Fakultät Agrarwissenschaften
Institut für Agrartechnik
Universität Hohenheim
Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion (440d)
Prof. Dr. sc. agr. Hans W. Griepentrog

Entwicklung einer kontextbasierten Systemarchitektur zur Verbesserung des kooperativen Einsatzes mobiler Arbeitsmaschinen

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften

vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften

von

Dipl.-Ing. agr. Thilo Steckel
aus Gütersloh
2018

Die vorliegende Arbeit wurde am 23.11.2017 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung:	17.01.2018

Leiter der Prüfung:	Prof. Dr. sc. agr. Markus Rodehutscord
Berichterstatter 1. Prüfer:	Prof. Dr. sc. agr. Hans W. Griepentrog
Mitberichterstatter 2. Prüfer:	Prof. Dr. agr. habil. Heinz Bernhardt
Mitberichterstatter 3. Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

Danksagung

Mit der vorliegenden Dissertation habe ich das Ziel verfolgt, die in der Landwirtschaft häufig zu beobachtende Lücke zwischen theoretischer und tatsächlicher Leistung bei maschinengestützten Prozessen zu untersuchen, durch Entwicklung quantitativer Methoden bewertbar zu machen und Ansätze zur Reduzierung zu liefern. Die Problemstellung ergab sich im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte die ich bei meinem Arbeitgeber CLAAS im Bereich der Vorentwicklung durchgeführt habe.
Ich danke Herrn Prof. Dr. Hans W. Griepentrog und Herrn Prof. Dr. Heinz Bernhardt für die Betreuung bei der Erstellung der Arbeit und die fruchtbaren Diskussionen. Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger für die Übernahme der Rolle als Drittprüfer.
Weiterhin danke ich den Kollegen und Freunden Sebastian Scholz, Thomas Kersting und Heinrich Warkentin für die Unterstützung bei der softwaretechnischen Implementierung, meinem Bruder Jesko Steckel für die Diskussion und Unterstützung bei der Formulierung des mathematischen Modells, Herrn Prof. Dr. Willi Nüßer von der FHDW Paderborn für die Diskussion informationstheoretischer Aspekte, Herrn Dr. Frank Volz von der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft für die Unterstützung bei der empirischen Erhebung und Herrn Dr. Gerhard Moitzi für die Überlassung eines Datensatzes zur Analyse von Transportprozessen.
Ich möchte meinen Eltern danken, die mir eine fundierte Ausbildung als Basis für diese Arbeit ermöglicht haben.
Herzlichen Dank an meine Frau Alice und unsere Tochter Friederike, dass ich diese Arbeit an der Grenze zwischen Beruf und Familienleben verfassen konnte.

Thilo Steckel
Gütersloh, 31. März 2018

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ..... **iii**

Inhaltsverzeichnis ..... **iv**

Abbildungsverzeichnis ..... **viii**

Tabellenverzeichnis ..... **xi**

Abkürzungsverzeichnis ..... **xiii**

Symbolverzeichnis ..... **xviii**

1 Einleitung **1**
1.1 Situation und Problemstellung 1
1.2 Gegenstand und Ziele dieser Arbeit 5
1.3 Aufbau dieser Arbeit 5

2 Stand der Forschung und der Technik **7**
2.1 Methoden und Technologien zur Steuerung mobiler, landwirtschaftlicher Prozesse 7
2.1.1 Precision Agriculture und Smart Farming 7
2.1.2 Automatisierung 9
2.1.3 Farm-Managementsysteme 9
2.2 Organisationstheoretische Analyse des landwirtschaftlichen Arbeitsumfeldes 12
2.3 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen 15
2.3.1 System, Modell und Komplexität 15
2.3.2 Ereignis und Kontext 19
2.3.3 Geoobjekte 23
2.3.4 Prozess 24
2.3.5 Selbstorganisation 24
2.3.6 Systemarchitektur 25
2.3.7 Simulation 26
2.3.8 Agenten und Entscheidungstheorie 28
2.3.9 Logistische Kennlinien und Kennfelder 31
2.4 Relevante Forschungsprojekte 32
2.4.1 AGRICOLA 32
2.4.2 INA 32
2.4.3 Robot2Business 33
2.4.4 iGreen 33
2.4.5 marion 34
2.4.6 M2M-Teledesk 35
2.4.7 pre agro 35
2.4.8 LaSeKo 35
2.4.9 FutureFarm 36
2.4.10 PreSeed 36

2.4.11 KOMOBAR 37
2.5 Anwendungsfall Silomaisernte 37
2.5.1 Teilprozess „Häckseln von Silomais“ 41
2.5.2 Teilprozess „Transport von Erntegut“ 42
2.5.3 Teilprozess „Einlagerung von Erntegut“ 43

