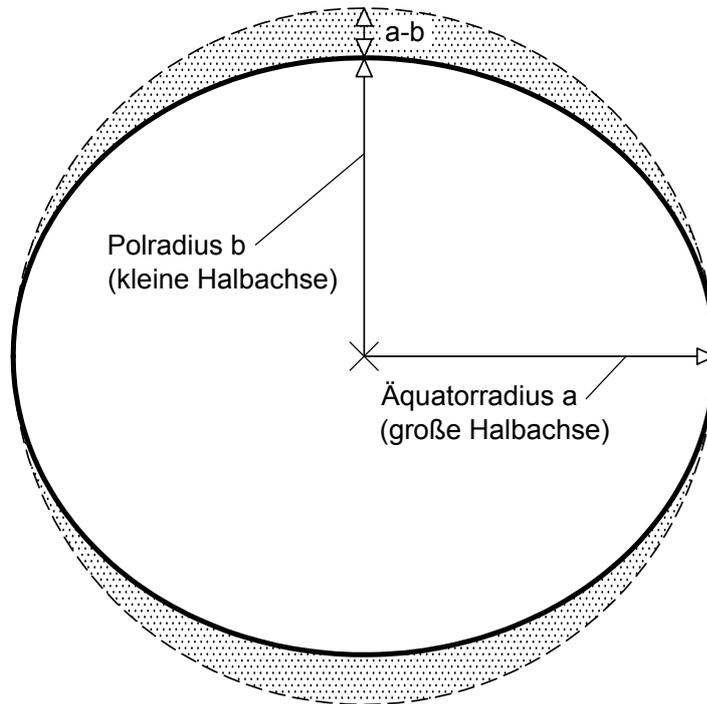


Abbildung 4.4: Parameter des Ellipsoids [Höl98]

Tabelle 4.4: Ellipsoid-Parameter, verändert nach [Höl98]

	kleine Halbachse a	große Halbachse b	numerische Exzentrizität $\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$
Bessel	6377397,155 m	6356078,963 m	0,08169683
WGS 84	6378137,000 m	6356752,313 m	0,08181919

den, weshalb die im Folgenden dargestellte Transformation der geographischen Koordinaten in die ebenen und metrischen Gauß-Krüger-Koordinaten einen grundlegenden Schritt in der Rohdatenaufbereitung darstellt.

4.2.2.1 Wechsel des Bezugsellipsoids

Die Positionsdaten, die man über die Nutzung von GPS erhält, beziehen sich auf die mathematische Approximation der Erde durch das WGS 84-Ellipsoid. Den verwendeten Gauß-Krüger-Koordinaten für Deutschland liegt dagegen das Bessel-Ellipsoid zugrunde [Gro76], [Höl98]. Ellipsoide lassen sich beschreiben durch die Angabe der Längen der beiden Halbachsen a und b (vgl. Abbildung 4.4 und Tabelle 4.4).

Bevor die Gauß-Krüger-Transformation durchgeführt werden kann, müssen die geographi-

schen Koordinaten des WGS 84-Ellipsoids mit geographischer Breite β und Länge λ in geographischen Koordinaten des Bessel Ellipsoids mit Breite β^* und Länge λ^* umgewandelt werden. Dazu sind drei Einzelschritte notwendig:

- Umwandlung geographischer Koordinaten in geozentrische Koordinaten
- Wechsel des Ellipsoids durch eine 7-Parameter-Helmert Transformation
- Ableitung der transformierten geographischen aus transformierten geozentrischen Koordinaten.

Formal lässt sich die Berechnung geozentrischer Koordinaten mit $N_\beta = \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \beta}}$ und Höhe h wie folgt darstellen [Tor01]:

$$\begin{aligned}x &= (N_\beta + h) \cos \beta \cdot \cos \lambda \\y &= (N_\beta + h) \cos \beta \cdot \sin \lambda \\z &= (N_\beta (1 - \varepsilon^2) + h) \sin \beta\end{aligned}$$

Die Erzeugung der auf ein alternatives Referenzellipsoid bezogenen transformierten geozentrischen Koordinaten x^* , y^* , z^* aus x , y , z erfolgt durch eine 7-Parameter-Helmert-Transformation [GJ12]:

$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Die verwendeten sieben Parameter setzen sich aus drei Translationsparametern c_x , c_y , c_z , drei Rotationsparametern r_x , r_y , r_z sowie einem Maßstabsparameter m mit $\mu = 1 + m$ zusammen. Diese Parameter sind ortsabhängig und können zum Beispiel bei Vermessungsämtern erfragt werden.

Die Rückführung der transformierten geozentrischen Koordinaten x^* , y^* , z^* in die transformierte geographische Breite β^* und Länge λ^* stellt den letzten Schritt des Ellipsoidwechsels dar [Tor01].

$$\lambda^* = \arctan \frac{y^*}{x^*}$$

Die Breite β^* und die Höhe h^* müssen iterativ bestimmt werden.

$$h^* = \frac{\sqrt{(x^*)^2 - (y^*)^2}}{\cos \beta^*} - N_{\beta^*}$$

$$\beta^* = \arctan \frac{z^*}{\sqrt{(x^*)^2 - (y^*)^2}} \left(1 - \varepsilon^2 \frac{N_{\beta^*}}{N_{\beta^*} + h^*} \right)^{-1}$$

Die Iteration kann mit $h^* = 0$ gestartet werden.

4.2.2.2 Gauß-Krüger Projektion

Nachdem der Bestimmung von λ^* und β^* aus GPS-Werten λ und β kann die eigentliche Projektion in die zweidimensionale Ebene durchgeführt werden. Diese Projektion bezieht sich immer auf einen Hauptmeridian L_0 , der in etwa durch die Mitte des zu projizierenden Gebietes läuft und im Abstand von 3° als Vielfaches von 3 gewählt wird. Beginnend bei 3° östlicher Breite werden die Hauptmeridiane fortlaufend nummeriert. Für die Nummer des Hauptmeridians wird hier die Variable $\#L_0$ eingeführt.

Zunächst wird der Meridianbogen G aus der Breite β^* bestimmt [Gro76]:

$$G = 111.120,61962 \cdot \beta^* - 15.988,63853 \cdot \sin(2\beta^*) + 16,72995 \cdot \sin(4\beta^*) \\ - 0,021 \cdot \sin(6\beta^*) + 0,0003 \cdot \sin(8\beta^*)$$

Definiert man η^2 unter Verwendung der 2. numerischen Exzentrizität $\tilde{\varepsilon} := \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$ des Bessel-Ellipsoids durch

$$\eta^2 = \tilde{\varepsilon}^2 \cos^2 B,$$

kann der Querkrümmungshalbmesser N berechnet werden [Gro76]:

$$N = \frac{a^2}{b\sqrt{1 + \eta^2}}$$

Mit $l = \lambda^* - L_0$, $t = \tan \beta^*$ und $\rho = \frac{360}{2\pi}$ können Rechtswert r und Hochwert h der Gauß-Krüger-Koordinaten ermittelt werden [Gro76]:

$$h = G + \frac{N}{2\rho^2} \cos^2 \beta^* t l^2 + \frac{N}{24\rho^4} \cos^4 \beta^* t (5 - t^2 + 9\eta^2) l^4$$

$$\Delta r = \frac{N}{\rho} \cos \beta^* l + \frac{N}{6\rho^3} \cos^3 \beta^* (1 - t^2 + \eta^2) l^3 + \frac{N}{120\rho^5} \cos^5 \beta^* (5 - 18t^2 + t^4) l^5$$

$$r = \#L_0 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^5 + \Delta r$$

Abschließende Koordinatenbeispiele sollen die Koordinatentransformation verdeutlichen (vgl. Tabelle 4.5).

Die hier beschriebene Koordinatentransformation stellt die Gauß-Krüger-Projektion ausgerichtet auf die Anwendung in Deutschland dar. Grundsätzlich lässt sich die Methodik global anwenden. Dabei müssen unter anderem aber Bezugsellipsoid und Anlage der Hauptmeridiane angepasst werden [Gro76].

Tabelle 4.5: Koordinatenbeispiele

	geographisch, WGS 84		Gauß-Krüger	
	Breite β	Länge λ	rechts	hoch
Kölner Dom	50,94129°	6,95817°	2567388 m	5645554 m
Marienplatz, München	48,13730°	11,57550°	4468513 m	5333338 m
Alexanderplatz, Berlin	52,52183°	13,41317°	4596024 m	5821906 m

4.3 Auswahl der Softwareumgebung

Die Programmierumgebung, die für die Erstellung des beschriebenen Analysesystems verwendet werden soll, muss folgenden Kriterien entsprechen:

- Es müssen Datenschnittstellen für verschiedene Dateiformate zur Verfügung stehen. Insbesondere gängig Formate wie .txt, .csv oder .xls sollen sowohl als Import- als auch als Exportformat genutzt werden können. Die Möglichkeit zum Einlesen von Positionsdaten aus .nmea-Dateien wird ebenfalls vorausgesetzt.
- Das fertige System soll für Nutzer ohne spezielle Programmierkenntnisse ausgelegt sein. Daher soll die Umgebung flexible Grundkomponenten zur Erstellung grafischer Benutzeroberflächen zur Verfügung stellen.

- Ernteketten mit vielen Fahrzeugen erzeugen große Datenmengen. Es soll auf optimierte, möglichst vektororientierte Routinen für mathematische Berechnungen zurückgegriffen werden können, um kurze Ausführungszeiten sicherzustellen.
- Die Analyse-Ergebnisse sollen graphisch visualisiert werden. Die Programmierumgebung soll eine Internet-Schnittstelle zur Integration von online-Karten bieten.
- Die Erzeugung von Stand-Alone-Versionen des Analysesystems soll möglich sein, um es unabhängig von der Programmierumgebung nutzen zu können.
- Anschaffungskosten und laufende Kosten sollen in einem vertretbaren Rahmen sein.

Diese Anforderungen werden von dem Programmpaket *Matlab* der Firma *MathWorks* vollständig erfüllt. Des Weiteren sind umfangreiche Zusatzmöglichkeiten in Form von spezifischen Toolboxen im Paket enthalten. Nicht zuletzt durch die Möglichkeit zum Bezug der Forschungslizenz inklusive aller Toolboxen im Rahmen einer Campus-Lizenz am Wissenschaftszentrum Weihenstephan erfüllt *Matlab* alle an die Programmierumgebung gestellten Anforderungen und wird deshalb als Entwicklungsumgebung gewählt.

Auf vergleichende Untersuchungen zur Eignung anderer Softwareumgebungen wird verzichtet. Die Beurteilung, ob ein Programmpaket alle genannten Anforderungen erfüllt, zieht einen erheblichen Zeitaufwand zur Einarbeitung in die Programmdetails nach sich. Je nach Verfügbarkeit von Forschungs-, Campus- oder Testlizenzen können vergleichende Untersuchungen auch einen nicht zu vernachlässigenden finanziellen Aufwand bedeuten.

5 Entwicklung eines agrarlogistischen Analysesystems

Agrarlogistische Aufgaben aus verschiedenen Bereichen werden in der Praxis in unterschiedlich gestalteten Prozessketten bearbeitet (vgl. Kapitel 2.2). Spezielle Rahmenbedingungen einzelner Verfahrensausprägungen müssen auch in deren Analyse berücksichtigt werden. Im Sinne einer systematischen Herangehensweise bietet es sich an, zunächst Fahrzeuge und Verfahren in verschiedene Klassen und Szenarien einzuteilen. Ausgehend von agrarlogistischen Szenarien werden Algorithmen konstruiert, die zunächst passende Betriebszustände für alle Fahrzeuge einer Logistikkette zu jedem Zeitpunkt bestimmen. Darauf aufbauend können Analyseergebnisse bezogen auf Prozesszeiten, Strecken und Geschwindigkeiten gewonnen werden. Ebenso lassen sich Beladungszustände ermitteln und Einzelfuhren Schlägen zuordnen, um die Rückverfolgbarkeit der Ladung zu gewährleisten.

5.1 Positionserkennung auf Schlägen

Die Einteilung der landwirtschaftlichen Produktionsfläche in einzelne Schläge bildet die organisatorische Struktur in der Pflanzenproduktion. Aus dem Standpunkt der Agrarlogistik stellt die Ermittlung, ob und auf welchem Schlag sich ein zu analysierendes Fahrzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet, eine grundlegende Fragestellung dar. Im Folgenden wird ausgeführt, wie dieses Problem in einem effizienten Verfahren gelöst werden kann.

5.1.1 Entscheidungsalgorithmus: Befindet sich ein Fahrzeug auf einem gegebenen Schlag?

Mathematisch können Flächen auf verschiedene Weise beschrieben werden. Im Bereich von Geoinformationssystemen (GIS) hat sich die Verwendung von Shapefiles etabliert. Dieser Standard wurde von der Firma *ESRI* entwickelt und in einem White Paper publiziert [ESR98]. Neben der Darstellung von Punkten und Linien ist in diesem Standard auch die Betrachtung

von Flächen möglich, welche in Form von Vielecken (Polygonen) beschrieben werden. Gemäß der Definition von ESRI müssen Polygone mindestens einen Ring enthalten, wobei ein Ring charakterisiert wird als zusammenhängende Folge von mindestens vier Punkten, die eine geschlossene Schleife bilden, welche sich nicht selbst schneidet. Ein Polygon kann mehrere Ringe enthalten. Die Reihenfolge der Eckpunkte oder die Orientierung der Ringe legen Äußeres und Inneres des Polygons fest. Weiterhin ist für die Speicherung von Polygonen in Shapefiles wichtig, dass sie „sauber“ sind, das heißt, sie dürfen keine sich überschneidenden Ringe besitzen und die Reihenfolge der Eckpunkte muss so gewählt sein, dass das Innere des Polygons sich auf der rechten Seite befindet, wenn man sich entlang der Kanten des Polygons bewegt. Für ein Polygon mit nur einem Ring bedeutet das also, dass die Eckpunkte im Uhrzeigersinn gespeichert werden müssen. Löcher sind in einem Polygon ebenfalls möglich. Die Reihenfolge der Eckpunkte, die ein Loch abgrenzen, muss entsprechend anders herum gewählt werden, damit die Definition des Inneren des Polygons korrekt bleibt.

Zu beachten gilt hier, dass Polygone definitionsgemäß eine Folge von Eckpunkten sind. Streng genommen haben Polygone keine Ausdehnung in die Fläche. Jedoch wird durch ihr Inneres eine Fläche dargestellt. Der Begriff wird daher, gerade auch im Sprachgebrauch von GIS, oftmals synonym zur Fläche eines Polygons verwendet. In dieser Arbeit beschreiben Polygone meist landwirtschaftliche Schläge und sollen deshalb auch eine Ausdehnung in die Fläche besitzen.

Entsprechend den genannten Charakterisierungen können Polygone sehr unregelmäßige Formen aufweisen. Für eine algorithmische Betrachtung ist daher eine Unterscheidung zwischen konvexen und nicht konvexen Polygonen von Vorteil.

5.1.1.1 Punkt in Polygon: konvexer Fall

In einer konvexen Menge kann von jedem Punkt dieser Menge jeder beliebige Punkt der Menge durch eine gerade Verbindungslinie erreicht werden, wobei diese Verbindung selbst komplett in dieser Menge enthalten ist. Die formale Definition einer konvexen Menge lautet wie folgt [KM08]:

Sei M Teilmenge eines \mathbb{R} -Vektorraums V . M ist konvex, wenn für alle $a, b \in V$ und für $\lambda \in \mathbb{R}$ mit $0 \leq \lambda \leq 1$ gilt:

$$\lambda a + (1 - \lambda)b \in M$$

Als Folge der Definition einer konvexen Menge können konvexe Polygone keine einspringen-

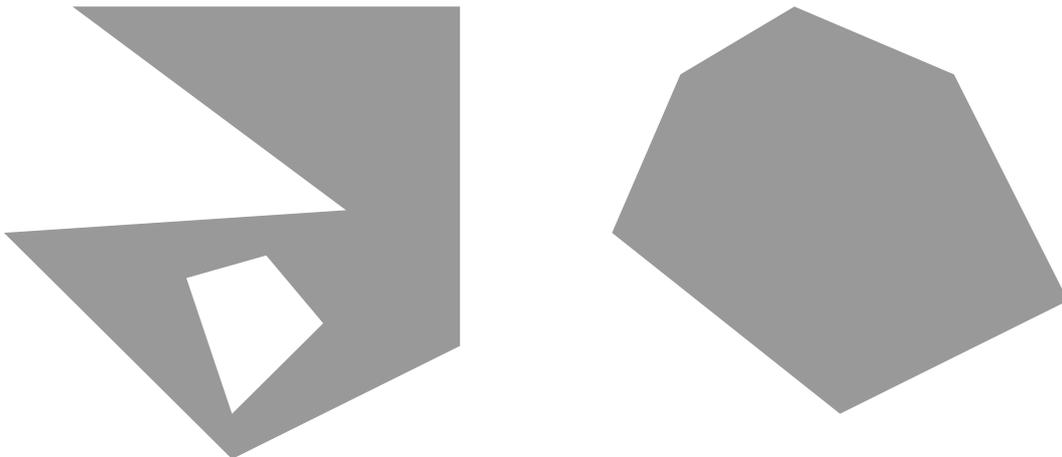


Abbildung 5.1: Nicht-konvexes Polygon (links), konvexes Polygon (rechts)

den Ecken oder Löcher haben. Abbildung 5.1 zeigt je ein Beispiel für ein konvexes und ein nicht konvexes Polygon.

Die Position eines Fahrzeugs zum Zeitpunkt t soll nun auf die Zugehörigkeit zum Inneren eines konvexen Polygons P geprüft werden. P kann dabei die geographische Ausdehnung eines Schlages darstellen. Diese Problemstellung lässt sich wie folgt formalisieren:

Sei P , Teilmenge von \mathbb{R}^2 , ein konvexes Polygon und sei $(x_t, y_t) \in \mathbb{R}^2$
 Gilt $(x_t, y_t) \in P$?

(x_t, y_t) kann als die Position eines Fahrzeugs zum Zeitpunkt t interpretiert werden.

Eine zum Teil sehr ähnliche Problemstellung tritt in der mathematischen Optimierung auf. Das lineare Minimierungsproblem unter linearen Nebenbedingungen, auch als lineares Programm (LP) bezeichnet, weist analoge Strukturen auf.

Gegeben seien die Matrix $A \in \mathbb{R}^{n,m}$ sowie die Vektoren $b \in \mathbb{R}^m$ und $c \in \mathbb{R}^n$

$$\min \{c^T x \mid x \in \mathbb{R}^n, Ax \leq b\}$$

Es wird aus allen zulässigen Lösungen $x \in \mathbb{R}^n$ diejenige gesucht, die einen minimalen Zielfunktionswert $c^T x$ aufweist. Die Frage, ob ein x die Nebenbedingungen $Ax \leq b$ erfüllt und somit eine zulässige Lösung für das Optimierungsproblem ist, verallgemeinert das zweidimensionale Problem, ob ein Fahrzeug sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem durch ein konvexes Polygon dargestellten Flurstück befindet. Die Zusammenhänge sollen näher erläutert werden.

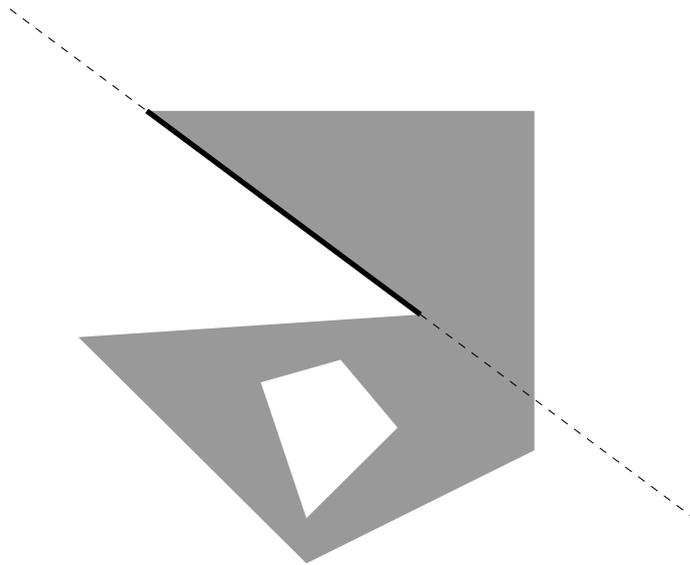


Abbildung 5.2: Nicht-konvexes Polygon mit verlängertem Kantenverlauf durch das Polygoninnere

Zunächst folgende Feststellung: In einem konvexen Polygon gibt es keine Kante, die in ihrer Verlängerung durch das Innere des Polygons verläuft. Die Begründung ist relativ leicht ersichtlich: Gäbe es eine solche Kante, würde eine Ecke existieren, an der sich zwei Kanten so schneiden, dass der Innenwinkel an dieser Stelle größer als 180° ist. Dadurch entstünde aber eine einspringende Ecke und somit ein Widerspruch zur Konvexität. Diese Feststellung wird in Abbildung 5.2 veranschaulicht.

Geraden teilen den zweidimensionalen Raum¹ in zwei Halbräume, das heißt ein beliebiger Punkt aus dem \mathbb{R}^2 kann entweder auf der Gerade oder auf einer der beiden Seiten der Gerade liegen.

Die Gerade $g := mx + t$ kann mit Hilfe des Skalarprodukts unter Verwendung des Normalenvektors $a := (-m, 1)$ geschrieben werden als

$$g = \{(x, y) \mid a \cdot (x, y)^T = t\},$$

wobei $(x, y)^T$ für den transponierten Spaltenvektor des Zeilenvektors (x, y) steht.

Die durch die Gerade g definierten Halbräume H^+ und H^- , mit

$$H^- := \{(x, y) \mid a \cdot (x, y)^T \leq t\},$$

$$H^+ := \{(x, y) \mid a \cdot (x, y)^T > t\},$$

lassen sich durch diese Notation ebenfalls leicht darstellen.

¹Im n -dimensionalen Raum teilt eine Hyperebene den Vektorraum in zwei Halbräume.

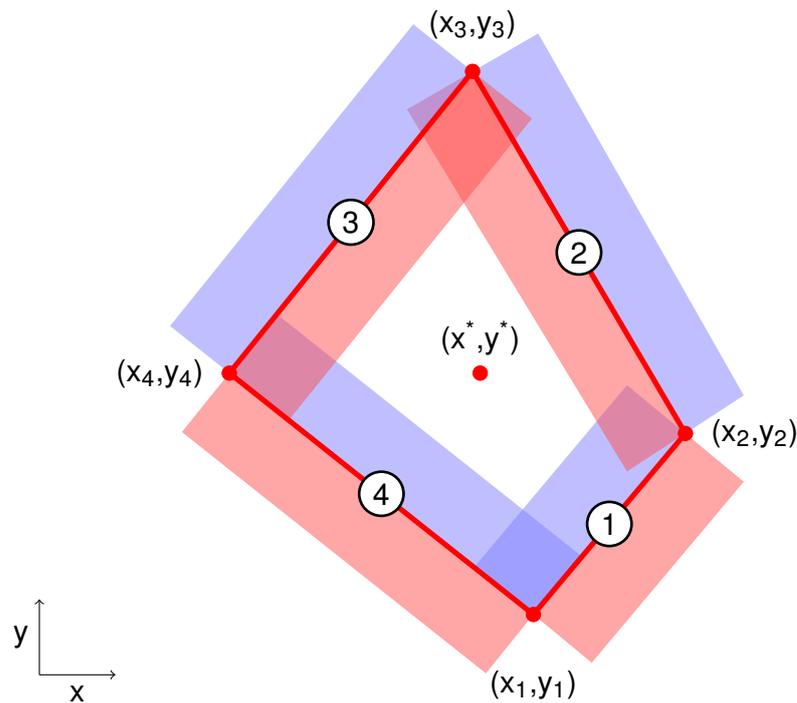


Abbildung 5.3: Beispiel: konvexer Schlag als Schnittmenge durch Polygonkanten induzierter Halbräume; oberer Halbraum: blau, unterer Halbraum: rot

Aus der obigen Überlegung, dass verlängerte Kanten eines konvexen Polygons nicht durch das Innere des Polygons verlaufen können, folgt, dass alle inneren Punkte im selben Halbraum liegen, welcher durch eine Gerade entstanden ist, die eine Kante des Polygons enthält. Da dies für alle Kanten zutrifft, kann ein konvexes Polygon somit als Schnitt endlich vieler Halbräume beschrieben werden, wobei diese Halbräume auf Geraden basieren, die die Kanten des Polygons enthalten. Formal bedeutet das:

Sei $P \subseteq \mathbb{R}^2$ ein konvexes Polygon mit n Kanten und $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}^2$, $t_1, \dots, t_n \in \mathbb{R}$ Normalenvektoren bzw. Achsenabschnitte der zu Geraden verlängerten Kanten von P , dann:

$$P = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid a_1 \cdot (x, y)^T \leq t_1, \dots, a_n \cdot (x, y)^T \leq t_n\}$$

Mit der Einführung der Matrix $A \in \mathbb{R}^{n,2}$, die die Vektoren a_1, \dots, a_n als Zeilen enthält, und dem Vektor $b \in \mathbb{R}^{n,1}$, der t_1, \dots, t_n als Zeilen enthält, wird die Bedingung reduziert zu einer Matrix-Vektor-Multiplikation:

$$P = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid A \cdot (x, y)^T \leq b\} \quad (5.1)$$

Ein Beispiel soll die bisherigen Überlegungen zusammenfassen und verdeutlichen.

Gegeben sei das konvexe Polygon P aus Abbildung 5.3. Die vier Kanten definieren vier

Geraden $g_1 \dots g_4$. Die Parameter $m_1 \dots m_4$ und $t_1 \dots t_4$ sind die zugehörigen Steigungen bzw. Achsenabschnitte der Geraden.

$$\begin{aligned} g_1 &:= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid m_1 x - y = -t_1\} \\ g_2 &:= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid m_2 x - y = -t_2\} \\ g_3 &:= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid m_3 x - y = -t_3\} \\ g_4 &:= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid m_4 x - y = -t_4\} \end{aligned}$$

Für jede Gerade muss nun entschieden werden, auf welcher Seite, also in welchem Halbraum, die inneren Punkte des Polygons liegen. Im Beispielfall ergibt sich:

$$\begin{aligned} (x, y) \in \mathbb{R}^2 \in P \iff (x, y) \in \{ &(x, y) \mid m_1 x - y \geq -t_1, \\ &m_2 x - y \leq -t_2, \\ &m_3 x - y \leq -t_3, \\ &m_4 x - y \geq -t_4 \} \end{aligned}$$

Diese Entscheidung kann über einen Referenzpunkt (x^*, y^*) , der sicher in P liegt, automatisiert werden. Man prüft dabei für alle Geraden, ob die Gleichung mit \leq oder \geq erfüllt wird. Anschließend wird ein Teil der Gleichungen mit -1 multipliziert, sodass alle Ungleichheitszeichen gleichgerichtet sind.

$$\begin{aligned} (x, y) \in \mathbb{R}^2 \in P \iff (x, y) \in \{ &(x, y) \mid -m_1 x + y \leq t_1, \\ &m_2 x - y \leq -t_2, \\ &m_3 x - y \leq -t_3, \\ &-m_4 x + y \leq t_4 \} \end{aligned}$$

Als geeigneter Referenzpunkt (x^*, y^*) bietet sich für ein Polygon mit den gegebenen Eckpunkten $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ der Schwerpunkt $S := (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)$ an². In einem nicht-konvexen Polygon kann dieser Schwerpunkt auch im Äußeren liegen. In einem konvexen Polygon liegt dieser immer im Inneren. Dies zeigt folgende Überlegung:

Sei $P \subseteq \mathbb{R}^2$ konvexes Polygon mit $P = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid A \cdot (x, y)^T \leq b\}$ und $S := (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)$. Um zu beweisen, dass $S \in P$ gilt, muss man zeigen, dass $A \cdot (x_S, y_S)^T \leq b$.

²Der hier definierte Schwerpunkt stimmt im Allgemeinen nicht mit dem Flächenschwerpunkt überein.

Einsetzen ergibt

$$\begin{aligned}
 A \cdot (x_S, y_S)^T &= \begin{pmatrix} a_{1,1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + a_{1,2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ a_{2,1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + a_{2,2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ \vdots \\ a_{n,1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + a_{n,2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{1,1} x_i + a_{1,2} y_i \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{2,1} x_i + a_{2,2} y_i \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{n,1} x_i + a_{n,2} y_i \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Da (x_i, y_i) Eckpunkte des Polygons sind, gilt $A \cdot (x_i, y_i)^T \leq b$. Dadurch kann die Gleichung komponentenweise nach oben abgeschätzt werden:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{1,1} x_i + a_{1,2} y_i \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{2,1} x_i + a_{2,2} y_i \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{n,1} x_i + a_{n,2} y_i \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_1 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_2 \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} n b_1 \\ \frac{1}{n} n b_2 \\ \vdots \\ \frac{1}{n} n b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = b$$

Damit ist die Behauptung bewiesen.

Unter Verwendung einer Matrix A und einem Vektor b wie in Gleichung (5.1) beschrieben, im Beispiel wäre

$$A = \begin{pmatrix} -m_1 & 1 \\ m_2 & -1 \\ m_3 & -1 \\ -m_4 & 1 \end{pmatrix} \text{ und } b = \begin{pmatrix} t_1 \\ -t_2 \\ -t_3 \\ t_4 \end{pmatrix},$$

lässt sich die Problemformulierung reduzieren auf

$$(x, y) \in P \iff A(x, y)^T \leq b.$$

Wenn sich die Position eines Fahrzeugs ändert, ändert sich nur die Positionsvariable (x, y) , nicht aber die Matrix A und der Vektor b . Diese sind ausschließlich von der Schlagkontur abhängig. Folglich können A und b in einem Pre-Processing bestimmt werden. In einem Algorithmus muss für jeden Zeitschritt lediglich A mit dem aktuellen Positionsvektor multipliziert werden und das Ergebnis mit b verglichen werden. Da hier Schläge zweidimensional betrachtet werden, hat die Matrix A genau zwei Spalten, bei n Eckpunkten im Polygon genau n Zeilen. Für die Entscheidung, ob ein Punkt sich in dem konvexen Polygon befindet, sind abgesehen von der einmaligen Aufstellung von A und b genau $2 \cdot n$ Multiplikationen und n Additionen aus der Matrix-Vektor-Multiplikation sowie n skalare Vergleiche, insgesamt also $4 \cdot n$ Rechenoperationen nötig.

5.1.1.2 Punkt in Polygon: nicht-konvexer Fall

Die Beschränkung der Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens auf konvexe Polygone ist unverzichtbar. Abbildung 5.4 verdeutlicht, dass die Anwendung des Algorithmus' auf nicht konvexe Polygone zu schwerwiegenden Fehlern führen kann. Die rot hinterlegte Fläche zeigt den Durchschnitt aller Halbräume, die den Schwerpunkt S enthalten. Wie oben erläutert, entspricht dieser Durchschnitt für konvexe Polygone genau dem Inneren des Polygons. Wie aus Abbildung 5.4 ersichtlich wird, gilt diese Gleichheit nicht für den nicht-konvexen Fall. Die grauen Flächen werden vom Algorithmus fälschlicherweise dem äußeren Bereich zugeschrieben.

Konvexität kann für natürliche Schlagformen nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden. Die Konvexität von Schlägen ist nicht nur für die mathematische Beschreibung von Bedeutung. Sie spielt beispielsweise auch in der Bewirtschaftung und Fahrspurplanung eine große Rolle. OKSANEN verwendet in seiner Arbeit zur Fahrspurplanung das Verhältnis aus Polygonfläche und Fläche der konvexen Hülle als Maß für die Konvexität eines Schlages [Oks07]. Um auch für nicht-konvexe Schläge korrekt entscheiden zu können, ob sich ein landwirtschaftliches

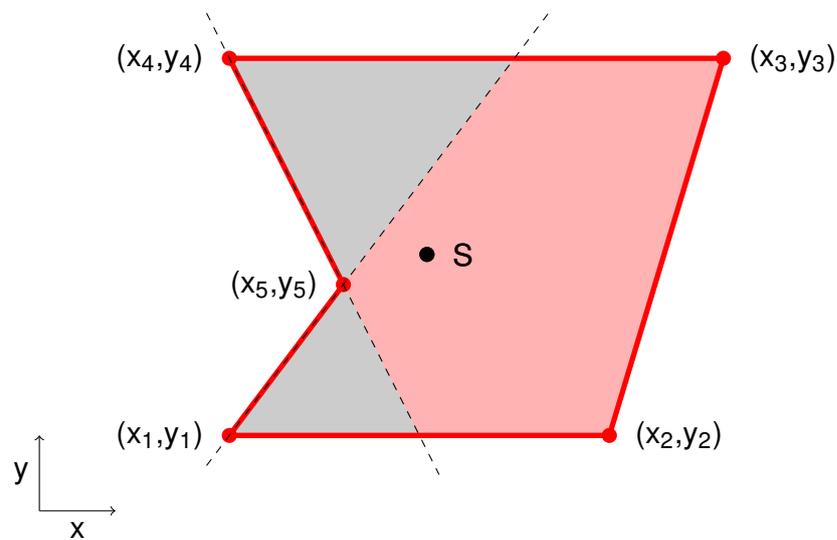


Abbildung 5.4: Nicht-konvexer Schlag mit einspringender Ecke, fälschliche Zuordnung der grauen Flächen

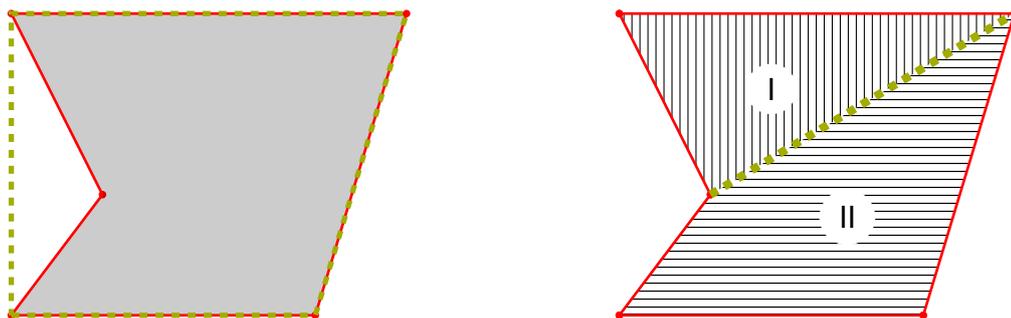


Abbildung 5.5: Bildung der konvexen Hülle (links), Unterteilung in mehrere konvexe Polygone (rechts)

Fahrzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt auf dem Schlag befindet, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Zunächst kann man die im obigen Verfahren gestellte Forderung nach Konvexität für ein nicht konvexes Polygons so erfüllen, indem man entweder die konvexe Hülle eines nicht konvexen Polygons bildet oder es in mehrere konvexe Polygone unterteilt (siehe Abbildung 5.5).

Die konvexe Hülle $\text{conv}(M)$ einer Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ ist die kleinste konvexe Menge, die M enthält. Formal kann dies definiert werden über den Durchschnitt aller konvexen Mengen, die M enthalten:

$$\text{conv}(M) = \bigcap_{M \subseteq T \subseteq \mathbb{R}^n, T \text{ konvex}} T$$

Für konvexe Mengen ist die konvexe Hülle gleich die Menge selbst. Die konvexe Hülle einer nicht konvexen Menge stellt eine Vergrößerung der Menge dar.

Die Entscheidung, ob die konvexe Hülle eines nicht-konvexen Schrages eine geeignete Approximation darstellt, muss situationsbedingt getroffen werden. Schließt die konvexe Hülle Flächen mit ein, die bei der Analyse des betrachteten Verfahrens ohnehin nicht befahren werden, zum Beispiel Wälder, Gewässer oder Schläge mit anderen Kulturen, liefert die Verwendung der konvexen Hülle anstatt der ursprünglichen Konturen keine fehlerhaften Zuweisungen. Zur Bestimmung der konvexen Hülle im zweidimensionalen Fall existieren verschiedene Algorithmen, die in geeigneten Softwaresystemen oft über hinterlegte Routinen verwendet werden können.

Verwendet man einen völlig anderen, allerdings rechenaufwendigeren Ansatz für die Punkt-in-Polygon-Entscheidung, kann man die Problematik der Konvexität komplett umgehen. Kern der sogenannten Strahl-Methode ist folgende Feststellung [Bar05]:

P sei Polygon und x ein beliebiger Punkt im zweidimensionalen Raum. Schneidet man einen beliebigen Strahl, der in x beginnt, mit allen Kanten des Polygons und bildet die Summe der Schnittpunkte, so gilt: x liegt in P , falls die Anzahl der Schnittpunkt ungerade ist und x liegt nicht in P , falls die Anzahl der Schnittpunkte gerade ist.

Ein Schnitt des Strahls mit einer Kante des Polygons bedeutet, dass an dieser Stelle der Strahl ins Innere des Polygons eintritt bzw. es verlässt. Ein- und Austritt erfolgen in Strahlrichtung im Wechsel. Da der Strahl unendliche Ausdehnung besitzt, ist sein letzter Schnittpunkt mit dem Polygon stets ein Übergang vom Inneren zum Äußeren. Somit gibt es nur zwei Möglichkeiten: Der Strahl hat genauso viele Eintritte ins Innere des Polygons wie er Austritte daraus aufweist oder es gibt einen Austritt mehr. Dies entspricht äußeren und inneren Punkten. Da die Richtung des Strahls beliebig gewählt werden kann, wird in der Regel immer dieselbe Strahlrichtung, oft horizontal, verwendet.

Dieses Verfahren ist in seiner Einfachheit prinzipiell kaum zu unterbieten, allerdings sind verschiedene Fälle zu unterscheiden (vgl. Abbildung 5.6). Im Standardfall, Fall a), schneidet der Strahl die Polygonkante zwischen den beiden Eckpunkten. Liegt der Schnitt genau in

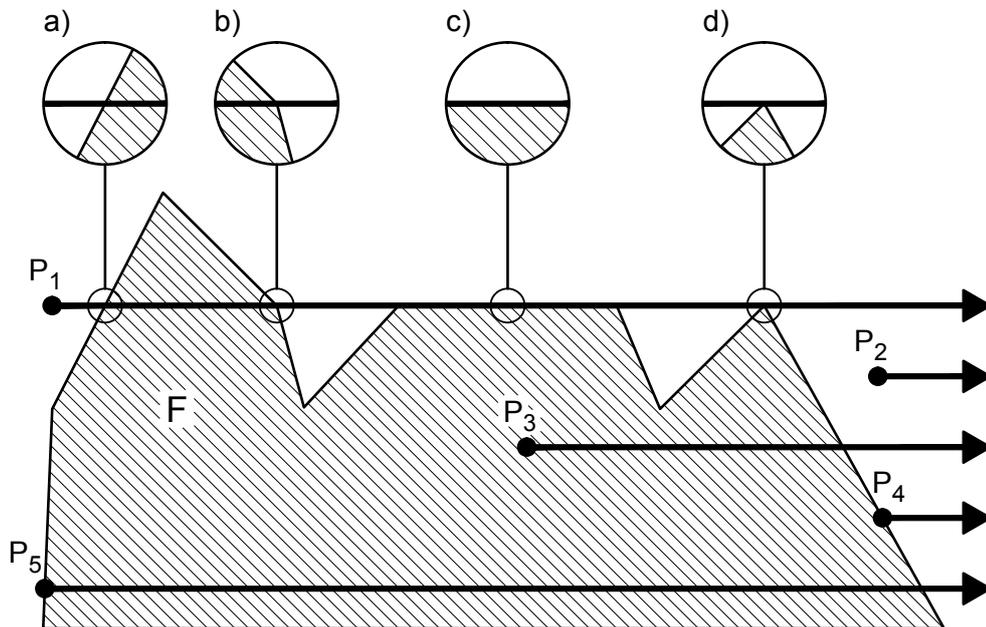


Abbildung 5.6: Punkt-in-Polygon; Strahlmethode mit Sonderfällen

einer Ecke des Polygons, schneidet der Strahl in dieser Ecke beide anliegenden Kanten. Im Fall b) darf man den Schnittpunkt nur einmal in der Summe berücksichtigen, da nur ein Flächenübergang an dieser Stelle durch den Strahl vollzogen wird. Im Fall d), bei dem der Strahl das Polygon nur berührt, muss der Schnittpunkt an der Ecke zweimal oder keimnal gezählt werden, da hier kein Flächenübergang stattfindet. Verläuft der Strahl genau auf einer Kante wie in Fall c), gibt es unendlich viele Schnittpunkte. Diese werden ignoriert, da der Strahl dort nicht vom Inneren ins Äußere wechselt. Nicht nur die Lage des Schnittpunkts des Strahls mit einer Kante kann Sonderfälle verursachen. Auch die Lage des Punktes selbst ist von Bedeutung. Liegt ein Punkt genau auf dem Rand, benötigt man abhängig davon, auf welcher Kante sich der Punkt befindet und wie die Strahlrichtung gewählt wurde, zusätzliche Fallunterscheidungen. Der Punkt P_5 in der Abbildung weist zwei Schnittpunkte auf und würde ohne Sonderbehandlung als äußerer Punkt identifiziert werden, P_4 dagegen mit nur einem Schnittpunkt als innerer.

Der Rechenaufwand ist hier etwas größer als im Verfahren für konvexe Polygone aus dem Abschnitt davor. Für jeden Punkt, den man auf Zugehörigkeit zu einem Polygon mit n Eckpunkten testen will, muss man für die Berechnung der Schnittpunkte mit den Kanten n zweidimensionale Gleichungssysteme lösen und auf die genannten Sonderfälle achten. Die

Summierung und ein Test auf Geradzahligkeit kommen hinzu. Dem höheren Rechenaufwand steht der Vorteil gegenüber, dass man sowohl konvexe als auch nicht konvexe Polygone betrachten kann.

5.1.2 Automatisierte Ermittlung von Schlag-Polygonen

Bei den bisherigen Betrachtungen wurden Polygone, die reale landwirtschaftliche Schläge approximieren, als gegeben vorausgesetzt. Dies trifft zu, wenn entsprechende Shape-Files in einer Kartei hinterlegt sind oder wenn Eck-Koordinaten der Polygone manuell aus geeignetem Kartenmaterial bestimmt wurden. Da in vielen Fällen in der Praxis die benötigten Schlagkonturen nicht oder nur zum Teil vorhanden sind, wird im Folgenden ein Verfahren entwickelt, das die Bestimmung der Schlag-Polygone anhand von GPS-Daten von Fahrzeugen automatisiert.

Die Grundidee besteht dabei darin, dass sich Fahrspuren landwirtschaftlicher Fahrzeug auf Schlägen zu Flächen häufen, während auf Wegen und Straßen Linien entstehen. Zu beachten ist, dass in diesem Zusammenhang nicht alle Maschinenarten gleich gut geeignet sind. Transportfahrzeuge in Häckselketten befahren beispielsweise nur einen Teil der Schläge. Somit kann aus diesen Spurdaten keine vollständige Schlagkontur abgeleitet werden. Mähdrescher, Feldhäcksler oder in absetzigen Systemen auch Schlepper mit Ladewagen befahren die Schläge in der Regel vollständig und eignen sich somit grundsätzlich gut für dieses Verfahren.

Der Algorithmus zur automatischen Erstellung eines Schlag-Polygons gliedert sich in zwei Hauptschritte. Zuerst wird unterschieden zwischen befahrenen und unbefahrenen Flächenanteilen, anschließend werden die befahrenen Anteile zu Schlägen zusammengefasst.