3 Material und Methoden 47
3.1 Kontext-Modell 47
3.2 Ableitung von Komponenten aus dem Kontext-Modell 48
3.2.1 Gruppenidentifikation 48
3.2.1.1 Indikatoren für die Beschreibung von Kooperationsbeziehungen 50
3.2.1.2 3-stufiges Konzept zur Ermittlung von Indikatoren 51
3.2.1.3 Komponentendarstellung 54
3.2.2 Prozess- und Leistungskonfiguration 54
3.2.2.1 Typologisierung und Beschreibung von Ressourcen 56
3.2.2.2 Strukturierung und Beschreibung von Leistungen 59
3.2.2.3 Konfiguration 61
3.2.2.4 Komponentendarstellung 62
3.2.3 Geoobjekt-Managementkomponente 63
3.2.3.1 Geometrie von Geoobjekten 63
3.2.3.2 Topologie von Geoobjekten 64
3.2.3.3 Thematik von Geoobjekten 65
3.2.3.4 Dynamik von Geoobjekten 66
3.2.3.5 Geoobjekte und damit verbundene Zustände und Ereignisse 67
3.2.3.6 Komponentendarstellung 67
3.2.4 Ressourcenspezifisches Zeit-Arbeitsschema 68
3.2.4.1 Ressourcenzustände 68
3.2.4.2 Arbeitswirtschaftliche Typologie 69
3.2.4.3 Zusammenführung von Ressourcenzuständen und arbeitswirtschaftlicher Typologie . 70
3.2.4.4 Komponentendarstellung 73
3.2.5 Speicherobjekte 73
3.2.5.1 Merkmale von Speicherobjekten 73
3.2.5.2 Komponentendarstellung 74
3.2.6 Managementsysteme 74
3.2.7 Ressourcen als verteilte, kooperierende Agenten 75
3.3 Kontext-basierte Systemarchitektur für den Anwendungsfall der Silomaisernte 76
3.3.1 Aufbau der Systemarchitektur 76

3.3.2 Verarbeitung von Ereignissen in der Systemarchitektur ... 79
3.3.2.1 Funktionsprinzip am Beispiel eines Anwendungsfallfragmentes ... 79
3.3.2.2 Verallgemeinerung des Funktionsprinzips ... 80
3.4 Gesamtmodell ... 82
3.4.1 Konzept kommunizierender Speicherobjekte ... 83
3.4.2 Maschinen-Prozessparameter und daraus abgeleitete Größen ... 84
3.4.3 Visualisierung der Prozessumgebung ... 86
3.4.4 Nachrichten für die Analyse, Steuerung und Dokumentation des Prozesses ... 88
3.4.5 Implementierung des Anwendungsfalles in die Simulationsumgebung ... 88
3.5 Mathematisches Modell zur Erzeugung von Kennfeldern ... 91
3.5.1 Teilprozess Häckseln ... 91
3.5.2 Teilprozess Transport ... 92
3.5.3 Teilprozess Verdichten ... 93
3.5.4 Gesamtprozess ... 93
3.6 Technische Grundlagen zur Ermittlung realistischer Parameterwerte und Parameterfunktionen für Simulation und Kennfelder ... 94

4 Ergebnisse ... 99
4.1 Empirische Erhebung zur Absicherung prozessrelevanter Kennzahlen ... 99
4.2 Ermittelte Parameterwerte und Parameterfunktionen ... 101
4.2.1 Teilprozess Häckseln ... 101
4.2.2 Teilprozess Transport ... 103
4.2.3 Teilprozess Verdichten ... 106
4.2.4 Zusammenfassende Darstellung von Kennzahlen ... 107
4.3 Simulation des Ernteprozesses und analytisches Modell ... 107
4.3.1 Ergebnisse Teilprozess Häckseln ... 108
4.3.2 Ergebnisse Teilprozess Transport ... 108
4.3.3 Ergebnisse Teilprozess Verdichten ... 109
4.3.4 Ergebnisse Gesamtprozess ... 110
4.4 Ergebnisdetails für unterschiedliche Leistungsniveaus ... 113
4.4.1 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Häckseln ... 113
4.4.2 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Transport ... 113
4.4.3 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Verdichten ... 115

4.5 Zusammenfassende Darstellung der Kennfelder ... 117

5 Diskussion ... 121
5.1 Beitrag der Architektur zur entwickelten Lösung ... 122
5.2 Diskussion von simulativem und analytischem Ansatz ... 124
5.3 Ansätze zur Weiterentwicklung der dargestellten Lösung ... 126
5.3.1 Technologiezentrierte Ansätze ... 126
5.3.2 Organisationszentrierte Ansätze ... 127
5.3.3 Methodenzentrierte Ansätze ... 127
5.3.4 Fachliche Ansätze ... 128
5.3.5 Übertragung auf andere Anwendungsfelder ... 131
5.4 Bezug zu den eingangs formulierten Zielen ... 131