5.1.2.1 Befahrene und unbefahrene Flächenanteile

Positionsdaten liegen als zeitliche Abfolge von Spurpunkten vor. Sie besitzen demzufolge keine flächenmäßige Ausdehnung. Um die Positionsdaten mit Flächen in Bezug zu bringen, wird ein Gitter eingeführt, wodurch die Fläche in quadratische Rasterzellen eingeteilt wird. Ziel ist es, Schläge als möglichst homogene Fläche von befahrenen Rasterzellen darzustellen. Die Wahl der Gitterweite ist dabei entscheidend. Wird das Gitter zu fein gewählt, können zwischen zwei benachbarten Spuren Zellen liegen, die weder von der einen noch von der anderen Spur tangiert werden. Bei zu großer Auflösung können dagegen mehrere Spuren in eine Gitterzelle fallen, sodass ein Informationsverlust entsteht. Eine Rasterweite in einem Wertebereich zwischen der Arbeitsbreite und der 1,5-fachen Arbeitsbreite hat sich als am

besten geeignet herausgestellt. Um den Rechenaufwand in der Umsetzung des Verfahrens möglichst gering zu halten, kann die Rasterung mehrstufig erfolgen. Die Ausdehnung der Gesamtfläche wird begrenzt durch die Extrema im GPS-Datensatz. Die Daten müssen dabei bereits von Ausreißern bereinigt sein. In einem ersten Schritt wird die Fläche mit einem groben Raster in befahrene und unbefahrene Zellen eingeteilt. Als Anhaltswert kann als grobes Raster das zu 100 m nächstgelegene Vielfache des kleinen Rasterabstandes gewählt werden. Anschließend werden im zweiten Schritt nur die befahrenen groben Zellen feiner aufgelöst. Wichtig ist dabei, dass das grobe Raster ein Vielfaches des kleinen Rasters ist, damit die kleinen Zellen an den Rändern der großen Zellen nahtlos aneinander anschließen. Abbildung 5.7 zeigt in den oberen beiden Teilgrafiken den Übergang von aufgezeichneten Wegpunkten zu besuchten Rasterzellen. Die Beispieldaten stammen von einem Feldhäcksler mit Direktschneidwerk. Es wurde ein Raster mit 7 m Gitterabstand verwendet.

5.1.2.2 Einteilung in Einzelschläge

Die Unterteilung der ermittelten befahrenen Rasterzellen in einzelne Schläge erfolgt in einem iterativen Verfahren. Zunächst wird für alle Zellen die Anzahl der Nachbarzellen bestimmt, die ebenfalls befahren sind. Nachbarn können links und rechts, oben und unten sowie in alle Richtungen diagonal versetzt liegen. Eine Zelle kann also maximal acht besetzte Nachbarn haben.

Der Ansatz dieses Verfahrens besteht darin, dass Zellen auf Schlägen viele befahrene Nachbarn haben, auf Wegen zwischen Schlägen dagegen nur wenige. Die algorithmischen Teilschritte werden im Folgenden beschrieben:

1. Festlegen eines Startpunktes

Das Verfahren benötigt einen Startpunkt. Als solcher wird eine befahrene Zelle gewählt, die noch keinem Schlag angehört und deren Nachbarn alle ebenfalls befahren sind. Dieser Startpunkt ist der erste Punkt, der einem neuen Schlag zugeordnet wird. Gleichzeitig wird der Startpunkt in einem Puffer-Array zwischengespeichert.

2. Finden weiterer Punkte

Vom Startpunkt aus bewegt sich das Verfahren zum nächsten Punkt. Beginnend beim oberen Nachbarn wird im Uhrzeigersinn nach einer Gitterzelle gesucht, die befahren ist und mindestens fünf befahrene Nachbarn hat und noch keinem Schlag zugeordnet ist. Sobald ein solcher Punkt gefunden ist, wird er dem Schlag zugewiesen und dem Puffer hinzugefügt.

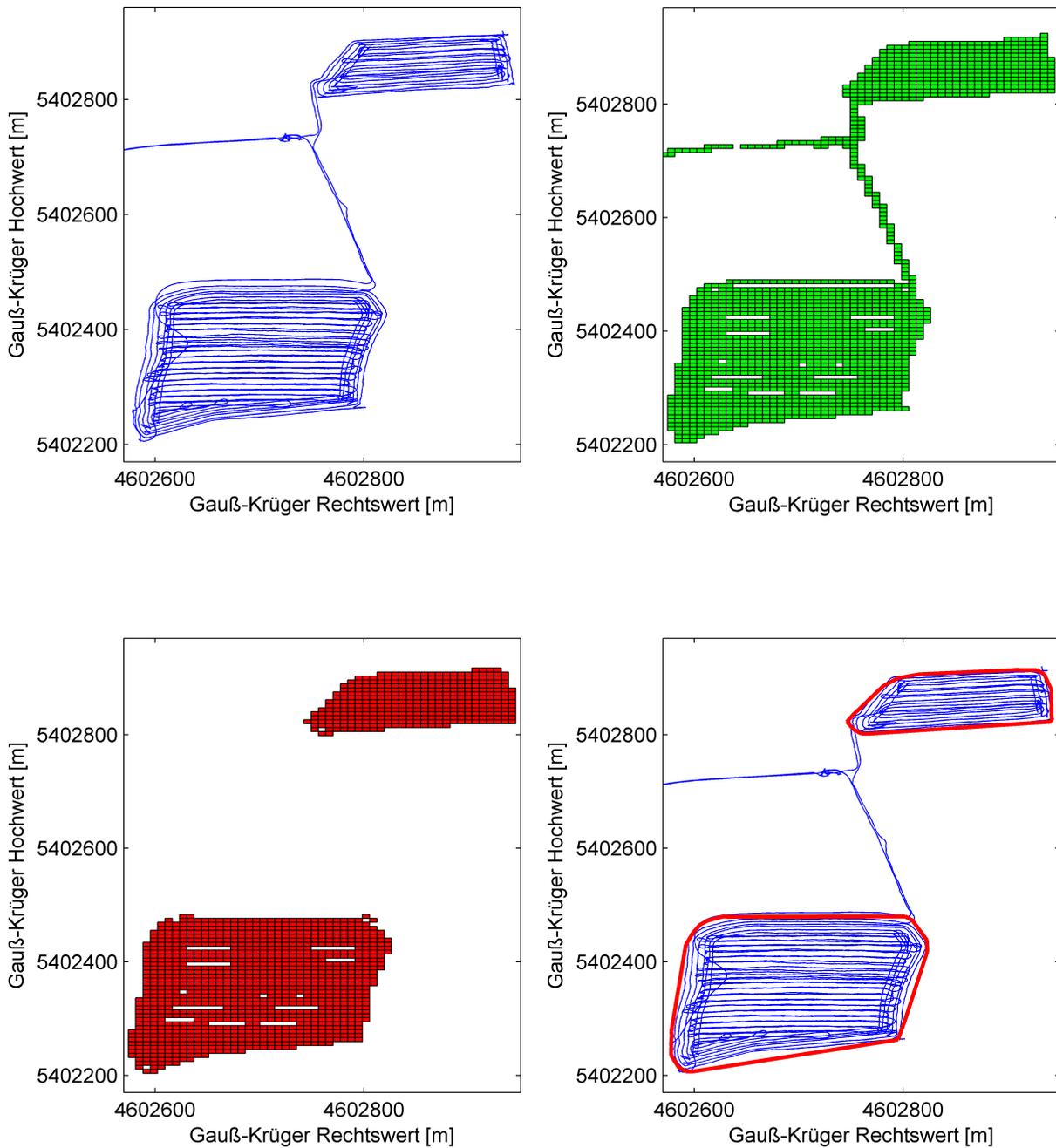


Abbildung 5.7: Teilschritte der automatisierten Polygonbildung: Wegpunkte (oben links), befahrene Rasterzellen (oben rechts), Einteilung in Einzelschläge (unten links), konvexe Schlag-Polygone mit Wegpunkten (unten rechts) [HB14]

Dieser Punkt ist nun der neue Ausgangspunkt. Nach diesem Prinzip werden dem Schlag iterativ neue Punkte hinzugefügt.

3. Zurückgreifen auf den Puffer

Falls der Algorithmus einen Punkt erreicht, von dem aus dem Schlag keine weiteren Punkte mehr hinzugefügt werden können, wird dieser aus dem Puffer gestrichen und der davor in den Puffer eingetragene Wert als Betrachtungspunkt gewählt. Der Puffer-Array funktioniert also nach dem LIFO-Prinzip (last in, first out). Sobald der Puffer leer ist, ist die Zuordnung von Punkten zu einem bestimmten Schlag abgeschlossen.

4. Bestimmung weiterer Schläge

Der Algorithmus bestimmt einen neuen Startpunkt und arbeitet nach analogem Prinzip solange weiter, bis kein geeigneter Startpunkt mehr gefunden werden kann.

Das Ergebnis dieses Verfahrens ist eine Zuweisung von befahrenen Rasterzellen zu Einzelschlägen, wie sie in Abbildung 5.7 unten links dargestellt ist. Die Forderung nach mindestens fünf befahrenen Nachbarn für die Zuordnung eines Punktes zu einem Schlag bewirkt, dass keine linearen Anordnungen von Zellen, wie es in der Regel auf Wegen und Straßen der Fall ist, einem Schlag zugerechnet werden. Gleichzeitig erhöht die Mindestforderung nach fünf befahrenen Nachbarn bei acht möglichen die Robustheit des Verfahrens gegenüber unbefahrenen Bereichen im Inneren des Schlages, die entstehen können in Folge von Ausfällen oder Schwankungen des GPS-Signals, bei Hindernissen im Feld oder bei spurversetztem Fahren, wenn die Arbeitsbreite nicht voll ausgenutzt wird. Auch hier soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine zu kleine Wahl des Rasterabstandes scheinbar unbefahrene Bereiche im Inneren eines Schlages erzeugen kann. Durch die automatische Einteilung in Einzelschläge in diesem Cluster-Verfahren unterscheidet sich die Methode zur Ableitung von Schlagkonturen aus GNSS-Positionsdaten maßgeblich von der Methodik aus [DDS10]. Benutzereingaben zur Abgrenzung der Lage sind nicht notwendig.

5.1.2.3 Erzeugung von Schlagkonturen

Im abschließenden Schritt müssen aus den Zuordnungen der Gitterzellen zu Einzelschlägen Polygone erzeugt werden, die die Konturen der Schläge darstellen. Konvexität stellt auch hier eine wichtige Eigenschaft dar. Im konvexen Fall kann die konvexe Hülle der im Schlag enthaltenen Rasterzellen gebildet werden, um die Konturen der Schläge zu erhalten. Die Eckpunkte der konvexen Hülle entsprechen im zweidimensionalen Fall den Eckpunkten

eines konvexen Polygons (vgl. Abbildung 5.7, unten rechts). Somit sind die in Kapitel 5.1.1.1 erarbeiteten Methoden zur Punkt-in-Polygon-Entscheidung für konvexe Schläge auch auf die automatisch ermittelten Polygone in gleicher Weise anwendbar.

Sollen auch nicht-konvexe Schlagformen automatisch ermittelt werden können, ist die Bildung der konvexen Hülle ungeeignet. Für viele algorithmische Verfahren, gerade auch in der mathematischen Optimierung, ist Konvexität eine Grundvoraussetzung für deren Anwendbarkeit. Methoden für die Erzeugung nicht-konvexer Hüllkurven einer Punktemenge werden dagegen vergleichsweise selten benötigt und sind in vielen Softwarepaketen nicht standardmäßig vorgesehen. Mit Hilfe der sogenannten Alpha Shapes haben EDELSBRUNNER et al. [EKS83] eine Methodik entwickelt, nicht-konvexe Hüllkurven um Punktwolken zu erzeugen. Die Teilschritte der Methode sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Zunächst wird eine Triangulierung der Punktwolke durchgeführt (a), anschließend werden für die erzeugten Dreiecke die Radien der Umkreise ermittelt (b). Mit Hilfe eines vom Anwender einzugebenden Grenzwertes werden Dreiecke mit großen Umkreisradien eliminiert (c). Abschließend werden die Randpunkte ermittelt, die die Ecken der Hüllkurve bilden und somit ein nicht notwendigerweise konvexes Polygon aufspannen (d). Das Verfahren ist abhängig vom einge-

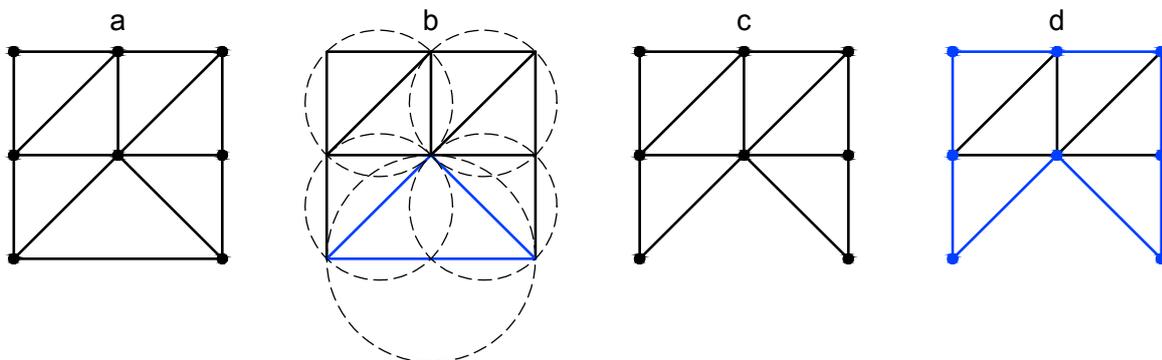


Abbildung 5.8: Bildung einer nicht-konvexen Hülle; Triangulierung der Polygonpunkte (a), Umkreise der Dreiecke (b), Löschen einer Kante (c), nicht-konvexe Hülle (d)

gebenen Grenzwert für den Umkreisradius. Wählt man diesen unendlich groß, entspricht die entstehende Hüllkurve der konvexen Hülle. Je größer der Grenzwert gewählt wird, umso ähnlicher wird die Hüllkurve der konvexen Hülle. Andererseits wird die gegebene Punktwolke zunehmend zerteilt und es entstehen Löcher im Inneren, falls man den Grenzwert schrittweise verkleinert. Die richtige Wahl ist somit entscheidend für die sinnvolle Anwendung. Im Zusammenhang mit der hier entwickelten automatisierten Schlagermittlung, die auf der Basis von Rasterzellen mit einem bestimmten Gitterabstand arbeitet, lässt sich eine Emp-

fehlung erarbeiten. Bei regelmäßigem Gitterabstand r beträgt der minimale Umkreisradius eines Dreiecks aus der Triangulierung $\frac{1}{2} \cdot r \cdot \sqrt{2}$. Gibt es im Inneren nur eine nicht besetzte Gitterzelle, entspricht der Umkreisradius an dieser Stelle genau dem Gitterabstand r . Damit kleine Lücken in den besetzten Gitterzellen nicht unmittelbar zu einem Loch in der ermittelten Schlagkontur führen, muss der Grenzradius somit auf jeden Fall größer als der Gitterabstand r gewählt werden. Der doppelte Gitterabstand hat sich experimentell als geeignet erwiesen, da somit auch diagonale Schlaggrenzen, die im orthogonalen Gitter viele Richtungsänderungen erzeugen, einen realistischeren, geradlinigeren Verlauf erhalten. Abbildung 5.9 zeigt an einem realen Beispielschlag den Unterschied zwischen konvexer und nicht-konvexer Hülle.

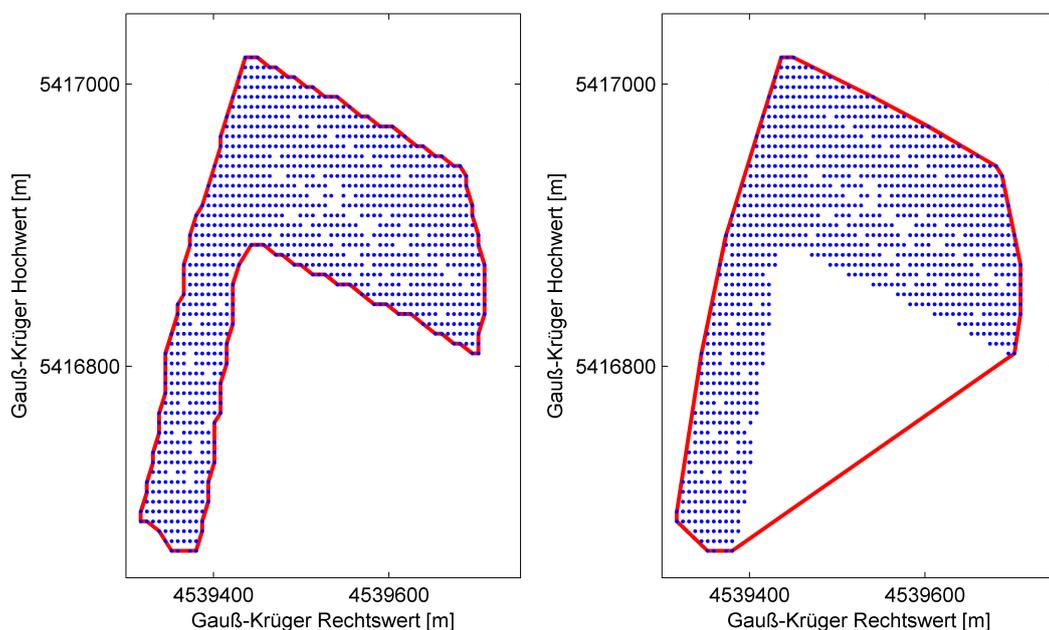


Abbildung 5.9: Nicht-konvexe Hülle (links) und konvexe Hülle (rechts) eines automatisch ermittelten Schlages

Die entstandenen Schläge werden geprüft, ob sie eine festgelegte Mindestgröße erfüllen. Durch bestimmte Effekte, zum Beispiel Rangieren beim Tanken oder durch Überlagerungen von Fahrspuren beim Benutzen von Überführungen oder kreisförmigen Auffahrten können vom Verfahren nicht vorhandene Kleinstschläge ermittelt werden. Diese können an dieser Stelle ausgesondert werden. Voreingestellt wurde die Mindestgröße auf 0,5 ha. Je nach Flächenstruktur muss dieser Wert eventuell korrigiert werden.

5.1.2.4 Randstreifen von Schlägen

Die automatisch ermittelten Schläge basieren auf Mittelpunkten von Gitterzellen, denen ein bestimmter Rasterabstand zugrunde liegt. Die erzeugten Schlagkonturen verlaufen durch diese Mittelpunkte, wodurch am äußeren Rand Flächenanteile abgeschnitten werden können. Um dies auszugleichen, kann man die Schlaggrenzen um den halben Gitterabstand nach außen verschieben. Gerade beim Anschneiden eines neuen Schlages warten Transporteinheiten oft in der Nähe des Schlages. Um diese Bereiche erfassen zu können, benötigt man ebenfalls ein Verfahren, das einen gleichmäßigen Sektor um den betrachteten Schlag erzeugt.

Auch hier kann für konvexe Schläge ein vergleichsweise einfacher Ansatz gewählt werden. Dazu wird jede Kante entlang ihrer Mittelsenkrechten um eine bestimmte Strecke nach außen verschoben. Die Eckpunkte des vergrößerten Polygons können über die Schnittpunkte der zu Geraden erweiterten, nach außen verschobenen Kanten ermittelt werden.

Für nicht-konvexe Schlagformen ist dieser Ansatz nicht geeignet, da sich verschobene Geraden im Inneren schneiden können. Mit einem anderen, etwas aufwendigeren Ansatz, erreicht man allerdings den gewünschten Effekt. Um alle Randpunkte des Polygons werden in dem Abstand, um den man die Grenzen verschieben möchte, die Eckpunkte eines regelmäßigen Achtecks erzeugt. Diese Punkte werden mit der Menge der ursprünglichen Punkte im Schlag vereinigt und mit der Methode der Alpha-Shapes eine Randkontur erzeugt.

Abbildung 5.10 verdeutlicht die beiden Ansätze. Die Methode für nicht-konvexe Schläge benötigt innere Punkte für die Berechnung der vergrößerten Schlagkontur über Alpha-Shapes. Oft liegen nur die Eckpunkte des Schlages vor. In einem zusätzlichen Schritt müssen somit erst innere Punkte in einem bestimmten Raster erzeugt werden, was den Rechenaufwand zusätzlich erhöht. Im konvexen Fall reichen die Eckpunkte dagegen für die Berechnung eines ausgedehnten Schlages aus.

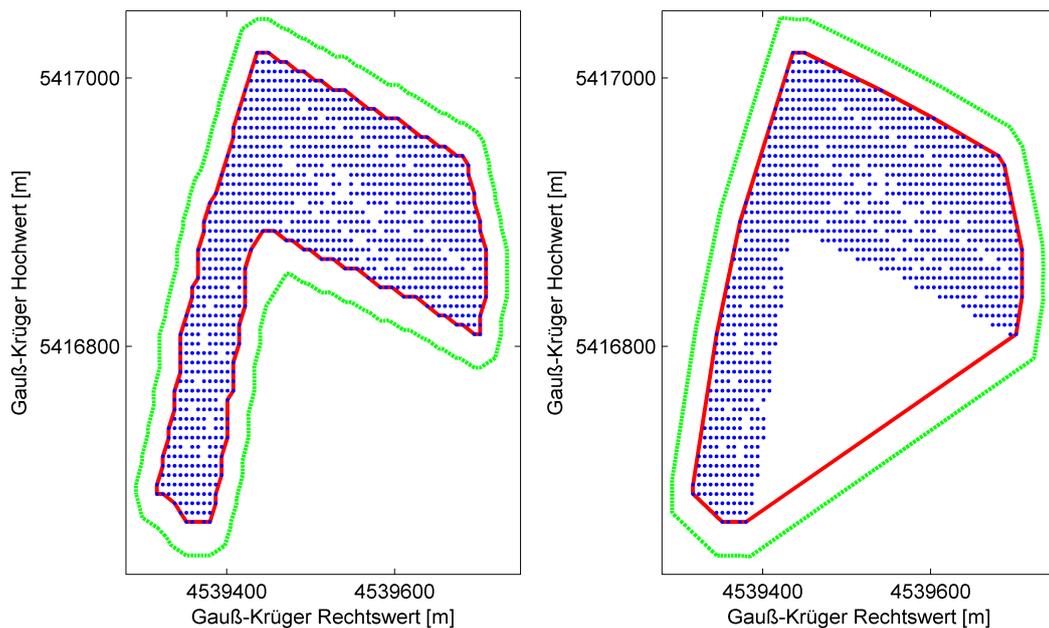


Abbildung 5.10: Randstreifen um einen automatisch ermittelten Schlag; nicht-konvexer Ansatz (links) und konvexer Ansatz (rechts)

5.2 Verwendetes Zeitgliederungsschema

Wie bereits in Kapitel 2.5.2 dargestellt, laufen Agrarlogistik-Prozesse zeitbezogen ab. Eine entsprechend hinterlegte Zeitstrukturierung ist dabei unumgänglich. Vor dem Hintergrund, die Schwachpunkte bisherige Zeitgliederungen zu verbessern, wurde von der KTBL-Arbeitsgruppe *Arbeitswirtschaftliche Grundlagen* ein neues Zeitgliederungsschema entworfen (vgl. Tabelle 2.2), das unter anderem auch auf eine automatisierte Prozessdatenerfassung ausgerichtet ist. Die Teilzeiten und Bezeichnungen des KTBL-Schemas sollen in dieser Arbeit verwendet werden. Erweiterungen sind bei dieser Zeitgliederung jederzeit möglich. Für bestimmte Teilzeiten bietet es sich an, diese ebenfalls örtlich zu untergliedern. Erntemaschinen mit einem Bunker wie Mähdrescher oder selbstfahrende Zuckerrübenroder können während der Fahrt geerntetes Gut an ein Transportfahrzeug übergeben. Daher ist es auch sinnvoll, die Hauptteilzeit t111 zu unterteilen. Entsprechende Teilzeiten werden dem Schema hinzugefügt (vgl. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Erweiterte Zeitgliederung des KTBL für landwirtschaftliche Arbeiten nach [Win14];
Erweiterungen grau hinterlegt

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	
t1 Hauptzeit	t11 Arbeitsverrichtungszeit	t111 Arbeitsverrichtung im engeren Sinne	t1111 mit Entladung t1112 ohne Entladung	
		t112 Lastfahrt	t1121 am Arbeitsort t1122 Straße	
		t113 Leerfahrt	t1131 am Arbeitsort t1132 Straße	
		t114 Kontrolle		
	t12 Wendezeit			
	t13 Be- und Entladezeit	t131 Beladezeit		
		t132 Entladezeit		
	t14 Ablaufbedingte Wartezeit	t141 am Arbeitsort		t1411 Logistik-Engpass Feld t1412 Logistik-Engpass Straße t1413 Logistik-Engpass Feld und Straße
		t142 am Be-/ Entladeort		
		t143 Straße		
	t15 Einstellungszeit			
	t16 Arbeitsbedingte Erholungszeit			
	t2 Störzeit	t21 Funktionelle und technische Störzeit	t211 Funktionelle Störung	
t212 Technische Störung			t2121 am Arbeitsort t2122 Straße	
t22 Organisationsbedingte Störzeit				
t23 Witterungsbedingte Störzeit				
t24 Persönliche Verteilzeit				
t3 Nebenzeit	t31 Versorgungszeit	t311 am Ausgangsort		
		t312 am Arbeitsort		

t32	Arbeitsvorbereitungszeit	t321	Rüsten	t3211	am Ausgangsort
				t3212	am Arbeitsort
		t322	Arbeitsorganisatorische Absprache	t3221	am Ausgangsort
				t3222	am Arbeitsort
t33	Arbeitsnachbereitungszeit	t331	Rüsten	t3311	am Ausgangsort
				t3312	am Arbeitsort
		t332	Arbeitsorganisatorische Absprache	t3321	am Ausgangsort
				t3322	am Arbeitsort
t34	Wegezeit				
t35	Wartungszeit	t351	am Ausgangsort		
		t352	am Arbeitsort		

Der Informationsgehalt einer Datengrundlage ist abhängig von der Qualität der darin enthaltenen Daten hinsichtlich Aussagekraft, Detaillierung und Erhebungsrate. Innerhalb des in der vorliegenden Arbeit gewählten Ansatzes mit einer rein aus Positionsdaten bestehenden Datenbasis ist es nicht möglich, sämtliche Teilzeiten des Zeitgliederungsschemas einzeln zu ermitteln. Daher gilt es, einzelne Teilzeiten sinnvoll zu aggregierten Teilzeiten zusammenzufassen, die sich aus der vorhandenen Datengrundlage bestimmen lassen und aus dem Blickwinkel der Agrarlogistik eine möglichst hohe Aussagekraft besitzen. Die aggregierten Teilzeiten werden im Unterschied zu den Teilzeiten aus Tabelle 5.1 mit „T“ bezeichnet und wie folgt untergliedert:

- T_A : Arbeitsverrichtungszeit mit Wendezeiten
 - T_{Aa} : mit paralleler Überladung
 - T_{Ab} : ohne parallele Überladung
- T_B : Be-/ Entladung im Stand am Schlag oder in Überladezone
- T_C : Standzeit am Schlag oder in Überladezone
 - T_{Ca} : Standzeit bedingt durch Logistikengpass Feld
 - T_{Cb} : Standzeit bedingt durch Logistikengpass Straße
 - T_{Cc} : Standzeit bedingt durch Logistikengpass Feld und Straße

- T_D : Leer- und Lastfahrt Feld oder Überladezone
- T_E : Verfahrensunterbrechung am Schlag
- T_F : Straßenfahrt
- T_G : Be-/ Entladen an Lager und Entladen in Überladezone bei mehrphasigen Transporten

Der Betriebszustand eines Fahrzeuges zu einem bestimmten diskreten Zeitpunkt wird in dieser Arbeit so definiert, dass sich die Zeit bis zum nächsten Betrachtungszeitpunkt einer bestimmten Teilzeit zuordnen lässt. Somit korrespondieren Betriebszustände mit Teilzeiten, was sich auch in der Verwendung identischer Bezeichnungen äußert.

5.3 Fahrzeugklassen

Landwirtschaftliche Logistikprozesse werden mit einer Vielzahl unterschiedlicher Maschinen und Maschinenkombinationen durchgeführt. Für eine strukturierte Analyse werden entsprechend Tabelle 5.2 verschiedene Fahrzeugklassen anhand charakteristischer Bestandteile der Hauptzeit t_1 definiert. Die hier vorgenommene prozessorientierte Einteilung der Fahrzeugklassen unterscheidet sich deutlich von vorwiegend technischen Klassifizierungen wie sie den Vorschriften für Fahrzeugzulassung und Fahrerlaubnis zu Grunde liegen. Beispielsweise fallen Traktoren mit Häckselwagen und Agrar-LKWs für einphasige Transportverfahren beide in die Klasse *Transporteinheit Feld und Straße*, wohingegen sie sich in den Einteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes deutlich unterscheiden [Kra12]. Durch diese prozessorientierte Herangehensweise kann die Anzahl der zur Beschreibung der Verfahren nötigen Klassen gering gehalten werden sowie eine Flexibilität und Stabilität der Methodik gegenüber unterschiedlichen technischen Umsetzungen gewährleistet werden.

Tabelle 5.2: Fahrzeugklassen mit charakteristischen Hauptzeitbestandteilen

	Ernten im Parallelsystem	Ernten mit Bunker	Ausbringung Flüssigmist	Überladen in Fahrt	Überladen im Stand	Transport Feld	Transport Straße	Be-/ Entladen an Lagerstätte	Entladen Feldrand	Überladen aus Transporteinheit	Überladen aus Feldmiete	Arbeit auf Schlag
Selbstfahrhäcksler (<i>SFH</i>)	●	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-
Mähdrescher (<i>MD</i>)	-	●	-	●	●	-	-	-	-	-	-	-
Ausbringeinheit (<i>AE</i>)	-	-	●	-	●	-	-	-	-	-	-	-
Transporteinheit Feld und Straße (<i>TE_FS</i>)	-	-	-	-	-	●	●	●	-	-	-	-
Transporteinheit Feld (<i>TE_F</i>)	-	-	-	-	-	●	-	-	●	-	-	-
Transporteinheit Straße (<i>TE_S</i>)	-	-	-	-	-	-	●	●	-	-	-	-
Überladeeinheit Bodenaufnahme (<i>UE_Bo</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-
Überladeeinheit Bunkeraufnahme (<i>UE_Bu</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-
Überladewagen (<i>UW</i>)	-	-	-	-	●	●	-	-	-	-	-	-
Ladewagen-Gespann (<i>LW</i>)	-	-	-	-	-	-	●	●	-	-	-	●
Gülletankwagen-Gespann (<i>GTW</i>)	-	-	-	-	-	-	●	●	-	-	-	●
Arbeitsmaschine solo (<i>AM</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●

- trifft zu
- trifft nicht zu

5.4 Verfahrensszenarien

Entsprechend der in der Praxis am häufigsten vorkommenden Verfahrensumsetzungen werden für die Analysemethodik verschiedene Szenarien definiert. Ähnlich gestaltete Logistikverfahren können so gruppiert werden. Bei der anschließenden Analyse werden die spezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Als Beispiel sei hier die Unterscheidung angeführt, ob der Transport auf Feld und Straße getrennt oder in Kombination durchgeführt wird. In Tabelle 5.3 sind die festgelegten Szenarien mit den jeweils zulässigen Fahrzeugklassen dargestellt.

Tabelle 5.3: Szenarien der Verfahrensanalyse

Bereich	Szenario	Fahrzeugklassen im Verfahren
Siliergüter	Ernte mit Ladewagen	LW
	Ernte mit SFH im Parallelverfahren, keine Überladung	SFH, TE_FS
	Ernte mit SFH im Parallelverfahren, Überladesystem mit Bunkeraufnahme	SFH, TE_F, TE_S, UE_Bu
	Ernte mit SFH im Parallelverfahren, Überladesystem mit Bodenaufnahme	SFH, TE_F, TE_S, UE_Bo
Mähdrusch	Mähdrusch, Entleerung an Standwagen oder parallel während der Fahrt	MD, TE_FS
	Mähdrusch mit Überladewagen	MD, UW, TE_S
Flüssigmistausbringung	Flüssigmistausbringung einphasig	GTW
	Flüssigmistausbringung mehrphasig	AE, TE_S

5.5 Interne Datenstruktur

Die in der Analyse verwendeten Daten lassen sich in fahrzeugbezogene Daten, in Datenelemente, die ortsfeste Parameter abbilden sowie in übergeordnete Datenstrukturen

einteilen. Die übergeordneten Strukturen stellen die Verknüpfungen zwischen verschiedenen Elementen her. Die einzelnen Inhalte sollen näher erläutert werden.

5.5.1 Fahrzeugbezogene Daten

Die Daten der Einzelfahrzeuge werden in einer Structure-Variablen *Fahrzeugdaten* gespeichert. Diese Variable kann mehrdimensional sein. Für jedes Fahrzeug wird die Dimension um eins erhöht. Matlab erlaubt es, beliebig viele Felder der Structure-Variablen zu definieren. Diese Felder können mit unterschiedlichen Dateninhalten gefüllt werden (vgl. Tabelle 5.4). Die während der Analyse erzeugten Daten können zu den Eingangsdaten hinzugefügt werden. Somit können sämtliche fahrzeugbezogenen Inhalte in einer Struktur hinterlegt werden.

Tabelle 5.4: Datenfelder des Structure-Arrays *Fahrzeugdaten*

Feld	Beschreibung	Datentyp
Art	Fahrzeugklasse (vgl. Tabelle 5.2)	1 x 1 cell
Jobs	Binär-Vektor mit Hauptzeitbestandteilen (vgl. Tabelle 5.2)	1 x 12 double
Name	Bezeichnung des Fahrzeugs, zum Beispiel Typenbezeichnung	1 x 1 cell
Daten	Positionsdaten und Betriebszustände, eine Zeile je Zeitschritt	n x 13 double

Im Feld *Art* wird die Klasse des Fahrzeugs gemäß Tabelle 5.2 hinterlegt. Das Feld *Jobs* enthält einen binären Vektor, der die Hauptaufgaben für ein Fahrzeug durch 1 an entsprechender Stelle freigibt beziehungsweise mit 0 sperrt, siehe ebenfalls Tabelle 5.2. Streng genommen ist das Mitführen der Fahrzeugklasse redundant, da sie sich aus dem beschriebenen Vektor eindeutig ableiten lässt. Falls man allerdings die Rohdaten direkt betrachtet, bietet das Feld *Art* eine gute Orientierungshilfe. Der Name des Fahrzeugs wird zunächst automatisch generiert als Kombination der Fahrzeugklasse und einer fortlaufenden Nummer. Durch eine Benutzereingabe kann der Name auch individuell gewählt werden.

Das Feld *Daten* enthält die eigentlichen Informationen und besteht aus einer Matrix mit je einer Zeile pro Aufzeichnungszeitpunkt und dreizehn Spalten. Neun Spalten beinhalten gemessene GPS-Daten beziehungsweise direkt daraus abgeleitete Werte. In den restlichen vier Spalten werden während der Analyse Parameter hinterlegt und zunächst mit 0 initialisiert (vgl. Tabelle 5.5). Die Analyseparameter sind über Zahlenwerte codiert. Der Betriebszustand eines Fahrzeuges wird in der Analyse zu jedem Aufzeichnungspunkt bestimmt und abgespeichert. Die Zuordnung von Betriebszustand und Ziffer wird verfahrensabhängig in Kapitel 5.6 dargestellt. Die Hilfsvariablen *Position 1* und *Position 2* dienen als Hilfsvariablen bei der

Bestimmung der Betriebszustände. In Position 1 ist als positive Zahl die Schlagnummer angegeben, falls sich ein Fahrzeug auf einem Schlag befindet. Falls für das betreffende Fahrzeug der Aufenthalt in einem Korridor um einen Schlag relevant ist (vgl. Kapitel 5.1.2.4), wird dies über die Addition der Gesamtanzahl an Schlägen hinterlegt. Der Aufenthalt an einer Be- oder Entladeanlage wird, falls es für das Fahrzeug relevant ist, durch Angabe der negativen fortlaufenden Nummer dieser Anlage angegeben. Liegt die Fahrzeugposition weder innerhalb von Schlägen, einschließlich möglicher Korridore, noch an einer Be- oder Entladeanlage, enthält die Hilfsvariable Position 1 an dieser Stelle die Ziffer 0.

In der Hilfsvariablen Position 2 wird für Arbeitsmaschinen zwischen den Werten 0 und 1 unterschieden, wobei 1 den Aufenthalt auf einem Schlag wiedergibt. Für Transportfahrzeuge, die von einer anderen Maschine zur Be- oder Entladung auf einem Schlag oder am Feldrand erkannt werden müssen, wird durch die Ziffer 2 an dieser Stelle angegeben, dass aufgrund der derzeitigen Relativposition eine Be- bzw. Entladung auf oder an einem Schlag möglich ist. Befindet sich das Fahrzeug auf dem Schlag, einschließlich Randkorridor, wird dies durch eine 1 im Datensatz vermerkt. Der Aufenthalt an einer Be- oder Entladeanlage wird durch die Ziffer -1 codiert. In der Getreideernte ist es möglich, dass mehrere Mähdrescher auf einem Schlag eingesetzt werden. Es muss hinterlegt werden, für welchen Mähdrescher das Transportfahrzeug für eine Beladung in Frage kommt. Deshalb wird hier die fortlaufende Nummer des Mähdreschers als Dezimale mitgeführt, wobei Matlab einen Punkt als Trennzeichen verwendet. Durch die Verwendung der Hilfsvariablen Position 1 und Position 2 kann vermieden werden, dass identische Berechnungen bei der folgenden Zuweisung der Betriebszustände mehrfach durchgeführt werden.

Die Variable *Beladungszustand* gibt für Transportfahrzeuge den aus den Betriebszuständen errechneten Beladungszustand wieder. Es wird zwischen leer, bereits begonnener Be- oder Entladung und voller Beladung unter Verwendung der Ziffern 0, 1 und 2 unterschieden.

5.5.2 Ortsfeste Strukturelemente

Lage und Ausdehnung der ortsfesten Strukturelemente wie Schläge, Annahmestellen für Häckselgut oder Getreide sowie Flüssigmistlagerstätten als Quellen und Senken des Gutflusses sind in der Logistikanalyse von entscheidender Bedeutung. Auf die entsprechenden Daten wird während der Analyse an verschiedenen Stellen zugegriffen. Schläge lassen sich als Polygone abbilden (vgl. Kapitel 5.1). Die automatisierte Schlagermittlung aus Abschnitt 5.1.2 liefert eine Zuteilung von gerasterten GPS-Punkten zu Einzelschlägen sowie eine Folge von Randpunkten, welche die konvexe Hülle des Schlages bilden. Sowohl die zugeweilten Rasterzellen, als auch die konvexe Hülle des Schlages werden neben einem Referenz-

Tabelle 5.5: Matrixaufbau im Feld *Daten* des Arrays *Fahrzeugdaten*

Spalte	Bezeichnung	Beschreibung	Beispielwert
1	Uhrzeit	Stunden, Minuten, Sekunden ungetrennt	145347
2	Absolutzeit	Datum als ganze Zahl, Uhrzeit als Dezimale	735320,42887
3	Delta_t	Zeitdifferenz zum vorherigem Datensatz in Sekunden	1, 2, 3,...
4	Breitengrad	Geographische Breite in Grad	48,12345
5	Längengrad	Geographische Länge in Grad	11,45678
6	GK rechts	Gauß-Krüger-Rechtswert in Meter	4515693,727
7	GK hoch	Gauß-Krüger-Hochwert in Meter	5766089,708
8	Geschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeit in Stundenkilometer	38,32
9	Höhe	Höhe über NN in Meter	428,23
10	Position 1	Fahrzeugposition 1, codiert	...-2, -1, 0, 1, 2, 3,...
11	Position 2	Fahrzeugposition 2, codiert	-1, 0, 1, 2, 2.1, 2.2
12	Job	Betriebszustand, codiert	...-2, -1, 0, 1, 2, 3,...
13	Beladung	Beladungszustand, codiert	0, 1, 2

punkt und einem Namen des Schlages als Felder eines Structure-Arrays gespeichert. Die Dimension des Arrays kann analog zu den fahrzeugbezogenen Daten beliebig vergrößert werden, sodass auf die Daten eines bestimmten Schlages durch einen indexbezogenen Aufruf unkompliziert zugegriffen werden kann.

Die Lage der Annahmestellen wird in einer Variablen *Silos* hinterlegt. Dort werden die zentral liegende GPS-Punkte abgespeichert als geographischer Mittelpunkt einer Anlage. Die zweidimensionale Ausdehnung wird über die Festlegung eines Radius als Eingabeparameter der Analyse abgebildet. Eine polygonale Beschreibung der Ausdehnung ist grundsätzlich ebenfalls möglich. Flüssigmistlagerstätten werden analog behandelt.

5.5.3 Übergeordnete Datenstrukturen

Die Analyse der Logistikketten erfolgt verfahrensabhängig entsprechend den vordefinierten Szenarien. Die Art des Szenarios wird zu Beginn der Analyse einmalig überprüft. Dazu wird eine Abfrage durchgeführt, die anhand der Fahrzeugklasse der eingelesenen Fahrzeugdatensätze entscheidet, um welches Szenario es sich handelt. In der Variable *Szenario* wird das ermittelte Verfahren als Text-String gespeichert. Stimmen die eingelesenen Fahrzeugklassen mit keinem Szenario überein, erfolgt keine Betriebszustandszuweisung.

Die Betrachtung von kausalen Zusammenhängen zwischen Fahrzeugen benötigt einen gemeinsamen Zeitbezug. In GPS-Datensätzen werden jedem Aufzeichnungszeitpunkt ge-

messene Positionsdaten zugeordnet. Die zeitliche Auflösung ist somit abhängig von der Aufzeichnungsfrequenz. Dieser Zeitbezug kann genutzt werden, um die Positionen von verschiedenen Fahrzeugen zu synchronisieren und zueinander in Bezug zu setzen. Schwierigkeiten bestehen dabei darin, dass die Startzeitpunkte der Aufzeichnungen der Einzelfahrzeuge in der Regel unterschiedlich sind. Auch die Zeitkontinuität der Aufzeichnungen kann bei schlechtem Empfang des GPS-Signals Lücken aufweisen. Dies muss bei allen Betrachtungen, die auf Relativpositionen verschiedener Fahrzeuge beruhen, berücksichtigt werden. Um redundante Abgleiche der Zeitstempel zu vergleichen, bietet es sich an, in einem der Analyse vorgelagerten Schritt den Gleichzeitigkeitsbezug aller an der Verfahrenskette beteiligten Fahrzeuge einmalig herzustellen.

Das von Matlab verwendete Zeit- und Datumsformat erweist sich als praktisch für zeitbezogene Rechenoperationen. Datum und Uhrzeit werden als Absolutwert seit Beginn der Zeitrechnung angegeben. Ganze Zahlen repräsentieren ganze Tage, Uhrzeiten können als Teil eines ganzen Tages beliebig genau in dezimaler Form angegeben werden. Auf diese Weise lassen sich Uhrzeiten mit Standardoperationen miteinander verrechnen oder vergleichen.