6 Zusammenfassung und Ausblick ... 133

Literaturverzeichnis ... 135

Anhang ... 147

Abbildungsverzeichnis

1.1 Zunahme von installierter und realisierbarer Leistung sowie Lücke nicht abgerufener Leistungsfähigkeit 3

2.1 Abgrenzung und Bestandteile von Precision Agriculture nach Auernhammer (2002) 8
2.2 Einordnung von FMS in die Value Chain nach *Porter (1985)* 11
2.3 Systembeziehungen im landwirtschaftlichen Arbeitsumfeld (R=Ressource) 13
2.4 Modelltypen dynamischer Systeme nach Syriakow (2003) ... 18
2.5 Beziehung von Geoobjekten Francois et al. (2010)) 20
2.6 9-Intersection-Schema nach Egenhofer (1998) 21
2.7 Struktur des Zeit-Kontextes nach ISO 19108 22
2.8 Gliederung von Produktionsfaktoren nach Gutenberg (1975) 23
2.9 Betrachtungsebenen von Geoobjekten nach Streit (2005), verändert 23
2.10 Zusammenhang von Ereignis, Aktivität und Prozess nach Page 26
2.11 Funktionsprinzip eines Agenten nach Wooldridge (2009) 29
2.12 Klassifikation der Dimensionen von Agenten nach Frank et al. (2004) 29
2.13 Erweitertes OCM-Modell nach Frank et al. (2004), verändert 30
2.14 Handlungsbestimmende Anteile in Agenten (Granot (2001), verändert) 31
2.15 Erforderliche Anzahl Transportfahrzeuge nach Transportentfernung bei konstantem Massenstrom (Mitterleitner et al. (2007), verändert) 39
2.16 Abhängigkeit der Dichte von der Trockenmasse bei Maissilagen (Richter et al. (2009), verändert) 40
2.17 Schnittbild Selbstfahrender Feldhäcksler (Haffert (2003), verändert) 41
2.18 Dichtefunktion für ausgewählte Futterpflanzen (Honig 1987) 44

3.1 Beziehung der Einzelkontexte 48
3.2 Strukturierung primärer und sekundärer Indikatoren (Kersting 2011) 51
3.3 3-stufiges Verfahren zur Gruppenidentifikation 52
3.4 Phasenmodell zum Lebenszyklus einer Arbeitsgruppe 54
3.5 Komponenten-orientierte Darstellung der Gruppenidentifikation 55
3.6 UML-Klassendiagramm zur Strukturierung von Ressourcen 57
3.7 Ablauf und Prinzip der Leistungskonfiguration 61
3.8 Begriffsbeziehungen der Leistungs- und Prozesskonfiguration 62
3.9 Komponenten-orientierte Darstellung des Konfigurators 62
3.10 Komponenten-orientierte Darstellung des Geoobjektmanagers 68
3.11 Hierarchie der Zeit-Arbeitselemente 69

3.12 Darstellung der Elemente des Zeit-Arbeitsschemas als Zustandsdiagramm 72
3.13 Komponenten-orientierte Darstellung des Zeit-Arbeitsschemas 73
3.14 Komponenten-orientierte Darstellung des Speicherobjektes. 74
3.15 Komponenten-orientierte Darstellung für Management-Informationssysteme 75
3.16 Alle Komponenten in der Übersicht 76
3.17 Darstellung des Agenten als Komponente mit benötigten und generierten Informationen 77
3.18 Verallgemeinerte Darstellung von Komponentenbeziehungen 77
3.19 Zusammenfassende Darstellung der Beziehungen zwischen den entwickelten Komponenten 78
3.20 Zuordnung von Komponenten zu Ressourcen 78
3.21 Beispielhafte Darstellung des Funktionsprinzips der Ereignisverarbeitung 79
3.22 Zeitliche Beziehungen in der Kommunikation 81
3.23 Informationsfluss im Gesamtsystem 82
3.24 Modellierter Prozess Ernte von Silomais (links) 83
3.25 Modellierter Prozess Ernte von Silomais (rechts) 84
3.26 Präzisierung von Ereignissen und Aktivitäten 84
3.27 Kommunizierende Speicherobjekte im Ernteprozess Silomais 85
3.28 Verfahrensspezifische Parameter und daraus abgeleitete Kennzahlen 85
3.29 Visualisierung der Prozessumgebung 88
3.30 Raumbezogene Zuordnung von prozessrelevanten Ereignissen 89
3.31 Visualisierung des Anwendungsfalles in der Simulationsumgebung 90
3.32 Zustandsdiagramm für Teilprozess Ernten 91
3.33 Benutzeroberfläche der Mapping-Anwendung (Ausschnitt) . 95
3.34 Regeln für die Erfassung von CAN-Bus-Parametern 95
3.35 Architektur des eingesetzten Telematikmoduls 96
3.36 Maschinenspezifische Konfiguration für BDE 97

4.1 Einschätzung der Befragten zu unterschiedlichen Leistungsniveaus von Prozessen und Ermittlung der relativen Leistungslücke 100
4.2 Durchsatzabhängiger Kraftstoffverbrauch SFH 102
4.3 Kraftstoffverbrauch der Transportfahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand 105
4.4 Stückkosten für den Teilprozess Häckseln 109
4.5 Stückkosten für den Teilprozess Transport 110
4.6 Stückkosten für den Teilprozess Verdichten 111
4.7 Stückkosten für den Gesamtprozess 112
4.8 Kennlinien für den Teilprozess Häckseln auf den Niveaus [50, 60, ...,100] sowie 85 % Ernteleistung 114

4.9 Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 50 % Ernteleistung 115
4.10 Kennlinien für den Teilprozess Verdichten auf den Niveaus [50, 60, ...,100] sowie 85 % Ernteleistung 116
4.11 Zusammenfassende, symbolische Darstellung der Kennfelder und ihrer Beziehungen 117

6.1 Zustandsdiagramm für Teilprozess Transport 150
6.2 Zustandsdiagramm für Teilprozess Verdichten 150
6.3 Kraftstoffverbrauch der Transportfahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand; Darstellung der Rohdaten 151
6.4 Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 85 % 152
6.5 Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 100 % 153
6.6 Automatisch generierte Rechnung 154
6.7 Interaktion von Agenten im ungerichteten Graphen 154

Tabellenverzeichnis

2.1 Modellvergleich nach Strube (1998) und Frank et al. (2004) mit Beispiel 30
2.2 Anhaltswerte zur Einschätzung der Silier- und Entnahmebedingungen (Nußbaum (2006), verändert) 40

3.1 Ergebnis Process Indicator Check für SFH 52
3.2 Struktur und Merkmale in Ressourcenprofilen 57
3.3 Mögliche topologische Beziehungen und Beispiele 64
3.4 Themen von Geoobjekten und resultierende Merkmale 65
3.5 Typisierung von Hindernissen 66
3.6 Beispiele dynamischer Veränderungen von Geoobjekten für drei Betrachtungsebenen 67
3.7 Bedingungen und Ereignisse im Kontext von Geoobjekten . 68
3.8 Ressourcenmerkmale und ihre Ausprägungen 69
3.9 Ressourcenspezifisches Schema Feldhäcksler 71
3.10 Konfigurierte Leistung 72
3.11 Eigenschaften, Ereignisse und Methoden von Speicherobjekten 74
3.12 Prozessparameter und Kennzahlen 86
3.13 Ereignisse und mögliche Reaktionen 89

4.1 Ermittlung der Anzahl durchzuführender Variationen 101
4.2 Teilprozesse Häckseln 101
4.3 Masse der verwendeten Transportfahrzeuge 103
4.4 Teilprozesse Transport 104
4.5 Teilprozesse Verdichten 106
4.6 Statische Parameter und funktionale Zusammenhänge für die Simulationsexperimente 107
4.7 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus dem Planungsbeispiel (50 %-Niveau) 118
4.8 Vergleichende Ergebnisdarstellung für 100 %-Niveau und vollständig entkoppelten Prozess 118

6.1 Grundlegende Typen topologischer Beziehungen für ausgewählte Geoobjekte nach GITTA (2017) 149

Abkürzungsverzeichnis

AB	Agent Based
ACL	Agent Communication Language
BPMN	Business Process Model and Notation
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAN	Controller Area Network
CEMOS	CLAAS Elektronisches Maschinen Einstell- und Optimierungssystem
CSV	Comma Separated Value
DBC	data base CAN; Dateiformat zum Austausch von CAN Busdaten
DES	Discrete Event Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
DTN	Delay Tolerant Network
ebXML	Electronic Business using XML
ECE	Economic Commission for Europe; Homologation
EN	Europäische Norm
ERP	Enterprise Resource Planning
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FIFO	First in First out
FMS	Farm-Managementsystem
FM	Frischmasse
GB	Gigabyte
GIS	Geografisches Informationssystem; engl. Geographic Information System
GPS	Globales Positionierungssystem; engl. Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IO	Input Output

ISO	International Organization for Standardization
ISOXML	ISOBUS Extended Markup Language (Standardisierte Notation für ISO 11889-konforme Dokumente und Austauschformat)
IQR	Interquartile Range
JSON	Java Script Object Notation
KMU	Klein- und mittelständige Unternehmen
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LOD	Linked Open Data
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MaKost	Maschinenkosten-Kalkulationsprogramm; KTBL
MANET	Mobile Adhoc Network
MAS	Multi Agenten System
MES	Manufacturing Execution System
MIS	Management Information System
MTM	Methods-Time Measurement
NAVSTAR	Navigation System with Timing And Ranging
NMEA	National Marine Electronics Association
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
QKT	dt. Qualität, Kosten, Zeit
RCP	Rich Client Platform
REFA	Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung
SCF	Store-Carry-Forward
SD	System Dynamics