Um den zeitlichen Bezug aller Fahrzeuge untereinander herzustellen und darauf zugreifen zu können, wird eine Zeitreferenzmatrix erzeugt. Aus allen Datensätzen der verschiedenen Fahrzeuge wird der früheste Aufzeichnungsbeginn und das späteste Ende ermittelt. Unter Beachtung dieser Grenzen, werden in die erste Spalte der Referenzmatrix kontinuierlich absolute Zeitpunkte im Abstand der Aufzeichnungsfrequenz eingetragen. In den weiteren Spalten werden den Zeitpunkten die passenden Spaltenindizes der Datensätze der einzelnen Fahrzeuge zugeordnet. Dazu werden alle Datensätze einmalig mit einer Schleife durchlaufen. Im Falle von Datenlücken wird der nächstfolgende Index in die Referenzmatrix eingetragen, siehe Tabelle 5.6. Sobald die Zeitreferenzmatrix einmalig erstellt ist, kann über das Aufrufen des jeweiligen Indexes ohne weitere Rechenoperationen auf zeitsynchrone Daten verschiedener Fahrzeuge zugegriffen werden.

5.6 Analysealgorithmen zur Bestimmung von Betriebszuständen

Betriebszustände von Maschineneinheiten zu allen Zeitpunkten, die durch die Datenaufzeichnungsfrequenz festgelegt sind, bilden das Grundgerüst für weiterführende Analysen. In einem Betriebszustand werden verschiedene Teilzeiten aggregiert. Somit müssen Betriebszustände für das jeweilige Verfahrensszenario zunächst unter Berücksichtigung der

Tabelle 5.6: Beispiel einer Zeitreferenzmatrix zu einer Erntekette vom 30.09.2011 (Ausschnitt) mit Lücke im Datensatz eines Fahrzeugs (rot markiert)

Zeit	Spaltenindex Fahrzeug 1	Spaltenindex Fahrzeug 2	Spaltenindex Fahrzeug 3	Spaltenindex Fahrzeug 4	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
734776,4177662038	14787	14797	14722	14797	
734776,4177777778	14788	14798	14723	14798	
734776,4177893519	14789	14799	14724	14799	
734776,4178009259	14790	14800	14725	14800	
734776,4178125000	14791	14801	14726	14800	
734776,4178240740	14792	14802	14727	14800	
734776,4178356482	14793	14803	14728	14801	
734776,4178472222	14794	14804	14729	14802	
734776,4178587963	14795	14805	14730	14803	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

vorhandenen Datengrundlage sinnvoll definiert werden. Zustandsdefinitionen müssen eindeutig und vollständig formuliert sein, was bedeutet, dass immer nur ein Betriebszustand für einen Datenzeitpunkt möglich sein darf und auch immer eine Zuweisung möglich sein muss. In einem weiteren Schritt gilt es, Algorithmen zu entwickeln, die aus der Datengrundlage zu jedem Aufzeichnungszeitpunkt einen Betriebszustand entsprechend den vorliegenden Definitionen ermitteln. Im Folgenden werden die Analysealgorithmen zur Bestimmung der Betriebszustände der an unterschiedlichen Logistikverfahren beteiligten Fahrzeuge beschrieben, aufbauend auf den in Abschnitt 5.4 definierten Verfahrensszenarien.

5.6.1 Szenarien Silierguternte

Die drei beschriebenen Szenarien zur Ernte von Siliergütern unterscheiden sich deutlich in der Komplexität ihrer Verfahrensketten. Während im Ernteprozess mit Ladewagen nur eine Fahrzeugklasse autonom im Einsatz ist, kommt es in Häckselketten ohne Überladung bei der Beladung auf dem Schlag zur Interaktion von Transporteinheit und Selbstfahrhäcksler. Verfahren mit einer Trennung des Feld- und Straßentransports beinhalten eine zusätzliche Gutübergabe am Feldrand. Diese Rahmenbedingungen müssen in den Algorithmen berücksichtigt werden.

5.6.1.1 Ernteverfahren mit Ladewagen

In Ernteverfahren mit Ladewagen werden Gutaufnahme, Transport und Entladung von Traktor-Ladewagen-Gespansen durchgeführt. Es können auch parallel mehrere Gespanne eingesetzt werden, die jedoch jeweils autonom arbeiten können. Über eine geeignete Analyse soll das Arbeitsverfahren untergliedert werden in aufgewendete Zeitanteile für die Entladung, für den Transport und für Prozesse auf einem Schlag. Standzeiten auf einem Schlag, die auf technische oder organisatorische Probleme im Verfahren hindeuten, sollen separat ausgewiesen werden. In Tabelle 5.7 werden die Definitionen der Betriebszustände mit den fokussierten Teilzeiten dargestellt, auf die die Definition ausgerichtet ist.

Die automatisierte Durchführung der Zustandszuweisungen benötigt ein geeignetes Rechenverfahren. Der entwickelte Algorithmus wird in Abbildung 5.11 dargestellt. Entsprechende Werte für Start- und Stoppzeit müssen initialisiert werden. Diese lassen sich über eine vorgelagerte Routine aus dem Positionsdatensatz bestimmen. Weitere Eingangsdaten sind Lage und Ausdehnung der Schläge und der Silo-Anlagen, die entsprechend den in Kapitel 5.5.2 beschriebenen Methoden eingehen. Der Algorithmus zur Zuweisung der Betriebszustände bestimmt nun für jeden Zeitpunkt einen der vier vorgegebenen Zustände. Dazu wird zunächst über die Betrachtung der radialen Entfernung zum Mittelpunkt der Siloanlage geprüft, ob sich das Fahrzeug an der Siloanlage befindet, was unmittelbar die Zuordnung des Zustandes *Entladung* zur Folge hat. Befindet sich das Gespann aus Traktor und Ladewagen nicht an der Siloanlage, stellt eine weitere Abfrage fest, ob die aktuelle Position auf einem Schlag liegt. Zur Anwendung kommt dabei das Verfahren zum Abgleich einer GPS-Position mit einem als Polygon gegebenen Schlag aus Kapitel 5.1. Bei Betriebszuständen auf einem Schlag wird anhand der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zwischen *Prozess- und Wendezeit* bzw. *Standzeit* unterschieden. Standzeiten sollen nur dann als solche identifiziert werden, wenn sie auf Schwachstellen im Verfahren hindeuten. Ein kurzzeitiges Stehen des Fahrzeugs beispielsweise beim Wenden soll nicht in die Standzeit einfließen. Der Genauigkeitsbereich der satellitengestützten Geschwindigkeitsermittlung soll ebenfalls berücksichtigt sein. Daher muss die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges im 15-sekündigen Durchschnitt unter 1 km/h liegen. Alle übrigen Fälle, in denen das Fahrzeug weder auf einem Schlag noch am Silo ist, werden als *Straßenfahrt* gewertet. Ein Update der Zeitvariablen sowie ein geeignetes Abbruchkriterium komplettieren den Algorithmus.

Tabelle 5.7: Betriebszustände eines Ladewagen-Gespans

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
T_A Prozess- und Wendezeit	Fahrzeug auf Schlag, in Bewegung	t111, t1121, t1131, t12
T_C Standzeit	Fahrzeug auf Schlag, im Stand	t211, t2122, t3222, t3312, t3322, t352
T_F Straßenfahrt	Fahrzeug weder an Schlag noch Silo	t1122, t1132
T_G Entladung	Fahrzeug an der Siloanlage	t132, t142

5.6.1.2 Einphasige Ernte mit Selbstfahrhäcksler im Parallelverfahren ohne Überladung

Die Ernte von Siliergütern mit Selbstfahrhäcksler wird in der Praxis vorwiegend im Parallelverfahren vollzogen. Maschinenkonzepte mit Bunker oder mit Anbaumöglichkeiten für Sattelaufleger sind selten vorzufinden. Bei der Ernte im Parallelverfahren muss das Erntegut von einer Transporteinheit aufgenommen und abtransportiert werden. Im Fall eines kombinierten Feld- und Straßentransports ohne Überladung besteht die Verfahrenskette somit aus den Fahrzeugklassen *Selbstfahrhäcksler* und *Transporteinheit Feld und Straße*. Ernteprozesse mit einem Selbstfahrhäcksler erfolgen stets schlaggebunden. Weiterhin kann ein Gutstrom nur in Fahrt entstehen und muss von einer parallel fahrenden Transporteinheit aufgenommen werden. Eine Transporteinheit, die aufgrund von Positionsrelationen als vom Selbstfahrhäcksler gegenwärtig zu beladen angesehen wird, wird im Weiteren als TE^* bezeichnet. In Abhängigkeit von der Existenz einer TE^* und der Information, ob sich der Selbstfahrhäcksler im Stand oder in Bewegung befindet, lassen sich für einen Selbstfahrhäcksler die vier schlagbezogenen Betriebszustände *Prozess- und Wendezeit*, *Leerfahrt Feld*, *Unterbrechung* und *Standzeit* unterscheiden. Der Zustand *Straßenfahrt* umfasst alle nicht schlagbezogenen Anteile (vgl. Tabelle 5.8).

Abbildung 5.12 zeigt die algorithmische Umsetzung der Betriebszustandszuweisungen. Zunächst wird geprüft, ob die Position des Selbstfahrhäckslers innerhalb eines Schlages liegt. Ist dies der Fall, folgt die Betrachtung der Transporteinheiten. Wird eine Transporteinheit als TE^* erkannt, erfolgt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit eine Unterscheidung zwischen den Zuständen *Prozess- und Wendezeit* und *Unterbrechung*. Ist keine TE^* vorhanden, werden ebenfalls geschwindigkeitsabhängig die Zustände *Leerfahrt Feld* beziehungsweise *Standzeit* eingenommen.

Wichtig für eine sinnvolle Analyse ist ein korrekter Entscheidungsalgorithmus für das Er-

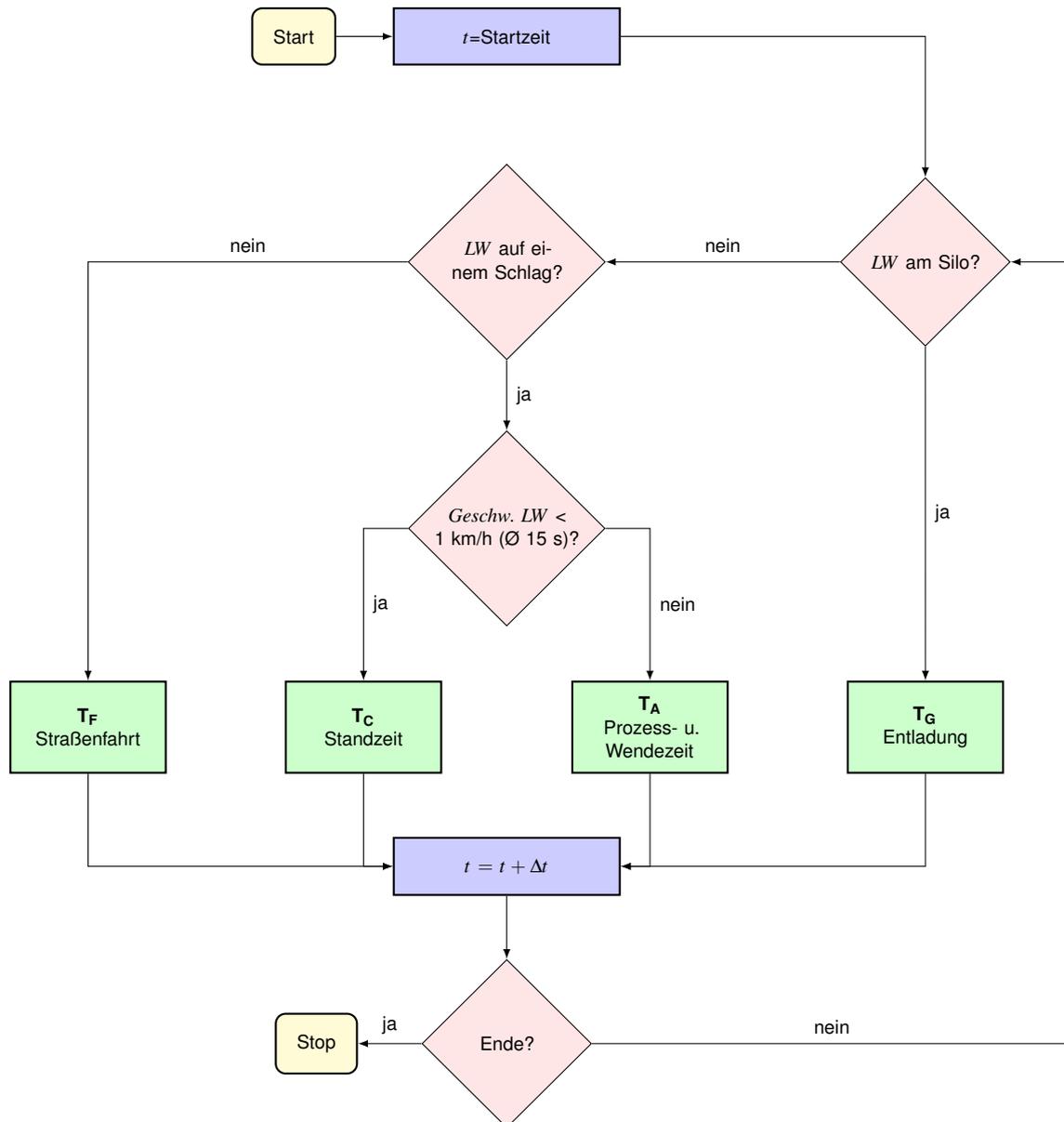


Abbildung 5.11: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Ladewagen

kennen einer zu beladenden Transporteinheit TE^* . Maßgeblich dafür sind Betrachtungen der Relativpositionen. Die Entscheidungen, wann genau für einen Häcksler die Übergänge bezüglich des Betriebszustandes von Warten auf eine Transporteinheit zu Beladen der selbigen und zu Beenden des Ladevorgangs vollzogen werden, sind selbst bei direkten visuellen Beobachtungen der Prozesse in der Praxis nicht immer eindeutig zu beurteilen. Daher müssen auch bei der algorithmischen Entscheidung mehrere Faktoren beachtet werden. Probleme bei der Zustandszuweisung können vor allem dann auftreten, wenn prinzipiell mehrere Transporteinheiten als gegenwärtig zu beladendes Fahrzeug in Frage kommen. Im Bewertungsverfahren gilt deshalb, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt höchstens ein Fahrzeug als TE^* erkannt werden kann. Freie Transporteinheiten folgen dem Feldhäcksler oft sehr dicht. Um solchen Situationen gegenüber eine gewisse Robustheit zu erzeugen, muss eine Transporteinheit, die im vorhergehenden Zeitschritt als zu beladende Einheit identifiziert wurde, schwächere Bedingungen erfüllen, um weiterhin als solche zu gelten, als bei der Neuerkennung einer Transporteinheit als TE^* gefordert werden. Des Weiteren soll eine TE^* auch während eines Wendevorgangs am Vorgewende diesen Status beibehalten, damit Wendezeiten als Bestandteil eines Beladungsvorgangs betrachtet werden. Im Detail wird die Entscheidung, welches Fahrzeug aktuell zu beladen ist, wie folgt vollzogen: Falls dem Selbstfahrhäcksler im Zeitschritt davor keine Transporteinheit zugeordnet wurde, wird die Neuerkennung aktiv. Wenn sich eine Transporteinheit zum Betrachtungszeitpunkt auf dem Schlag und näher als 20 m am Häcksler befindet und dies auch in den nächsten 15 Sekunden mindestens drei Mal erfüllt, wird sie als TE^* erkannt. Ein im Zeitschritt davor bereits als TE^* identifiziertes Fahrzeug muss der Beibehaltungsbedingung genüge leisten, mindestens zwei Mal in den nächsten 15 Sekunden näher als 20 m am Häcksler zu sein. Diese Methoden zur Bestimmung der zu beladenden Transporteinheit sind ein wesentlicher Unterschied zu den Betriebszustandsbestimmungen in [DDS10]. Dort werden ausschließlich Abstandsrelationen berücksichtigt.

Die Geschwindigkeitsbetrachtungen zur Identifizierung von Standzeiten erfolgen analog zur Vorgehensweise bei Traktor-Ladewagen-Gespannen über einen 15-sekündigen Durchschnittswert. Auch hier soll kurzzeitiges technik- oder verfahrensbedingtes Stehen beim Wenden oder bei der Einfahrt in eine Spur nicht als Standzeit gewertet werden. Bei der Identifizierung von Unterbrechungen wird neben der Geschwindigkeit des Selbstfahrhäckslers auch die Geschwindigkeit der Transporteinheit betrachtet. Dadurch wird erreicht, dass am Ende eines Beladungsvorgangs, wenn sich der Selbstfahrhäcksler in der Regel im Stand und die Transporteinheit in Fahrt vom Selbstfahrhäcksler wegbewegt, keine Unterbrechung des Verfahrens attestiert wird.

Tabelle 5.8: Betriebszustände eines Selbstfahrhäckslers

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
T _A Prozess- und Wendezeit	SFH auf Schlag, TE^* erkannt, SFH in Bewegung	t111, t12
T _C Standzeit	SFH auf Schlag, TE^* nicht erkannt, SFH im Stand	t141
T _D Leerfahrt Feld	SFH auf Schlag, TE^* nicht erkannt, SFH in Bewegung	t1131
T _E Unterbrechung	SFH auf Schlag, TE^* erkannt, SFH im Stand	t211, t2121
T _F Straßenfahrt	SFH nicht auf Schlag	t34, t143

Transporteinheiten in Ernteketten für Siliergüter ohne Überladung werden für den Transport des Erntegutes sowohl auf einem Schlag als auch auf der Straße eingesetzt. Schlagbezogene Betriebszustände von Transporteinheiten stehen in einem engen Zusammenhang mit denen des Selbstfahrhäckslers. Die Zuordnung nicht schlagbezogener Betriebszustände beruht auf der Betrachtung der relativen Position des Einzelfahrzeugs.

Ähnlich zu den Betrachtungen für den Selbstfahrhäcksler können sich auch Transporteinheiten auf einem Schlag entweder im Stand oder in Fahrt befinden sowie als TE^* erkannt sein. Daraus werden die schlagbezogenen Betriebszustände *Belade- und Wendezeit*, *Unterbrechung*, *Leer- und Lastfahrt Feld* und *Standzeit* abgeleitet. Beim Anschneiden neuer Schläge können Transporteinheiten in der Regel nicht auf dem zu beerntenden Schlag warten, sondern an einer geeigneten Stelle in der Nähe des Schlages. Diese Standzeiten sollen vom Analyseverfahren auch als *Standzeit* identifiziert werden, ebenso, falls ein Transportfahrzeug beim Schlagwechsel bereits am nächsten Schlag wartet. Nicht schlagbezogen soll zwischen *Entladung* am Silo und *Straßenfahrt* unterschieden werden (vgl. Tabelle 5.9). Abbildung 5.13 zeigt die Kausalzusammenhänge der Zustandszuordnungen im Detail. Unterscheidungen zwischen Straßentransport, Entladen und schlagbezogenen Prozessen werden analog zur Analyse der Ladewagenernte durchgeführt. *Belade- und Wendezeit* und *Unterbrechung* werden in Abhängigkeit der Erkennung der Transporteinheit als TE^* zugewiesen. Ist eine Transporteinheit auf dem Schlag nicht als TE^* erkannt, wird geschwindigkeitsabhängig zwischen den Betriebszuständen *Leer- und Lastfahrt Feld* und *Standzeit* unterschieden. Auch im Algorithmus der Zustandszuweisungen für Transporteinheiten muss berücksichtigt

werden, dass bei stehendem Selbstfahrhäcksler und fahrender TE^* der Transporteinheit der Zustand *Leer- und Lastfahrt Feld* zugewiesen werden soll. Die Ermittlung der Standzeiten in der Nähe eines Schlages beruht auf der Definition eines Sektors um einen Schlag gemäß Kapitel 5.1.2.4. Die Größe des Korridors kann frei gewählt werden, Werte von etwa 100 bis 300 Meter sind sinnvoll. Da ein um einen Korridor vergrößertes Schlag-Polygon wiederum ein Polygon darstellt, kann die Zugehörigkeit einer Fahrzeugposition zum erweiterten Schlag methodisch analog zum Test auf Zugehörigkeit zum Ausgangsschlag geprüft werden. In Verbindung mit einer Geschwindigkeitsbetrachtung können dadurch Standzeiten in der Nähe eines Schlages erkannt werden.

Tabelle 5.9: Betriebszustände einer Transporteinheit in einphasigen Häckselketten

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
T_A Belade- und Wendezeit	TE auf Schlag mit SFH, als TE^* erkannt, SFH in Bewegung	t111, t12
T_C Standzeit	TE auf oder in Sektor um beliebigen Schlag, TE im Stand	t141
T_D Leer- und Lastfahrt Feld	TE auf Schlag mit SFH, nicht als TE^* erkannt, TE in Bewegung	t1121, t1131
T_E Unterbrechung	TE auf Schlag mit SFH, als TE^* erkannt, SFH und TE im Stand	t2121
T_F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t1122, t1132, t143
T_G Entladung	TE an Siloanlage	t13, t142

5.6.1.3 Dreiphasige Ernte mit Selbstfahrhäcksler im Parallelverfahren mit Überladung

Unter gewissen Voraussetzungen, insbesondere bei großen Transportentfernungen, bietet sich bei der Ernte von Siliergütern die Trennung der Logistik auf dem Schlag und auf der Straße an. In diesen mehrphasigen Systemen können auf der Straße möglichst ökonomische Fahrzeuge eingesetzt werden, in der Regel LKWs, um Kraftstoff zu sparen und Umlaufzeiten zu verkürzen. Damit einher gehen auch die Reduzierung der Straßenverschmutzung und der Lärmbelastigung für die Bevölkerung. Dem gegenüber steht ein erheblich größerer technischer Aufwand (vgl. Kapitel 2.2.3).

Grundsätzlich kann die Überladung mit oder ohne Anlegen einer Bodenmiete vollzogen werden. Die Bodenmiete stellt einen Puffer im Verfahren dar und bewirkt eine zeitliche

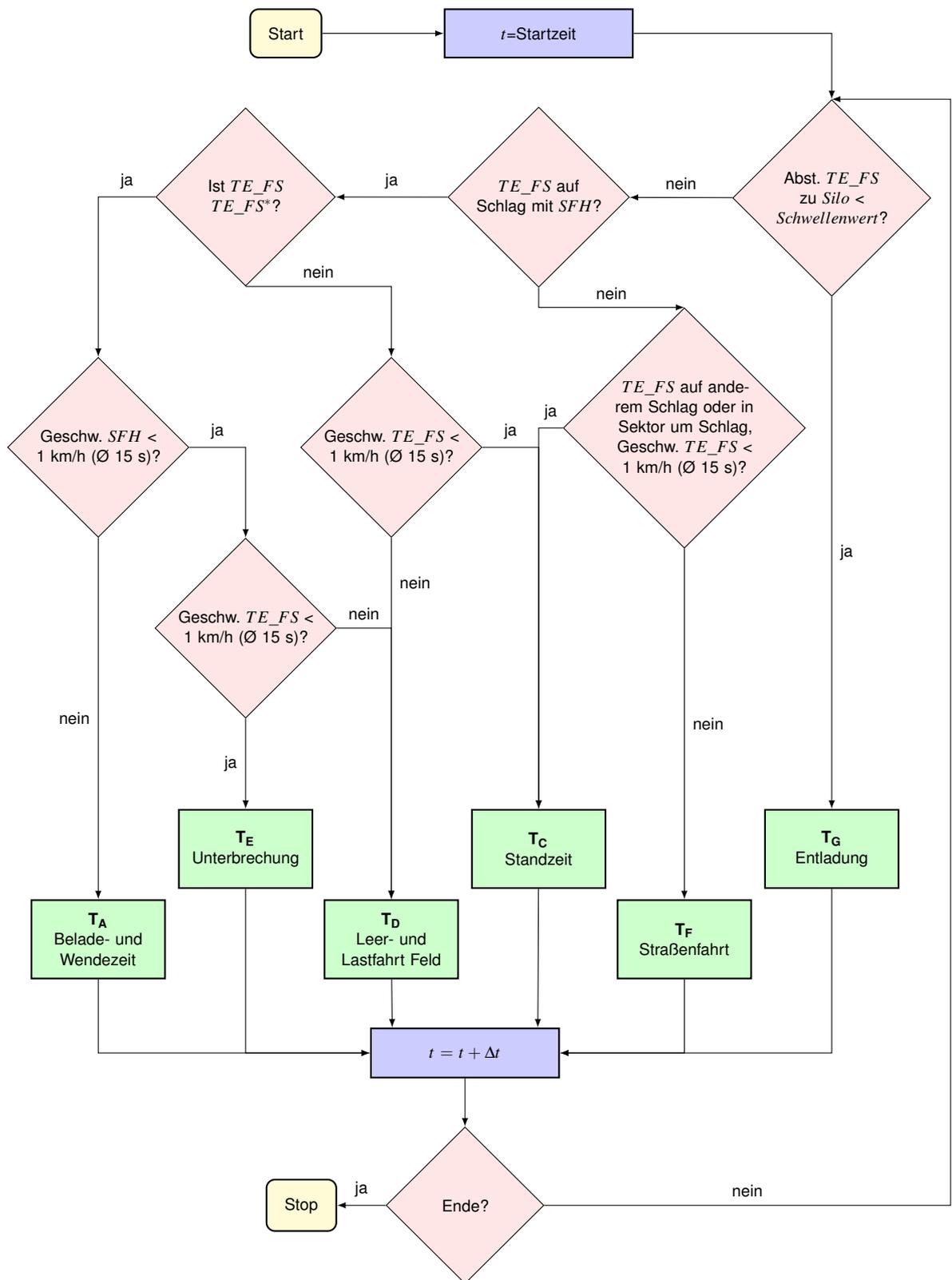


Abbildung 5.13: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Transporteinheit in einphasigen Häckselketten

Entkopplung von Prozessen auf dem Feld und dem Straßentransport. Dies zieht jedoch den Einsatz einer für die Bodenaufnahme von Erntegut geeigneten Überladeeinheit nach sich. In den betrachteten Verfahrensszenarien ohne Bodenmiete belädt eine Überladeeinheit, die das Häckselgut direkt von den Feldtransportfahrzeugen aufnehmen kann, Straßentransportfahrzeuge in der Überladezone (ULZ). Das Fassungsvermögen der Gutaufnahme der Überladeeinheit kann in der Regel nur in sehr beschränktem Maße als kleiner Verfahrenspuffer wirken.

In diesen mehrphasigen Häckselketten werden vier verschiedene Fahrzeugklassen gemäß Tabelle 5.2 eingesetzt: *Selbstfahrhäcksler*, *Transporteinheit Feld*, *Transporteinheit Straße* und *Überladeeinheit Bodenaufnahme* bzw. *Überladeeinheit Bunkeraufnahme*. Im Vergleich zu einphasigen Verfahren ergeben sich für den Selbstfahrhäcksler Änderungen bezüglich der Betriebszustandszuweisungen nur insofern, als ausschließlich Feldtransporteinheiten als potenziell zu beladende Fahrzeuge in Betracht gezogen werden dürfen. Für Feldtransporteinheiten ändert sich die Zuweisungsbedingung bezüglich der Entladung, die nicht am Silo, sondern in einem Überladebereich stattfindet. Falls keine Bodenmiete angelegt wird, wird direkt an einer Gutaufnahmevorrichtung der Überladeeinheit entladen. Dies soll ebenfalls berücksichtigt werden. Ein Transportumlauf einer Straßentransporteinheit ist vergleichbar mit Umläufen bisher betrachteter Transporteinheiten. Die Beladung wird von einer Überladeeinheit im Überladebereich vorgenommen, die Entladung erfolgt am Silo. Standzeiten, Leerfahrten im Überladebereich sowie Straßenfahrten treten zusätzlich auf. Auch Überladeeinheiten können, wie Selbstfahrhäcksler, zeitgleich nur eine Transporteinheit beladen. Daher gilt es, diese zu beladende Straßentransporteinheit TE_{S^*} korrekt zu identifizieren. Die möglichen Betriebszustände einer Überladeeinheit im Überladebereich sind abhängig davon, in welcher Form die Gutaufnahme vollzogen wird und ob Straßentransporteinheiten zur Beladung zur Verfügung stehen. Die sich aus diesen Betrachtungen ergebenden Betriebszustände werden in Tabelle 5.10 für Straßentransporteinheiten und Überladeeinheiten definiert. Die Zustandsdefinitionen für Selbstfahrhäcksler und Feldtransporteinheiten können aus der Verfahrensbetrachtung für Systeme ohne Überladung mit den genannten Anpassungen übernommen werden.

Die algorithmische Abbildung der Überladevorgänge durch eine Überladeeinheit benötigt weitere kausale Ansätze als die bisherigen. Im Nahbereich der Überladeeinheit befinden sich mitunter mehrere Fahrzeuge zur gleichen Zeit auf engem Raum und werden nur wenig bewegt. Beziehungen über Fahrzeugabstände und Geschwindigkeiten sind daher nicht immer ausreichend für die Beschreibung der Betriebszustände der Fahrzeuge während der Überladung. Die Überladung findet in der Regel in einem örtlich begrenzten Bereich, am

Tabelle 5.10: Betriebszustände von Straßentransporteinheiten, Überladeeinheit mit Bodenaufnahme und Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme in dreiphasigen Häckselketten

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
TE_S		
T _B Beladung	TE_S in Überladezone, als TE_S^* erkannt	t131
T _C Standzeit	TE_S in Überladezone, nicht als TE_S^* erkannt, im Stand	t141
T _D Leer- und Lastfahrt ULZ	TE_S in Überladezone, nicht als TE_S^* erkannt, in Bewegung	t1121, t1131
T _F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t1122, t1132
T _G Entladung	TE_S an Silo	t132, t142
UE_Bo		
T _B Beladung	UE in Überladezone, TE_S^* vorhanden	t111
T _C Standzeit	UE in Überladezone, keine TE_S^*	t141
T _F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t34
UE_Bu		
T _B Beladung	UE in Überladezone, TE_S^* vorhanden, TE_F in Entladebereich	t111
T _{Ca} Warten auf TE_F	UE in Überladezone, TE_S^* vorhanden, keine TE_F in Entladebereich	t1411
T _{Cb} Warten auf TE_S	UE in Überladezone, keine TE_S^* , TE_F in Entladebereich	t1412
T _{Cc} Standzeit	UE in Überladezone, keine TE_S^* , keine TE_F in Entladebereich	t1413
T _F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t34

Feldrand oder in der Nähe des Schlages statt, der als Überladezone betrachtet wird. Mit Hilfe dieser Zone können auch wartende Transporteinheiten identifiziert werden. Die Position der Überladezone kann fest als Polygon definiert werden. Bei Überladung direkt am Rand eines Schlages kann auch der betreffende Schlag als Überladezone fungieren. Entscheidend für eine korrekte Beschreibung der Zustände ist vor allem die richtige Erkennung der Straßen-transporteinheit, die durch die Überladeeinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt beladen wird. Diese wird insbesondere dann erschwert, wenn nachfolgende Fahrzeuge sehr nahe an der Überladeeinheit warten. Das Festlegen eines Überladekorridors über Angabe eines Mindest- und Höchstwinkels zur Ausrichtung der Überladeeinheit in Verbindung mit einer maximalen Entfernung zur Überladeeinheit schafft dabei Abhilfe (siehe Abbildung 5.14). Weiterhin kann die Überladeeinheit immer nur ein Fahrzeug beladen. Da die Überladung im Stand oder bei sehr langsamer Vorwärtsfahrt stattfindet, jedoch keine Wendemanöver oder ähnliches beinhaltet, wird die Erkennung der gegenwärtig zu beladenden Straßen-transporteinheit TE_S^* über den definierten Korridor modelliert. Auf zusätzliche Betrachtungen, wie bei der Erkennung von Transporteinheiten am Selbstfahrhäcksler auf einem Schlag, wird verzichtet. Der Überladekorridor muss zur korrekten Zuweisung nicht das komplette Fahrzeug enthalten, sondern lediglich den Teil auf dem sich der GPS-Empfänger befindet. In der Regel ist dies das Führerhaus. Die Fahrzeuglänge ist somit bereits Teil des Toleranzbereichs für die Festlegung des Korridors als Abgrenzung zum folgenden Fahrzeug. Nachteilig erweist sich allerdings, dass die Winkel des Korridors für jede Prozesskette extra bestimmt werden müssen. Aus der Animation der Positionsdaten können diese Winkel abgeleitet werden. Die Orientierung der Überladeeinheit im Falle einer Bodenmiete kann aus der Vorwärtsfahrt abgeleitet werden. Bei ortsfesten Stationen wird eine zusätzliche Eingabe der Richtung nötig.

Engpässe bei der Überladung wirken sich bei Stationen mit direkter Gutaufnahme ohne Bodenmiete unmittelbar auf die Häckslerleistung aus. Um dies methodisch erfassen zu können, muss das Bewertungsverfahren ermitteln können, ob eine Feldtransporteinheit an einer ortsfesten Überladestation im Entladungsprozess ist. Die Definition eines Korridors über Winkelangaben, der die Gutaufnahme der Überladestation und die davor befindlichen abladenden Fahrzeuge enthält, ermöglicht diese Unterscheidung. Die Ausdehnung des Korridors hängt in erster Linie von den Abmessungen der Überladestation ab und muss für eine Maschine nur einmalig ermittelt werden. Zusätzlich muss die radiale Entfernung begrenzt werden. Dies ist abhängig von der Länge der Transporteinheiten. Abbildung A.1 und A.2 im Anhang stellen die entwickelte Analysemethodik für eine Überladeeinheit in dreiphasigen Häckselketten mit beziehungsweise ohne Bodenmiete dar.

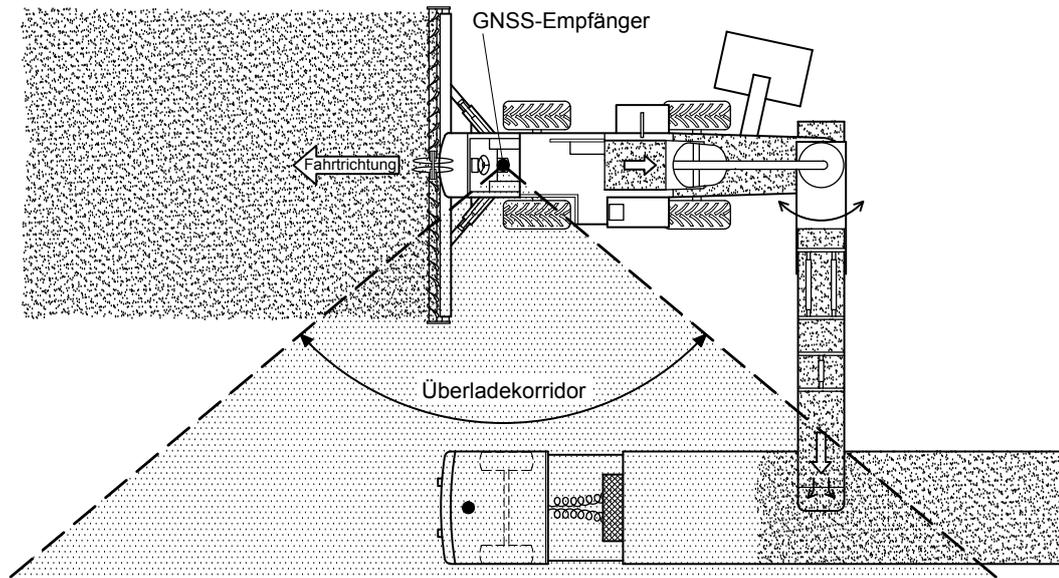


Abbildung 5.14: Überladekorridor bei der Bodenaufnahme von Häckselgut

Für Transporteinheiten auf dem Feld müssen im Algorithmus für die Zustandszuweisungen für dreiphasige Verfahren im Vergleich zu einphasigen Verfahren nur die bei der Definition der Betriebszustände geänderten Bedingungen für den Entlade-Zustand eingearbeitet werden, da die Entladung nicht an der Siloanlage sondern an einer ortsfesten Überladeeinheit beziehungsweise an einer Bodenmiete durchgeführt wird (vgl. Abbildung A.3). Die Zustandszuweisungen für Straßentransporteinheiten gestalten sich methodisch weitgehend ähnlich zu Transporteinheiten in Verfahren ohne Überladung. Die Bedingungen für Beladung auf dem Feld durch einen Feldhäcksler müssen ersetzt werden durch Kausalbeziehungen, die die Beladung in der Überladezone durch eine Überladeeinheit abbilden (vgl. Abbildung A.4).

5.6.2 Szenarien Getreideernte

In ihrer Grundstruktur sind Verfahrensketten in der Getreideernte und Silageernteketten oftmals ähnlich aufgebaut. Ernteprozesse werden schlagbezogen durchgeführt, für den Transport werden mit möglicher Überladung am Feldrand Transporteinheiten eingesetzt. Am Ende der Logistikkette wird das Getreide an einer Annahmestelle entladen. Unterschiede zu Häckselketten ergeben sich in erster Linie dadurch, dass Mähdrescher als Schlüsselmaschinen in der Getreideernte Erntegut im Getreidetank mitführen können und dadurch Transporteinheiten im Stand oder während der Fahrt beladen werden können. Des Weiteren

sind Massenerträge und Massenfluss in der Getreideernte weitaus geringer als bei der Ernte von Häckselgut. Dadurch ist es mitunter auch sinnvoll, Transporteinheiten am Feldrand abzustellen und als Verfahrenspuffer zu nutzen. In einer analytischen Verfahrensbetrachtung müssen diese Faktoren berücksichtigt werden.

5.6.2.1 Einphasige Getreideernte

In der einphasigen Getreideernte wird der Getreidetransport vom Mähdrescher zur Annahmestelle durchgängig von einer Transporteinheit durchgeführt. Somit sind die zwei Fahrzeugklassen *Mähdrescher* und *Transporteinheit Feld und Straße* gemäß Tabelle 5.2 im Verfahren vorzufinden. Neben der Prozess- und Wendezeit sind für den Mähdrescher Überladevorgänge im Stand und während der Fahrt Bestandteile des Ernteprozesses. Hinzu kommen Standzeiten auf dem Schlag sowie die Anteile auf der Straße. Die Betriebszustände für Transporteinheiten setzen sich aus Anteilen für Fahrten auf Straßen und Schlägen, Beladung und Entladung zusammen. Die Beladung erfolgt auf dem Schlag durch den Mähdrescher im Stand oder während der Fahrt. Die Entladung wird an der Siloanlage durchgeführt. Die zu ermittelnden Betriebszustände sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst. Die Betriebszustände in der Getreideernte weisen in ihren Definitionen große Ähnlichkeiten zu Ernteketten für Siliergüter auf. So entspricht der Zustand *Beladen in Fahrt* im Mähdrusch dem Zustand *Beladen* in Häckselketten, *Beladen im Stand* wird analog zu *Unterbrechung* definiert. In den Analysealgorithmen für Mähdrescher und Transporteinheiten müssen im Unterschied zu Häckselketten insbesondere die bereits erwähnten Effekte des Zwischenlagerns von Erntegut im Mähdrescher berücksichtigt werden. Ein Mähdrescher kann daher ohne parallele Transporteinheit auf dem Schlag Ernteprozesse durchführen. Die Beladung von Transporteinheiten kann sowohl im Stand als auch während der Fahrt erfolgen.

Wie auch bei der Ernte von Häckselgütern ist es für die Analyse von Ernteketten für Getreide von entscheidender Bedeutung, das durch den Mähdrescher zu beladende Fahrzeug korrekt zu identifizieren. Die Robustheit des Verfahrens gegenüber kurzzeitigem Aneinander-vorbeifahren soll gewährleistet werden. Daher werden analog zu Kapitel 5.6.1.2 vergleichsweise strenge Anforderungen an die Neubestimmung eines zu beladenden Fahrzeugs gestellt. Für die Beibehaltung eines Fahrzeugs, das bereits im Zeitschritt davor als zu beladende Transporteinheit erkannt wurde, genügen wiederum etwas schwächere Voraussetzungen, wodurch einmal erkannte Transporteinheiten möglichst durchgehend über den gesamten Ladezeitraum korrekt identifiziert werden.

Die Methodik der Zustandszuweisungen in einphasigen Getreideernteketten ist für einen Mähdrescher in Abbildung A.5 und für eine Transporteinheit in Abbildung A.6 dargestellt.

Tabelle 5.11: Betriebszustände von Mähdrescher und Transporteinheiten bei der einphasigen Getreideernte

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
MD		
T_{Aa} Entladung in Fahrt	MD auf Schlag, TE^* erkannt, MD in Bewegung	t1111
T_{Ab} Prozess- und Wendezeit	MD auf Schlag, keine TE^* , MD in Bewegung	t1112, t12
T_B Entladung im Stand	MD auf Schlag, TE^* erkannt, MD im Stand	t132
T_C Standzeit	MD auf Schlag, keine TE^* , MD im Stand	t141
T_F Straßenfahrt	MD nicht auf Schlag	t34, t143
TE_FS		
T_{Aa} Beladung in Fahrt	TE auf Schlag, von MD als TE^* erkannt, MD in Bewegung	t1111, t12
T_B Beladung im Stand	TE auf Schlag, von MD als TE^* erkannt, MD im Stand	t131
T_C Standzeit	TE auf Schlag oder in Sektor um Schlag, im Stand	t141
T_D Leer- und Lastfahrt Feld	TE auf Schlag, nicht als TE^* erkannt, in Bewegung	t1121, t1131
T_F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t1122, t1132, t143
T_G Entladung	TE an Getreideannahme	t131, t142

5.6.2.2 Mehrphasige Getreideernte

Bei der mehrphasigen Getreideernte wird analog zur mehrphasigen Ernte von Häckselgut der Transport des Ernteguts auf dem Feld und der Transport auf der Straße von unterschiedlichen Fahrzeugen übernommen. Dazu muss eine Überladung am Feldrand stattfinden. Die zum Feldtransport eingesetzten Transporteinheiten sind in der Regel mit Überladetechnik ausgestattet, sodass zur Überladung keine zusätzliche Maschineneinheit benötigt wird. In einer mehrphasigen Erntekette für Getreide sind somit die Fahrzeugklassen *Mähdrescher*, *Überladewagen* und *Transporteinheit Straße* beteiligt (vgl. Tabelle 5.2).

Die Betriebszustandszuweisungen für einen Mähdrescher müssen bei mehrphasigen Ernteketten im Vergleich zu einphasigen nur insofern angepasst werden, als das Abbunkern nur auf ein Fahrzeug der Klasse *Überladewagen* erfolgen kann. Die Straßentransporteinheiten dürfen nicht als potentiell zu beladende Fahrzeuge in Betracht gezogen werden.

Die Betriebszustände des Überladewagens setzen sich aus bereits verwendeten methodischen Teilen zusammen. Tabelle 5.12 beinhaltet die entsprechenden Zustandsdefinitionen. Die Zustände auf dem Schlag entsprechen denen von Transporteinheiten in einphasigen Systemen. Die Entladung am Feldrand erfolgt im Stand. Auf die Charakterisierung einer speziellen Überladezone wird verzichtet. Stattdessen wird der gegenwärtig beerntete Schlag mit Randsektor als potentielle Lokalisierung des Überladevorgangs angesehen. Im Gegensatz zu einer Überladeeinheit in Häckselketten verändern Überladewägen in der Getreideernte ständig ihre Position. Daher variieren die Orte der Überladevorgänge ebenfalls, was der Verwendung einer speziellen Überladezone entgegen steht. Grundsätzlich ist dies aber nicht ausgeschlossen. Eine algorithmische Herausforderung stellt auch beim Überladevorgang die korrekte Erkennung der zu beladenden Transporteinheit dar. Dies wird auch hier analog zu bereits beschriebenen Überladeprozessen zweistufig gelöst. Eine Straßentransporteinheit muss sich in den folgenden 15 Sekunden mindestens acht Mal näher als 12 Meter am Überladewagen befinden, um neu als zu beladen erkannt zu werden. Wurde eine Transporteinheit für den Analysezeitpunkt davor als zu beladen identifiziert, genügt es für die Beibehaltung dieser Eigenschaft, falls der Abstand in den folgenden 13 Sekunden mindestens drei Mal geringer als 12 Meter ist. Anschließend wird eine Geschwindigkeitsbetrachtung durchgeführt, da der Überladevorgang am Feldrand fast ausschließlich im Stand durchgeführt wird. Der entsprechende Algorithmus ist in Abbildung A.7 dargestellt.