SFH	Selbstfahrender Feldhäcksler
TF	Transportfahrzeug
TM	Trockenmasse
TPM	Total Productive Management oder Management
UTC	Coordinated Universal Time
VF	Verdichtungsfahrzeug
WLAN	Wireless Local Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
XML	Extensible Markup Language

Einheiten- und Symbolverzeichnis

Symbol	Erläuterung	Einheit
abs	absolut	
b	Breite	m
c	Kosten	€
C	Teilprozess Verdichten (Compacting)	
CF	Verdichtungsfaktor (Compaction Factor)	$4\,\mathrm{h}^{-1}$
$const$	konstant	
CPU	Stückkosten (Cost per Unit)	$€\,n^{-1}$
DMC	Trockensubstanzanteil	%
η_v	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$\mathrm{l}\,n^{-1}$
f	Frequenz	n^{-1}
H	Teilprozess Häckseln	
m	Masse	t
$\dot{m}$	Massenstrom	$\mathrm{t}\,\mathrm{h}^{-1}$
n	Anzahl	
$nenn$	Nenn, z. B. Nennleistung	
μ_m	Relative Verdichtermasse	%
μ_t	Relative Wartezeit	%
μ_H	Relative Häckselleistung	%
P	Leistung	$\mathrm{kW}\,\mathrm{h}$
p_t	Prozesszeit	min
rel	relativ	
RT	Roundtrip (Umlauf)	n
s, $Dist$	Distanz	m
SFH	Selbstfahrender Feldhäcksler	
t	Dauer	min
T	Teilprozess Transport	
TF	Transportfahrzeug	
v	Geschwindigkeit	$\mathrm{km}\,\mathrm{h}^{-1}$
VF	Verdichtungsfahrzeug	
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\mathrm{l}\,\mathrm{h}^{-1}$
w_t	Wartezeit	min

1 Einleitung

1.1 Situation und Problemstellung

Größe und Nennleistung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen haben in der Vergangenheit kontinuierlich zugenommen (Kutzbach (2001), Kutzbach et al. (2006)). Ein wesentlicher Treiber ist die damit verbundene Möglichkeit zur Reduzierung von Stückkosten[1]. Besonders sichtbar wird diese Entwicklung am Beispiel von dokumentierten Spitzenleistungen (siehe z.B Horsch (2004)). In einem Rekordversuch mit einem Mähdrescher (CLAAS LEXION 770TT) wurde über einen Zeitraum von 8 h ein mittlerer Durchsatz von $84\,\mathrm{t\,h^{-1}}$ erzielt, der Spitzenwert lag bei $120\,\mathrm{t\,h^{-1}}$ (Deter 2011).

Aus optimalen Arbeitsbedingungen resultierende Ergebnisse liefern einen Indikator für das Leistungspotenzial von Maschinen (= installierte Leistung). Der Betrag der installierten Leistung kann als Ergebnis zweier konvergenter Entwicklungen gesehen werden.

Zunächst wurden Maschinen in physischen Dimensionen vergrößert. Dieser Prozess wird durch legislative Grenzen hinsichtlich Geometrie und Masse begrenzt, in Deutschland z.B durch die Straßenverkehrsordnung (BMJV 2013) oder vorgegebene Lichtraumprofile (BMJV 2012). Nicht nur formale Beschränkungen setzen Grenzen. So stellt Hunt (2001) fest, dass mit dem Wachstum der theoretischen Kapazität von Maschinen eine unterproportionale Entwicklung der Feldeffizienz verbunden ist. Mit der Einführung mechatronischer Systeme erfolgte insbesondere durch Assistenzsysteme wie Fahrregler, Lenkautomaten oder Einstelloptimierungssysteme eine Erhöhung der Leistungsdichte bezogen auf den umbauten Raum.

Gleichzeitig ist festzustellen, dass die in typischen Arbeitssituationen realisierte Leistung bzw. realisierbare Leistung, dokumentiert in Telematik-Systemen, deutlich von der oben beschriebenen Situation abweicht (Feiffer 2004). In der Literatur wird diese Beobachtung allgemein als Kapazitätslücke bezeichnet (Chase et al. 2007). Eine auf der Datenbasis von CLAAS Telematics durchgeführte Analyse liefert für den oben genannten Mähdrescher einen

[1] Bezogen auf Erntemaschinen sind das z.B. die Kosten (€) je Tonne geernteten Materials.

durchschnittlichen Massenstrom von $35\,\mathrm{t\,h^{-1}}$. Das entspricht 40 % des Rekordergebnisses von $84\,\mathrm{t\,h^{-1}}$[2]. Für Selbstfahrende Feldhäcksler liegen keine auf diese Weise dokumentierten Spitzenwerte vor. Die Analyse liefert einen durchschnittlichen Massenstrom von $54\,\mathrm{t\,h^{-1}}$. Das entspricht ca. 30 % von den ermittelten Bestwerten[3]. Beim Vergleich von Gesamt-Betriebsstunden mit Druschzeit bzw. Häckselzeit ergibt sich eine Auslastung von 56 % bei Mähdreschern und 46 % bei Feldhäckslern[4].

Diese Beobachtungen lassen sich weiterhin aus Untersuchungen zum *Total Productive Maintenance* TPM bei der Ermittlung der *Overall Equipment Effectiveness* OEE untermauern. Kennedy (2005) nennt Werte von 40-60 % für Batch-Prozesse[5] sowie 50-75 % für kontinuierliche Prozesse[6]. Anzustreben sind nach Hansen (2002) 90 % für diskrete und 95 % für kontinuierliche Prozesse. Als einen generell anzustrebenden Richtwert nennen Blanchard (1997), McKone & Schroeder (1999) und Nakajima (1988) einen Wert von 85 %. Ernteprozesse können als hybride Prozesse aus der Kombination diskreter (z.B Wechsel des Transportfahrzeugs) und dynamischer Anteile (z.B Gutstrom) verstanden werden. Die aufgeführten Leistungsniveaus von 85 bis 95 % beziehen sich auf industrielle Prozesse. Systembedingt höhere Störpotenziale in der Landwirtschaft lassen solche Niveaus unrealistisch erscheinen. Für Prozesse außerhalb der Landwirtschaft werden abweichende realisierte Leistungen genannt.[7]

Vor dem Hintergrund dieser Leistungslücke (Abb. 1.1) sind bei der Entwicklung neuer Generationen von Großmaschinen vorrangig Technologien und Prozesse zur Reduzierung dieser Lücke zu entwickeln (Verbesserung der Produktivität). Hierfür ist es erforderlich, diese Leistungslücke genau zu analysieren, um geeignet Maßnahmen ergreifen zu können.

---

[2] Kampagnerergebnisse 2014 bis 2016, CLAAS LEXION 770, Weizen, Einsatzdauer größer 50 h

[3] Kampagnerergebnisse 2014 bis 2016, CLAAS JAGUAR 950, alle Früchte, Einsatzdauer größer 50 h, Filterung erfolgte auf den Typ 950, weil dieser auch im späteren Anwendungsfall zum Einsatz kommt

[4] Kmapagneergebnisse 2014 bis 2016, Einsatzdauer größer 50 h alle Maschinentypen, alle Früchte

[5] Beispiel für einen Batch-Prozess ist das Befüllen eines Anhängers mit einer begrenzten Kapazität und der erforderlichen Beendigung oder Unterbrechung des Prozesses. Der Batch-Prozess ist in IEC61512 (1997) definiert

[6] Beispiel für einen kontinuierlichen Prozess ist die Erzeugung von Methan in einer Biogasanlage. Dieser Prozess läuft, solange eine ausreichende Menge Substrat zugeführt wird und unter der Annahme, dass Reststoffe laufend entfernt werden. Dieser Begriff ist nicht normiert.

[7] Halbleiterindustrie 90 % (Leachman 1997), Prozesse der Serienproduktion von Komponenten im Maschinenbau 70 % (Rudolph 1988), Forstwirtschaft 65 % (Bolding 2008), Textilindustrie 60 % (Lee & Shahidul 2013), „viele Maschinen und Anlagen“ 30-40 % (May & Koch 2008)