Die Betrachtung der Straßentransporteinheiten erfolgt ähnlich zur Vorgehensweise in mehrphasigen Häckselketten. Die Betriebszustände sind nahezu identisch. Unterschiede bestehen insofern, als die Beladung hier durch den Überladewagen erfolgt und nicht durch eine

Tabelle 5.12: Betriebszustände eines Überladewagens in mehrphasigen Ernteketten für Getreide

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
T _{Aa} Beladung in Fahrt	UW auf Schlag, als UW^* erkannt, MD und UW in Bewegung	t1111, t12
T _B Beladung im Stand	UW auf Schlag, als UW^* erkannt, MD und UW im Stand	t132
T _C Standzeit	UW auf Schlag, nicht als UW^* erkannt, UW im Stand	t141
T _D Leer-und Lastfahrt Feld	UW auf Schlag, nicht als UW^* erkannt, UW in Bewegung	t1121, t1131
T _F Straßenfahrt	alle übrigen Zustände	t1122, t1132, t143
T _G Überladung	zu beladende Straßentransporteinheit erkannt	t131

separate Überladeeinheit. Außerdem wird, wie oben erläutert, für die Überladeprozesse in mehrphasigen Getreideernteketten keine separate Überladezone definiert. Stattdessen wird der aktuelle Schlag mit Randkorridor verwendet. Der Algorithmus der Zustandszuweisungen ist in Abbildung A.8 vollständig dargestellt.

5.6.3 Verfahren der Flüssigmistausbringung

Die Ausbringung von Flüssigmist kann einphasig oder mehrphasig erfolgen. Bei einphasigen Systemen übernimmt eine Maschineneinheit sowohl Transportaufgaben auf der Straße als auch die Ausbringung auf dem Feld, bei mehrphasigen Systemen werden Ausbringung und Straßentransport getrennt. Am Feldrand ist dann eine Überladung nötig. Im Vergleich zu Ernteketten für Getreide oder Siliergüter findet bei der Flüssigmistausbringung ein entgegengesetzter Gutfluss statt. Die Lagerstätte am Betrieb bildet hier die Quelle, der zu düngende Schlag die Senke des Gutflusses.

5.6.3.1 Einphasige Flüssigmistausbringung

Bei der einphasigen Flüssigmistausbringung werden in der Regel schleppergezogene Gülletankwagen eingesetzt, die sich in der Fahrzeugklasse *Gülletankwagen* aus Tabelle 5.2 wiederfinden. Dieses System weist aus agrarlogistischer Sicht enge Parallelen zur Ernte von Siliergütern mit einem Ladewagen auf, da in beiden Fällen eine Maschinenkombination

wiederkehrend zwischen einem Betriebsgelände und einem Schlag pendelt, um dort Arbeitsprozesse auszuführen (vgl. Kapitel 5.6.1.1). Lediglich der Gutfluss ist entgegengesetzt. In Tabelle 5.13 werden die Betriebszustände definiert, die in der einphasigen Flüssigmistausbringung ermittelt werden sollen. Abbildung A.9 stellt den Algorithmus der Zuordnung der Betriebszustände dar, der stark dem Analyseverfahren für Siliergüter mit einem Ladewagen ähnelt.

Tabelle 5.13: Betriebszustände eines Gülletankwagens bei der einphasigen Flüssigmistausbringung

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
T _A Prozess- und Wendezeit	GTW auf Schlag, in Bewegung	t111, t1121, t1131, t12
T _C Standzeit	GTW auf Schlag, im Stand	t211, t2122, t3212, t3222, t3312, t3322, t352
T _F Straßenfahrt	Fahrzeug weder an Schlag noch an Lager	t1122, t1132
T _G Befüllung	GTW am Flüssigmistlager	t132, t142

5.6.3.2 Mehrphasige Flüssigmistausbringung

Bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung werden die Fahrzeugklassen *Ausbringeinheit* für die Ausbringung eingesetzt sowie die Fahrzeugklasse *Transporteinheit Strasse* für den Straßentransport (vgl. Tabelle 5.2). Die Ausbringeinheit bringt den Flüssigmist aus dem mitgeführten Tank auf dem Schlag aus. Die Befüllung erfolgt am Feldrand im Stand. Die Befüllung kann durch die Ausbringeinheit durch Saugen oder über eine Pumpe am Zubringer erfolgen. In beiden Fällen benötigt man ein Rohr zwischen beiden Fahrzeugen, das positionsgenau andockt werden muss. Dadurch ist das Überladen während der Fahrt nicht möglich. Über eine Analyse der Positionsdaten sollen daher auf dem Schlag *Prozess- und Wendezeit*, *Überladung* sowie *Standzeit* ermittelt werden. Zusätzlich fallen Zeitanteile für *Straßenfahrt* an.

Die Transporteinheiten werden am Flüssigmistlager befüllt und übergeben ihre Ladung am Feldrand an die Ausbringeinheit. Am Schlag kann zwischen *Überladung*, *Standzeit* und *Leer- und Lastfahrt* unterschieden werden. Die Zeitanteile für *Befüllung* werden über die Position des Fahrzeugs an der Lagerstätte definiert. Der Zustand *Straßenfahrt* enthält alle

Zeitanteile, zu denen sich das Fahrzeug weder am Schlag noch an der Lagerstätte befindet. Tabelle 5.14 beinhaltet die Definitionen der Betriebszustände der beiden am Verfahren beteiligten Fahrzeugklassen.

Die algorithmische Zuweisung der Betriebszustände ist für die Ausbringeinheit in Abbildung A.10 dargestellt, für eine Straßentransporteinheit in Abbildung A.11. Wie auch bei Ernteketten für Siliergüter und für Getreide, ist auch bei der Analyse von mehrphasigen Verfahrensketten in der Flüssigmistausbringung die korrekte Identifizierung der Transporteinheit während der Überladung von entscheidender Bedeutung. Auch hier bietet es sich an, zwischen der Neuerkennung und der Beibehaltung einer Transporteinheit während der Überladung zu unterscheiden. Die Bedingungen dazu sind analog zu denen aus Häckselketten.

Tabelle 5.14: Betriebszustände bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung für Ausbringeinheit und Straßentransporteinheit

Zustand	Definition	Fokussierte Teilzeiten (vgl. Tabelle 5.1)
AE		
T _A Prozess- und Wendezeit	AE auf Schlag, in Bewegung	t111, t12
T _B Überladung	AE auf Schlag, im Stand, TE zur Überladung erkannt	t131
T _C Standzeit	AE auf Schlag, im Stand, keine TE zur Überladung erkannt	t141
T _F Straßenfahrt	AE nicht auf Schlag	t34, t143
TE_S		
T _B Überladung	TE an Schlag mit Randkorridor, von AE zur Überladung erkannt	t132
T _C Leer- und Lastfahrt Feld	TE an Schlag mit Randkorridor, nicht von AE zur Überladung erkannt, in Bewegung	t1121, t1131
T _D Standzeit	TE an Schlag mit Randkorridor, nicht von AE zur Überladung erkannt, im Stand	t141
T _F Straßenfahrt	TE weder an Schlag noch an Lager	t1122, t1132, t143
T _G Befüllung	TE am Flüssigmistlager	t131, t142

5.7 Von Betriebszuständen zu Analyseergebnissen

Die Kenntnis, welche Betriebszustände von beteiligten Maschinen über den zeitlichen Verlauf einer Erntekette angenommen werden, kann sowohl Aufschluss über Leistungsparameter der Gesamtverfahrenskette als auch von Einzelfahrzeugen geben. Dazu müssen geeignete Darstellungsformen der Betriebszustände gewählt und aussagekräftige Analysekenwerte ermittelt werden.

5.7.1 Dynamische Visualisierung

Die statische Darstellung der Fahrspuren von Fahrzeugen einer Erntekette ist in ihrer Aussagekraft beschränkt. Es können zwar grundlegende Informationen über die Ausprägung des Arbeitsverfahrens oder die genutzten Wegstrecken abgeleitet werden. Bewertungen des Zusammenwirkens unterschiedlicher Fahrzeuge in Prozesskette sind mit statischen Darstellungen nicht möglich, da hierbei vor allem dynamische Faktoren entscheidend sind. Die dynamische Visualisierung der zeitlichen Abläufe gibt optisch Aufschluss über die Effektivität einer Erntekette. Beispielsweise können Wartezeiten einer Erntemaschine aufgrund fehlender Transporteinheiten erkannt werden und gleichzeitig auch Rückschlüsse auf die Ursache gezogen werden, etwa ob sich an einer Siloanlage ein Rückstau bildet oder ob die zurückzulegende Fahrstrecke zu viel Zeit in Anspruch nimmt.

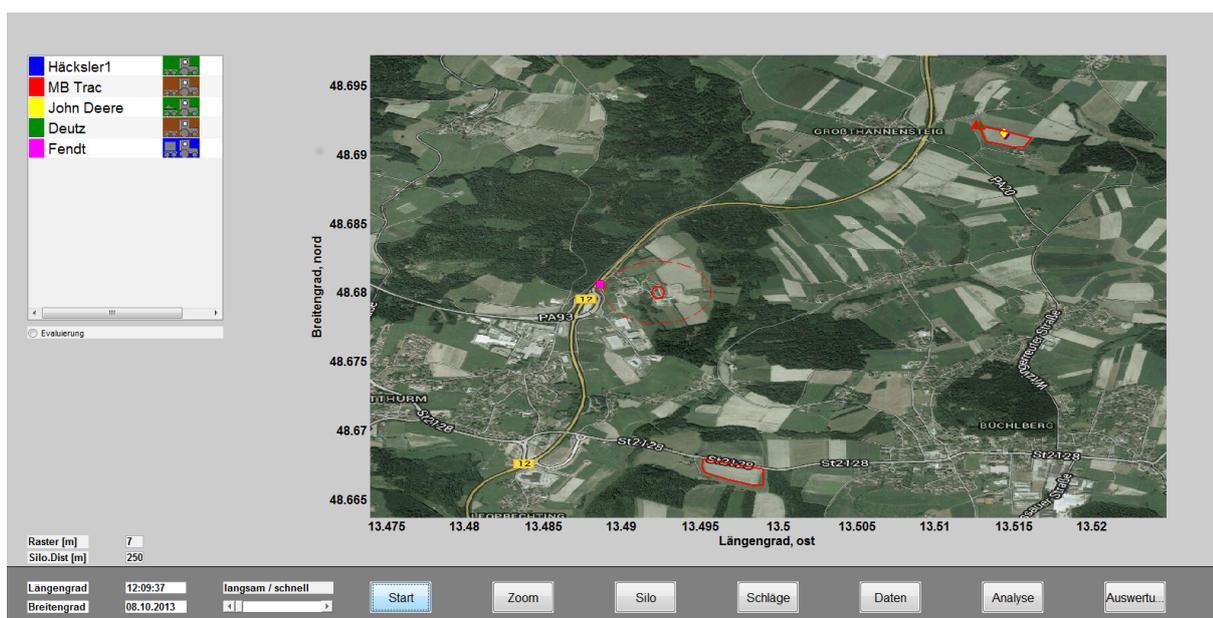


Abbildung 5.15: Hauptansicht des Analyse-Tools während der dynamischen Visualisierung

Die erstellte Matlab-Anwendung zur Logistik Analyse, in die die oben beschriebenen Algorithmen zur Betriebszustandszuweisung integriert sind, ermöglicht auch die Darstellung der Ergebnisse. Die dynamische Visualisierung ist nach Abschluss der Analyse-Berechnungen in die Hauptansicht unter Verwendung einer Hintergrundkarte integriert (vgl. Abbildung 5.15). Die Hintergrundkarte beruht auf Daten von *Google Inc.* und wird über ein eingebettetes Skript von BAR-YEHUDA geladen [Bar12]. Es kann zwischen Satellitenbildern, einer Straßenkarte und einer Überlagerung aus beiden gewählt werden. Die Schlagkonturen und die Lage der Siloanlage werden in diese Karte integriert. Über die Vergrößerungs- und Verkleinerungsfunktionen für Matlab-Graphiken kann die Größe des Kartenausschnitts variiert werden. Die Hintergrundkarte wird dabei automatisch neu geladen. Verschiedenfarbige Symbole visualisieren die Positionen der Fahrzeuge der Erntekette. Die Zuordnung der Farben zu den Fahrzeugen wird in der Tabelle im linken oberen Teil der Hauptansicht aufgezeigt. Die erste Spalte enthält die Farbe, die dem Fahrzeug zugeordnet ist, die zweite Spalte die Fahrzeugbezeichnung. Standardmäßig wird als Fahrzeugbezeichnung eine Kombination aus der Fahrzeugklasse und einer fortlaufenden Nummer verwendet. Es können in diese Tabelle aber auch individuelle Bezeichnungen eingetragen werden, die für alle Auswertungen übernommen werden. Die dritte Spalte dieser Tabelle enthält jeweils ein Fahrzeugsymbol, das verschiedenfarbig hinterlegt wird. Die verschiedenen Farben stellen an dieser Stelle die unterschiedlichen Betriebszustände dar. Die Zustände werden zusätzlich über veränderliche Symbole für die Fahrzeuge in der Karte verdeutlicht. Die Zuordnung von Farben und Symbolen zu den Betriebszuständen wird entsprechend den Tabellen A.1, A.2 und A.3 im Anhang vorgenommen.

Die dynamische Visualisierung der Verfahrenskette kann über eine Schaltfläche gestartet und pausiert werden. Über einen Schieberegler kann die Geschwindigkeit der Animation angepasst werden. Datum und Uhrzeit der betrachteten Arbeitsprozesse werden im unteren Teil der Bildschirmansicht angezeigt. Zu jedem Animationszeitpunkt werden Datum, Uhrzeit, Fahrzeugpositionen und die Darstellungen der Betriebszustände der Fahrzeuge aktualisiert. Die zur Berechnung der Betriebszustände generierte Zeitreferenzmatrix (vgl. Kapitel 5.5.3) wird in der Animation ebenfalls verwendet, sodass an dieser Stelle keine neuen Berechnungen oder Zeitabgleiche nötig sind, sondern nur auf die bereits berechneten Werte zugegriffen werden muss. Dadurch ist eine unterbrechungsfreie, flüssige Animation möglich. Durch direkte Eingabe der Uhrzeit sind beliebige Vor- und Rücksprünge im Zeitbereich der Visualisierung möglich.

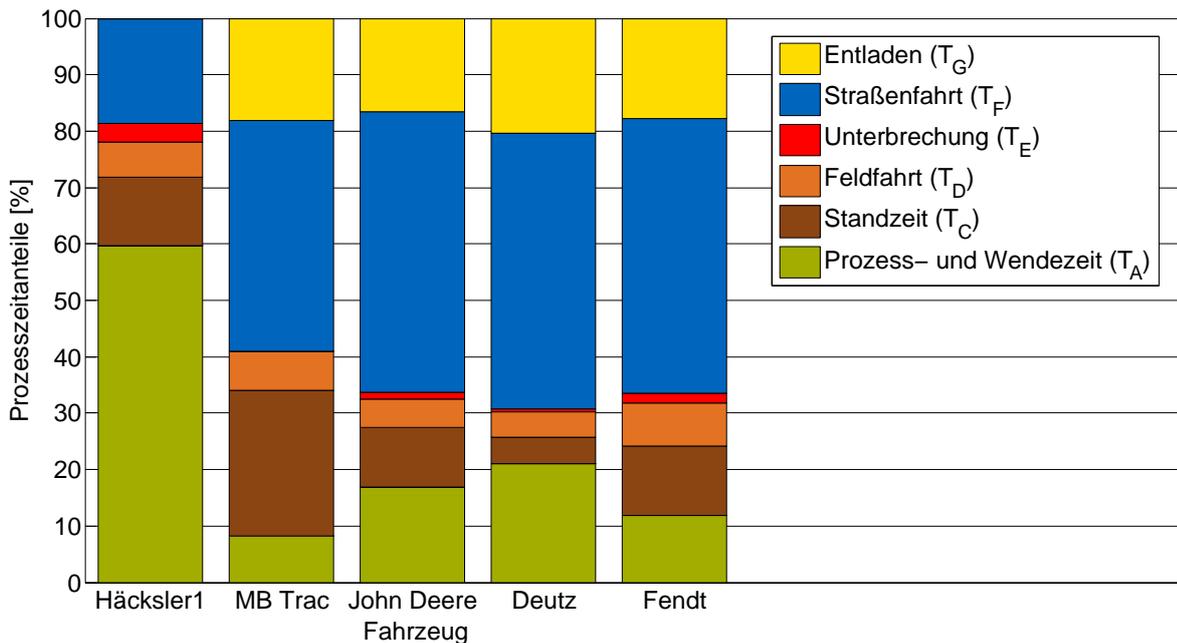


Abbildung 5.16: Relative Prozesszeitanteile einer Prozesskette; Beispiel einer Häckselkette

5.7.2 Prozesszeitanalyse

Die dynamische Visualisierung der Prozessketten vermittelt einen visuellen Überblick über die Effizienz der logistischen Abläufe und kann auch als Grundlage für eine qualitative Bewertung herangezogen werden. Für quantitative Aussagen sind weitergehende Analysen nötig. Aus den Zuweisungen der Betriebszustände zu jedem Zeitschritt lassen sich ohne großen Aufwand die relativen Anteile der Gesamtzeit ermitteln, zu denen für ein Fahrzeug ein bestimmter Betriebszustand angenommen wird. Dazu werden für jedes Fahrzeug die absoluten Zeitanteile jedes Betriebszustandes ermittelt, indem eine gewichtete Summe aus der Anzahl, wie oft ein Betriebszustand angenommen wird, berechnet wird. Die Zeitdifferenzen zwischen den Analysezeitpunkten dienen als Gewichte der Summe. Die Absolutzeit jedes Betriebszustandes wird zur Gesamtzeit, während der das Fahrzeug im Einsatz war, in Bezug gesetzt. Als Histogramm lassen sich die relativen Prozesszeitanteile für mehrere Fahrzeuge übersichtlich darstellen (vgl. Abbildung 5.16). Analysezeitpunkte, zwischen denen die Zeitdifferenz mehr als 3 Sekunden beträgt, werden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da dies in der Regel auf fehlende Positionsdaten zurückzuführen ist. In der Histogrammdarstellung hat dies zur Folge, dass im Falle von fehlenden Positionsdaten die Gesamthöhe des Balkens für ein Fahrzeug weniger als 100 % beträgt. Somit werden Lücken in der Datengrundlage an dieser Stelle deutlich sichtbar.

5.7.3 Beladungszustände und Rückverfolgbarkeit

Die Grundaufgabe von Logistikketten in der Landwirtschaft besteht im Transport von verschiedenen Agrargütern. Abgesehen von der Möglichkeit, Flüssigmist kontinuierlich in der näheren Umgebung der Lagerstätte über eine direkte Schlauchverbindung auszubringen, werden Transporte von und zu Schlägen sowie überbetriebliche Transporte in der Regel absetzig mit Transportfahrzeugen durchgeführt. Daher wechseln die Beladungszustände von Transportfahrzeugen wiederkehrend zwischen leer und voll beladen. Die Kenntnis über die Beladungszustände kann Aufschluss über das Einsatzspektrum eines Transportgespanns geben. Unterschiede in der Transportgeschwindigkeit oder im Beschleunigungsvermögen im beladenen zum unbeladenen Zustand lassen Rückschlüsse zu, inwieweit die Motorleistung des Fahrzeugs für die betrachtete Transportaufgabe ausreicht.

Die zugewiesenen Betriebszustände können für die Ermittlung der Beladungszustände genutzt werden. Bei Ernteketten erreichen die Transportfahrzeuge im voll beladenen Zustand die Siloanlage und verlassen diese leer wieder. Somit kann das Verweilen an der Siloanlage als Übergang von einer Fuhre zur nächsten betrachtet werden. Die Verweilzeit an der Anlage muss dabei mindestens 30 Sekunden betragen, um robust gegenüber Ausreißern der Positionsdaten oder schleifenförmigen Wegstrecken zu sein, die die Grenze der Siloanlage mehrmals überschreiten. Nach einem Aufenthalt an der Siloanlage wird der Beladungszustand solange als leer angesehen, bis für die Transporteinheit mindestens 10 Beladungszustände in 11 Sekunden festgestellt werden können. Ab diesem Zeitpunkt wird die Beladung als begonnen angenommen. Der letzte Beladungszeitpunkt, bevor das Fahrzeug die Siloanlage wieder erreicht, stellt das Ende der Beladung dar. Das Fahrzeug gilt als voll beladen. Durch diese Betrachtung kann die Beladung auf einem Schlag begonnen werden und auf einem weiteren Schlag beendet werden. In der Flüssigmistausbringung erreicht das Fahrzeug die Lagerstätte im leeren Zustand und verlässt es voll wieder. Beginn und Ende der Entladung an einem Schlag können durch analoge Betrachtungen ermittelt werden.

Die ermittelten Beladungszustände werden als zusätzliche Spalte in den Fahrzeugdaten abgespeichert und können auch in der Animation genutzt werden. Dazu werden in der Hauptansicht des Analyse-Tools (vgl. Abbildung 5.15) die Darstellungen in der Fahrzeugtafel links oben entsprechend den Beladungszuständen unter Verwendung der Symbole aus Abbildung 5.17 angepasst. Über die Kenntnis der Beladungszustände lässt sich weiterhin die Herkunft der Ladung jeder Fuhre in Prozessketten bestimmen, da Beginn und Ende der Beladung der einzelnen Fuhren bereits vorliegen. Die Schläge, die zwischen Beladebeginn und Beladeende besucht werden und auf denen auf Grundlage der Betriebszustandszuweisung

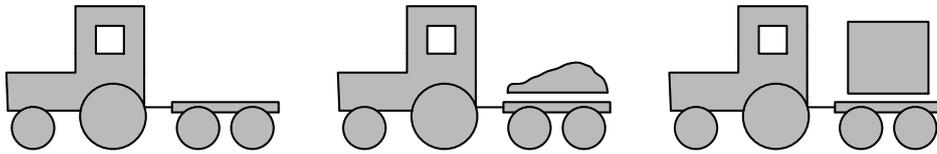


Abbildung 5.17: Symbole der Beladungszustände (von links): leer, Beladung begonnen, voll beladen

eine Beladung stattfindet, werden den Fuhren als Ursprungsort der Ladung zugeordnet. Falls auf einem Schlag nur kurzzeitig die Fahrzeugkonstellationen erfüllt sind, die auf eine Beladung schließen lassen, lässt sich algorithmisch nur schwer entscheiden, ob es sich um eine Teilladung handelt oder ob die Fahrzeugkonstellationen kurzzeitig ohne Beladen erfüllt sind. Das fälschliche Ausweisen einer Teilladung von einem bestimmten Schlag kann beim Abgleich der Analysedaten mit den Wiegeprotokollen zu Irritationen führen, ebenso das Fehlen einer Teilladung, falls man eine hohe Mindestbeladedauer auf einem Schlag veranschlagt, damit dieser bei der Ladungsrückverfolgung aufgelistet wird. Um die negativen Auswirkungen beider Fälle zu umgehen, werden hier zunächst alle Schläge aufgeführt, auf denen entsprechend der Betriebszustände eine Beladung von mehr als 10 Sekunden stattfindet. Anschließend wird für alle gelisteten Schläge die maximale unterbrechungsfreie Beladedauer ermittelt. Falls die Dauer für einen Schlag weniger als 25 Sekunden beträgt, wird dieser in der tabellarischen Ausgabe rot hinterlegt (vgl. Abbildung 5.18). Die farblich gekennzeichneten Werte können anschließend gezielt mit Hilfe der Animation überprüft oder mit einem vorhandenen Wiegeprotokoll verglichen werden. Neben der Information über die Herkunft der Ladung der Einzelfuhren werden auch die Be- und Entladezeiträume jeder Fuhre aufgeführt. In diese Tabelle können in eine extra Spalte die Zuladungen der einzelnen Fuhren eingetragen werden, falls die Fahrzeuggewichte mit einer Fuhrwerkswaage ermittelt wurden. Unter Verwendung dieser Daten lassen sich weitere Auswertungen erstellen. Es ist ebenfalls möglich, durch Auswählen der betreffenden Registerkarte, Übersichten über Einzelfahrzeuge zu erhalten (vgl. Abbildung A.12). Die fahrzeugabhängige Be- oder Entladedauer kann dadurch errechnet werden. Zusätzlich ist für jedes Fahrzeug die aus den Positionsdaten errechnete kumulierte Gesamtstrecke angegeben sowie die Dauer eines Umlaufes von einer Ankunft am Silo bis zur nächsten.

NR	Fahrzeug	Schlag	Beladen	Entladen	Zuladung [t]
1	Deutz	Schlag: 4	08:28-08:42	08:58-09:08	11.4200
2	John Deere	Schlag: 4	08:42-08:50	09:07-09:14	11.2200
3	Fendt	Schlag: 4	08:50-08:54	09:10-09:16	6.5600
4	MB Trac	Schlag: 4	08:55-08:59	09:16-09:21	2.1500
5	Deutz	Schlag: 5	09:22-09:36	09:51-09:55	7.6600
6	John Deere	Schlag: 5	09:36-09:42	09:57-10:04	3.9700
7	Fendt	Schlag: 6	09:49-09:59	10:15-10:22	6.1100
8	Deutz	Schlag: 6	10:09-10:20	10:36-10:41	9.1500
9	John Deere	Schlag: 6	10:20-10:27	10:44-10:51	9.3900
10	MB Trac	Schlag: 6	10:27-10:33	10:49-11:08	6.1300
11	Fendt	Schlag: 6	10:33-10:39	10:53-11:00	6.0600
12	Deutz	Schlag: 6, 7	10:56-11:13	11:26-11:32	8.5800
13	Fendt	Schlag: 7	11:14-11:16	11:29-11:36	3.3100
14	John Deere	Schlag: 3, 7	11:14-11:34	11:46-11:54	9.2100
15	MB Trac	Schlag: 3	11:34-11:40	11:52-11:59	4.1700
16	Deutz	Schlag: 3	11:40-11:47	11:55-12:02	4.0400
17	Fendt	Schlag: 2, 3	11:47-12:03	12:09-12:14	6.3000
18	John Deere	Schlag: 2	12:03-12:15	12:22-12:31	8.9400

Abbildung 5.18: Ausgabetable zur Rückverfolgung von Einzelfahren einer Häckselkette

5.7.4 Geschwindigkeitsanalyse

Leistungsfähige Erntemaschinen, können nur dann effizient eingesetzt werden, wenn die angegliederte Transportkette in der Lage ist, den erzeugten Massenstrom zu bewältigen. Da die volumenbezogene Kapazität von Transporteinheiten in der Regel bekannt ist, kann unter Einbeziehen der Dichte des Transportguts relativ leicht auf die mögliche Zuladung geschlossen werden. Die Transportgeschwindigkeit, die neben der Zuladung als zweite Größe in die Ermittlung der Transportleistung einfließt, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Zum einen haben bereits im Vorhinein bekannte Maschinenparameter wie die Motorleistung oder die Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs einen Einfluss. Zum anderen wirken sich schwer quantifizierbare und mitunter erst während der Prozessdurchführung bekannte Größen wie das Verkehrsaufkommen auf viel befahrenen Straßen, der Wegezustand in Abhängigkeit von der Witterung oder die Passierbarkeit von Engstellen auf tatsächlich erreichbare Transportgeschwindigkeiten aus. Eine zuverlässige Schätzung, die für eine belastbare Logistikplanung verwendet werden kann, ist daher schwierig. Auch die Bildung von Tagesdurchschnitten gibt wenig Aufschluss über die Leistungsfähigkeit einer Maschine, da das Fahrzeug in einer Prozesskette nur zu einem bestimmten Teil direkte Transportaufgaben übernimmt.

Über die Betriebszustandszuweisungen kann die Fahrzeuggeschwindigkeit zustandsabhängig betrachtet werden. In Abbildung 5.19 sind die Fahrgeschwindigkeiten entsprechend der Betriebszustände für ein Schleppergespann farblich unterschiedlich markiert sowie die durchschnittliche Straßengeschwindigkeit ausgewiesen. Anhand dessen können verschiedene eingesetzte Transporteinheiten bezogen auf das individuelle Einsatzspektrum verglichen werden. Einflüsse, die die Vergleichbarkeit einschränken, wie unterschiedlich große Anteile an Wartezeiten, werden durch diese Analyse herausgefiltert.

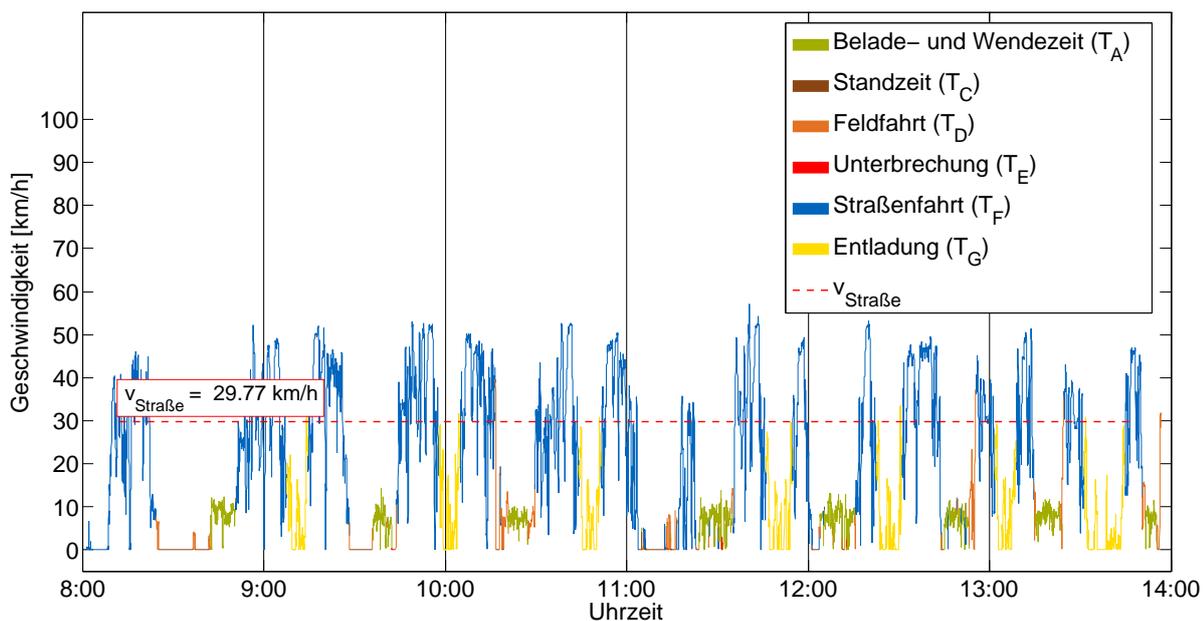


Abbildung 5.19: Geschwindigkeitsanalyse; Beispiel einer Transporteinheit in einer Häckselkette ohne Überladung

5.8 Aufbau des Analyse-Tools

Die beschriebenen Methoden und Algorithmen zur Bewertung und Analyse von agrarlogistischen Prozessketten sind in eine übergeordnete Matlab-Anwendung integriert. Die in Tabelle 5.3 beschriebenen Szenarien können dort analysiert werden. Das Einlesen und Strukturieren von Daten, die Berechnung der Betriebszustände als Kern der Analyse, die Darstellung der Ergebnisse sowie der Export der Daten und Ergebnisse ist mit Hilfe dieser Anwendung möglich. Weitere Software-Systeme werden nicht benötigt. Die einzelnen Schritte der Analyse sollen in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

5.8.1 Positionsdaten importieren

Grundlage für die Analyse bilden Datensätze, die die Positionsdaten landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Einsatz im .nmea-Format enthalten. Diese müssen zunächst in die Anwendung importiert werden. In der Startansicht (vgl. Abbildung A.13) kann daher nur die Schaltfläche *Daten* gewählt werden, wodurch das in Abbildung 5.20 dargestellte Fenster zum Import von Daten geöffnet wird. Zunächst muss die Fahrzeugklasse des zu importierenden Datensatzes ausgewählt werden. Über eine zusätzliche Schaltfläche können die Eigenschaften der Fahrzeugklassen angezeigt werden, falls der Anwender Zusatzinformationen benötigt. Falls gewünscht, kann durch Angabe einer Startzeit und einer Stoppzeit der Zeitbereich eingegrenzt werden, in dem die eingelesenen Datensätze liegen müssen. Aus Datensätzen, die zum Teil außerhalb dieser Grenzen liegen, werden in diesem Fall nur die im definierten Bereich liegenden Positionsdaten verwendet. Über die Schaltfläche *Fahrzeugdaten laden* kann die gewünschte Datei im entsprechenden Verzeichnis ausgewählt werden. Falls keine Fahrzeugklasse gewählt wurde, erscheint eine Fehlermeldung. Diese Vorgehensweise muss für jedes Fahrzeug wiederholt werden. Die Fahrzeuge, deren Daten bereits eingelesen sind, werden in die in Abschnitt 5.7.1 bereits erwähnte tabellarische Fahrzeugübersicht in der Hauptansicht der Anwendung übernommen.

Mit der Anzahl der Fahrzeuge in einer Logistikkette steigt auch der Zeitaufwand für das Einlesen aller Fahrzeugdaten. Deshalb ist im Programm eine Möglichkeit vorgesehen, Projektdaten zu speichern und bei Bedarf wieder aufzurufen. Die intern erzeugten Datenstrukturen (vgl. Kapitel 5.5) können beim Schließen des Programms als Projektdatei gespeichert werden oder, falls gewünscht, auch verworfen werden. Über die Schaltfläche *Daten aus Archiv laden* kann eine Projektdatei als Ganzes wieder geladen werden. Somit stehen alle Daten wieder zur Verfügung, die bis zum Zeitpunkt der Speicherung erzeugt worden sind. Insbesondere gilt dies auch für berechnete Betriebszustände.

5.8.2 Betriebszustände ermitteln

Sofern die Positionsdaten aller an der Verfahrenskette beteiligten Fahrzeuge eingelesen sind, kann mit der Analyse der Daten begonnen werden. Falls gewünscht, können die automatisch erzeugten Fahrzeugbezeichnungen durch individuelle ersetzt werden. Durch Auswahl der Schaltfläche *weiter* werden die minimalen und maximalen Längen- und Breitengrade aller Fahrzeugspuren ermittelt und eine Hintergrundkarte geladen, auf der alle Spuren in den Farben angezeigt werden, die den Fahrzeugen zugeordnet sind.

An die Erstellung der graphischen Übersicht schließt sich die Ermittlung von Schlägen an. In

The screenshot shows a software interface with a title bar 'Fahrzeug auswählen'. Below the title bar, there is a dropdown menu with the text '<Fahrzeugklasse wählen>'. To the right of the dropdown is a button labeled 'Eigenschaften'. Below these elements, there are two input fields for dates and times. The first is labeled 'Startzeit [dd.mm.yyyy HH:MM:SS]' and contains the value '29.09.2013 07:30:00'. The second is labeled 'Stoppzeit [dd.mm.yyyy HH:MM:SS]' and contains the value '29.09.2013 20:00:00'. Below the input fields, there is a large button labeled 'Fahrzeugdaten laden'. At the bottom of the window, there is another large button labeled 'Daten aus Archiv laden'.

Abbildung 5.20: Programmfenster zum Datenimport

das angezeigte Eingabefeld *Raster* ist die Größe des Gitterabstandes für die automatisierte Schlagbestimmung einzugeben (vgl. Kapitel 5.1.2). Durch Auswahl der Schaltfläche *Schläge* wird die automatische Schlagbestimmung ausgeführt. Bei Eingabe des Rasterwertes 0 wird die automatische Schlagbestimmung nicht ausgeführt. Die ermittelten Schlaggrenzen werden in die Kartendarstellung übernommen. Zusätzlich öffnet sich eine tabellarische Übersicht. Dort bestehen die Möglichkeiten, einzelne ermittelte Schläge zu verwerfen, neue Schläge durch Eingabe der Polygon-Eckpunkte hinzuzufügen sowie bestehende Schläge durch Ergänzen, Löschen oder Verändern von Eckpunkten zu bearbeiten. *Aktualisieren* aktualisiert die Kartendarstellung (vgl. Abbildung 5.21, links).

Weiterhin wird für die Betriebszustandszuweisungen im Falle von Ernteprozessketten die Lage der Annahmestellen für Erntegut benötigt bzw. die Lage der Flüssigmistlagerstätten, falls Verfahrensketten zur Flüssigmistausbringung betrachtet werden. Durch Anwahl der Schaltfläche *Silo* werden die zentralen Punkte der Be- bzw. Entladestätten über eine Analyse der gerasterten Häufungspunkte der Positionsdaten von Transportfahrzeugen bestimmt (vgl. Kapitel 5.5.2). Die potentiellen Standorte der Siloanlage werden in einer Tabelle angezeigt, wobei die am häufigsten besuchte Position vorausgewählt ist und in der Karte eingezeichnet wird. Vom Anwender können eine oder mehrere Positionen ausgewählt werden sowie durch direkte Eingabe der Koordinaten nicht zur Auswahl stehende Standorte definiert werden. Die Schaltfläche *Aktualisieren* passt die Anzeige in der Karte entsprechend der Auswahl

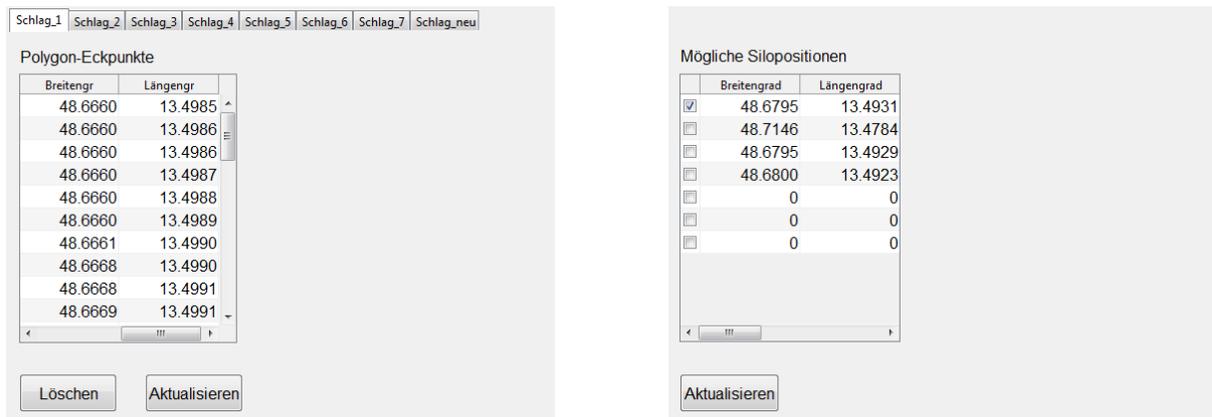


Abbildung 5.21: Anzeigefenster für Schlagpositionen (links) und Silopositionen (rechts)

an (vgl. Abbildung 5.21, rechts). Die radiale Ausdehnung der Siloanlage kann in diesem Schritt verändert werden, falls der Standardwert als nicht passend erachtet wird. Sobald Schläge und Lagerstätten definiert sind, wird die Schaltfläche *Analyse* auswählbar. Dadurch werden die Berechnungen der Betriebs- und Beladungszuständen initialisiert. Anhand der vorhandenen Fahrzeugklassen wird zunächst das vorliegende Logistik-Szenario bestimmt und über ein Dialogfeld angezeigt. Dieses ist zu bestätigen, um die weiteren Berechnungen durchzuführen. In mehreren Rechenschritten werden die Zeitreferenzmatrix, die Hilfsvariablen für die Zustandsberechnungen sowie die Betriebs- und Beladungszustände ermittelt. In Abhängigkeit von Szenario und Fahrzeugklassen erfolgen Aufrufe der programminternen hinterlegten Routinen.

Stimmen die Fahrzeugklassen mit keinem Szenario überein, wird dies ebenfalls im Dialogfeld angezeigt. Durch Bestätigung dieser Anzeige wird ausschließlich die Zeitreferenzmatrix für die eingelesenen Fahrzeugdaten berechnet, es erfolgt jedoch keine Berechnung von Zuständen. Beliebige Fahrzeugspuren lassen sich so zeitsynchron dynamisch animieren und visuell analysieren.

5.8.3 Darstellung, Speicherung und Export der Ergebnisse

Sobald die Zustandsberechnungen abgeschlossen sind, kann auf die Ergebnisse zugegriffen werden. In der Hauptansicht hat der Anwender die Möglichkeit, die dynamische Visualisierung der Fahrzeugspuren zu starten (vgl. Abbildung 5.15). Über die nun auswählbare Schaltfläche *Auswertung* erscheint ein Menü, mit dem die beschriebenen Ergebnisdarstellungen zur Prozesszeitanalyse, Rückverfolgung und Geschwindigkeitsanalyse erzeugt werden können (vgl. Kapitel 5.7).

Die Ergebnisdarstellungen können ausgedruckt oder als Datei gespeichert werden. Um auch die eingelesenen und errechneten Daten wieder- und weiterverwenden zu können, sind in der Anwendung zwei Möglichkeiten vorgesehen. Beim Schließen der Anwendung erscheint ein Dialogfeld, das dem Anwender die Möglichkeit gibt, das Projekt zu verwerfen oder zu speichern. Zur Speicherung muss anschließend ein Verzeichnis gewählt werden, in das eine .mat-Datei unter einem automatisch erzeugten Namen aus Datum und Uhrzeit abgelegt wird. Diese Datei enthält alle fahrzeugbezogenen Daten, alle Daten der ortsfesten Strukturelemente sowie die übergeordneten Datenstrukturen zur Zeitreferenz und zum vorliegenden Szenario. Somit ist es bei einem Wiederaufruf dieser Projektdatei direkt möglich, die Verfahrenskette zu visualisieren oder Ergebnisdarstellungen abzuleiten.

Sollen die erzeugten Daten auch in Softwaresystemen verwendet werden, in denen .mat-Dateien nicht verwendet werden können, lassen sich die fahrzeugbezogenen Daten über eine Zusatzfunktion exportieren. Diese wird im Eingabefenster von Matlab aufgerufen und benötigt als Parameter die Structure-Variable, die die Fahrzeugdaten enthält, sowie den Pfad eines Verzeichnisses. In diesem wird für jedes Fahrzeug eine .txt-Datei angelegt, die nach der Fahrzeugbezeichnung benannt ist und die zeitbezogenen Datensätze des Fahrzeuges zeilenweise enthält (vgl. Tabelle 5.5). Die Spalten sind durch Tabulatoren getrennt.