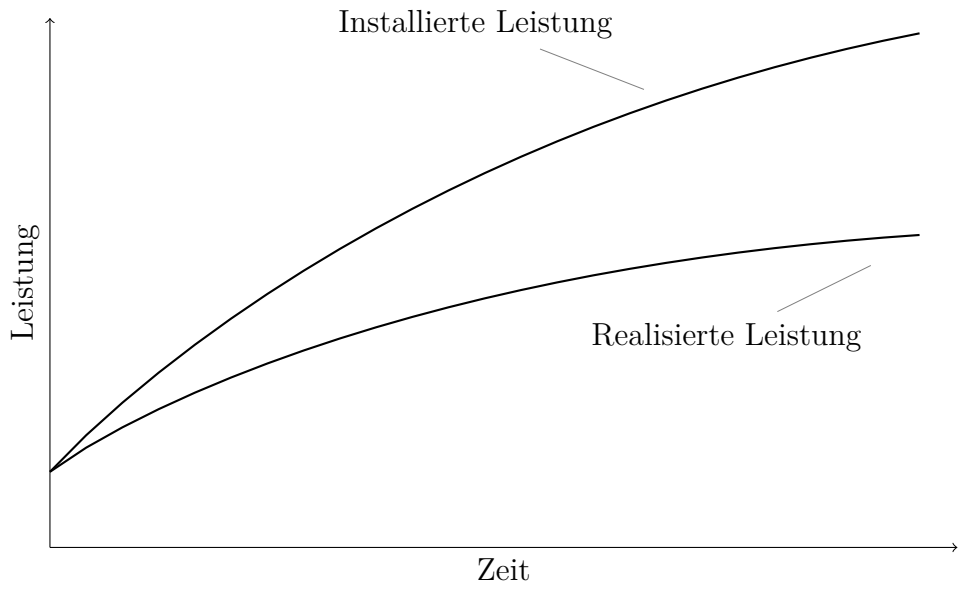


Abb. 1.1: Zunahme von installierter und realisierbarer Leistung sowie Lücke nicht abgerufener Leistungsfähigkeit

Eine Leistung ergibt sich aus der zweckgemäßen Kombination und Abfolge von Transformation und Transaktion. *Transformation* ist als ein Vorgang zu verstehen, der auf der Grundlage zuvor getroffener Entscheidungen ausgeführt wird. Hierbei kann es sich um eine definierte und in Anwendung befindliche Maschineneinstellung oder einen verabredeten Ort und Zeitpunkt des Überladens von Erntegut handeln. *Transaktion* ist ein Vorgang, der die vorgelagerte Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von QKT-Aspekten betrifft, hier in Analogie die Ermittlung einer situationsgerechten Maschineneinstellung bzw. eines Ortes und Zeitpunktes für das Überladen. Für die Entwicklung und Verbesserung dieser Vorgänge stehen Technologien und Methoden aus zahlreichen Wissensbereichen, z.B Ingenieurs-, Wirtschafts- und Formalwissenschaften zur Verfügung. Die Reduktion der Leistungslücke erfordert interdisziplinäre Fähigkeiten.

Aufgrund witterungsbedingt unsicherer Umgebungsbedingungen in der Landwirtschaft kommt es häufig zu Störungen bei transformatorischen Vorgängen. Die landwirtschaftliche Arbeitsumgebung ist hinsichtlich möglicher Zustände und deren zeitlichem Verlauf somit nicht immer deterministisch bestimmbar. Daraus folgt, dass kompensierende Transaktionsvorgänge zur Entscheidungsfindung ebenfalls immer mit Unsicherheit behaftet sind (unterspezifizierte Prozesse). Zur Modellierung der Leistungslücke im Entwicklungsprozess ist es also wesentlich, die Bedeutung des geringen Determinismus zu beachten.

In einer stärker übergeordneten Sicht ist zu beobachten, dass geringer

Determinismus nicht nur aus witterungsbedingten Aspekten abgeleitet werden kann. Auch technische und soziale Aspekte führen zu Störungen in der Transformation. Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Prozessen ist es in industriellen und handwerklichen Prozessen durch die Schaffung definierter Umgebungsbedingungen möglich, die Störeinflüsse mäßig (Handwerk) bis stark (Industrie) zu reduzieren.
Somit ergeben sich drei Aspekte, die in dieser Arbeit zu betrachten sind:

Biosystem:

- Der Zustand des Biosystems im Sinne des Produktionsumfeldes – insbesondere Boden und Pflanze – ist hochdynamisch, heterogen, begrenzt reproduzierbar und heute nur unvollständig beschreibbar.
- Eine Prognose des Systemzustandes ist aufgrund hoher Heterogenität und geringem Determinismus ungenau.
- Unvollständiges Systemverständnis bezogen auf die Situation und Prognose erfordert heuristisches Vorgehen, das mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem möglichen Optimum abweicht.

Technologisches System:

- Aktuelle Arbeitsmaschinen ermöglichen durch vielfältige Assistenzsysteme eine hohe Leistung. Die damit verbundene Komplexität kann Bediener überfordern und führt zu Unsicherheit. Als Konsequenz wird das Potenzial dieser Systeme nur in Teilen genutzt (Arbeiten mit Werkeinstellungen).
- Die informationstechnische Vernetzung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen ist aufgrund hoher Mobilität und schlechter Netzverfügbarkeit im ländlichen Raum schwächer entwickelt, als in Teilen der Industrie. Eine situationsgerechte Lieferung und Nutzung von Informationen ist nur in geringem Umfang gegeben.