5.9 Prüfung der Algorithmen

Die Ergebnisparameter der Logistik-Analysen stehen in direktem Bezug zu den ermittelten Betriebszuständen der Einzelfahrzeuge eines Logistik-Systems. Um die Qualität der Ergebnisaussagen beurteilen zu können, muss die Korrektheit der Zustandszuweisungen geprüft werden. Dazu werden zwei unterschiedliche Arten von Referenzdaten herangezogen. Unter Verwendung der dynamischen Visualisierung der Fahrzeugpositionen lassen sich visuell Referenzzustände festlegen. Dies ist für alle Zustände und alle Fahrzeugklassen möglich. Sensorbasierte Vergleichsdaten für Schlüsselmaschinen können über Maschinendaten aus Telemetrie- bzw. Ertragserfassungssystemen generiert werden.

5.9.1 Visuell bestimmte Referenzdaten

Über visuell erzeugte Referenzdaten soll geprüft werden, inwiefern die definierten Betriebszustände von den entwickelten Algorithmen korrekt ermittelt werden. Die visuell zugewiesenen Zustände müssen auf denselben Zustandsdefinitionen basieren. Anderenfalls können aus den Vergleichen keine Rückschlüsse auf die Qualität der Algorithmen gezogen werden.

Die Definitionen der Betriebszustände aus Kapitel 5.6 dienen als gemeinsame Basis. Alle Szenarien, für die eine Analyse-Methodik entwickelt wird, werden auch hier betrachtet.

5.9.1.1 Prüfung Szenarien Silierguternte

Die Analysealgorithmen der betrachteten Szenarien für die Ernte von Siliergütern werden anhand eines Referenzdatensatzes aus visuellen Analysen überprüft. Dabei werden nicht insgesamt ermittelte Prozesszeitanteile gleichgesetzt, sondern die Zustandszuweisung zu jedem Datenpunkt mit dem Referenzwert verglichen und über die Aufzeichnungsfrequenz der Positionsdaten zu Zeitanteilen aggregiert. Ausgleichseffekte durch mehrfache Fehlzuweisungen sind somit nicht möglich.

Traktor-Ladewagen-Gespanne können sämtliche Prozessschritte bei der Ernte von Grassilage übernehmen. In diesem System sind keine weiteren Fahrzeuge nötig. Tabelle 5.15 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der algorithmischen Zuweisungen mit den visuell erzeugten Referenzdaten für ein Ernteverfahren mit Ladewagen vom 07.06.2013 (vgl. Tabelle 4.2). Interaktionen zwischen Fahrzeugen müssen hier nicht berücksichtigt werden. Daher ist sowohl die algorithmische als auch die visuelle Betriebszustandszuweisung vergleichsweise einfach. Die Ergebnisse lassen somit Rückschlüsse auf die Qualität der visuellen Zustandszuweisungen zu. Übereinstimmungen bis zu 99 % sind möglich. Die im Vergleich zu den anderen Zuständen etwas niedrigeren relativen Übereinstimmungen für die Standzeit T_C von etwa 96 % lassen sich dadurch erklären, dass es sich absolut um einen geringen Zeitanteil handelt, der sich wiederum aus mehreren kurzen Einzelereignissen zusammensetzt. Unvermeidbare Ungenauigkeiten bei der visuellen Zustandsbestimmung summieren sich.

Tabelle 5.15: Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die Silierguternte mit Ladewagen

	T_A	T_C	T_F	T_G	gesamt
Referenzzeit [h]	3,72	0,17	4,15	1,52	9,56
Identische Zuweisungen [h]	3,63	0,16	4,09	1,51	9,39
Identische Zuweisungen [%]	97,74	95,85	98,37	99,14	98,21

T_A Prozess- und Wendezeit

T_C Standzeit

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung

Für die Überprüfung der algorithmischen Zustandszuweisungen werden für einphasige Ernteprozessketten mit Selbstfahrhäcksler ohne Überladung anhand der Datensätze vom 06.10.2010, vom 09.10.2010 und vom 08.10.2013 (vgl. Tabelle 4.2) visuell ermittelte Referenzzustände bestimmt und als Vergleichsgrundlage herangezogen. Tabelle 5.16 zeigt die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Zustandszuweisungen. Die größten relativen Abweichungen treten hier bei den Zuständen T_D (Leerfahrt) und T_E (Unterbrechung) auf. Hierbei handelt es sich um kumulierte Zeitanteile, die sich aus kurzen Einzelereignissen zusammensetzen. Kurzzeitige algorithmische Fehlzweisungen haben hier, relativ betrachtet, große Auswirkungen, ebenso wie Fehlzweisungen in der visuellen Auswertung. Zu beachten gilt weiterhin, dass bei den betrachteten Ernteketten höchstens drei Fahrzeuge der gleichen Klasse bewertet wurden. Dies erklärt beispielsweise die unterschiedlichen Zeitsummen bei Betrachtung der Teilzeit T_A für Selbstfahrhäcksler und Transporteinheiten. Da die Zuweisungen gekoppelt sind, müssen die für alle Transporteinheiten aufsummierten absoluten Zeitanteile dem Wert des Selbstfahrhäckslers entsprechen.

Tabelle 5.16: Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für einphasige Häckselketten für Selbstfahrhäcksler und Transporteinheit Feld und Straße

	T_A	T_C	T_D	T_E	T_F	T_G	gesamt
SFH							
Referenzzeit [h]	14,79	3,77	0,93	1,45	2,96	-	23,90
Identische Zuweisungen [h]	14,16	3,66	0,80	1,34	2,87	-	22,83
Identische Zuweisungen [%]	95,72	97,27	86,16	91,93	97,09	-	95,53
TE_FS							
Referenzzeit [h]	11,60	4,54	4,15	1,45	36,04	9,33	67,11
Identische Zuweisungen [h]	11,07	4,20	3,76	1,24	35,45	9,10	64,82
Identische Zuweisungen [%]	95,42	92,50	90,70	85,78	98,36	97,51	96,59

T_A Prozess- und Wendezeit (SFH), Belade- und Wendezeit (TE_FS)

T_C Standzeit

T_D Leerfahrt Feld (SFH), Leer- und Lastfahrt Feld (TE_FS)

T_E Unterbrechung

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung

Bei Verfahren mit Überladung werden in den betrachteten Ernteszenarien selbstfahrende Überladeeinheiten eingesetzt, die das Erntegut entweder von einer Bodenmiete oder

direkt von einer Transporteinheit aufnehmen. Bei diesen Verfahren sind insgesamt vier Fahrzeugklassen parallel im Einsatz: Ein Selbstfahrhäcksler, eine Überladeeinheit und jeweils separate Transporteinheiten für den Transport auf Feld bzw. Straße. Da bei Systemen mit Bodenaufnahme das Entladen des Häckselguts an der Miete keine Interaktion zwischen beweglichen Maschinen bedeutet, das Entladen bei direkter Aufnahme jedoch eine solche Interaktion darstellt und somit eine zusätzliche Schwierigkeit für die algorithmische Analyse bildet, werden diese Szenarien getrennten Referenzierungsbetrachtungen unterzogen (vgl. Tabelle 5.17, 5.18 und 5.19).

Die Übereinstimmungswerte für den Selbstfahrhäcksler sind mit Boden- bzw. Bunkeraufnahme vergleichbar mit den ermittelten Werten für einphasige Häckselketten. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass die möglichen Betriebszustände des Selbstfahrhäckslers nicht davon beeinflusst werden, ob das Erntegut mit oder ohne Überladung weitertransportiert wird. Bei Feldtransporteinheiten zeigen sich Unterschiede bezüglich den beiden verschiedenen untersuchten Überladeverfahren. Während beim Verfahren mit Bodenaufnahme die Entladung nicht an eine Interaktion mit der Überladeeinheit gekoppelt ist und sehr hohe Übereinstimmungswerte mit den Referenzdaten von über 99 % erreicht werden, stellt sich der Entladevorgang bei Überladesystemen mit Bunkeraufnahme komplexer dar. Über den durch Winkelangaben definierten Korridor für die Entladung an der Gutaufnahme kann der Entladungszustand zu etwa 95 % korrekt erkannt werden. Allerdings ist es bei Transporteinheiten, die sich im Grenzbereich des Entladekorridors im Stand befinden, nicht immer möglich die Zustände korrekt zu trennen. Die übrigen Übereinstimmungsgrade sind mit denen von Transporteinheiten bei Verfahren ohne Überladung weitgehend vergleichbar. Auch hier ergeben sich für Betriebszustände, die häufig, aber nur kurzzeitig auftreten, die geringsten relativen Übereinstimmungen.

Für Straßentransporteinheiten werden insgesamt sehr hohe Übereinstimmungsgrade von etwa 99 % erreicht. Der Aufenthalt am Silo und die Anteile für Straßenfahrt beinhalten in der Regel keine wechselnden Betriebszustände. Dies erleichtert sowohl die algorithmische Zustandszuweisung als auch die Bestimmung des Referenzzustandes. Es zeigt sich an den Tabellenwerten aber auch, dass die Erkennung des Beladezustandes und die Unterscheidung zwischen Beladung und Standzeit in der Überladezone mit Hilfe des definierten Überladekorridors an der Überladeeinheit in hohem Maße korrekt erfolgen. Im Unterschied zu Feldtransporteinheiten, die bei Verfahren mit Bunkeraufnahme aus verschiedenen Richtungen zur Entladung an die Überladeeinheit heranziehen und unterschiedlichste Standpositionen einnehmen, befinden sich Straßentransporteinheiten bei der Beladung meist auf einem Weg oder einer Straße und reihen sich hintereinander zur Beladung ein.

Tabelle 5.17: Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bodenaufnahme) für Selbstfahrhäcksler, Transporteinheit Feld, Transporteinheit Straße und Überladeeinheit mit Bodenaufnahme

	T_A/T_B	T_C	T_D	T_E	T_F	T_G	gesamt
SFH							
Referenzzeit [h]	10,10	0,93	0,13	0,71	0,14	-	12,00
Identische Zuweisungen [h]	9,82	0,92	0,11	0,59	0,13	-	11,57
Identische Zuweisungen [%]	97,24	99,19	85,37	83,55	94,88	-	96,44
TE_F							
Referenzzeit [h]	10,06	1,67	4,43	0,70	2,64	4,53	24,02
Identische Zuweisungen [h]	9,77	1,61	4,17	0,59	2,45	4,50	23,10
Identische Zuweisungen [%]	97,13	96,52	94,15	84,75	92,87	99,44	96,15
TE_S							
Referenzzeit [h]	4,34	5,11	0,66	-	18,56	6,25	34,91
Identische Zuweisungen [h]	4,32	5,04	0,59	-	18,46	6,16	34,57
Identische Zuweisungen [%]	99,47	98,62	90,52	-	99,47	98,64	99,03
UE_Bo							
Referenzzeit [h]	8,81	2,98	-	-	0,23	-	12,02
Identische Zuweisungen [h]	8,65	2,84	-	-	0,23	-	11,72
Identische Zuweisungen [%]	98,16	95,14	-	-	99,88	-	97,44

T_A Prozess- und Wendezeit (SFH), Belade- und Wendezeit (TE_F)

T_B Beladung (TE_S, UE_Bo)

T_C Standzeit

T_D Leerfahrt Feld (SFH),
Leer- und Lastfahrt Feld / Überladezone (TE_F, TE_S)

T_E Unterbrechung

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung

Tabelle 5.18: Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bunkeraufnahme) für Selbstfahrhäcksler, Transporteinheit Feld und Transporteinheit Straße

	T_A/T_B	T_C	T_D	T_E	T_F	T_G	gesamt
SFH							
Referenzzeit [h]	6,11	2,28	0,20	0,15	-	-	8,74
Identische Zuweisungen [h]	5,86	2,25	0,18	0,12	-	-	8,41
Identische Zuweisungen [%]	95,91	98,31	91,44	82,71	-	-	96,21
TE_F							
Referenzzeit [h]	5,97	7,34	4,95	0,15	-	7,39	25,79
Identische Zuweisungen [h]	5,73	6,51	4,73	0,13	-	7,02	24,11
Identische Zuweisungen [%]	96,01	88,68	95,67	81,77	-	94,99	93,48
TE_S							
Referenzzeit [h]	1,97	3,60	0,74	-	14,10	5,55	25,96
Identische Zuweisungen [h]	1,94	3,57	0,73	-	13,99	5,52	25,75
Identische Zuweisungen [%]	98,23	99,20	98,31	-	99,22	99,55	99,19

T_A Prozess- und Wendezeit (SFH), Belade- und Wendezeit (TE_F)

T_B Beladezeit (TE_S)

T_C Standzeit (SFH, TE_F, TE_S)

T_D Leerfahrt Feld (SFH),
Leer- und Lastfahrt Feld / Überladezone (TE_F, TE_S)

T_E Unterbrechung

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung

Tabelle 5.19: Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen für dreiphasige Häckselketten (Bunkeraufnahme) für Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme

	T_B	T_{Ca}	T_{Cb}	T_{Cc}	T_F	gesamt
UE_Bu						
Referenzzeit [h]	2,57	0,31	4,61	0,80	-	8,29
Identische Zuweisungen [h]	2,44	0,29	4,31	0,72	-	7,77
Identische Zuweisungen [%]	95,04	94,73	93,65	89,70	-	93,74

T_B	Beladung
T_{Ca}	Warten auf TE_F
T_{Cb}	Warten auf TE_S
T_{Cc}	Standzeit
T_F	Straßenfahrt

Daher liegen die Grenzen des Überladekorridors nach Möglichkeit quer zur Fahrriichtung, sodass Fahrzeugpositionen entlang der Korridorgrenzen vergleichsweise selten auftreten. Die Überprüfungen der Zustandszuweisungen für Überladeeinheiten zeigen unterschiedliche Ergebnisse für die beiden betrachteten Maschinentypen. Für die Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme werden insgesamt geringere Übereinstimmungen mit den Referenzzuständen erreicht als mit Bodenaufnahme. Die oben beschriebene, teilweise nicht korrekte Erkennung der Feldtransporteinheiten zur Entladung wirkt sich auch auf die Zustände der Überladeeinheit aus. Des Weiteren sei hier für Verfahren mit Bunkeraufnahme erwähnt, dass der Zustand T_B (Beladung) bei Überladeeinheiten gekoppelt ist an den Aufenthalt einer Feld- und einer Straßentransporteinheit im jeweiligen Korridor. Bei Straßentransporteinheiten reicht lediglich der Aufenthalt im Überladekorridor für die Zuweisung des Belade-Zustands aus. Nicht korrekte Identifizierungen bei der Entladung wirken sich somit nicht auf die Zustände der Straßentransporteinheiten bei der Beladung aus.

5.9.1.2 Prüfung Szenarien Getreideernte

Die Zustandszuweisungen für Logistikketten in der Getreideernte werden ebenfalls geprüft mit Unterscheidung zwischen Verfahren mit und ohne Überladevorgang am Feldrand. Dazu werden für die Verfahrensketten ohne Einsatz eines Überladewagens vom 19. und 27.07.2012 visuell ermittelte Referenzzustände herangezogen. Mehrphasige Verfahren werden anhand der Ernteketten vom 07. und 08.08.2012 analysiert (vgl. Tabelle 4.2).

Tabelle 5.20: Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für einphasige Getreideernteketten für Mähdrescher und Transporteinheiten Feld und Straße

	T_{Aa}	T_{Ab}	T_B	T_C	T_D	T_F	T_G	gesamt
MD								
Referenzzeit [h]	0,74	14,11	0,55	0,69	-	0,57	-	16,65
Identische Zuweisungen [h]	0,71	13,97	0,48	0,63	-	0,51	-	16,29
Identische Zuweisungen [%]	96,27	98,98	87,18	91,06	-	89,02	-	97,80
TE_FS								
Referenzzeit [h]	0,74	-	0,56	33,62	2,03	6,20	6,33	49,48
Identische Zuweisungen [h]	0,71	-	0,48	33,42	1,90	5,97	6,30	48,78
Identische Zuweisungen [%]	96,29	-	85,23	99,43	93,48	96,25	99,46	98,58

T_{Aa} Prozess- und Wendezeit

T_{Ab} Be- /Entladung in Fahrt

T_B Be-/Entladung im Stand

T_C Standzeit

T_D Leer- und Lastfahrt Feld

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung

Tabelle 5.21: Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für mehrphasige Getreideernteketten für Mähdrescher, Überladewagen und Transporteinheit Straße

	T_{Aa}	T_{Ab}	T_B	T_C	T_D	T_F	T_G	gesamt
MD								
Referenzzeit [h]	2,84	10,76	0,28	1,68	-	0,48	-	16,04
Identische Zuweisungen [h]	2,75	10,50	0,23	1,65	-	0,48	-	15,60
Identische Zuweisungen [%]	96,81	97,49	81,43	98,28	-	99,25	-	97,22
UW								
Referenzzeit [h]	2,83	-	0,28	2,44	5,96	1,33	2,78	15,63
Identische Zuweisungen [h]	2,77	-	0,23	2,33	5,59	1,33	2,66	14,91
Identische Zuweisungen [%]	97,93	-	80,14	95,37	93,81	99,65	95,73	95,39
TE_S								
Referenzzeit [h]	-	-	2,77	18,09	3,02	4,20	4,15	32,24
Identische Zuweisungen [h]	-	-	2,60	17,80	2,90	4,10	4,09	31,51
Identische Zuweisungen [%]	-	-	96,07	98,43	93,94	97,67	98,55	97,74

T_{Aa} Prozess- und Wendezeit

T_{Ab} Beladung in Fahrt

T_B Beladung in Stand

T_C Standzeit

T_D Leer- und Lastfahrt Feld

T_F Straßenfahrt

T_G Entladung (TE_S), Überladung (UW)

Die Ergebnisse dieser Überprüfungen zeigen insgesamt hohe Übereinstimmungen zwischen den algorithmisch zugewiesenen und den mittels visueller Analyse ermittelten Betriebszuständen (vgl. Tabelle 5.20 und Tabelle 5.21). Im Vergleich zu Silageernteketten ist die Überladezeit und somit die Zeit der Interaktion zwischen Fahrzeugen bei der Getreideernte relativ zur Gesamtzeit gering. Bei den Verfahren ohne Einsatz eines Überladewagens liegt die Erkennungsrate für Beladen im Stand deutlich niedriger als für Beladen in Fahrt. In den betrachteten Ernteketten wird das Getreide situationsabhängig während der Fahrt oder im Stand abgeladen. Als Verfahrenspuffer fungieren in einem Fall auch am Feldrand abgestellte Hänger-Gespanne, die im Stand vom Mähdrescher beladen werden, falls keine andere Transporteinheit vorhanden ist. Unter Umständen wird die Beladung dieser Gespanne von den Analysealgorithmen nicht korrekt erkannt. In den betrachteten Fällen ist dies darauf zurückzuführen, dass der Abstand zwischen der GPS-Position des Mähdreschers und der GPS-Position des am vorderen Hänger des Gespanns angebrachten Empfängers den in der Auswertemethodik hinterlegten Grenzwert überschreitet. Eine Erhöhung des Grenzwertes würde mit hoher Wahrscheinlichkeit Zuweisungsfehler an anderer Stelle nach sich ziehen. Die Anbringung der Positionsempfänger in der Mitte eines längeren Gespanns stellt einen methodischen Lösungsansatz dar, diese Fehlerquelle zu umgehen.

Die Positionsdaten für Ernteverfahren mit Einsatz eines Überladewagens stammen aus einem großflächig strukturierten Gebiet. Auch hier fällt die Erkennungsrate für Beladung im Stand vergleichsweise gering aus. Nach Möglichkeit werden alle Beladungen in Fahrt durchgeführt. Beladungen im Stand treten hier nur auf, falls ein Beladungsvorgang am Ende einer Spur nicht beendet ist und im Stand abgeschlossen wird. Es handelt sich somit in der Regel um kurze Zeitintervalle, deren optische Zuordnung mitunter Schwierigkeiten verursacht. Überladevorgänge vom Überladewagen auf Straßentransporteinheiten werden zu 94 bzw. 96 % in Übereinstimmung mit den Referenzdaten erkannt.

Die betrachteten Ernteketten bestehen aus maximal fünf Fahrzeugen, die alle in der Auswertung berücksichtigt sind. Die Ergebnisse lassen daher auch Rückschlüsse über die Eignung der Methode zu, mittels optischer Zustandszuweisungen Referenzdaten zu erzeugen. Die Referenzzeiten für Zustände, die eine Interaktion zwischen Fahrzeugen darstellen, stimmen im Idealfall für beide beteiligte Fahrzeugklassen überein. Die maximale Abweichung von 0,01 h bei Beladung in Fahrt und bei der Überladung zwischen Überladewagen und Straßentransporteinheit kann als Hinweis für die Anwendbarkeit der Vorgehensweise gesehen werden.

5.9.1.3 Prüfung Szenarien Flüssigmistausbringung

Die einphasige Flüssigmistausbringung ist aus dem Betrachtungswinkel der Agrarlogistik als analoges Verfahren zur Ernte von Anweilensilage mit einem Ladewagen zu sehen. Alle Aufgaben innerhalb des Prozesses werden von einer Maschineneinheit ausgeführt. Zur Überprüfung der Zustandszuweisungen werden die Datenaufzeichnungen vom 08.04. und 15.04.2013 herangezogen (vgl. Tabelle 4.2). Der Abgleich der algorithmischen Zustandszuweisungen mit den Referenzzuständen ergibt Übereinstimmungen von mehr als 95,99 % für alle Betriebszustände (vgl. Tabelle 5.22).

Tabelle 5.22: Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die einphasige Flüssigmistausbringung mit Gülletankwagen

	T_A	T_C	T_F	T_G	gesamt
Referenzzeit [h]	4,29	0,18	6,26	6,53	17,26
Identische Zuweisungen [h]	4,18	0,18	6,01	6,46	16,83
Identische Zuweisungen [%]	97,56	97,11	95,99	98,92	97,50

T_A Prozess- und Wendezeit

T_C Standzeit

T_F Straßenfahrt

T_G Befüllung

Die Zustandszuweisungen in der mehrphasigen Flüssigmistausbringung werden anhand der Verfahrenskette vom 24.04.2013 überprüft (vgl. Tabelle 4.2). Mit Ausnahme der Standzeiten werden für alle Betriebszustände relative Übereinstimmungen von mehr als 95 % erreicht. Standzeiten werden zu etwa 93 % in Übereinstimmung zu den Referenzzuständen zugewiesen (vgl. Tabelle 5.23). Die Übergangsbereiche zwischen der Überladung am Feldrand und Standzeiten stellen hier sowohl bei der visuellen als auch bei der algorithmischen Zustandszuweisung eine Schwierigkeit dar.

Tabelle 5.23: Referenzbetrachtung der algorithmischen Zustandszuweisungen für die mehrphasige Flüssigmistausbringung für Ausbringeinheit und Transporteinheit Straße

	T_A	T_B	T_C	T_D	T_F	T_G	gesamt
AE							
Referenzzeit [h]	3,85	1,52	3,26	-	1,38	-	10,01
Identische Zuweisungen [h]	3,74	1,44	3,05	-	1,38	-	9,61
Identische Zuweisungen [%]	97,13	95,07	93,47	-	99,52	-	95,95
TE_S							
Referenzzeit [h]	-	1,51	3,14	0,51	3,90	4,47	13,52
Identische Zuweisungen [h]	-	1,45	2,92	0,49	3,88	4,45	13,19
Identische Zuweisungen [%]	-	96,50	93,05	95,68	99,33	99,60	97,51

T_A Prozess- und WendezeitT_B ÜberladungT_C StandzeitT_D Leer- und LastfahrtT_F StraßenfahrtT_G Befüllung

5.9.2 Sensorbasierte Referenzdaten

Dokumentationssysteme in selbstfahrenden Erntemaschinen können für die Referenzierung der algorithmischen Zustandszuweisungen verwendet werden. Diese Daten sind auf die Einzelmaschine bezogen und beinhalten keine Informationen über weitere an der Prozesskette beteiligte Maschinen. Daher lassen sich unter Verwendung dieser Daten nur ausgewählte Betriebszustände sensorisch referenzieren.

5.9.2.1 Datengrundlage Ertragserfassung Feldhäcksler

Das georeferenzierte Ertragserfassungssystem des in der Erntekette am 08.10.2013 eingesetzten Feldhäckslers (vgl. Tabelle 4.2) liefert einen Vergleichsdatensatz, der zur Überprüfung bestimmter algorithmischer Zustandszuweisungen in Häckselketten genutzt werden kann. Das System zeichnet sekundlich Positions-, Maschinen- und Erntegutparameter auf (vgl. Tabelle A.4). Die Erntemenge, die zu jedem Erfassungszeitpunkt als Menge seit dem vorherigem Aufzeichnungspunkt im Datensatz enthalten ist, beinhaltet somit auch Informationen zum zeitbezogenen Massenfluss. Die Kernzeit des Beladevorgangs in Häckselketten als Zeiträume mit Massenfluss im Feldhäcksler sowie Beladeorte von Transporteinheiten lassen sich dadurch referenzieren.

In der algorithmischen Zuweisung der Betriebszustände für Feldhäcksler werden Beladungsvorgänge anhand von Relativpositionen und Geschwindigkeiten von Fahrzeugen identifiziert. Wendevorgänge werden in diesem Ansatz als Teil des Beladungsprozesses betrachtet und in der Teilzeit Prozess- und Wendezeit (T_A) zusammengefasst. Somit gilt die Beziehung, dass vorhandener Massenfluss im Feldhäcksler den algorithmisch ermittelten Zustand Prozess- und Wendezeit (T_A) bedingt, umgekehrt allerdings nicht zwingend ein algorithmisch zugewiesener Betriebszustand T_A einen Massenfluss erfordert. Jedoch befinden sich Wendevorgänge als Teil des Beladungsvorgangs in zeitlicher Nähe zu vorhandenem Massenfluss im Feldhäcksler. Diese Beziehungen sollen im Datensatz untersucht werden.

Die hinreichende Bedingung für einen algorithmisch ermittelten Beladungszustand in Form eines vorhandenen Massenflusses im Feldhäcksler spiegelt sich im Datensatz insofern wider, als von 9774 Datenpunkten mit einem Erntemengendurchfluss von mehr als 500 g/s 9698 Datenpunkte in der algorithmischen Analyse als T_A identifiziert werden, was einer relativen Übereinstimmung von 99,22 % entspricht.

Die Analysemethodik sollen jedoch Betriebszustände, in denen kein Massenfluss zu verzeichnen ist, nur dann als T_A ausweisen, wenn es sich um Wendezeiten während des Beladens handelt. Der Vergleich mit den Referenzdaten zeigt, dass 85 % der algorithmisch

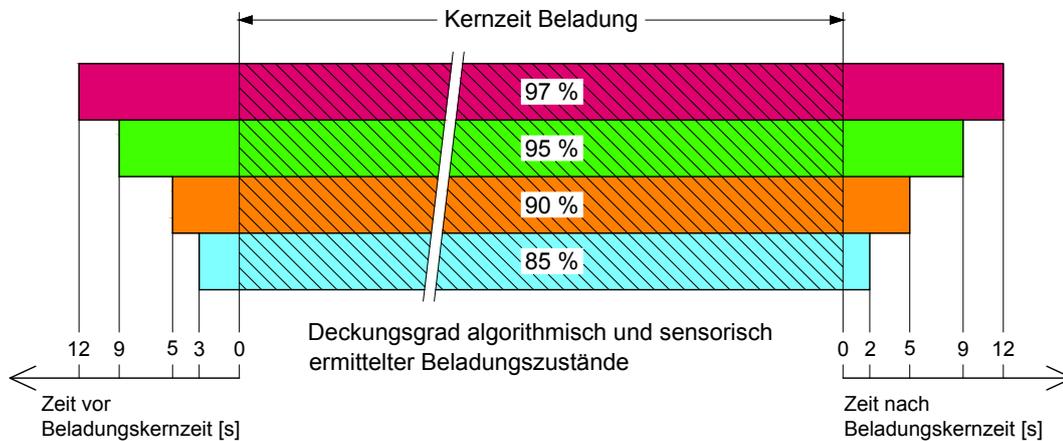


Abbildung 5.22: Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Beladungszustände für einen Feldhäcksler mit Referenzdaten aus dem Ertragserfassungssystem

ermittelten Zustände der Prozess- und Wendezeit in einem Zeitbereich liegen, der sich über 3 Sekunden vor bis 2 Sekunden nach dem Kernzeitraum der Beladung mit gemessenem Massenfluss von mehr als 500 g/s erstreckt. Der Zeitkorridor von 5 Sekunden vor bis 5 Sekunden nach der Beladungskernzeit enthält 90 % der algorithmischen Beladungszustände. Im Zeitbereich von 12 Sekunden vor und 12 Sekunden nach der Kernzeit liegen 97 % der Zustände (vgl. Abbildung 5.22).

Die Beladeorte der einzelnen Fuhren lassen sich aus den zugewiesenen Betriebszuständen ableiten. Die auf algorithmisch ermittelten Betriebszuständen basierende Ladungsrückverfolgung (vgl. Kapitel 5.7.3) soll anhand der Daten aus der Ertragserfassung geprüft werden. Dazu werden die visuell erzeugten Referenz-Betriebszustände mit den Ertragsdaten überlagert. Somit liegen Informationen bezüglich Gutfluss und zu beladender Transporteinheit unabhängig von den Ergebnissen der algorithmischen Zustandszuweisung vor. In Tabelle 5.24 sind die so ermittelten Referenz-Beladezeiten mit zugehöriger algorithmischer Systemausgabe dargestellt. Bei einem Massenfluss von mindestens 500 g/s wird ein Zeitpunkt als Beladezeit angesehen. Die Gegenüberstellung zeigt, dass sämtliche Beladeorte algorithmisch korrekt wiedergegeben werden. Die durch Klammern gekennzeichneten Orte mit sehr kurzer algorithmischer Beladedauer weisen in diesem Fall keinen Gutfluss aus.

Tabelle 5.24: Beladeorte einzelner Fuhren bei der Silomaisenernte, Referenzierung über Ertragserfassungssystem

Fuhre	Referenz-Beladezeit [s]							Algorithm. Ausgabe Schlag
	Schlag							
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	0	679	0	0	0	4
2	0	0	0	399	0	0	0	4
3	0	0	0	206	0	0	0	4
4	0	0	0	178	0	0	0	4
5	0	0	0	0	502	0	0	5
6	0	0	0	0	208	0	0	5
7	0	0	0	0	0	448	0	6
8	0	0	0	0	0	477	0	6
9	0	0	0	0	0	281	0	6
10	0	0	0	0	0	231	0	6
11	0	0	0	0	0	205	0	6
12	0	0	0	0	0	91	329	6, 7
13	0	0	0	0	0	0	107	7
14	0	0	450	0	0	0	0	3, (7)
15	0	0	248	0	0	0	0	3
16	0	0	275	0	0	0	0	3
17	0	342	0	0	0	0	0	2, (3)
18	0	485	0	0	0	0	0	2
19	0	397	0	0	0	0	0	2
20	0	230	0	0	0	0	0	2
21	0	132	0	0	0	0	0	2
22	396	0	0	0	0	0	0	1
23	389	0	0	0	0	0	0	1
24	217	0	0	0	0	0	0	1
25	260	0	0	0	0	0	0	1
26	395	0	0	0	0	0	0	1
27	386	0	0	0	0	0	0	1
28	286	0	0	0	0	0	0	1
29	286	0	0	0	0	0	0	1
30	175	0	0	0	0	0	0	1

5.9.2.2 Telemetriedaten Mähdrescher

Für die am 07. und 08.08.2012 in der Getreideernte aufgezeichneten Ernteketten (vgl. Tabelle 4.2) liegen neben den Positionsdaten aller Fahrzeuge auch die Datensätze vor, die für den eingesetzten Mähdrescher über ein Telemetriesystem des Herstellers erhoben werden. Die Telemetrie-Anwendung am Rechner ermöglicht zusätzlich zur graphischen Aufbereitung verschiedener Prozessparameter auch den Export der zugrundeliegenden Rohdaten. Tabelle A.5 zeigt die vom Telemetriesystem während der Ernte im Abstand von 15 Sekunden aufgezeichneten Inhalte.

Über den mitgeführten Zeitstempel können Datensätze ähnlich den Daten aus der Ertragerfassung des Feldhäckslers miteinander kombiniert werden. Für die Überprüfung der algorithmisch zugewiesenen Betriebszustände lassen sich die Informationen über den Gutfluss während der Ernte verwenden. Dazu kann hauptsächlich der Status der Korntankentleerung genutzt werden. Dies lässt Rückschlüsse auf die Betriebszustände während der Überladevorgänge zu.

Der Kernzeitraum der Überladevorgänge im Mähdrusch lässt sich dadurch charakterisieren, dass die Korntankentleerung aktiviert ist. Allerdings kann der Betrieb der Korntankentleerung nicht als äquivalente Bedingung für einen Überladevorgang verwendet werden, da die Fahrzeuge bereits eine bestimmte Zeit vor Beginn und nach Ende des Gutflusses die Überladepositionen eingenommen haben müssen, was als Teil des Überladevorgangs angesehen wird.

Abgeleitet aus diesen Überlegungen können zwei Fragestellungen betrachtet werden. Zum einen, ob sich die beschriebene hinreichende Bedingung für einen Überladevorgang in Form einer aktivierten Korntankentleerung in den algorithmischen Betriebszustandszuweisungen widerspiegelt. Das heißt, sämtliche Zeitpunkte, zu denen die Korntankentleerung aktiviert ist, müssen auch algorithmisch als Überladung erkannt sein. Zum anderen soll betrachtet werden, in welchem zeitlichen Abstand sich die algorithmisch zugewiesenen Betriebszustände der Überladung zu den Kernzeiträumen der Überladung mit aktiver Korntankentleerung befinden. Dies gibt Aufschluss darüber, zu welchen zeitlichen Abständen in der algorithmischen Zustandszuweisung Fahrzeugkonstellationen als Überladung identifiziert werden, in denen jedoch kein Gutfluss stattfindet.

Die erste Fragestellung lässt sich vergleichsweise einfach überprüfen. Zunächst werden der Telemetriedatensatz und der Datensatz aus der algorithmischen Analyse zu einem gemeinsamen Datensatz fusioniert. Als Kriterium dient dazu die Zeitangabe, die in beiden Datensätzen hinterlegt ist. Der Vergleich der Zustände ergibt, dass 99,36 % der Datenpunkte, zu denen ein Telemetriedatensatz vorliegt und die Korntankentleerung aktiviert ist, durch die

Tabelle 5.25: Algorithmisch identifizierte Überladevorgänge, Referenzierung über Telemetriedaten

	Beladungszustände Telemetriedatensatz	Äquivalente algorithmisch generierte Zustände	Deckungsgrad [%]
Überladung gesamt	466	463	99,36 %
Überladung Fahrt	444	441	99,24 %
Überladung Stand	22	19	86,36 %

algorithmische Analyse als Überladung identifiziert werden. Unterscheidet man zwischen Überladung während der Fahrt und Überladung im Stand, indem man eine Geschwindigkeit von 1 km/h im Telemetrie-Datensatz als Schwellenwert verwendet, werden 99,24 % der Zustände mit aktiver Korntankentleerung und einer Fahrgeschwindigkeit von mindestens 1 km/h algorithmisch als Überladung in Fahrt erkannt. Zustände mit aktiver Korntankentleerung und Fahrgeschwindigkeit unter 1 km/h werden zu 86,36 % als Überladung im Stand identifiziert (vgl. Tabelle 5.25). In den betrachteten Ernteketten werden die Entladungen des Mähdreschers durch den Einsatz eines Überladewagens vornehmlich während der Fahrt vollzogen. Überladevorgänge im Stand bilden die Ausnahme. In Kombination mit der Aufzeichnungsrate der Telemetriedaten von 15 Sekunden sind somit nur wenige Betriebszustände im Telemetriedatensatz enthalten, die eine Überladung im Stand widerspiegeln. Die Aussagekraft des Deckungsgrades der Betriebszustände ist in diesem Fall beschränkt. Die Überprüfung der drei nicht übereinstimmend zugeordneten Zustände zeigt, dass es sich jeweils um die Beendigung eines Überladevorgangs im Stand handelt, die in Fahrt begonnen wurde. Die algorithmische Änderung des Betriebszustandes von Überladung in Fahrt auf Überladung im Stand erfolgt 3 bzw. 5 Sekunden versetzt im Vergleich zum Telemetriedatensatz.

Die Analyse der Gegenrichtung erfolgt ausgehend von algorithmisch ermittelten Betriebszuständen und setzt diese in Bezug zu Zuständen, die aus Telemetriedaten abgeleitet sind. Dazu werden die Zeiträume betrachtet in denen, bezogen auf die Kernzeit der Überladung mit aktiver Korntankentleerung, Datenpunkte liegen, die von der algorithmischen Analyse als Überladung identifiziert sind. Unterschieden wird ebenfalls zwischen Überladevorgängen insgesamt, Überladevorgängen während der Fahrt und Überladevorgängen im Stand.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufzeichnungsraten von 15 Sekunden im Telemetriedatensatz und 1 Sekunde im algorithmisch analysierten Datensatz existiert zu den meisten algorithmisch ermittelten Zuständen kein korrespondierender Zustand im Telemetriedatensatz. Da für die Betrachtungen vor allem der Zustand der Korntankentleerung genutzt wird,

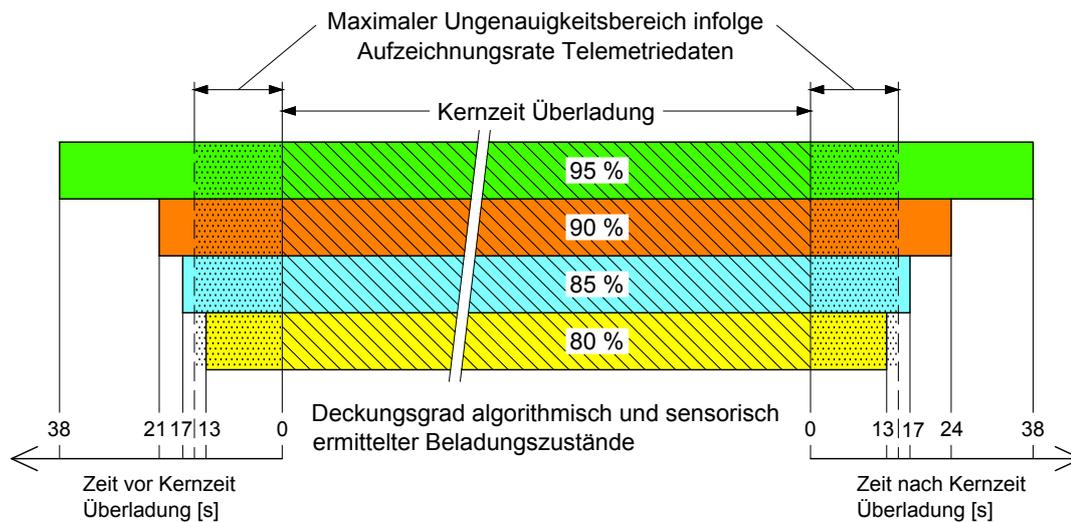


Abbildung 5.23: Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge mit Telemetrie-Referenzdaten

können fehlende Werte vergleichsweise einfach ergänzt werden, indem sekundliche Werte zwischen zwei Telemetriedatenpunkten mit aktiver Korntankentleerung ebenfalls als aktiv gesetzt werden. Fehlende Geschwindigkeitswerte können aus den Daten der GPS-Datenlogger übernommen werden. Weitere Parameter sind nicht zu ergänzen. Durch zeitliche Extrapolation der Überlade-Kernzeit mit aktiver Korntankentleerung und einem anschließenden Vergleich der Betriebszustände können die Zeitbereiche identifiziert werden, in denen algorithmisch ermittelte Überladevorgänge, bezogen auf die Überlade-Kernzeit, liegen.

Betrachtet man die algorithmisch ermittelten Überladevorgänge insgesamt ohne Unterscheidung bezüglich der Fahrgeschwindigkeit, liegen 80 % der Werte in einem Zeitbereich, der die Kernzeit der Überladevorgänge sowie 13 Sekunden vor und 13 Sekunden danach beinhaltet. Der Betrachtungszeitraum von 17 Sekunden vor und nach der Kernzeit enthält 85 % der Überladezustände. 90 % werden bei Grenzen von 21 Sekunden davor und 24 Sekunden danach erreicht, 95 % bei 38 Sekunden vor und nach der Überlade-Kernzeit (vgl. Abbildung 5.23). Verfahrenstechnisch stellen die Bereiche vor und nach der Überlade-Kernzeit die Zeiten dar, in denen sich die Fahrzeuge bereits genähert haben und der Beginn der Aktivierung kurz bevor steht bzw. die Zeiten nach dem Ende des Gutflusses bis sich der Überladewagen wieder von Mähdrescher weg bewegt. Diese werden wie bereits erwähnt als Bestandteil des gesamten Überladevorgangs betrachtet. Zu beachten gilt es den Ungenauigkeitsbereich in Abbildung 5.23 aufgrund der Aufzeichnungsrate von 15 Sekunden im Telemetriedatensatz.

Analoge Überlegungen für die Betriebszustände, die von der algorithmischen Analyse als Überladevorgang während der Fahrt identifiziert sind, mit anschließendem Vergleich mit extrapolierten Telemetriedatenpunkten, zu denen die Korntankentleerung aktiv ist und die Geschwindigkeit mehr als 1 km/h beträgt, ergeben ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 5.24). Eine Übereinstimmung zu 85 % wird durch eine zeitliche Erweiterung der Überlade-Kernzeit um 17 Sekunden nach vorne und 17 Sekunden nach hinten erreicht. Die Verwendung der Grenzen von 21 Sekunden davor und 24 Sekunden danach führt zu einer Zustandsübereinstimmung von 90 %. In einem Zeitsektor von 39 Sekunden vor bis 39 Sekunden nach der Überlade-Kernzeit befinden sich 95 % der algorithmisch als Überladung während der Fahrt erachteten Datenpunkte.

Überladevorgänge im Stand lassen sich deutlich ungenauer algorithmisch abbilden (vgl. Abbildung 5.25). In zeitlichen Grenzen von 31 Sekunden vor und 31 Sekunden nach der Überladekernzeit mit aktiver Korntankentleerung und einer Geschwindigkeit von weniger als 1 km/h befinden sich 80 % der als Überladung im Stand errechneten Datenpunkte. Eine Zustandsübereinstimmung von 85 % wird in einem Bereich von 52 Sekunden vor bis 32 Sekunden nach der Kernzeit der Überladung erreicht. Um mindestens 90 % der algorithmisch ermittelten Überladungen im Stand zu überdecken, muss der Betrachtungszeitraum auf 74 Sekunden vor bis 32 Sekunden nach der Überlade-Kernzeit ausgedehnt werden. Stimmen sich beispielsweise Fahrer nach dem Ende eines Überladevorgangs im Stand über das weitere Vorgehen ab, bleibt die Konstellation der Fahrzeuge auch nach dem Überladevorgang unverändert bestehen. Dies kann bei der Analyse über Positionsdaten nicht unterschieden werden. Auch hier gilt zu beachten, dass aufgrund des Einsatzes eines Überladewagens in den vorhandenen Telemetriedaten nur wenige Entladevorgänge des Mähdreschers im Stand enthalten sind.

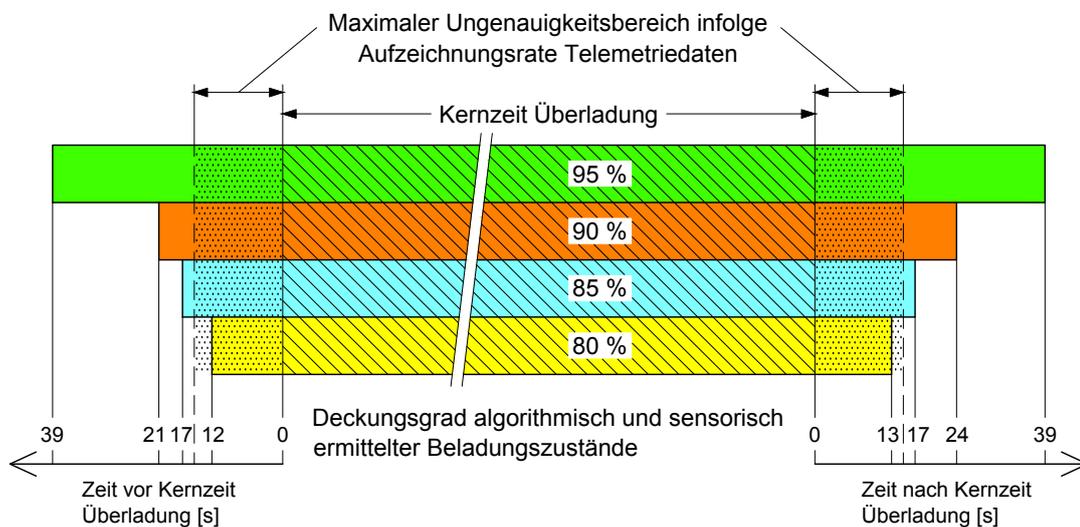


Abbildung 5.24: Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge während der Fahrt mit Telemetrie-Referenzdaten

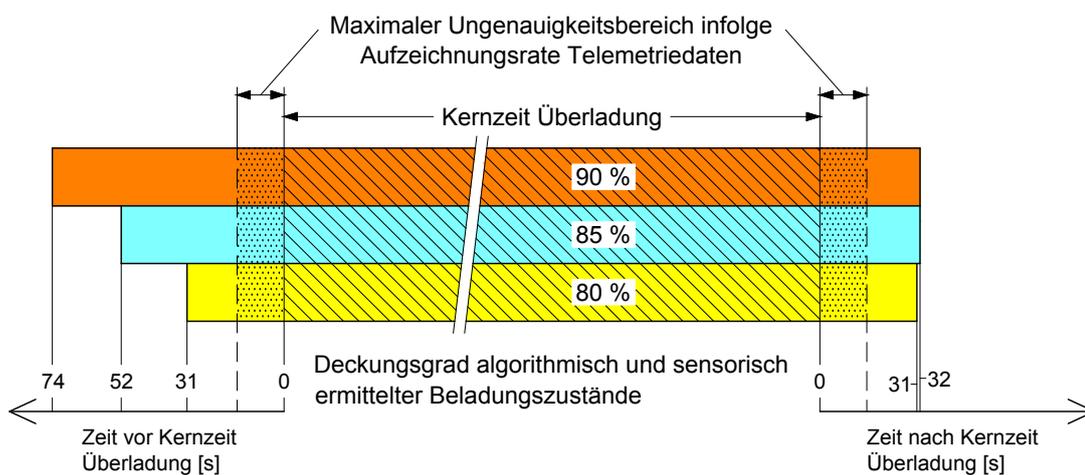


Abbildung 5.25: Übereinstimmung algorithmisch ermittelter Überladevorgänge im Stand mit Telemetrie-Referenzdaten

6 Diskussion

Durch die Entwicklung eines algorithmischen Analysesystems für Prozessketten in der Agrarlogistik, basierend auf einer möglichst einfach gehaltenen, rein aus GNSS-Positionsdaten bestehenden Datengrundlage, werden Potentiale aufgezeigt, wie mit vergleichsweise geringem Aufwand Informationen gewonnen werden können, die sich für die Effizienzsteigerung landwirtschaftlicher Logistiksysteme nutzen lassen.

6.1 Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des entwickelten Systems

In einer Reihe von Anwendungsfällen ist es denkbar, mit Hilfe des entwickelten Systems agrarlogistische Abläufe zu verbessern. Dies bezieht sich sowohl auf die Nutzung als Primärmethode ohne Verwendung weiterer Analyseverfahren als auch auf die Anwendung als Sekundärverfahren innerhalb eines parallel laufenden Systems. In diesem Abschnitt sollen darüber hinaus aber auch Grenzen der Anwendbarkeit aufgezeigt werden.

6.1.1 Kritische Beurteilung der betrachteten Verfahren

Die Analyse landwirtschaftlicher Prozessketten erfolgt verfahrensabhängig durch die Definition unterschiedlicher Szenarien (vgl. Tabelle 5.3). Da landwirtschaftliche Logistiksysteme einer Vielzahl von Einflussparametern unterliegen, existieren zahlreiche Verfahrensausprägungen und Systemvarianten. Die Anwendbarkeit des Systems *Logistik-Analyse* in einem weiten Spektrum stellt eines der Ziele der Arbeit dar. An dieser Stelle gilt es, die gewählten Logistikbereiche und Szenarien kritisch zu betrachten.

In dieser Arbeit werden Logistikverfahren in den Bereichen der Ernte von Siliergütern, der Getreideernte und der Ausbringung von Flüssigmist fokussiert. Gemäß den Betrachtungen zum Transportaufkommen in der deutschen Landwirtschaft in Kapitel 2.2 stellt die Logistik von Hackfrüchten, insbesondere von Zuckerrüben, einen weiteren wichtigen Logistikbereich

dar. Aufgrund der Handelsstruktur erfolgt die Abfuhr von Zuckerrüben größtenteils gemeinschaftlich. Durch das Anlegen von Feldrandmieten, in denen eine Zwischenlagerung von mehreren Wochen bis Monaten möglich ist, liegen vergleichsweise genaue Informationen zu Transportmengen und Beladeorten im Vorhinein vor. Dies kann in den Logistikplanungen berücksichtigt werden. Somit ist das Management und auch die technische Ausstattung der Fahrzeuge in diesem Bereich am weitesten fortgeschritten, sodass der zu erwartende Mehrnutzen durch Integration dieses Bereichs in das System *Logistik-Analyse* als deutlich geringer erachtet wird als in den detailliert betrachteten Sektoren.

Der Logistik-Bereich der Festmistausbringung wird ebenfalls nicht separat betrachtet. Die Ausbringung mit einem Stallungstreuer ist logistisch vergleichbar mit der Ausbringung von Flüssigmist mit einem Gülletankwagen. Prozessketten für die Festmistausbringung mit separater Zubringung sind in der Praxis kaum verbreitet. Um den Lagerplatzbedarf am Hof zu begrenzen und Transportspitzen zu vermeiden, besteht die Möglichkeit Festmist am Feldrand zwischenzulagern. Die entsprechenden gesetzlichen Vorgaben sind dabei zu berücksichtigen [SD12], [WDN14]. Gemäß Abbildung 2.1 ist der Anteil der weiteren Logistikbereiche am landwirtschaftlichen Transportaufkommen in Deutschland relativ gering. Die zugrunde liegenden Prinzipien decken sich weitgehend mit einem der betrachteten Szenarien. So lassen sich Arbeitsvorgänge, die mit einer Applikation am Schlag verbunden sind, beispielsweise die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln oder Mineraldüngung, mit und auch ohne separate Zubringung, analog zur ein- oder mehrphasigen Ausbringung von Flüssigmist analysieren. Die Beladung eines Transportanhängers mit Strohballen durch einen Schlepper mit Frontlader oder einen Teleskoplader stellt eine Beladung am Schlag im Stand dar und ist somit vergleichbar mit einer Beladung eines Anhängers im Stand durch einen Mähdrescher in der Getreideernte.

Neben der bereichsübergreifenden Reflexion müssen auch die ausgewählten Verfahren innerhalb eines Bereiches kritisch betrachtet werden. Für Ernte und Transport von Siliergütern werden vier verschiedene Szenarien betrachtet: Systeme mit Ladewagen, Häckselketten mit direktem Transport ohne Überladung und Häckselketten mit zusätzlicher Überladung am Feldrand über eine separate Überladestation mit und ohne Anlegen einer Zwischenmiete am Feldrand (vgl. Tabelle 5.3). Die in der Verfahrensübersicht in Kapitel 2.2 dargestellte Bergung von Anwelksilage in Silageballen ist nicht ins Analysesystem integriert, da zum einen die Variante nur bei geringen Bedarfsmengen sinnvoll ist, zum anderen werden die Ballen in der Regel am Schlag in Folie gewickelt und sind somit bereits konserviert. Der Abtransport muss daher nicht unmittelbar erfolgen. Die logistischen Anforderungen sind folglich vergleichsweise gering. Eine sinnvolle Erweiterung des Analysesystems ist die Integration

von Häckselketten mit direkter Überladung am Feldrand ohne separate Überladestation. Darauf wurde bisher aus zwei Gründen verzichtet. Zum einen besteht die Möglichkeit zur Analyse bereits indirekt, da sich die Logistik-Prinzipien aus Verfahren zur Getreideernte mit Überladewagen übertragen lassen. Dazu muss lediglich die Benennung einiger Betriebszustände geändert werden. Zum anderen ist dieses Verfahren aus technischer Sicht als aufwendig zu betrachten, da aufgrund des höheren Massenflusses und der nicht vorhandenen Möglichkeit zur Zwischenbunkerung von Erntegut nicht ein Überladewagen wie in der Getreideernte ausreichend sein kann, sondern mindestens zwei Überladewagen vorhanden sein müssen. Dies ist auch ein möglicher Grund dafür, dass kein Praxisbetrieb zur Erhebung entsprechender Daten zur Verfügung stand.

Für die beiden betrachteten Szenarien für Häckselketten mit Überladung am Feldrand mit separater Überladeeinheit werden jeweils Daten mit einer selbstfahrende Überladeeinheit herangezogen. Dies stellt jedoch keine Einschränkung dar, da die Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme ortsfest ist. Somit können hier auch nicht selbstfahrende Stationen analog analysiert werden. In Verfahren mit Feldrandmiete und Bodenaufnahme sind in der Praxis auch Radlader, Teleskoplader und Bagger vorzufinden. Im Gegensatz zur Überladeeinheit aus Abbildung 5.14 ändern diese Fahrzeuge ihre Fahrtrichtung während der Beladung vielfach. Die für die Definition des Überladekorridors notwendige Richtungsangabe muss deshalb als fiktive Orientierung gewählt werden, um die Beladungen sinnvoll abbilden zu können.

Weitere Verfahren zur Bergung von Häckselgut sind bisher mit der entwickelten Software nicht analysierbar. Zu nennen sind hier Systeme mit Feldhäcksler mit mitgeführtem Bunker oder die Verwendung von LKW-Sattelaufliegern auf dem Schlag in Kombination mit einem Vorderwagen als Anhänger an einem Traktor und einer Übergabe des Auflegers an eine LKW-Zugmaschine am Feldrand. Vermutlich aufgrund des erhöhten technischen Aufwands ist die Bedeutung dieser Verfahren in der Praxis derzeit relativ gering. Bei Bedarf ist es jedoch möglich, auch diese Verfahren in das Analysesystem zu integrieren, da Bestandteile aus anderen Analysemethoden übernommen werden können. Ein kombiniertes Verfahren aus Häckselkette und einem oder mehreren Ladewagen, die sowohl im eigenständigen Betrieb als auch im Parallelbetrieb eingesetzt werden, stellt eine weitere Logistik-Variante für Siliergüter dar. Eine vollständig automatisierte Analyse ist derzeit nicht möglich. Die Modellierung als reine Häckselkette mit anschließender manueller Zuweisung von Betriebszuständen für die eigenständige Beladung von Ladewagen wird in [Hof14] erprobt. Dies hat jedoch einen erheblichen Arbeitsaufwand für die Analyse zur Folge.

Bei der Einlagerung von Siliergütern gibt es ebenfalls verschiedene Verfahrensausprägungen.

gen. Die Siloanlage wird jedoch nur als geographischer Ort betrachtet. Somit ist es für die Analyse unerheblich, ob die Einlagerung mit oder ohne Überföhrung des Silos stattfindet oder ob eine Schlauchsilage erfolgt.

In Bereich der Getreidelogistik ist die Bandbreite der Verfahrensausprägungen geringer. In der Praxis existieren keine nennenswerten Alternativen zum Mähdrescher als Erntemaschine. Grundsätzlich würden sich die entwickelten Methoden auch für die kaum noch vorzufindenden gezogenen Mähdrescher eignen. Somit unterscheiden sich die Logistiksysteme im Getreidebereich hauptsächlich in der Art des Transportes. Die definierten Analyseszenarien mit und ohne Einsatz eines Überladewagens beinhalten jeweils Möglichkeiten zur Entladung des Mähdreschers im Stand und während der Fahrt. Die Mischform beider Verfahren, bei der der Mähdrescher vom Überladewagen bedient wird und mitunter auch auf weitere Transporteinheiten überlädt, ist bisher nicht ins Analysesystem integriert. Diese Option ist mit relativ geringem Aufwand umzusetzen, da in diesem Fall die für eine Entleerung des Mähdreschers in Frage kommenden Fahrzeuge nicht nur aus der Fahrzeugklasse *Überladewagen* bestehen dürfen sondern auf weitere Transporteinheiten erweitert werden müssen. Dies grundsätzlich zu erlauben wäre nicht sinnvoll, da dies die Wahrscheinlichkeit für Fehlzweisungen von Betriebszuständen bei ausschließlicher Entleerung auf einen Überladewagen unnötig erhöhen würde. In der Getreidelogistik besteht eine weitere Verfahrensausprägung darin, Container am Feldrand abzustellen, die entweder vom Mähdrescher oder von einem Überladewagen beladen werden. Diese unterscheiden sich aus logistischer Sicht nicht von gezogenen Anhängern, die am Feldrand abgestellt werden. Die Effizienz von Trägerfahrzeugen kann ebenfalls analysiert werden, indem sie als Transporteinheiten betrachtet werden. Allerdings dürfen diese dann nicht für eine Beladung durch einen Mähdrescher oder einen Überladewagen in Frage kommen.

Die Bandbreite der Verfahren in der Flüssigmistausbringung ist ebenfalls begrenzt. Im Analysesystem sind zwei Logistiksysteme hinterlegt: zum einen die Ausbringung mit einem Gülletankwagen ohne Überladung am Feldrand, zum anderen Verfahren mit Ausbringereinheit und separater Zubringung. Die Fahrzeugklassen sind so zusammengefasst, dass die Antriebsart des Fahrzeugs nicht entscheidend ist. Somit sind die Analyseverfahren gleichermaßen für selbstfahrende und schleppergezogene Maschineneinheiten geeignet. Einschränkung bezüglich der Analysierbarkeit bestehen bei Verfahren, die Feldrandcontainer als Verfahrenspuffer verwenden und bei Verschlauchungsverfahren.

6.1.2 Anwendung als Primärsystem

Durch die geringen Anforderungen an die Datengrundlage zeichnet sich das algorithmische Analysesystem für Prozessketten in der Agrarlogistik durch eine hohe Flexibilität aus. Die Beschränkung auf Positionsdaten aus GNSS, deren Ausgabe in hohem Maße standardisiert ist, ermöglicht es, Prozessketten vollkommen herstellerunabhängig zu betrachten. Es werden keinerlei herstellereinspezifische Zusatzinformationen benötigt, um beispielsweise über Schnittstellen ausgelesene Maschinendaten interpretieren zu können.

Neben der Unabhängigkeit vom Hersteller der an einer Prozesskette beteiligten Maschinen kann die Analysemethodik auch unabhängig vom technischen Stand einzelner Kettenglieder zur Anwendung kommen. Für ältere Fahrzeuge ohne interne elektronische Datenerhebung können dieselben Analyseergebnisse erzielt werden wie für moderne Maschinen, die inzwischen bereits häufig standardisierte Datenschnittstellen aufweisen.

Auch gegenüber externen strukturellen Voraussetzungen zeigt sich das System in Bezug auf seine Einsatzmöglichkeiten flexibel. Die Datenübertragung in Telemetriesystemen basiert in der Regel auf Mobilfunktechnik. Innerhalb Deutschlands kann es in manchen Regionen diesbezüglich Einschränkungen geben. Global gesehen ist insbesondere in Entwicklungsländern nicht von einer flächendeckenden Netzabdeckung auszugehen. GNSS sind dagegen weltweit verfügbar. Dabei gilt es allerdings zu bedenken, dass die für interne Berechnungen praktischen Gauß-Krüger-Koordinaten in dieser Form speziell für Deutschland ausgelegt sind (vgl. Kapitel 4.2.2). Bei Bedarf müssen daher entweder andere in die Ebene projizierte Koordinaten verwendet werden oder die entsprechenden Berechnungsschritte unter Verwendung passender trigonometrischer Beziehungen mit geographischen Koordinaten durchgeführt werden. Für beide Varianten existieren Verfahren [Gro76].

Auch der Zugriff auf Ackerschlagkarteien mit hinterlegten Schlaggrenzen ist weltweit keinesfalls gewährleistet. Durch die automatisierte Bestimmung von Schlag-Polygonen aus Fahrspuren von Erntemaschinen können dagegen Schlaggrenzen ohne Zusatzinformationen generiert werden (vgl. Kapitel 5.1.2). Aus ökonomischer Sicht ist der geringe Aufwand für die Datenerfassung ebenfalls von Vorteil.

Die Verbindung der entwickelten Methoden mit mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablet-PCs ist denkbar. In der Regel sind bereits GNSS-Empfänger und Datenschnittstellen standardmäßig vorhanden. Verschiedene Hersteller und Projekte befassen sich mit der Nutzung dieser Endgeräte für landwirtschaftliche Anwendungen. Auch im Bereich der Agrarlogistik gibt es entsprechende Umsetzungen, vornehmlich zur Routenplanung, Flottenkoordinierung und Auftragsübertragung. Durch die Verwendung zusätzlicher Analysealgorithmen könnte die Funktionalität solcher Anwendungen erweitert werden [Jac+12].

Analyseergebnisse bezüglich der analysierten Prozessketten können für die direkte Verfahrensbewertung genutzt werden und in die Planung künftiger Abläufe integriert werden. Möglich ist auch die Verwendung der Analyseergebnisse zur Erzeugung von Eingangsdaten für rechnerische Optimierungsverfahren. Um für konkrete Prozessketten sinnvolle Optimierungsaussagen mit Hilfe von Simulationsverfahren oder analytischen Methoden treffen zu können, bedarf es einer belastbaren Datengrundlage. Beispielsweise können für reale Transportgespanne über das algorithmische Analysesystem Umlaufzeiten ermittelt werden, auf deren Grundlage Transportleistungen errechnet werden können. Darauf aufbauend lassen sich Prozessketten gestalten, deren Transportleistung der Prozessleistung einer Arbeitsmaschine möglichst genau entspricht.

6.1.3 Anwendung als Sekundärsystem

Grundsätzlich können in allen technischen Systemen ungewünschte Effekte auftreten. Im Sinne einer möglichst problemfreien Anwendung gilt es, diese Systeme so fehlerfrei wie möglich zu gestalten. Der Aufwand dafür steigt in der Regel mit kleiner werdender Fehler-toleranz überproportional an. Für Systeme und Verfahren, die zur Verarbeitung von Daten oder zur Durchführung von Berechnungen im Allgemeinen entwickelt sind, besteht die Möglichkeit, Einzelschritte mehrmals auf verschiedene Weise durchzuführen, Fehler durch die Bildung von Differenzen zu erkennen und gegebenenfalls geeignete Ergebniskorrekturen durchzuführen. In der numerischen Mathematik im Allgemeinen oder konkret in der Korrektur von GNSS-Positionsdaten ist dies eine gängige Vorgehensweise [DHB02], [Bau11].

Elektronische Systeme sind in modernen Landmaschinen bereits als wichtiger Bestandteil für die Steuerung und Regelung von Betriebsabläufen etabliert. Ein Datenerfassungs- und Datenverarbeitungssystem ist dabei häufig integriert oder angegliedert. Derzeitige Entwicklungstendenzen gehen dahin, gegenwärtige Telemetriesysteme zu vernetzten Systemen zu erweitern, sodass auch eine direkte Datenkommunikation von Fahrzeugen möglich ist und Betriebsabläufe auch komplett autonom ablaufen können [CLA13]. Die Komplexität der Systeme nimmt dabei zu. Die Methoden des entwickelten algorithmischen Analysesystems können als Sekundärsystem in diese technisch aufwendigen Anwendungen integriert werden. So lassen sich verschiedene Ausgabeparameter über eine zweite Berechnungsmethode auf ihre Plausibilität hin überprüfen. Mögliche Fehler sind dadurch frühzeitig erkennbar.

Der Ausfall von Sensoren oder Kommunikationsschnittstellen kann für technisch aufwendige Datenanalyse- und Verarbeitungssysteme viele Schwierigkeiten nach sich ziehen. Die parallele Einbindung eines einfachen Analysesystems mit geringer Ausfallwahrscheinlichkeit stellt diesbezüglich eine gewisse Sicherheit dar. Somit können auch bei technischen Störungen

zumindest grundlegende Aussagen über logistische Abläufe getätigt werden.

Durch die Vernetzung aller Glieder einer Prozesskette sind künftig positive Entwicklungen hinsichtlich der Effektivität von landwirtschaftlichen Logistiksystemen zu erwarten. Bevor sich Standardisierungen in der Datenübertragung herstellerübergreifend durchgesetzt haben werden, ist zu erwarten, dass zunächst vernetzte Maschinensysteme nur herstellerabhängig eingesetzt werden können. Für gemischte Prozessketten ergibt sich durch das einfache algorithmische Analysesystem als Sekundärsystem die Möglichkeit, die wichtigsten Analyseparameter zu ermitteln. Dies gilt auch beim Einsatz älterer Fahrzeuge, die die technischen Anforderungen nicht erfüllen.

6.1.4 Grenzen im Anwendungsbereich

Das Einsatzgebiet eines technischen Systems im Allgemeinen ist stark abhängig von der zu Grunde liegenden Aufgabenstellung. Für Systemanalysen in der Agrarlogistik sind dabei Gesichtspunkte wie Detaillierungsgrad der Analyseergebnisse, Fehlerhäufigkeiten, zulässige Abweichungen oder Echtzeitfähigkeit von Bedeutung. Daraus abgeleitet ergeben sich für das entwickelte Analysesystem Grenzen im Anwendungsbereich.

Der Anwendungsbereich ist grundsätzlich durch die Festlegung der analysierbaren Szenarien in Tabelle 5.3 festgelegt. Logistik-Systeme, die nicht mit einem der gegebenen Szenarien übereinstimmen, sind in der gegenwärtigen Programmversion nicht analysierbar. Der Anwendungsbereich muss aber auch innerhalb der Szenarien differenziert betrachtet werden. Aufgrund der einfachen Datenbasis ohne sensorische Zusatzinformationen über Maschinenzustände lassen sich nicht alle Teilzeiten des verwendeten Zeitgliederungsschemas aus Tabelle 5.1 abbilden. Bei den ermittelten Betriebszuständen handelt es sich daher um aggregierte Teilzeiten. Insbesondere lassen sich für Arbeitsmaschinen Wendezeiten nicht von der eigentlichen Arbeitsverrichtungszeit trennen. Liegt das Augenmerk der Analyse hauptsächlich auf der Ermittlung von Potentialen im Prozesskettenmanagement, sind vornehmlich Standzeiten von Arbeitsmaschinen von Bedeutung, welche sich mit den vorgestellten Methoden für alle betrachteten Verfahren bestimmen lassen. Für Analysen, die auch oder vornehmlich auf die Verbesserung der Infield-Logistik ausgerichtet sind, ist es empfehlenswert, eine erweiterte Datengrundlage zu verwenden. Zusätzliche Informationen können vor allem aus den Maschinendaten von Arbeitsmaschinen abgeleitet werden. Eine Erweiterung des entwickelten Systems um eine optionale Schnittstelle für vorhandene Zusatzdaten würde sich hier anbieten. So könnten für die Getreideernte neben den Wendezeiten des Mähdreschers beispielsweise auch Entladezeiten im Stand von ablaufbedingten Absprachen getrennt werden.

Um bereits während der Ausführungszeit agrarlogistische Betriebsabläufe bei Bedarf regulieren zu können, ist es notwendig, dass Analysedaten in Echtzeit bzw. mit möglichst geringer Zeitverzögerung vorliegen. Das System *Logistik-Analyse* bewertet Prozessketten in einer nachgelagerten Analyse. Grundsätzlich lassen sich die entwickelten Methoden aber auch in Systeme integrieren, die parallel zum Arbeitsprozess Eingangsdaten erhalten. Dabei gibt es aber gewisse Einschränkungen. Die Methoden zur automatisierten Bestimmung von Schlag-Polygonen aus Kapitel 5.1.2 benötigen die vollständigen Spurdaten von Arbeitsmaschinen eines Arbeitstages beziehungsweise des jeweils zugrunde liegenden Bezugszeitraums. Diese Daten liegen jedoch erst am Ende des Arbeitsverfahrens vor. Diese Art der Schlagbestimmung ist somit nicht für Verfahren in Echtzeit geeignet. Schwierigkeiten bezüglich der Echtzeitfähigkeit können auch bei der Bestimmung spezieller Betriebszustände entstehen. Die algorithmische Erkennung von aktuell zu beladenden Transporteinheiten oder von Standzeiten berücksichtigt nicht nur Informationen zum Betrachtungszeitpunkt, sondern bezieht auch die Positionsdaten in einen kurzen Zeitraum davor und danach in die Berechnungen ein. Streng genommen ist dies nicht in Echtzeit möglich, da künftige Positionen zu einem Betrachtungspunkt nicht bekannt sind. Da es sich um Zeiträume von einigen Sekunden handelt und Maschinendaten bei derzeitigen Systemen mit Datenübertragung per Mobilfunk paketweise in gewissen zeitlichen Abständen übertragen werden, sind die zu erwartenden Einschränkungen als vergleichsweise gering einzustufen. Ein anderer Fall liegt bei der Bestimmung der Beladungszustände vor. Eine Transporteinheit gilt als voll beladen, wenn bis zur nächsten Ankunft an der Siloanlage keine mit einer Beladung verbundenen Betriebszustände vorliegen. Vom Betrachtungszeitpunkt aus sind dazu somit Informationen nötig, die über einen längeren zukünftigen Zeitraum verteilt sein können. In Echtzeit ist dies nicht möglich. Ohne diese Zukunftsbetrachtungen wäre nur die Unterscheidung zwischen den zwei Beladungszuständen *leer* und *Beladung begonnen* möglich.

Die Überprüfung der Zuweisung der Betriebszustände zeigt für fast alle Zustände Übereinstimmungen von deutlich über 90 % mit visuell und sensorisch erzeugten Referenzdaten (vgl. Kapitel 5.9). Durch die Vielzahl von Einflussparametern in der Agrarlogistik, die oft erst während der Prozessdurchführung bekannt werden oder mitunter auch nicht quantifizierbar sind, müssen im Prozesskettenmanagement gewisse Ungenauigkeiten generell berücksichtigt werden, sodass die genannte Genauigkeit der Zustandszuweisung für viele Anwendungsfälle ausreichen sollte. Eine Besonderheit stellen Abrechnungssysteme dar. Besonders an Biogasanlagen kommen in kurzer Zeit oft Erträge von verschiedenen Schlägen mit unterschiedlichen Besitzern an. Über die Synchronisierung von Wiegedaten und Herkunftsdaten der Beladung lassen sich automatisiert Abrechnungen erstellen. Dazu müssen

die Herkunftsdaten aber fehlerfrei vorliegen. Die Überprüfung der Beladeorte aus Kapitel 5.9.2.1 zeigt keine Fehlzusweisungen. Es sind jedoch Fahrzeugkonstellationen denkbar, die zu falschen Beladeorten führen könnten. Somit ist von der Verwendung des Analysesystems als alleiniges Kriterium für die Herkunft einer Ladung abzuraten. Auch in Systemen zur automatischen Ladungsrückverfolgung über Transponder oder lokale Funknetzwerke sind Fehler nicht gänzlich auszuschließen. Daher empfiehlt es sich, mehrere Systeme parallel zu verwenden, um Fehlerwahrscheinlichkeiten zu verringern. Die hier dargestellte algorithmische Methode der Ladungsrückverfolgung könnte somit als Sicherheits- oder Sekundärsystem auch zu Abrechnungszwecken eingesetzt werden.

6.1.5 Reflexion der Zuweisung von Betriebszuständen

Die Definition von Logistik-Szenarien und Betriebszuständen, die Fahrzeuge einer Prozesskette einnehmen können, legen die methodische Grundstruktur des Systems fest. Bei Bedarf können beinahe beliebig weitere Szenarien entsprechend den in praktischen Anwendungen eingesetzten Fahrzeugen hinzugefügt werden. Die Definition von Betriebszuständen, die aus Teilzeiten abgeleitet sind, stellt ein methodisch weitaus schwierigeres Problem dar. Die Existenz und der Entwicklungsprozess unterschiedlicher Zeitgliederungssysteme für landwirtschaftliche Arbeitsprozesse verdeutlicht die Komplexität, ein möglichst weitreichendes Schema zu entwickeln (vgl. Kapitel 2.5.2). Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Einflussparameter unterliegen sämtliche Zeitgliederungssysteme gewissen Grenzen in ihrer Anwendbarkeit.

Diese grundsätzliche Schwierigkeit überträgt sich auch auf die Definition von Betriebszuständen von Fahrzeugen in agrarlogistischen Prozessketten. Einzelteilzeiten werden zu aggregierten Teilzeiten zusammengefasst. Dabei müssen die Zielstellung der Analyse, der Informationsgehalt der vorhandenen Datenbasis und die Bewahrung von Übersichtlichkeit berücksichtigt werden. Es nicht auszuschließen, dass die Definitionen der Betriebszustände Fahrzeugkonstellationen einschließen, die über die fokussierten Teilzeiten hinaus gehen. Auch bei vielschichtigen Datenstrukturen kann dies nicht komplett vermieden werden. Durch die Verwendung des entwickelten Analysesystems sollen insbesondere Basisinformationen zu Logistiksystemen mit geringem Aufwand generiert werden. Daher werden die Definitionen der Betriebszustände so gewählt, dass möglichst viele Bestandteile der Hauptarbeitszeit unterschieden werden können. Innerhalb des gewählten Ansatzes ist der Detaillierungsgrad auf Grund der Struktur der Datengrundlage limitiert. Diesbezüglich wurde bereits die separate Ausweisung von Wendezeiten diskutiert. Weitere Detaillierungen der Betriebszustände sind jedoch auch ohne Zusatzdaten denkbar. Ein möglicher Ansatz wäre es beispielsweise, in

Ernteketten über Geschwindigkeits- und Abstandsbeziehungen zielgerichtete Annäherungsfahrten an Erntemaschinen von langsamen Nachfolgefahrten zu unterscheiden. Langsame Nachfolgefahrten deuten in der Regel auf vorhandene zeitliche Puffer im Logistikmanagement hin, wohingegen zielgerichtete Annäherungsfahrten wenig Optimierungspotential darstellen. Auch eine separate Betrachtung von sehr langen Aufenthalten an Silo-Anlagen könnte zusätzliche Systeminformationen erzeugen.

Störzeiten und Nebenzeiten sind mit dem System *Logistik-Analyse* grundsätzlich schwierig von Arbeitsprozessen im Stand zu unterscheiden. Da Standardselbstfahrhäcksler nicht mit einem Bunker ausgestattet sind, können keine Arbeitsprozesse im Stand durchgeführt werden. Bei anderen Prozessketten ist dies allerdings möglich, da bei der Getreideernte und bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung Überladungen im Stand vollzogen werden können oder müssen. Die Referenzierung von Beladungszuständen in Fahrt bei der Getreideernte anhand von Telemetriedaten zeigt, dass teilweise Stör- und Nebenzeiten eingeschlossen sind (vgl. Abbildung 5.25). Über die Nutzung von Sensordaten können Standzeiten somit weitaus detaillierter betrachtet werden. Als mögliche Vorgehensweise für die Verbesserung der Effektivität von Prozessketten in der Praxis bietet sich somit eine mehrphasige Analyse an. Falls über eine einfach durchzuführende Analyse mit dem System *Logistik-Analyse* Schwachstellen festgestellt werden, die eine exakte Abgrenzung von Arbeitsprozessen im Stand zu Stör- und Nebenzeiten bei ähnlichen Fahrzeugkonstellationen erfordern, können aufwendigere Methoden in Betracht gezogen werden.

6.2 Vergleichsbetrachtungen mit Systemen zur Verwendung von erweiterten Prozessinformationen

Über verschiedene Schnittstellen liefern moderne Landmaschinen diverse Informationen über Maschinenkennwerte. Das entwickelte Analysesystem *Logistik-Analyse* verzichtet vollständig auf die Einbindung dieser Informationen. Wie in den vorhergehenden Abschnitten bereits andiskutiert, ergeben sich dadurch verschiedene Möglichkeiten und Probleme, die anhand verschiedener Gesichtspunkte an dieser Stelle erörtert werden sollen.

6.2.1 Eignung für die Gesamtanalyse von Prozessketten

Das System *Logistik-Analyse* ist primär ausgelegt auf die Analyse von vielgliedrigen Prozessketten in der Agrarlogistik, um Schwachstellen aufzudecken, die in der Organisation und im Management begründet sind. Das Fusionieren der erhobenen GNSS-Daten der

Einzelmaschinen ist über den vorhandenen Zeitbezug und standardisierte Dateiformate einfach zu realisieren.

Die Verwendung von Datenerfassungssystemen, die Maschinenparameter integrieren, führt beim Zusammenführen unterschiedlicher Daten häufig zu Problemen. Verschiedenartige Informationen können in der Regel nicht auf Rohdatenebene kombiniert werden, sondern müssen auf Merkmals- oder Zustands-Vektor- Ebene oder Entscheidungsebene transferiert werden [Ost13]. Bei derzeitigen Entwicklungen stehen meist Einzelmaschinen oder Maschineneinheiten aus Traktor und Gerät im Vordergrund. Zur Übertragung erhobener Maschinendaten an einen Server entwickeln verschiedene Hersteller unterschiedliche Telemetriesysteme. Prozessketten setzen sich in der Regel aus Maschinen verschiedener Hersteller zusammen. Landwirte oder Lohnunternehmer benötigen daher für die Betrachtung kompletter Maschinenverbunde verschiedene Systeme unterschiedlicher Hersteller [Rot14]. Ein zusätzliches Problem ergibt sich, sobald kurzfristig Maschinen eingesetzt werden, die nicht mit einer entsprechenden Technik ausgestattet sind.

Im Zentrum von Standardisierungen mit dem ISOBUS steht die Kommunikation zwischen Traktor und Gerät. Vorhandene Datenaustauschformate wie ISOXML oder agroXML lassen den Datenaustausch entlang einer Prozesskette bisher nicht im erforderlichen Umfang zu. Starre Definitionen der Datenformate reduzieren die Flexibilität gegenüber künftigen Entwicklungen [Rot14].

Die Eignung von Analysemethoden für Prozessketten anhand von Maschinendaten ist nicht nur abhängig von Fragen der Datenkommunikation. Ausschlaggebend ist neben der Übertragbarkeit der Daten auch der Informationsgehalt an sich. Aktive Prozesse werden in einer Maschine durch die Ansteuerung bestimmter Aggregate ausgelöst und sind somit über Maschinendaten grundsätzlich genau nachvollziehbar. In passiven Prozessen werden keine Aggregate angesteuert. Automatisiert lassen sich daher Informationen nur über Sensoren ermitteln. In der Agrarlogistik ist als Beispiel für einen solchen passiven Prozess vor allem die Beladung von Transporteinheiten zu betrachten. Diese wird in der Regel von Arbeitsmaschinen aktiv ausgeführt, während Transporteinheiten, abgesehen von einer möglichen Vorwärtsfahrt, in einem passiven Zustand verbleiben. Über Wiegeeinrichtungen oder Ultraschall-Füllstandssensoren ist es denkbar, sensorisch Beladungsvorgänge an der Transporteinheit zu erfassen. Dadurch wäre die Identifikation der Transporteinheit, die zu einem bestimmten Zeitpunkt beladen wird, sensorisch möglich. Dies ist insbesondere wichtig, wenn sich mehrere Transporteinheiten in der Nähe einer Arbeitsmaschine befinden. Da jedoch derartige technische Ausstattungen derzeit keinesfalls der Regel entsprechen, müssen zur Identifikation von Transporteinheiten auch unter Verwendung von erweiterten

Prozessinformationen ähnliche kausale Zusammenhänge betrachtet werden, wie sie dem hier entwickelten System *Logistik-Analyse* zugrunde liegen. In [Rus12] werden beispielsweise Abstandsbeziehungen basierend auf der Qualität von Funksignalen herangezogen, um den Überladewagen korrekt zu identifizieren, der von einem Mähdrescher beladen wird.

6.2.2 Datenmenge und Datenübertragung

Der Verzicht auf eine Betrachtung von Maschinen- und Sensordaten führt zu einer Reduzierung der zu analysierenden Datenmenge. Selbst mobile Kleingeräte sind mittlerweile mit vergleichsweise großen Datenspeichern ausgestattet, sodass große Datenmengen vor allem in der Datenübertragung zu Problemen führen können. Falls eine Datenübertragung in Echtzeit gewünscht ist, kann vor allem in ländlichen Gegenden die Verfügbarkeit und Qualität von mobilen Internetverbindungen einen begrenzenden Faktor für landwirtschaftliche Anwendungen darstellen. Die Kapazitäten in Deutschland werden aber für Telemetrie- und Dokumentationsanwendungen als ausreichend erachtet [AL13]. Auch bei der Übertragung von Daten über den ISOBUS können nicht nur bezüglich der Flexibilität sondern auch bezüglich des Volumens Grenzen erreicht werden. Zum einen ist der Anteil an Stammdaten hoch, der mit jedem Datensatz übertragen werden muss, um Konsistenz auf verschiedenen Systemen zu gewährleisten [Ste12]. Zum anderen können Anwendungen, wie bildgebende Verfahren, die sehr große Datenmengen erzeugen, die Gesamtkapazität des ISOBUS überschreiten [Ost13]. Lücken oder Ungenauigkeiten in den Informationen wären die Folge.

Der Umfang eines Datensatzes leitet sich nicht nur aus Anzahl und Art der enthaltenen Parameter, sondern insbesondere auch aus der Frequenz der Aufzeichnungszeitpunkte ab. In den Datenerhebungen im Rahmen dieser Arbeit wird eine Aufzeichnungsfrequenz von einem Datensatz pro Sekunde umgesetzt. Herstellerabhängig können die Zeitabstände in Telemetriesystemen deutlich länger sein. Der Informationsgehalt im Hinblick auf logistische Betrachtungen nimmt dadurch stark ab [Str13]. Dem Vorteil einer Datenverfügbarkeit nahezu in Echtzeit inklusive Maschinenparametern steht somit der Nachteil gegenüber, dass in den Zeiten zwischen zwei Aufzeichnungspunkten keine Informationen zur Verfügung stehen.

6.2.3 Ökonomische Aspekte

Durch die Verwendung einfacher Messtechnik lassen sich die Kosten für die Analyse von Prozessketten in Bezug auf die Datenerhebung gering halten. Ein detaillierter Kostenvergleich ist schwierig, da das System *Logistik-Analyse* kein marktfähiges Produkt, sondern eine Forschungsentwicklung darstellt. Auch die Kosten, die für die Nutzung von Telemetrie-

systemen oder Maschinendatenerfassungssystemen im Allgemeinen anfallen, lassen sich nur schwer ermitteln, da Hersteller diese Systeme oftmals in Paketen mit Neumaschinen anbieten, es unterschiedliche Systeme in unterschiedlichen Entwicklungsstufen gibt und die Einsatzgebiete weltweit anzusiedeln sind. Als Beispielwert sollen die in einer ökonomischen Studie ermittelten Gesamtkosten für die Nutzung von Telemetriesystemen in Mähdreschern auf einem Betrieb in Russland von nahezu 2500 € pro Maschine und Jahr dienen. Darin sind neben Lizenzgebühren und Abschreibungen der Hardware auch Lohnkosten enthalten [And09]. Falls nicht Einzelmaschinen im Betrachtungsfokus stehen, sondern Prozessketten, ist es stets erforderlich, die Daten aller Fahrzeuge zu erfassen. Neben den Leistungsparametern spielen somit auch ökonomische Faktoren eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Analyse landwirtschaftlicher Prozessketten.

6.3 Möglichkeiten zur Weiterentwicklung

Das entwickelte System zur algorithmischen Datenanalyse stellt einen Prototyp eines Softwaresystems dar. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Weiterentwicklung.

Grundsätzlich ist das System nur für vorgesehene Logistik-Szenarien geeignet (vgl. Tabelle 5.3). Um das Spektrum der zu analysierenden Logistikketten zu erweitern, müssen zusätzliche Szenarien implementiert werden (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Eine funktionale Erweiterung des Analysesystems ist auch durch die Erhöhung der Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Positionsdaten möglich. Als wichtigster Punkt sei hier die Ermittlung von Wendezeiten und Leerfahrtanteilen für Arbeitsmaschinen zu nennen. Über Genauigkeiten in den Positionsdaten im Dezimeter-Bereich ist es denkbar, bereits befahrene Flächen von unbefahrenen zu unterscheiden und dadurch Rückschlüsse auf die Ausdehnung des Vorgewendes zu ziehen oder Leerfahrten auf bereits bearbeiteten Flächen zu erkennen. Durch die Weiterentwicklung bestehender GNSS und die vollständige Inbetriebnahme des europäischen Systems Galileo ist davon auszugehen, dass auch kostengünstige Geräte in Zukunft diese Genauigkeitsanforderungen erfüllen werden.

Bereichsübergreifend ist auch eine Erweiterung des Systems *Logistik-Analyse* auf andere Logistik-Bereiche denkbar, allen voran die Logistik im Baugewerbe (vgl. Kapitel 2.6). Die Zubringung von Beton oder Asphalt zu mobilen Arbeitsmaschinen erfolgt nach ähnlichen Prinzipien wie landwirtschaftliche Logistikketten, mit der Besonderheit, dass sich die Arbeitsmaschinen im Stand befinden oder nur sehr langsam bewegen. Das algorithmische Grundkonzept der Analyse kann übernommen werden. Die nötigen Feinanpassungen wären in einer Voruntersuchung zu bestimmen.

6.4 Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Elektronik in der Landtechnik auch künftig weiter zunimmt. Für Anwendungen wie Spurführungssysteme, automatische Teilbreitenschaltungen, Ertragskartierungen oder Agrarnavigationssysteme werden GNSS in breitem Umfang genutzt. Zukünftig ist vorstellbar, dass GNSS-Empfänger standardmäßig auf allen landwirtschaftlichen Fahrzeugen vorzufinden sein werden. Somit würden die für die algorithmische Analyse benötigten Daten bereits vorliegen. Die Analyse der logistischen Prozessketten wäre daher ohne zusätzliche Datenerhebung möglich.

Falls derartige gesetzliche Regelungen in Kraft treten würden, wäre es auch möglich, mittels der algorithmischen Datenanalyse technisch unaufwendig einer Nachweispflicht für die Herkunft landwirtschaftlicher Produkte nachzukommen. Lange Transportstrecken stehen vor allem im Zusammenhang mit der Substratanlieferung an großen Biogasanlagen in der Kritik. Die Einhaltung etwaiger maximaler Transportentfernungen könnte mit der algorithmischen Datenanalyse in Kombination mit einem Wiegeprotokoll dokumentiert werden.

In der Agrarlogistik wird die strukturierte Planung und Optimierung von Prozessketten künftig stärker in Konkurrenz zur derzeit gängigen erfahrungsbasierten Logistikplanung treten. Die Effektivität der Optimierungsroutinen wird sich vor allem in der Startphase eines flächendeckenden Einsatzes kritischen Prüfungen stellen müssen. Mit Hilfe der algorithmischen Analysemethoden könnten diesbezüglich unabhängige Studien erstellt werden.

7 Zusammenfassung

Arbeitsaufgaben in der landwirtschaftlichen Außenwirtschaft, die mit einem hohen Transportaufkommen verbunden sind, werden in der Regel durch den Einsatz von Prozessketten bewältigt. Diese individuell zusammengesetzten Maschinenverbunde ermöglichen es, für die jeweiligen Teilaufgaben Spezialmaschinen einzusetzen. Dadurch ist eine hohe Gesamtleistung der Prozesskette möglich und es kann flexibel auf die vorherrschenden Rahmenbedingungen reagiert werden. Organisation und Management haben einen wesentlichen Einfluss auf die Effektivität der Systeme. In Industrie und Forschung existieren unterschiedliche Ansätze zur Ausschöpfung der vorhandenen Maschinenpotentiale. Kommunikation und Vernetzung der Einzelmaschinen werden dabei ebenso fokussiert wie Methoden zur Modellierung und Simulation der Arbeitsabläufe.

Aufgrund der Vielzahl an externen Einflussparametern und der Heterogenität der Rahmenbedingungen sind generelle Aussagen über Prozessketten in der Agrarlogistik nur in einem sehr geringen Umfang möglich. Eine detaillierte Analyse bestehender Logistiksysteme bildet somit den ersten Schritt zur Steigerung der Effektivität. Moderne Landmaschinen besitzen verschiedene Schnittstellen, um Informationen zu unterschiedlichen Maschinenparametern zu ermitteln. Prozessketten in der Agrarlogistik setzen sich in der Regel aus Maschinen mehrerer Hersteller mit unterschiedlicher technischer Ausstattung zusammen. Um eine herstellerübergreifende, kostengünstige und mit geringen Rüstzeiten durchführbare Analyse zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Arbeit das Analysesystem *Logistik-Analyse* entwickelt, dessen Datengrundlage ausschließlich aus GNSS-Positionsdaten der Fahrzeuge einer Prozesskette besteht. Speziell entwickelte Algorithmen zur Auswertung dieser Daten bilden den Kern des Analysesystems, um Informationen zu untersuchten Prozessketten ableiten zu können. Eine geeignete Darstellung der Ergebnisse ist ebenso integriert.

Das entwickelte System *Logistik-Analyse* ist für die Betrachtung von Prozessketten für die Ernte von Siliergütern, die Getreideernte und die Ausbringung von Flüssigmist konzipiert. Anhand der verwendeten Fahrzeugklassen werden entsprechende Logistik-Szenarien definiert. Zunächst gilt es, aus den Spurdaten über geometrische Algorithmen Schläge und Lagerstätten als Quellen und Senken des Gutflusses zu ermitteln. Weitere Berechnungsmethoden weisen jedem Fahrzeug zu jedem Aufzeichnungszeitpunkt einen Betriebszustand zu. Viele

Schwachstellen in logistischen Abläufen werden aus der dynamischen Visualisierung der Abläufe unter Einbeziehung der ermittelten Betriebszustände deutlich. Durch verschiedene Auswertungen der Betriebszustände können Prozesszeitanteile, Geschwindigkeitsprofile und Beladungszustände abgeleitet werden. Die Verknüpfung der Beladungszustände mit den Orten der Beladung erlaubt auch die Zuordnung von Einzelfahren zu den jeweiligen Schlägen.

Die Qualität der Analyseergebnisse wird direkt beeinflusst von der Korrektheit der Betriebszustandszuweisungen. Daher werden die Zuweisungen anhand von Referenzdaten überprüft. Über visuell ermittelte Vergleichsdaten können sämtliche Zustände und Szenarien referenziert werden. Für alle betrachteten Fahrzeugklassen ergeben sich Gesamtübereinstimmungen der Betriebszustände von 93 bis 99 % mit den visuell ermittelten Vergleichswerten. Die Auswertung von Maschinendaten von Erntemaschinen erzeugt sensorische Referenzdaten. Diese Informationen lassen Rückschlüsse auf den Gutfluss in einer Maschine und somit auf Beladungsvorgänge zu. Für die überprüften Fahrzeuge werden sensorisch ermittelte Beladungszustände zu 99 % auch algorithmisch als Beladung erkannt. In der algorithmischen Analyse können Wendezeiten nicht separat ausgegeben werden. Daher sind sensorisch ausgewiesene Beladungszustände zwar hinreichend für algorithmische Beladungszustände, jedoch nicht äquivalent dazu.

Da die Analysen in *Logistik-Analyse* mit großer Flexibilität, geringen Rüstzeiten und geringem Kostenaufwand durchgeführt werden können, ist der Anwendungsbereich weitreichend. Das System kann einerseits als Primärsystem zur Analyse von kompletten Prozessketten mit Fahrzeugen verschiedener Hersteller und unterschiedlicher technischer Ausstattung eingesetzt werden. Der weltweite Einsatz ist problemlos möglich, da kein Mobilfunk und keine Informationen aus Schlagkarteien benötigt werden. Andererseits bieten sich die Methoden zur Integration in Telemetriesysteme als Sekundärsystem an, um Plausibilitätsprüfungen für Daten durchzuführen oder Sensorausfälle zu kompensieren.

Grenzen im Anwendungsbereich bestehen insofern, als derzeit vor allem Wendezeiten nicht separat analysiert werden können. Für die Optimierung von Fahrspuren auf dem Schlag liefern sensorisch ermittelte Datensätze wichtige Zusatzinformationen [HB14].

8 Summary

In agricultural plant production work tasks that are connected with high transport volumes are usually handled with process chains. As machines can be combined individually, it is possible to use special-purpose machines for each subtask. Thereby high overall performances of the process chains can be achieved. If necessary, flexible reactions on the underlying circumstances can be made. There is a substantial influence of organization and management on the effectivity of the systems. Different approaches are followed in industry and research to use the available machine capabilities. Communication and interconnection of machines are on focus as well as modelling and simulation of work processes.

Due to the multitude of external influence parameters and the heterogeneity of the framework conditions general statements about process chains in agricultural logistics are only possible to a small extent. The first step to increase efficiency is a detailed analysis of existing logistic systems. Modern agricultural machines are equipped with diverse interfaces to provide information about various machine parameters. Usually process chains in agricultural logistics consist of machines of several manufacturers with varying technical features. To be able to do analyses across manufacturers, with low costs and low setup times, the approach of the present study is to develop an analysis tool called *Logistik-Analyse* that only uses GNSS-position data of the vehicles in a process chain. Specially designed algorithms to evaluate these data form the core of the system to be able to deduce information about evaluated process chains. Furthermore, appropriate forms of presentation of the results are attached to the system.

The developed tool *Logistik-Analyse* is designed for the analysis of process chains for the harvest of silage material and grain and the spreading of slurry. Logistic scenarios are defined by reference to the used vehicle classifications. Using geometric algorithms, field shapes and storage locations as sources and sinks of the mass flow have to be derived from the position data. Additional calculation methods assign an operation condition to each machine at each time step. A lot of weak points of the evaluated logistic systems become apparent in the dynamic visualization of the processes having regard to the assigned operating conditions. Process-time analyses, velocity profiles and load conditions can be deduced from the operating conditions by different evaluations. By linking load conditions and locations of

loading processes single carriages can be assigned to particular fields.

The quality of the analysis results depends directly on the correctness of the assignment of the operation conditions. Therefore the assignments are verified using reference data. All operating conditions and scenarios can be verified by visually generated reference data. For all regarded vehicle classifications the algorithmic assignments correspond overall to the visually generated reference data in a range from 93 to 99 %. The analysis of machine data of harvesting machines generates sensor reference data. This information allows conclusions about the mass flow in the machine and thus provides data about loading operations. For the regarded machines loading operations derived from sensor data are identified as loading operations by the developed algorithms to 99 %. Yet, turning times cannot be identified separately in the analysis system. Hence sensor-identified loading operations are sufficient for algorithmic loading operations but not equivalent.

As the analyses in *Logistik-Analyse* can be performed with high flexibility, short setup times and low costs, there is a wide application area. On the one hand the system can be used as primary system for the analysis of complete process chains with machines from different manufacturers and varying technical equipment. As no mobile communication and no information from field databases is needed, the system can be used all over the world. On the other hand, the developed methods can be integrated in telematic systems as secondary system to do tests on the plausibility of data or compensate for sensor failures.

The application is limited in a sense that turning times cannot be analyzed separately. To optimize infield processes sensor based data provide important additional information.

Literaturverzeichnis

- [ADE08] **Allred, B. J., Daniels, J. J., Ehsani, M. R., 2008:** *Handbook of agricultural geophysics*. Books in soils, plants, and the environment. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 978-0-8493-3728-4.
- [Agr10] **Agriculture and Agri-Food Canada, 2010:** *Wheat Sector Profile Part One: Overview*. In: *Market Outlook Report 2(6)*, S. 1–8.
- [AKB13] **Ault, A. C., Krogmeier, J. V., Buckmaster, D., 2013:** *Mobile, Cloud-Based Farm Management: A Case Study with Trello on My Farm*. In: ASABE Annual International Meeting. Kansas City, 21.–24. Juli. DOI: 10.13031/aim.20131593538.
- [AL13] **Alcala, F., Lecker, J., 2013:** *Mobiles Internet auf dem Ackerschlag: Analyse empirischer Langzeitdaten*. In: *Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Erhebung - Verarbeitung - Nutzung*. Referate der 33. GIL-Jahrestagung. Potsdam, 20.–21. Februar, S. 35–38. ISBN: 978-3-88579-605-3.
- [Amo07] **Amon, T., 2007:** *Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen: ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Energie-Systeme der Zukunft, Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften*. Wien: BMVIT.
- [And09] **Andres, S., 2009:** *Implementierung und Kosten-Nutzen-Analyse automatischer Datenerfassungssysteme in russischen Agrarholdings*. Dissertation. Universität Hohenheim.
- [Aue89] **Auernhammer, H., 1989:** *Elektronik in Traktoren und Maschinen: Einsatzgebiete, Funktion, Entwicklungstendenzen*. München: BLV Verl.-Ges. ISBN: 3-405-13618-0.
- [Aue93] **Auernhammer, H., 1993:** *Die elektronische Schnittstelle Schlepper-Gerät: The Electronical Tractor-Implement Interface*. In: *Landwirtschaftliches BUS-System: Mobile agricultural BUS system*. Arbeitspapier Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V, S. 18–30. ISBN: 3-7843-1841-X.

- [Bar05] **Bartelme, N., 2005:** *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 3-540-20254-4.
- [Bar12] **Bar-Yehuda, Z., 2012:** *File Exchange: plot_google_map.m*. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27627-plotgooglemap> (letzter Aufruf am: 17.12.2012).
- [Bau11] **Bauer, M., 2011:** *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. 6. Aufl. Berlin: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-482-2.
- [BB09] **Busato, P., Berruto, R., 2009:** *Combined Use of Simulation Modeling and Linear Programming for Logistic Design of the Slurry Distribution Systems*. In: 7th World Congress on Computers in Agriculture Conference Proceedings. Reno, 22.–24. Juni. DOI: 10.13031/2013.29061.
- [BBP05] **Busato, P., Berruto, R., Piccarolo, P., 2005:** *Modeling of rice harvesting chains: technical and logistic aspects*. In: XXXI CIOSTA – CIGR V Congress Proceedings. Hohenheim, 19.–21. September, S. 168–176.
- [BBP09] **Berruto, R., Busato, P., Piccarolo, P., 2009:** *Economic and energetic analysis of crop systems management techniques by means of WEB application*. In: XXIII CIOSTA - CIGR V Conference Proceedings. Reggio Calabria, 17.–18. Juni, S. 1093–1097.
- [BBS08] **Busato, P., Berruto, R., Saunders, C., 2008:** *Logistics and efficiency of Grain harvest and transport systems in a South Australian context*. In: ASABE Annual International Meeting, Providence, 29. Juni–2. Juli. DOI: 10.13031/2013.24977.
- [Ber+10] **Berruto, R. et al., 2010:** *Modelling Corn Stover Harvest Operations*. In: CIGR XVII World Congress, Quebec City, 13.–17. Juni.
- [Ber02] **Bernhardt, H., 2002:** *Schüttguttransport in landwirtschaftlichen Betrieben Deutschlands*. Dissertation. Gießen: Justus-Liebig-Universität.
- [Ber13] **Bernardi, A., 2013:** *iGreen - Offene Strukturen machen Wissensaustausch möglich*. In: *Landtechnik* 68(1), S. 3.
- [BH12] **Beyer, S., Haidn, B., 2012:** *Working Time Measurement by a Real-Time Location System – Automated Detection and Automatic Time Measurement of a Yard Loader's Work*. In: CIGR-AgEng International Conference of Agricultural Engineering Proceedings, Valencia, 8.–12. Juli. ISBN: 10 84-615-9928-4.

- [Bio08] **Biomass Research and Development Board, 2008:** *National National Bio-fuels Action Plan*. URL: <http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/nbap.pdf> (letzter Aufruf am: 30.08.2014).
- [Bis96] **Bissantz, N., 1996:** *CLUSMIN - Ein Beitrag zur Analyse von Daten der Ergebniscontrollings mit Datenmustererkennung (Data Mining)*. Dissertation. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander-Universität.
- [Böh13] **Böhrnsen, A., 2013:** *Wenn das iPhone mit der Waage spricht*. In: *Profi, Magazin für Agrartechnik* 2013(1), S. 82–84.
- [Bru04a] **Bruchner, A.-K., 2004:** *Industrielle Simulationssoftware als Entscheidungsunterstützungsinstrument in der Produktionslogistik der Holzerntekette*. Dissertation. München: Technische Universität.
- [Bru04b] **Brune, M., 2004:** *Untersuchungen zur Logistik im Rahmen der ganzheitlichen Optimierung der Baustellenprozesse anhand eines konkreten Beispiels*. 1. Aufl. s.l.: Diplomica. ISBN: 3832482679.
- [BS09] **Bochtis, D., Sorensen, C., 2009:** *The vehicle routing problem in field logistics: Part I*. In: *Biosystems engineering* 104(4), S. 447–457.
- [BS10] **Bochtis, D., Sorensen, C., 2010:** *The vehicle routing problem in field logistics: Part II*. In: *Biosystems engineering* 105(5), S. 180–188.
- [BSV10] **Bochtis, D., Sorensen, C., Vougioukas, S., 2010:** *Path planning for in-field navigation-aiding of service units*. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 74(1), S. 80–90.
- [Bus+11] **Busato, P. et al., 2011:** *Logistics and Economics of Grain Harvest and Transport Systems with the Use of Silo-Bag*. In: ASABE Annual International Meeting, Louisville, 7.–10. August. DOI: 10.13031/2013.38990.
- [Cas+10] **Casavant, K. et al., 2010:** *Study of Rural Transportation Issues*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. DOI: 10.9752/TS041.04-2010.
- [Chu10] **Chung, S., 2010:** *Biofuel Supply Chain Challenges and Analysis*. Masterarbeit. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- [CLA13] **CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, 2013:** *Das Projekt marion*. URL: <http://www.projekt-marion.de/drupal/> (letzter Aufruf am: 03.07.2013).

- [DD14] **Doleschel, P., Demmel, M., 2014:** *Grundlagen des Pflanzenbaus: Präziser Ackerbau (Precision Farming)*. In: Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. 13. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV-Buchverlag, Landwirtschaftsverlag, S. 171–184. ISBN: 978-3-8354-0716-9.
- [DDS10] **Dudenhoeffer, N. E., Digman, M. F., Shinnors, K. J., 2010:** *On-Farm Analysis of Corn Silage Harvesting Systems Observation and Data Processing Techniques*. In: ASABE Annual International Meeting, Pittsburgh, 20.–23. Juni. DOI: 10.13031/2013.30089.
- [DFK13] **DFKI, 2013:** *igreen*. URL: <http://www.igreen-projekt.de/iGreen/> (letzter Aufruf am: 08.03.2013).
- [DHB02] **Deuffhard, P., Hohmann, A., Bornemann, F. A., 2002:** *Numerische Mathematik*. 3. Aufl. Berlin, New York: Gruyter. ISBN: 3-11-017182-1.
- [DM14] **Day-Farnsworth, L., Miller, M., 2014:** *Networking Across the Supply Chain: Transportation innovations in local and regional food systems*. University of Wisconsin. DOI: 10.9752/TS202.06-2014.
- [DPD06] **Doan, D., Paddock, B., Dyer, J., 2006:** *The Reform of Grain Transportation Policy and Transformation in Western Canadian Agriculture*. In: Policy reform and adjustment in the agricultural sectors of developed countries, S. 163–173. ISBN: 1-84593-033-9.
- [DS10] **Döring, G., Schleicher, R., 2010:** *Verfahrensalternativen für Biomassetransporte*. Fachinformation Biogas Forum Bayern. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. Freising.
- [Dür04] **Düringer, A., 2004:** *Verfahrensoptimierung und -vergleiche zur Ausbringung von Flüssigmist unter bundesdeutschen Rahmenbedingungen*. 1. Aufl. Göttingen, Giessen: Cuvillier. ISBN: 3-86537-045-4.
- [EKS83] **Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D., Seidel, R., 1983:** *On the shape of a set of points in the plane*. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 294, S. 551–559. ISSN: 0018-9448.
- [ELL12] **ELLA, 2012:** *From Manual to Mechanical Harvesting: Reducing Environmental Impacts and Increasing Cogeneration Potential*. URL: <http://ella.practicalaction.org/node/1046> (letzter Aufruf am: 27.08.2014).
- [ESR98] **ESRI, 1998:** *ESRI Shapefile Technical Description*. URL: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (letzter Aufruf am: 18.02.2013).

- [FAO13] **FAO, 2013:** *FAO statistical yearbook 2013: World food and agriculture*. FAO statistical yearbook. Rom. ISBN: 978-92-5-107396-4.
- [FAO14] **FAOSTAT, 2014:** *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division*. URL: <http://faostat3.fao.org> (letzter Aufruf am: 27. 08. 2014).
- [Fei05] **Feiffer, A., 2005:** *Maßnahmen während der Ernte: Abfuhrlogistik immer wichtiger*. In: Feiffer, A. et al. (Hrsg.): *Getreideernte - sauber, sicher, schnell*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, S. 209–212. ISBN: 3-7690-0652-6.
- [Frö+11] **Fröhner, A. et al., 2011:** *Früherkennung von Erkrankungen bei Kälbern unter Nutzung pedometergestützter Messtechnik*. In: *Landtechnik* 66(6), S. 448–452.
- [FZ14] **Ferraz Dias de Moraes, M. A., Zilberman, D., 2014:** *Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market*. Cham, s.l.: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-03139-2.
- [GJ12] **Gruber, F. J., Joeckel, R., 2012:** *Formelsammlung für das Vermessungswesen*. 16. Aufl. Wiesbaden: Springer. ISBN: 978-3-8348-1835-5.
- [GKS07] **Günthner, W. A., Kessler, S., Sanladerer, S., 2007:** *Transportlogistik in der Baubranche - Optimierung durch den Einsatz eines Flottenmanagementsystems*. URL: <http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/TransportlogJahrbuch%20Logistik.pdf> (letzter Aufruf am: 28. 02. 2013).
- [Göt+11] **Götz, S. et al., 2011:** *Agrarlogistik – Systemvergleich von Transportkonzepten der Getreidelogistik*. In: *Landtechnik* 66(5), S. 381–386.
- [Gro76] **Großmann, W., 1976:** *Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung*. 3. Aufl. Stuttgart: Wittwer.
- [HB11a] **Heizinger, V., Bernhardt, H., 2011:** *Algorithmic Efficiency Analysis of Harvest and Transport of Biomass*. In: *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)* 7(1), S. 95–99.
- [HB11b] **Heizinger, V., Bernhardt, H., 2011:** *Algorithmische Effizienzanalyse von Ernteprozessketten*. In: 17. Arbeitswirtschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, Weihenstephan, 14.–15. März, S. 49–54. ISBN: 978-3-00-034001-7.
- [HB12a] **Heizinger, V., Bernhardt, H., 2012:** *Algorithmische Analyse von Transportsystemen für Biomasse*. In: *Landtechnik* 67(1), S. 22–25.

- [HB12b] **Heizinger, V., Bernhardt, H., 2012:** *Algorithmische Effizienzanalyse von Ernteprozessketten*. In: Informationstechnologie für eine nachhaltige Landbewirtschaftung, Fokus Forstwirtschaft, Referate der 32. GIL-Jahrestagung, 29. Februar–1. März 2012, Freising, S. 119–123. ISBN: 978-3-88579-288-8.
- [HB14] **Heizinger, V., Bernhardt, H., 2014:** *Algorithmische Datenanalyse landwirtschaftlicher Prozessketten*. In: 72. Internationale Tagung Landtechnik. Berlin, 19.–20. November.
- [HD05] **Higgins, A., Downs, P., 2005:** *Optimal Scheduling of Road Vehicles in the Maryborough Sugarcane Transport System*. In: Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, Bundaberg, 3.–6. Mai, S. 31–38.
- [HD75] **Hanle, A., Drosdowski, G., 1975:** *Meyers Enzyklopädisches Lexikon*. 9. Auflage. Bd. 15. Mannheim (u.a.): Bibliographisches Institut.
- [Hel98] **Heller, A., 1998:** *Brockhaus - die Enzyklopädie: In vierundzwanzig Bänden*. 20. Aufl. Bd. 13. Leipzig: Brockhaus. ISBN: 3-7653-3113-9.
- [Her99] **Herrmann, A., 1999:** *Modellierung verfahrenstechnischer Bewertungskriterien bei unterschiedlicher Verknüpfung von Ernte- und Transportarbeitsgängen*. Habilitation. Halle (Saale): Martin-Luther-Universität.
- [Hof14] **Hoffmann, D., 2014:** *Verfahrensvergleich zur Logistik der Anwelkguternte mit Ladewagen und Feldhäcksler bei Grünland und Ackerfutter*. Masterarbeit. München: Technische Universität.
- [Höl98] **Höll, L., 1998:** *Grundlagen: Geodätisches Datum, Kartenprojektionen und Koordinatensysteme in Deutschland und Österreich*. URL: http://www.mydarc.de/dk3wi/Geodatisches_Datum_Koordinatensysteme.pdf (letzter Aufruf am: 27.03.2013).
- [Hoo01] **Hoogen, H., 2001:** *Technischer Stand und Zeitbedarf des Transportes von Zuckerrüben als Grundlage für ein Transportmanagementsystem*. Dissertation. Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität.
- [HSK11] **Habenicht, I., Spieckermann, S., König, M., 2011:** *Simulation der Baustellenlogistik am Beispiel eines Flugsteigs*. In: Mefisto: eine Modell-, Informations- und Wissensplattform für das Bauwesen, Tagungsband 2. Mefisto Kongress, Dresden, 13. Oktober. Bd. 4, S. 133–144. ISBN: 978-3-86780-250-5.

- [HT14] **Hünting, K., Thurner, S., 2014:** *Futter- und Substratkonservierung: Verfahrenstechnik Futterernte und Futterkonservierung*. In: Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. 13. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV-Buchverlag, Landwirtschaftsverlag, S. 873–946. ISBN: 978-3-8354-0716-9.
- [Jac+12] **Jacob, A. et al., 2012:** *Rationalisierung der Einsatzplanung und -steuerung mobiler Arbeitsmaschinen*. In: *Landtechnik* 67(3), S. 158–161.
- [KM08] **Koop, A., Moock, H., 2008:** *Lineare Optimierung: Eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research*. Berlin: Spektrum. ISBN: 978-3-8274-1897-5.
- [KP03] **Kemmer, H., Pommerehne, C., 2003:** *Modulare Integrierte Rübenlogistik - Vernetzung und aktiver Datenaustausch im Rübentransport*. In: Mobile Information - Chancen für die Agrarwirtschaft und ihre Partner, Referate der 24. GIL-Jahrestagung, Göttingen, 15.–17. September, S. 65–68. ISBN: 3-932987-05-5.
- [Kra12] **Kraftfahrt-Bundesamt, 2012:** *Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern: 7. Ausgabe*.
- [KTB05] **KTBL, 2005:** *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. 13. Aufl. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.). Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag Münster. ISBN: 3-7843-2194-1.
- [KTB13] **KTBL, 2013:** *KTBL-Feldarbeitsrechner*. Darmstadt. URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html#0> (letzter Aufruf am: 12.03.2013).
- [KTW02] **Klindtworth, K., Trinkl, S., Wendl, G., 2002:** *Effizienz verschiedener Aktivitätssensoren zur Brunstüberwachung bei Milchkühen*. In: *Landtechnik* 57(2), S. 86–87.
- [Küb09] **Kübler, S., 2009:** *Simulation verfahrenstechnischer Prozesse im Feldbau*. Dissertation. Halle (Saale): Martin-Luther-Universität.
- [LAC13] **LACOS Computerservice GmbH, 2013:** *FieldNav-Agrarnavigation*. URL: http://www.lacos.de/cms_neu/ (letzter Aufruf am: 22.02.2013).
- [Lan83] **Langer, J., 1983:** *Transport- und Standortoptimierung*. In: Mührl, K. (Hrsg.): *Transport, Umschlag, Lagerung in der Landwirtschaft*. Berlin: VEB Verlag Technik, S. 332–361.
- [LfL13] **LfL Bayern, 2013:** *Datenerhebungen im Projekt Betriebsmonitoring – Vergleichende Untersuchung alternativer Verfahrensketten für die Einwerbung und Vergärung von Grünlandaufwüchsen*. LfL Bayern, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising.

- [Liu+13] **Liu, B.-I. et al., 2013:** *Contemporary Logistics in China: Transformation and Revitalization*. Current Chinese Economic Report Series. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-33566-2.
- [Mat+01] **Matsuura, K. et al., 2001:** *Automatic Following Vehicle System*. In: ASABE Annual International Meeting. Sacramento, 29. Juli–1. August. DOI: 10.13031/2013.3447.
- [Mei08] **Meier, L. H., 2008:** *Koordination interdependenter Planungssysteme in der Logistik: Einsatz multiagentenbasierter Simulation im Planungsprozess von Container-Terminals im Hafen*. Wiesbaden: Gabler. ISBN: 978-3-8349-1418-7.
- [Mey06] **Meyer, E., 2006:** *A Review of the Harvesting, Loading, Transport and Mill Receiving Operations of the South African Sugar Industry*. URL: http://www.cenicana.org/pdf/otros/foro_cosecha_transporte_2006/6_cosecha_transporte_recepcion_sudafrica_may9-2006.pdf (letzter Aufruf am: 27. 08. 2014).
- [MF08] **Martinelli, L., Filoso, S., 2008:** *Expansion of Sugarcane Ethanol Production in Brazil: Environmental and Social Challenges*. In: *Ecological Applications* 18(4), S. 885–898.
- [MNI92] **Miyazaki, M. O. K., Nagasaki, Y., Itokawa, N., 1992:** *Improvement of the Forage Harvest Work by a Small-Size Forage Harvester and a Driverless Transport Vehicle on the Upland Converted from Paddy Field*. In: *Japanese Journal of Farm Work Research* 27(1), S. 14–20.
- [Mor+10] **Morey, R. et al., 2010:** *A Corn Stover Supply Logistics System*. In: *Applied Engineering in Agriculture* 26(3), S. 455–461.
- [MR11] **Monteiro, J., Robertson, G., 2011:** *Grain Transportation in Canada - Deregulation*. In: CTRF 46th Annual Conference, Transportation and Innovation: the Roles of Governments, Industry and Academia. Gatineau, 29. Mai–1. Juni.
- [MSD07] **Mitterleitner, H., Schilcher, A., Demmel, M., 2007:** *NawaRo-Transport: Konzepte zur Reduzierung der Kosten beim Transport von nachwachsenden Rohstoffen für Biogasanlagen*. LfL-Information. Freising.
- [Nil99] **Nilsson, D., 1999:** *Analysis and Simulation of Systems for Delivery of Fuel Straw to District Heating Plants*. Dissertation. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.

- [Oks07] **Oksanen, T., 2007:** *Path planning algorithms for agricultural field machines*. Helsinki University of Technology Automation Technology Laboratory Series A Research reports. Espoo: Helsinki University of Technology. ISBN: 978-951-22-9080-2.
- [Ost13] **Ostermeier, R., 2013:** *Multisensor Data Fusion in einem mobilen landtechnischen BUS-System für die Real-time Prozessführung in sensorgestützten Düngesystemen*. Dissertation. München: Technische Universität.
- [Pag+88] **Page, B. et al., 1988:** *Simulation und moderne Programmiersprachen: Modula-2, C, Ada*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 3-540-18982-3.
- [Pau+13] **Pauli, S. A. et al., 2013:** *Entwicklung eines benutzerfreundlichen und einheitlichen Workflows zur Verarbeitung heterogener und komplexer Prozessdaten*. In: Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Erhebung - Verarbeitung - Nutzung. Referate der 33. GIL-Jahrestagung. Potsdam, 20.–21. Februar, S. 259–262. ISBN: 978-3-88579-605-3.
- [Pfo00] **Pfohl, H.-C., 2000:** *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 6. Aufl. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-60314-X.
- [Pro10] **Productivity Commission, 2010:** *Wheat export marketing arrangements: Productivity Commission inquiry report*. Canberra: Productivity Commission. ISBN: 978-1-74037-319-7.
- [Qst09] **Qstarz International Co. Ltd, 2009:** *BT-Q1000eX Xtreme Recorder, User's Manual*.
- [Qst11] **Qstarz International Co. Ltd, 2011:** *BT-Q1000XT / TR-Q1000XT Travel Recorder XT, User's Manual*.
- [RCG03] **Ravula, P. P., Cundiff, J. S., Grisso Robert D., 2003:** *Cotton Logistics as a Model for Analysis of Biomass Transportation Issues*. In: ASABE Annual International Meeting, Las Vegas, 27.–30. Juli. DOI: 10.13031/2013.13910.
- [Rot14] **Rothmund, M., 2014:** *Datenaustausch in Prozessketten - mehr als ISOBUS*. In: *Landtechnik* 69(4), S. 163.
- [Rus12] **Rusch, C., 2012:** *Untersuchung der Datensicherheit selbstkonfigurierender Funknetzwerke im Bereich von mobilen Arbeitsmaschinen am Beispiel der Prozessdokumentation*. Dissertation. Berlin: Technische Universität.

- [SCK14] **Stretch, T., Carter, C., Kingwell, R., 2014:** *The cost of Australia's bulk grain export supply chains: An information paper*. URL: http://www.aegic.org.au/media/25873/aegic_supply_chains_report_2014_v3.pdf (letzter Aufruf am: 01.09.2014).
- [SD12] **Schultheiß, U., Döhler, H., 2012:** *Lagerung von Festmist in der Feldflur auf unbefestigtem Untergrund*. In: *Landtechnik* 67(2), S. 133–135.
- [Son07] **Sonnen, J., 2007:** *Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter*. Dissertation. Berlin: Humboldt Universität.
- [Sta10] **Statistics Japan, 2010:** *Japan statistical yearbook 2011*. URL: <http://www.stat.go.jp/english/data/nenkan/back60/> (letzter Aufruf am: 28.08.2014).
- [Sta13] **Statistisches Bundesamt, 2013:** *Statistisches Jahrbuch Deutschland*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. ISBN: 978-3-8246-1007-5.
- [Sta95] **Statistisches Bundesamt, 1995:** *Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. ISBN: 3-8246-0476-0.
- [Ste12] **Steinberger, G., 2012:** *Methodische Untersuchungen zur Integration automatisch erfasster Prozessdaten von mobilen Arbeitsmaschinen in ein Informationsmanagementsystem „Precision Farming“*. Dissertation. München: Technische Universität.
- [Str00] **Strohm, R., 2000:** *Zuckerrübenernte und –transport: Modelle zur strategischen, taktischen und operativen Logistikplanung*. Dissertation. Gießen: Justus-Liebig-Universität.
- [Str13] **Streicher, G., 2013:** *Optimierung des Mähdrusches und der Infield-Logistik anhand praktischer Untersuchungen in der Winterweizenernte eines Großbetriebs unter Verwendung automatischer Prozessdatenerfassung*. Masterarbeit. München: Technische Universität.
- [TGL70] **TGL 80 - 22289, 1970:** *Zeitgliederung in der Landwirtschaft: Begriffe, Kurzzeichen, Erläuterungen*.
- [Tor01] **Torge, W., 2001:** *Geodesy*. 3. Aufl. Berlin: de Gruyter. ISBN: 3-11-017072-8.
- [Unb12] **Unbekannt, 2012:** *Zeit zum Aufspringen: Telemetriesysteme starten durch*. In: *Agrartechnik* 5, S. 10–13.
- [USD14] **USDA, 2014:** *U.S. domestic corn use*. URL: <http://www.ers.usda.gov/media/866543/cornusetable.html> (letzter Aufruf am: 29.08.2014).

- [Vet13] **Vetter, M., 2013:** *Analyse von Ernteketten für Siliergüter anhand realer Prozessdaten*. Bachelorarbeit. München: Technische Universität.
- [WDN14] **Wendland, M., Demmel, M., Nesper, S., 2014:** *Pflanzenernährung und Düngung: Verfahrenstechnik*. In: *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau*. 13. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV-Buchverlag, Landwirtschaftsverlag, S. 195–304. ISBN: 978-3-8354-0716-9.
- [Wil97] **Wildemann, H., 1997:** *Logistik Prozessmanagement*. München: Transfer-Centrum. ISBN: 3-931-511-17-0.
- [Win14] **Winkler, B., 2014:** *Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten*. In: 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, Dresden, 11.–12. März, S. 14–21.
- [Wun10] **Wunder, A., 2010:** *Systemanalyse leistungsfähiger Technologieketten in der Flüssigmistausbringung*. Bachelorarbeit. München: Technische Universität.
- [Wut13] **Wutz, J., 2013:** *Verfahrenstechnische und wirtschaftliche Analyse selbstfahrender Überlademaschinen in der Biomassesubstraterntekette: Datenerhebungen zur Bachelorarbeit*. Bachelorarbeit. München: Technische Universität.

Anhang

A Abbildungen und Tabellen

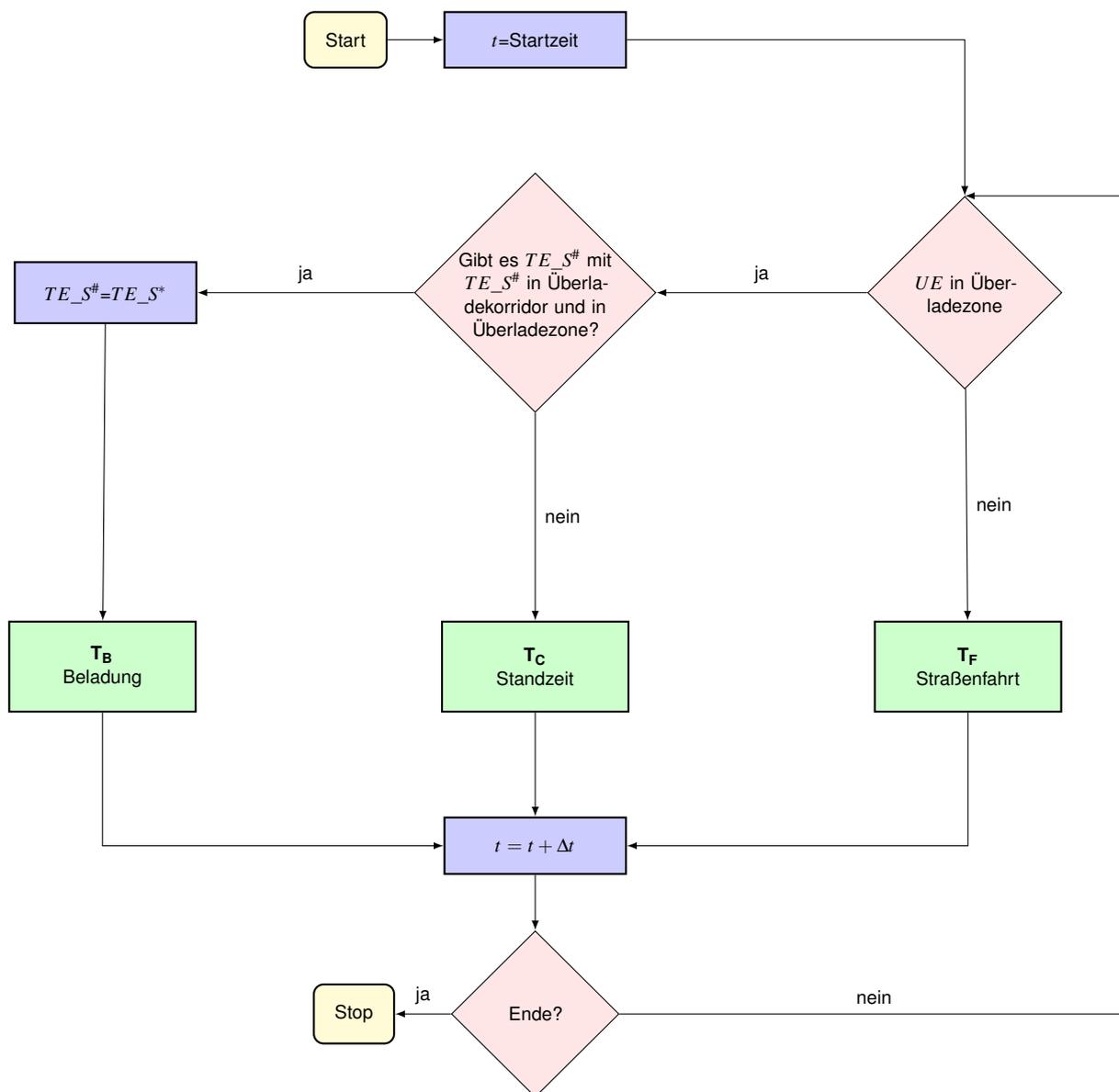


Abbildung A.1: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladeeinheit zur Bodenaufnahme

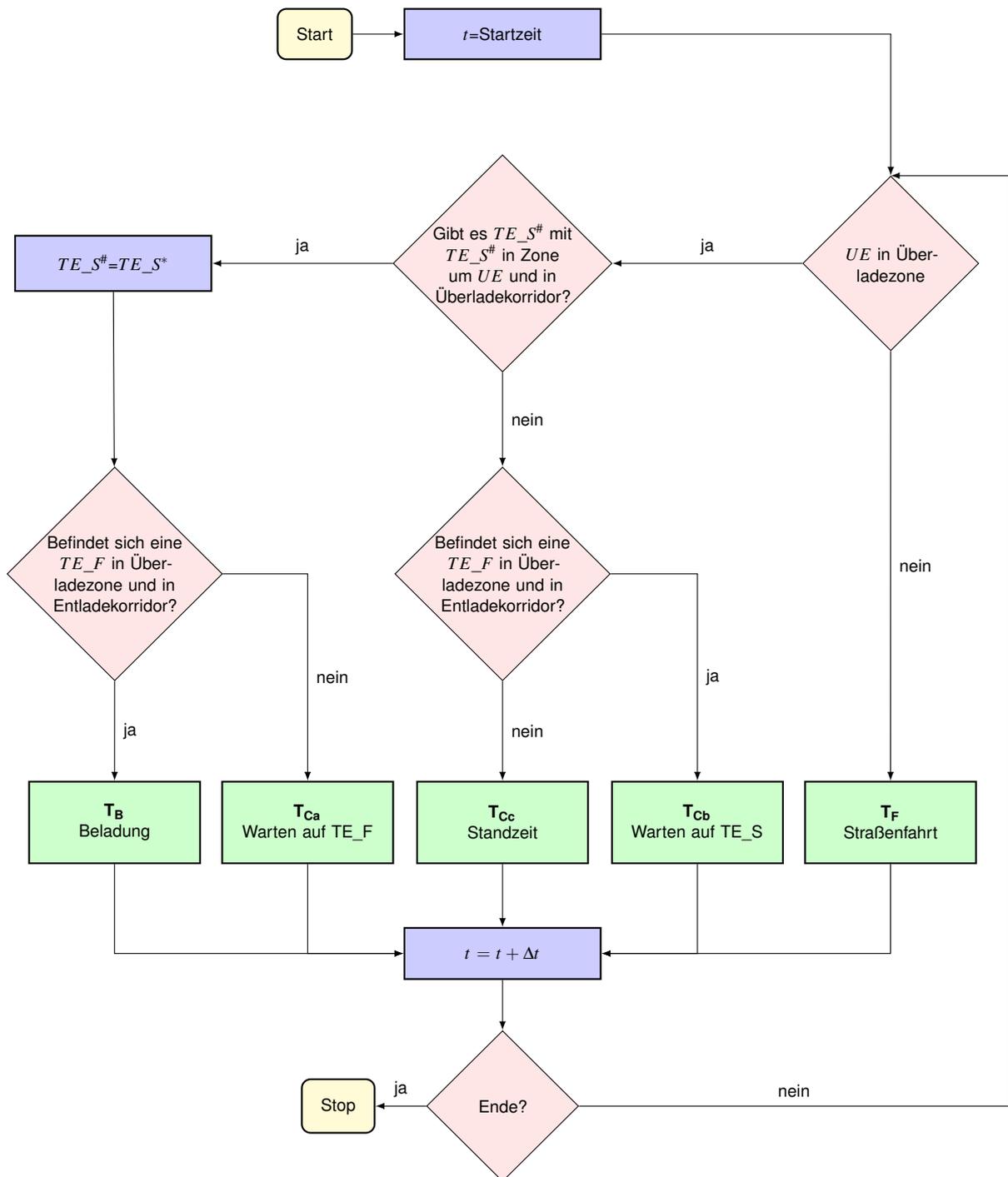


Abbildung A.2: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladeeinheit mit Bunkeraufnahme

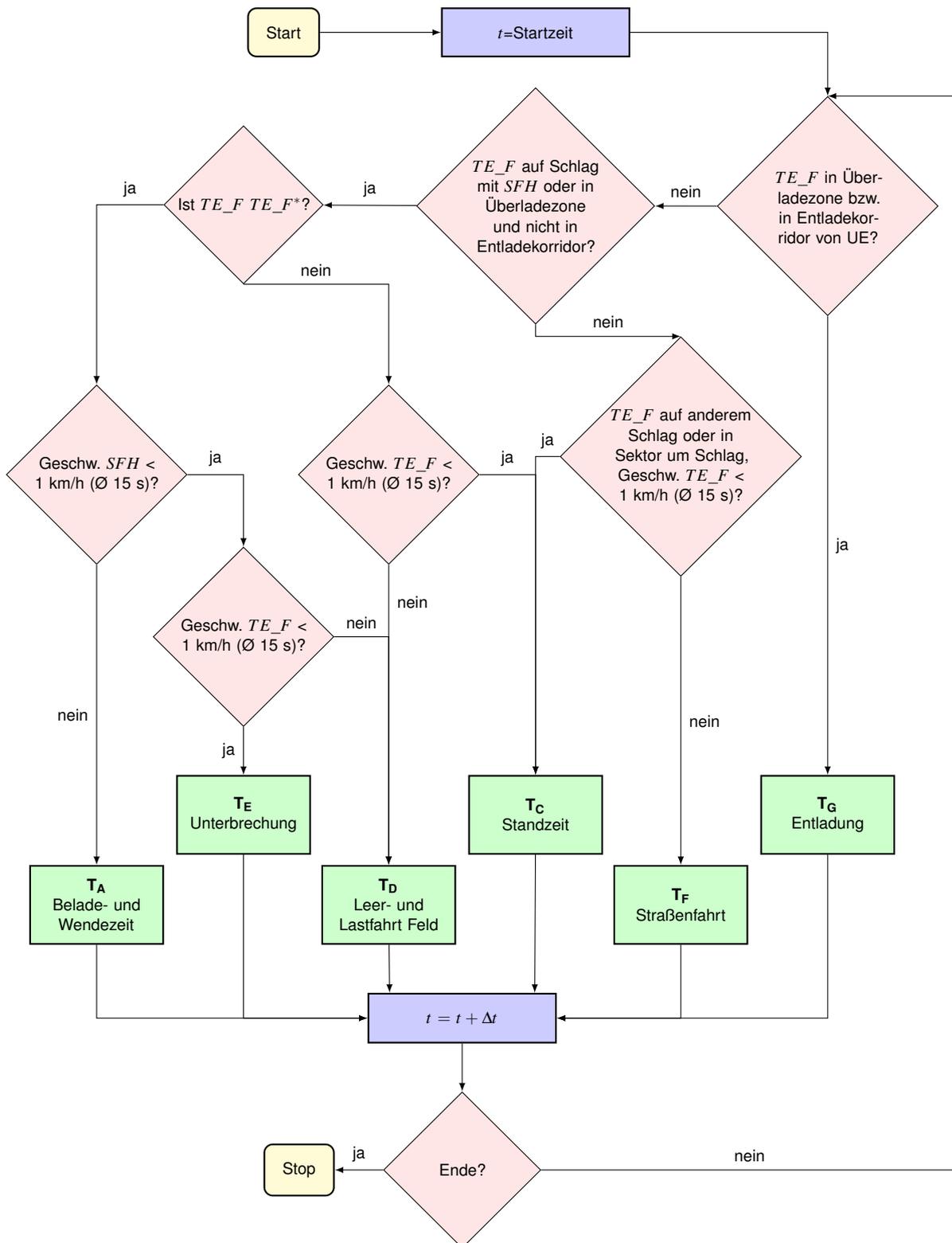


Abbildung A.3: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Feldtransporteinheit in dreiphasigen Häckselketten

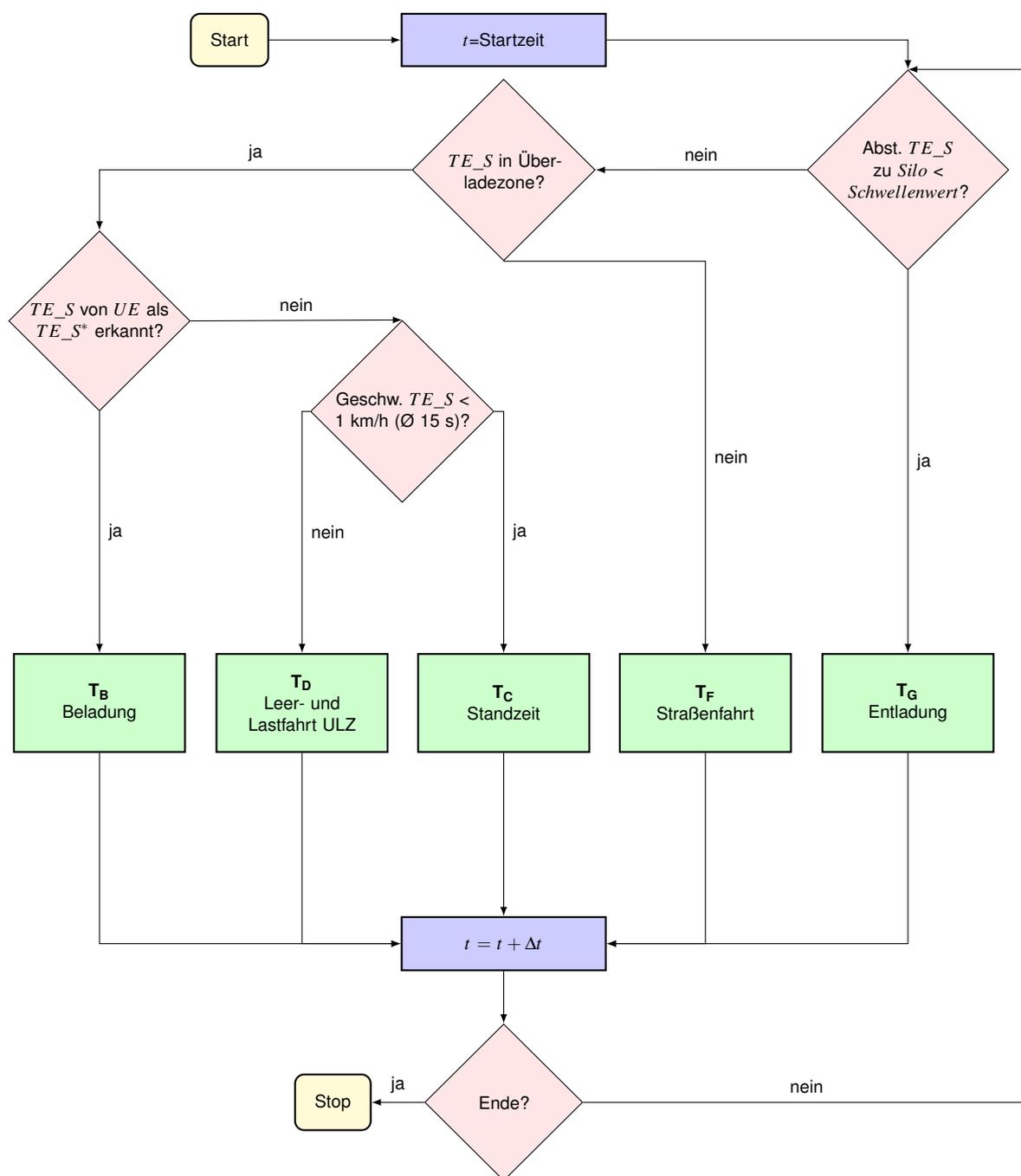


Abbildung A.4: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Straßentransporteinheit in dreiphasigen Häckselketten

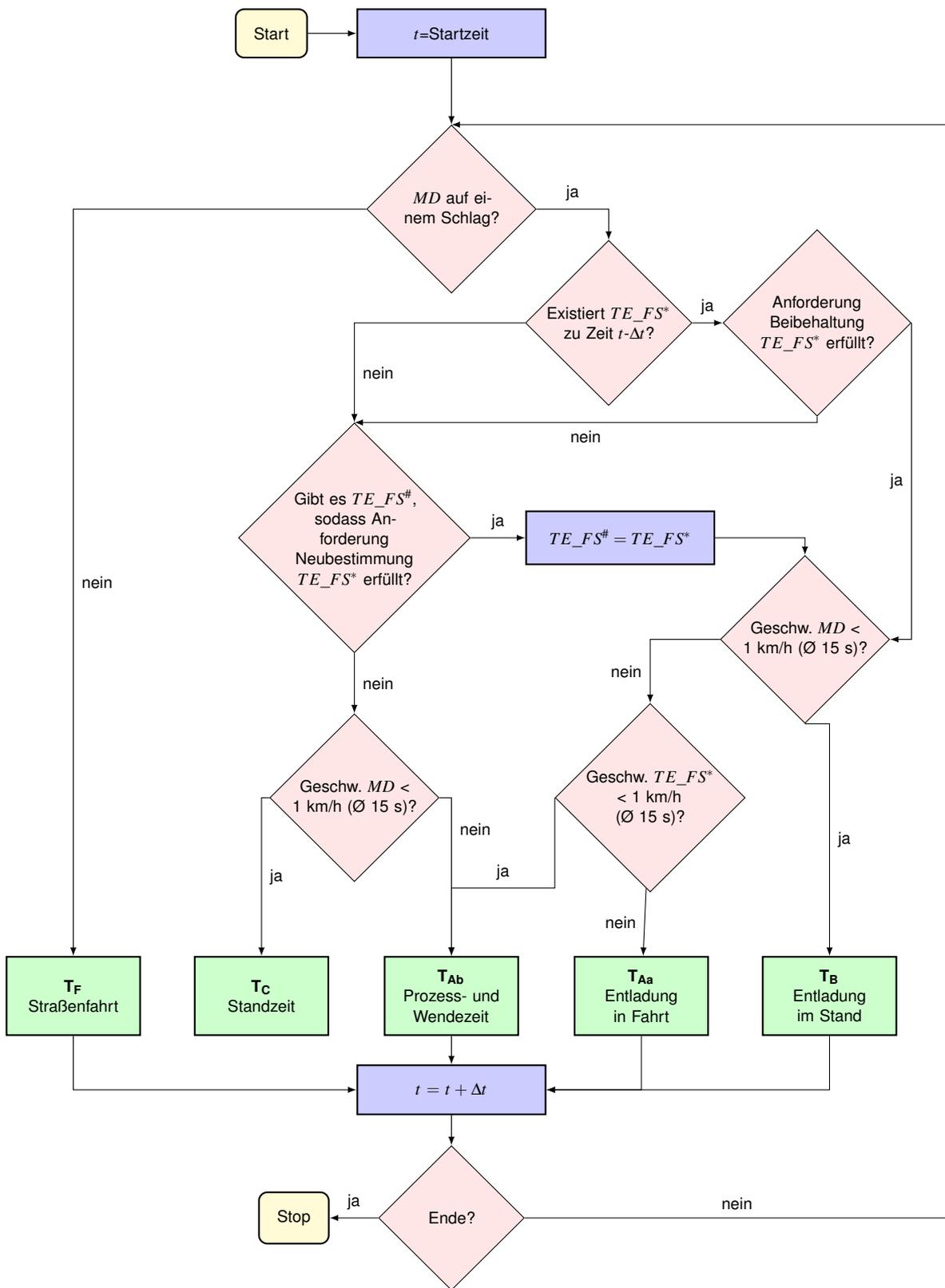


Abbildung A.5: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Mährescher

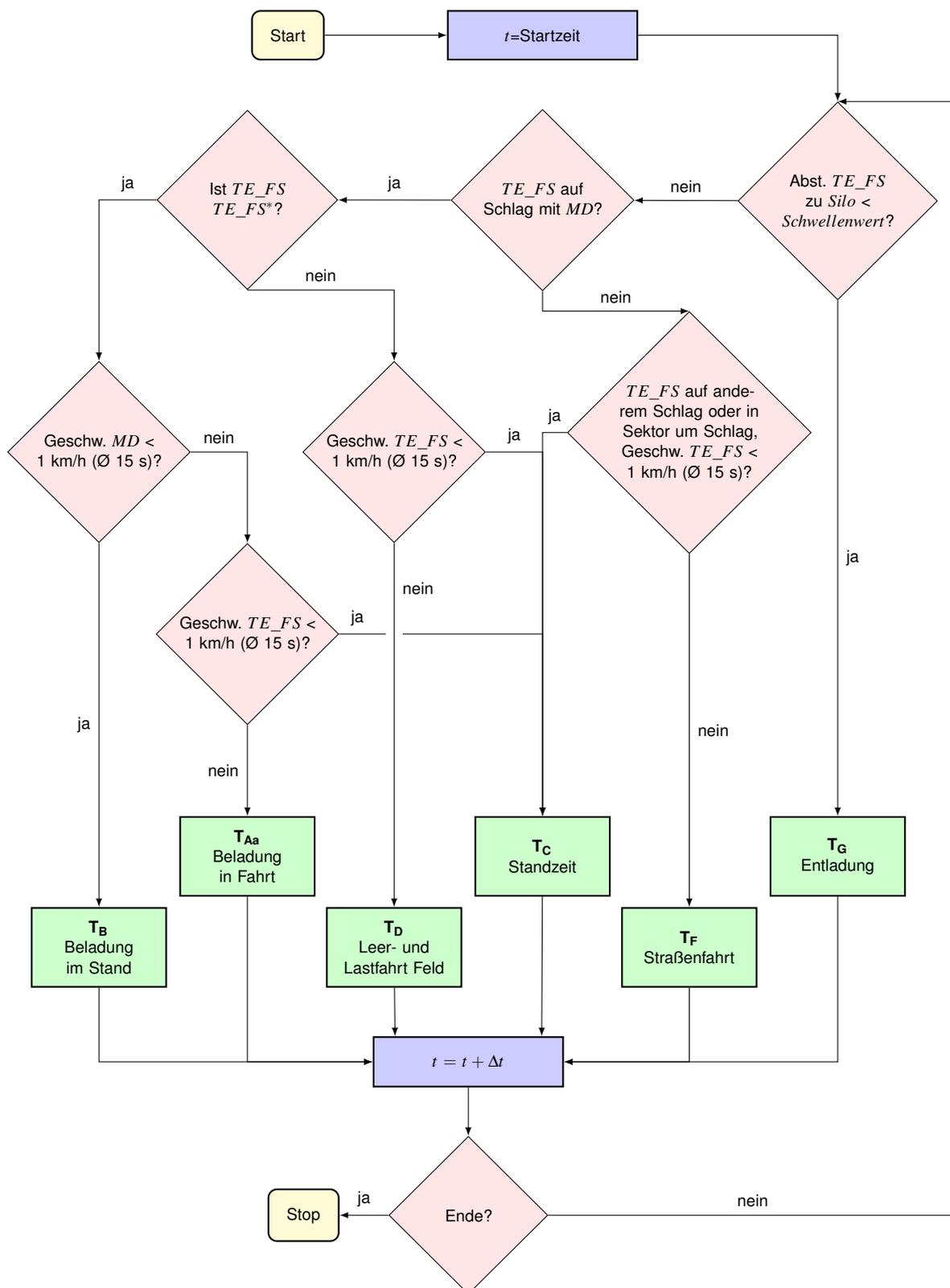


Abbildung A.6: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Transporteinheit in der einphasigen Getreideernte

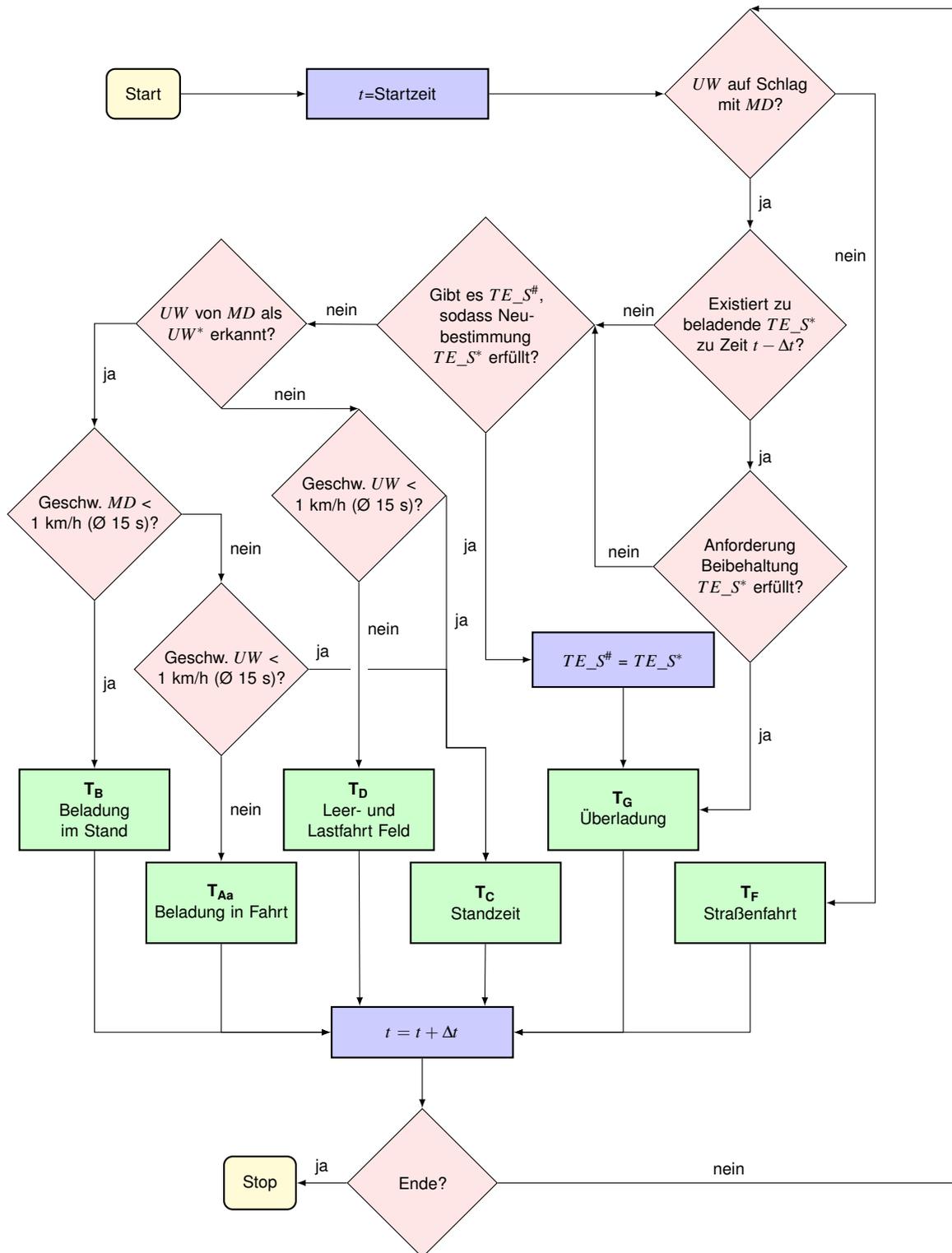


Abbildung A.7: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Überladewagen in der mehrphasigen Getreideernte

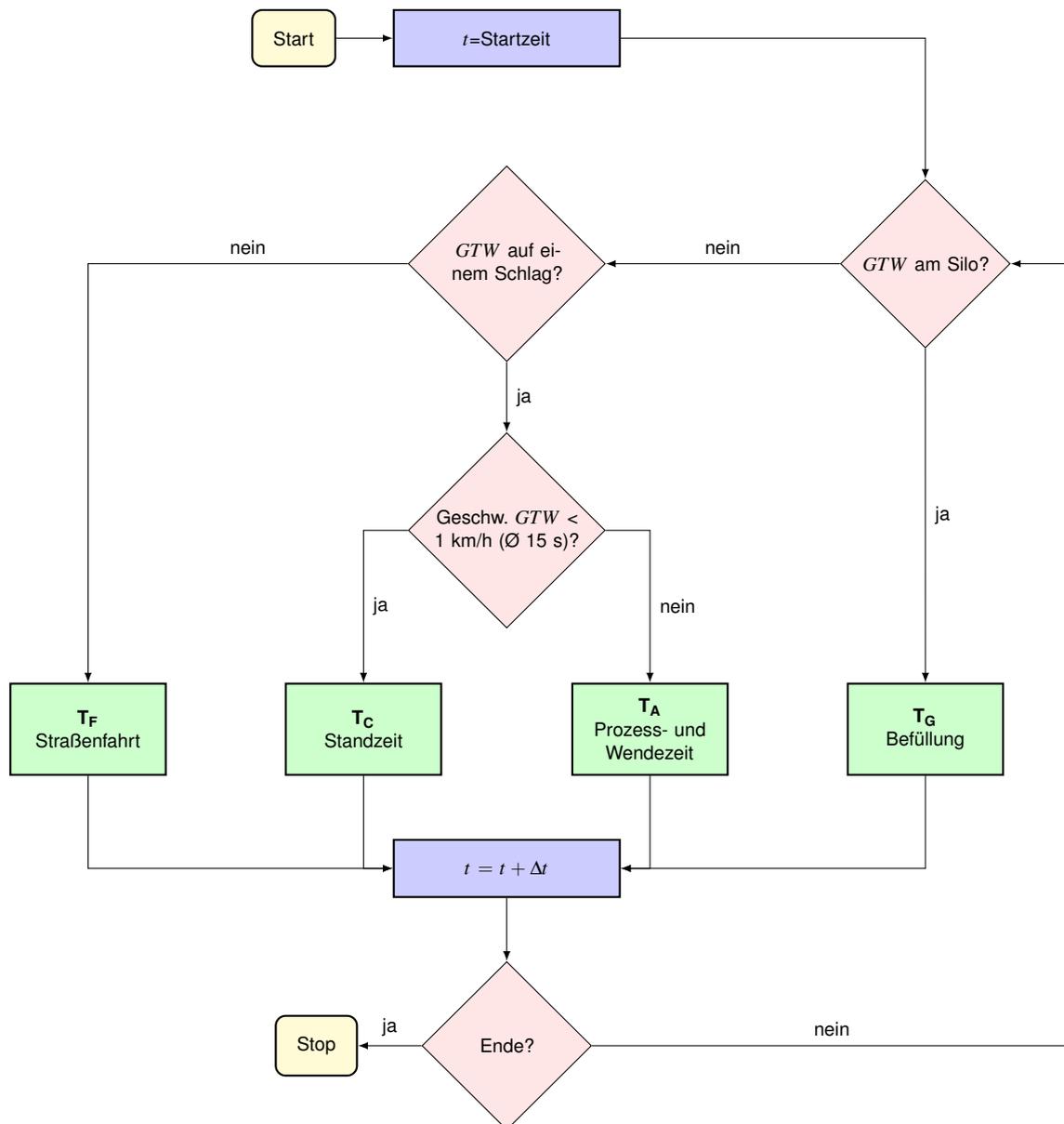


Abbildung A.9: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Gületankwagen

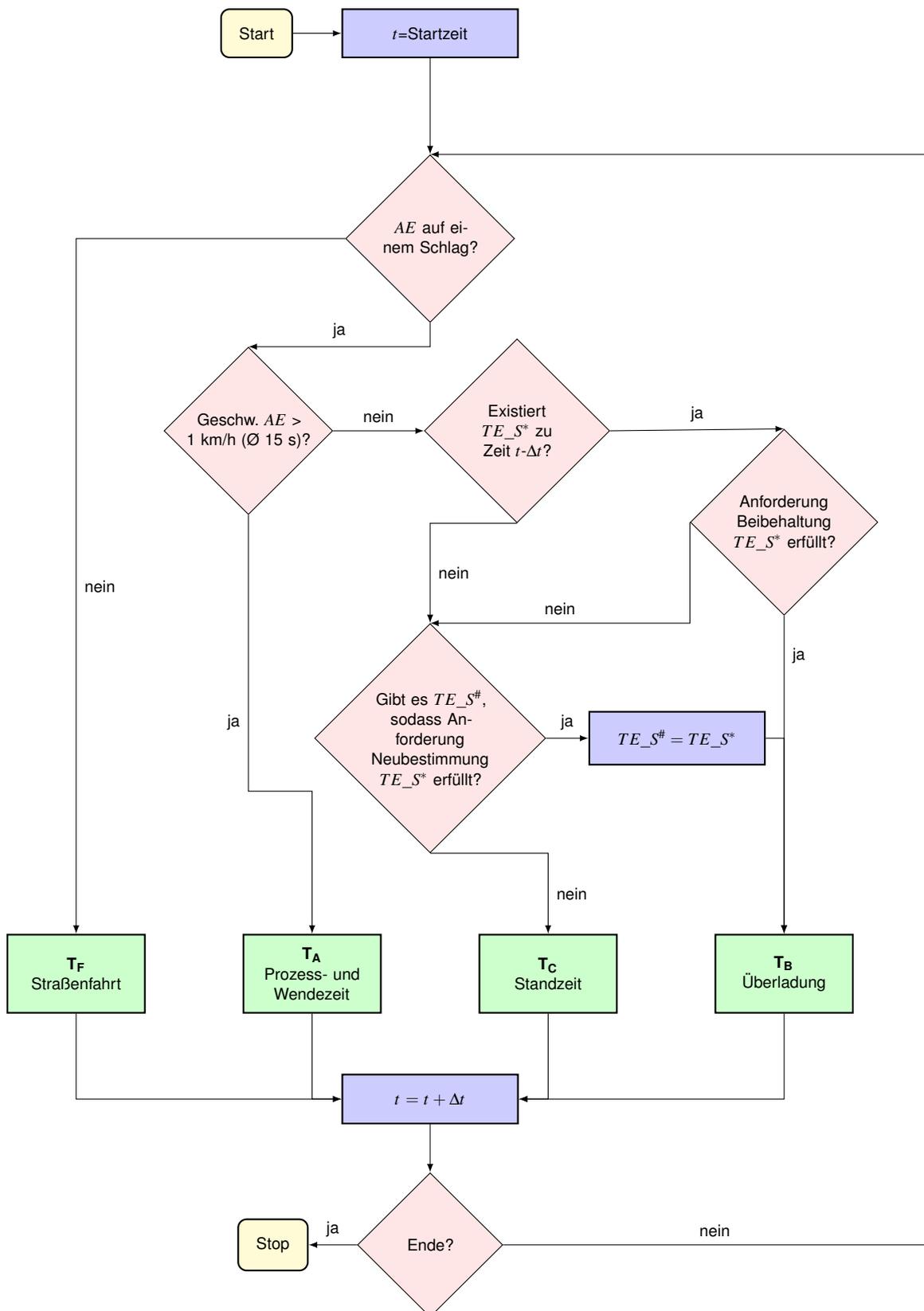


Abbildung A.10: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände für eine Ausbringeinheit in der mehrphasigen Flüssigmistausbringung

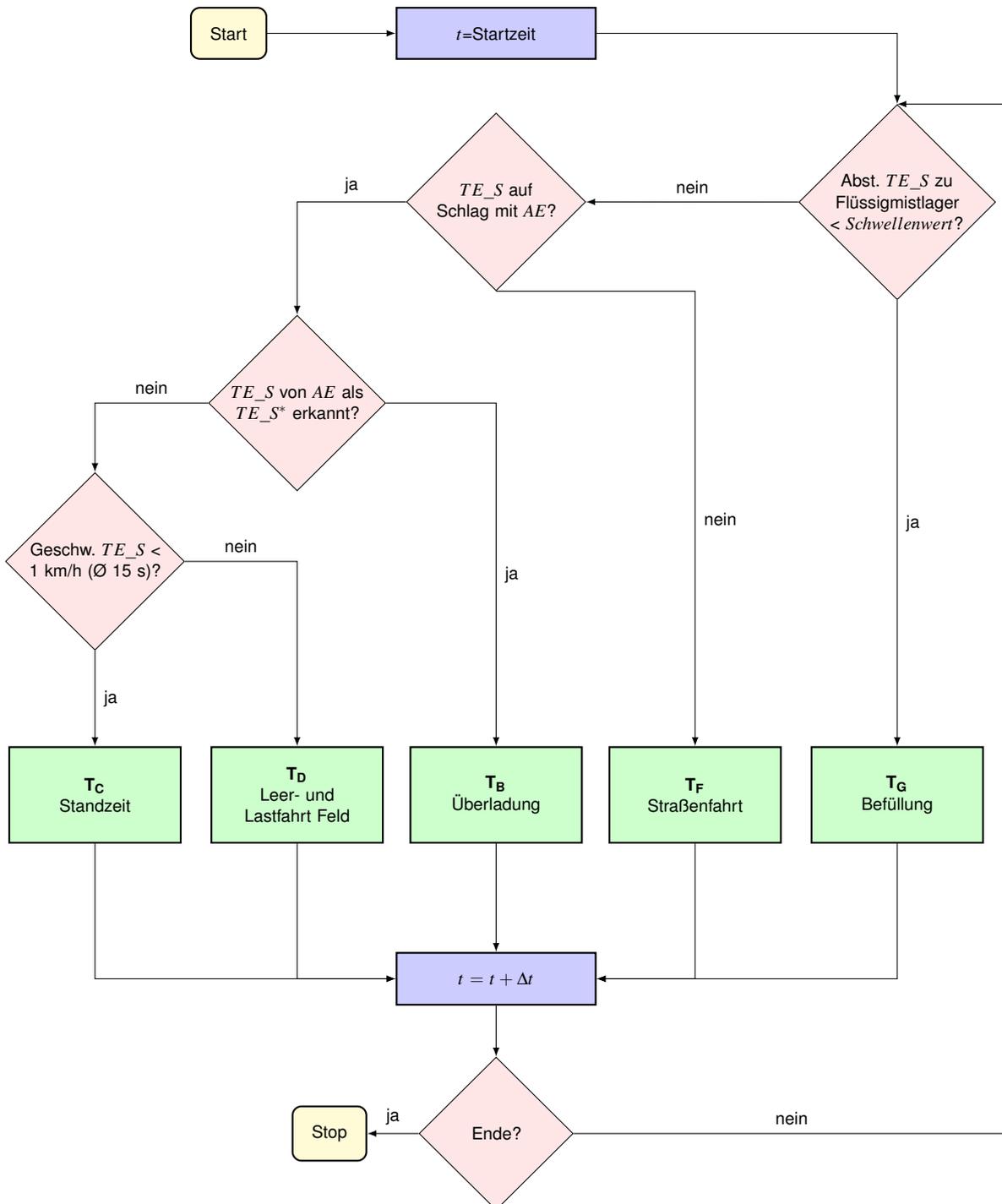


Abbildung A.11: Flussdiagramm Zuweisung Betriebszustände Straßentransporteinheit bei der mehrphasigen Flüssigmistausbringung

Tabelle A.1: Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Ernteketten für Siliergüter

Fahrzeugklasse	Betriebszustand	Farbhinterlegung	Positionssymbol
Ernte mit LW			
LW	Prozess- und Wendezeit (T_A)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Entladung (T_G)	Gelb	●
Ernte mit SFH			
SFH	Prozess- und Wendezeit (T_A)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leerfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Unterbrechung (T_E)	Rot	▼
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
TE_FS, TE_F	Belade- und Wendezeit (T_A)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Unterbrechung (T_E)	Rot	▼
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Entladung (T_G)	Gelb	●
TE_S	Beladung (T_B)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt ULZ (T_D)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Entladung (T_G)	Gelb	●
UE	Beladung (T_B)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■

Tabelle A.2: Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Getreideernteketten

Fahrzeugklasse	Betriebszustand	Farbhinterlegung	Positionssymbol
MD	Entladen in Fahrt (T_{Aa})	Grün	◆
	Prozess- und Wendezeit (T_{Ab})	Orange	●
	Entladen im Stand (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
TE_FS	Beladung in Fahrt (T_{Aa})	Grün	◆
	Beladung im Stand (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Entladung (T_G)	Gelb	●
UW	Beladung in Fahrt (T_{Aa})	Grün	◆
	Beladung im Stand (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Überladung (T_G)	Gelb	●
TE_S	Beladung (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Entladung (T_G)	Gelb	●

Tabelle A.3: Farbliche Hinterlegung und Positionsdarstellungssymbol in Abhängigkeit vom Betriebszustand für Verfahren der Flüssigmistausbringung

Fahrzeugklasse	Betriebszustand	Farbhinterlegung	Positionssymbol
GTW	Prozess- und Wendezeit (T_A)	Grün	◆
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Befüllung (T_G)	Gelb	●
AE	Prozess- und Wendezeit (T_A)	Grün	◆
	Überladung (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
TE_S	Überladung (T_B)	Rot	▼
	Standzeit (T_C)	Braun	▲
	Leer- und Lastfahrt Feld (T_D)	Orange	●
	Straßenfahrt (T_F)	Blau	■
	Befüllung (T_G)	Gelb	●

NR	Schlag	Beladen	Entladen	Gesamtstrecke [km]	Umlaufzeit [min]
1	Schlag: 4	08:28-08:42	08:59-09:07	18.6000	
2	Schlag: 5	09:21-09:36	09:51-09:55	37.3000	52
3	Schlag: 6	10:09-10:20	10:36-10:40	54.8000	45
4	Schlag: 6, 7	10:55-11:13	11:27-11:31	73.8000	51
5	Schlag: 3	11:40-11:47	11:56-12:01	86.5000	29
6	Schlag: 2	12:15-12:23	12:30-12:35	93.9000	35
7	Schlag: 1	12:51-13:01	13:10-13:22	103	40
8	Schlag: 1	13:29-13:36	13:43-13:58	112	34

Abbildung A.12: Ausgabetable zur Analyse eines Einzelfahrzeugs einer Häckselkette

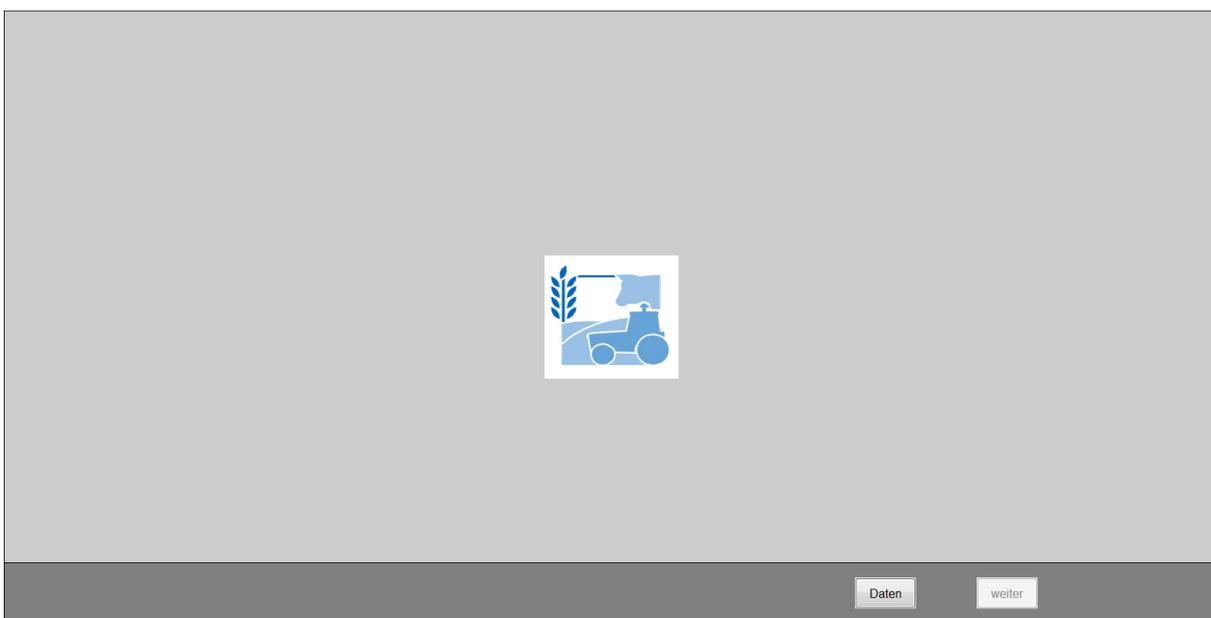


Abbildung A.13: Hauptfenster der Analyse-Anwendung, Startansicht

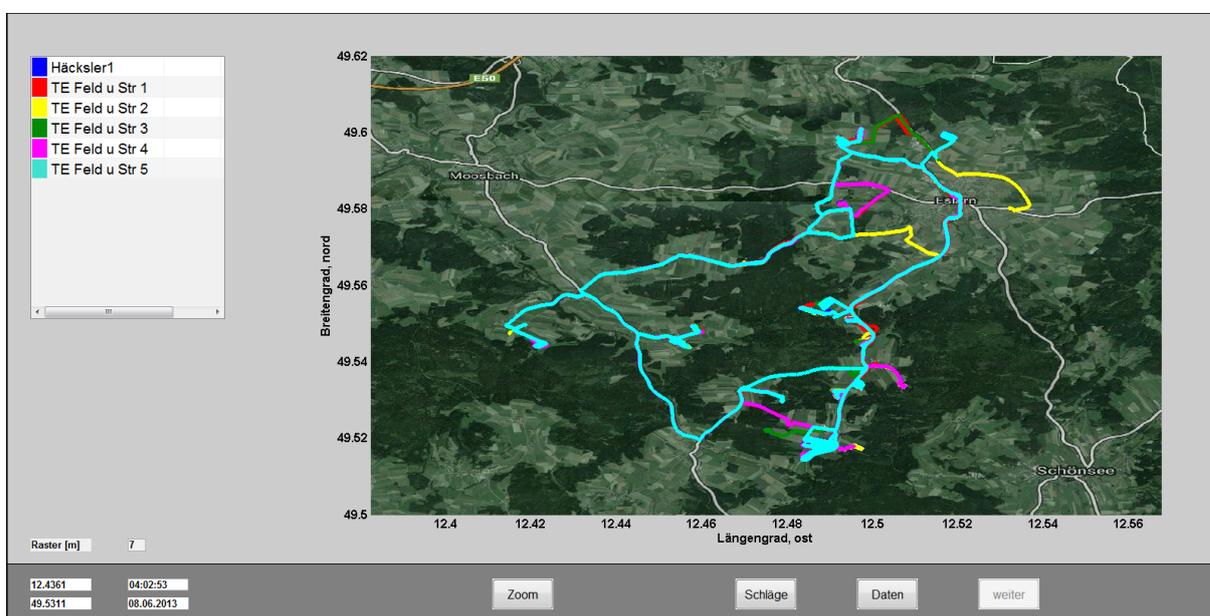


Abbildung A.14: Hauptfenster der Analyse-Anwendung mit Daten und Hintergrundkarte

Tabelle A.4: Dateninhalte Ertragserfassung Feldhäcksler

Parameter	Format / Einheit	Beispielwert
GPS Längengrad	°	12,2356740792
GPS Breitengrad	°	49,4810468913
Ertragsmenge	g	13990,382
Aktivität Ertragserfassung	1/0	1
Fahrgeschwindigkeit	km/h	5,035
Kraftstoffverbrauch	ml	20,575
Feuchte	%	73,410
Schnittlänge	mm	6,000
Silagezusatz	ml	-
Höhe	m	435,335
Arbeitsbreite	m	7,500
Distanz	m	1,475
Zeitpunkt	tt.mm.jjjj HH:MM:SS.SSS	08.10.2013 06:28:02.997

Tabelle A.5: Dateninhalte Telemetriedatensatz Mähdrescher

Parameter	Format / Einheit	Beispielwert
Datum, Uhrzeit	tt.mm.jjjj HH:MM:SS	07.08.2012 12:38:43
Seriennummer	-	01234567
GPS Längengrad	°	10,81007
GPS Breitengrad	°	49,96138
Fahrgeschwindigkeit	km/h	6,96
Motordrehzahl	U/min	1123
Motorauslastung	%	56,66
Haspelumfangsgeschwindigkeit	km/h	6,84
Tischposition	%	51
Dreschtrommeldrehzahl	U/min	854
Korbposition	mm	14
Gebälasedrehzahl	U/min	1263
Rotor- / Schüttlerdrehzahl	U/min	853
Obersiebposition	mm	16
Untersiebposition	mm	13
Verluste Abscheidung	-	3,34
Verluste Siebe	-	1,86
Strohhäcksler	1/0	an
Korntank 70	1/0	an
Korntank 100	1/0	aus
Korntankentleerung	1/0	aus
Schnitthöhe	%	71,7
Kornfeuchte	%	13,9
Betriebsstunde	h	955,33
Durchsatz	t/h	46,24
Flächenleistung	ha/h	7,95
Ertrag	t/ha	7,04
bearbeitete Fläche	ha	3,42
Dieselfüllstand	%	47
Feuchtemittelwert	%	15,3
Arbeitspostion	1/0	an
Dreschtrommel	1/0	an
Empfindlichkeit Abscheidung	-	2
Empfindlichkeit Siebe	-	2
Fruchtart	-	Weizen
spezifisches Fruchtgewicht	g/l	750

B Abkürzungen

algorithm.	algorithmisch
agroXML	Datenaustauschformat für die Landwirtschaft, basierend auf dem XML
Akh	Arbeitskraftstunde
AM	Arbeitsmaschine solo
Anz.	Anzahl
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
bzw.	beziehungsweise
CAN	Controller Area Network
CEP	Circular Error Probable
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DGNSS	Differentielles Globales Navigationssatellitensystem
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP	Dilution of Precision
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EU	Europäische Union
Geschw.	Geschwindigkeit
GGA	Global Positioning System Fix Data
GHTS	Grain Handling and Transportation System
GIS	Geoinformationssystem

GLL	Geographic Position Latitude and Longitude
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema; russisches GNSS
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
GSA	GPS DOP and Active Satellites
GSV	GNSS Satellites in View
GTW	Gülletankwagen-Gespann
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
industr.	industriell
ISO	International Organization for Standardization
ISOBUS	Datenbussystem konform zur Norm ISO 11783
ISOXML	Datenformat konform zur Norm ISO 11783
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LIFO	Last in, first out
LW	Ladewagen-Gespann
MD	Mähdrescher
MIR	Modulare Integrierte Rübenlogistik
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
NMEA	National Marine Electronics Association
NN	Normalnull
RMC	Recommended Minimum Sentence C
RMS	Root Mean Square
RTK	Real-Time Kinematik

SFH	Selbstfahrhäcksler
TE	Transporteinheit
TE*	Gegenwärtig zu be- / entladende Transporteinheit
TE#	Akzentuierung einer Transporteinheit
TE_FS	Transporteinheit Feld und Straße
TE_F	Transporteinheit Feld
TE_S	Transporteinheit Straße
TGL	Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
t_{xxx}	Teilzeit nach KTBL-Zeitgliederungsschema, numerisch indiziert
T_{xxx}	Aggregierte Teilzeit, alphabetisch indiziert
UE_Bo	Überladeeinheit Bodenaufnahme
UE_Bu	Überladeeinheit Bunkeraufnahme
URL	Uniform Resource Locator
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time, Coordinated
ULZ	Überladezone
UW	Überladewagen
vgl.	vergleiche
VTG	Course over Ground and Ground Speed
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS	World Geodetic System
WGTA	Western Grain Transportation Act
XML	Extensible Markup Language 455.24411pt

C Mathematische Notationen

a, b, \dots, z	Bezeichnungen für Variablen
$\alpha, \beta, \dots, \omega$	Bezeichnungen für Winkel und Skalare
$\text{conv}(M)$	Konvexe Hülle von M
c^T	Transponierung von Vektor c
G	Meridianbogen
H^+, H^-	Oberer, unterer Halbraum
L_0	Hauptmeridian
$\#L_0$	Nummer des Hauptmeridians
M	Bezeichnung für eine allgemeine Menge
N	Querkrümmungshalbmesser
N_β	Krümmungsradius
P	Bezeichnung für ein allgemeines Polygon
S	Schwerpunkt eines Polygons
V	Bezeichnung für einen allgemeinen Vektorraum
$(x, y) \in \mathbb{R}^2$	Vektor aus \mathbb{R}^2
Δ	Indikation Differenz
\in	Elementzeichen
\mathbb{R}	Körper der reellen Zahlen
\mathbb{R}^n	n -dimensionaler Vektorraum über \mathbb{R}

$\mathbb{R}^{n,m}$	Raum der Matrizen über \mathbb{R} mit n Zeilen und m Spalten
$<, \leq, =, >, \geq$	Vergleichsoperatoren, bei Vektoren elementweise
\subseteq	Teilmenge
Σ	Summe
\iff	Äquivalenz
x^*	Akzentuierung von x
\emptyset	Durchschnitt

D Verwendete Maßeinheiten

dBm	Dezibel Milliwatt
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
HH:MM:SS	Zeitformat; Stunde (zweistellig), Minute (zweistellig), Sekunde (zweistellig)
Hz	Hertz
km	Kilometer
kW	Kilowatt
l	Liter
m	Meter
m³	Kubikmeter
MHz	Megahertz
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
ns	Nanosekunde
s	Sekunde
t	Tonne
tt.mm.jjjj	Datumsformat; Tag (zweistellig), Monat (zweistellig), Jahr (vierstellig)

U	Umdrehung
°	Grad, Winkelmaßeinheit
%	Prozent
€	Euro