Soziales System:

- Aufgrund bäuerlicher Familienstrukturen und kleiner Unternehmensgrößen ist die Landwirtschaft von einer geringen Arbeitsteilung geprägt; sie produziert jedoch Güter in einem teilweise tayloritischen Sinne (Taylor 1967). Die handelnden Personen müssen gleichzeitig Generalisten und Spezialisten sein. Dies stellt hohe Anforderungen an die informationstechnischen Prozesse und Systeme.

- Ausgeprägte, vegetationsbedingte Arbeitsspitzen werden üblicherweise durch Saisonarbeitskräfte oder durch Einbindung von Lohnunternehmen kompensiert. Der Aufbau von Kompetenzen zum optimalen Betrieb von Arbeitsmaschinen (kurze Hochlaufzeiten, hohe Leistung, Stabilität im Prozess) sowie der Erwerb von erforderlichen Ortskenntnissen sind dadurch erschwert.
- Konkurrierende Ziele von Landwirten (hohe Arbeitsqualität zu geringen Kosten) und Dienstleistern (hohe Auslastung der eingesetzten Ressourcen) können zu Konflikten führen.

1.2 Gegenstand und Ziele dieser Arbeit

1. In dieser Arbeit wird das identifizierte Problem der Leistungslücke beim Einsatz kooperierender mobiler Arbeitsmaschinen aufgegriffen und Ansatzpunkte für eine Reduzierung dieser Lücke untersucht. Durch die Reduktion der Leistungslücke soll eine signifikante Verbesserung von Prozessergebnissen im Sinne reduzierter Kosten und Zeitansprüche angestrebt werden. Im Mittelpunkt steht die systematische Analyse, Bewertung und Gestaltung von Prozesskontexten, um Planung, Steuerung und Dokumentation von Prozessen durch Schaffung und Anwendung einer kontextbasierten Systemarchitektur zu verbessern.
2. Es werden zwei sich ergänzende, quantitative Verfahren zur Planung und Steuerung von verketteten Prozessen am Beispiel der Ernte von Silomais entwickelt.
   a. Agentenbasierte Simulation und Parametervariation. Die agentenbasierte Simulation wird verwendet, weil sie eine detaillierte Darstellung von Handlungsweisen einzelner Systeme ermöglicht.
   b. Mathematisches Modell zur Generierung logistischer Kennfelder für alle Teilprozesse und den Gesamtprozess
3. Die Ergebnisse der beiden Verfahren werden miteinander und mit Angaben aus einer empirischen Erhebung verglichen.
4. Es werden Wege zur Reduzierung der postulierten Leistungslücke durch verbesserte Kooperation aufgezeigt.
5. Die universelle Anwendbarkeit der Verfahren wird durch die perspektivische Erläuterung am Beispiel anderer Anwendungsfälle dargestellt.

1.3 Aufbau dieser Arbeit

1. Zunächst wird der Kontextbegriff eingeführt und auf der Basis allgemeiner Kontexte sowie anhand landwirtschaftlich relevanter Kontexte ein Kontext-Modell erarbeitet. (Kapitel 3.1)

2. Auf Basis dieses Modells werden erforderliche Komponenten für deren systemtechnische Verarbeitung abgeleitet. (Kapitel 3.2)

3. Diese Komponenten werden in einer Systemarchitektur zusammen geführt (Kapitel 3.3)

4. Auf Basis der Systemarchitektur wird als Anwendungsfall ein Logistik-Prozess für die Ernte modelliert und in Form einer Simulation implementiert. (Kapitel 3.4 und 3.6)

5. Auf Grundlage der Simulation wird gezeigt, welche Auswirkungen die vielfältigen Kontexte auf Planungsmöglichkeiten und Verhaltensweisen sowie die Prozess-Leistung und Prozess-Kosten haben. Es wird untersucht, ob und wie die weiter oben angeführten Leistungslücke reduziert werden kann. (Kapitel 4)

6. Schließlich wird diskutiert, wie sich die erzielten Ergebnisse in das Arbeitsumfeld implementieren lassen und welche weiteren Perspektiven sich vor dem Hintergrund anderer und neuer Technologien ergeben. (Kapitel 5)

2 Stand der Forschung und der Technik

2.1 Methoden und Technologien zur Steuerung mobiler, landwirtschaftlicher Prozesse

2.1.1 Precision Agriculture und Smart Farming

Precision Agriculture ist ein Sammelbegriff für vielfältige Methoden, Technologien und Prozesse zur Unterstützung orts- und zeitgenauer Planung, Steuerung und Dokumentation in landwirtschaftlichen Verfahren. Synonym verwendete Begriffe sind Precision Farming und Präzisionslandwirtschaft. Die Entstehung von Precision Agriculture wurde durch methodische und technologische Entwicklungen zur Erfassung und Verarbeitung ortsbezogener Informationen ermöglicht. Erste Ansätze zu Geografischen Informationssystemen GIS wurden in den 1950er und 1960er Jahren vom US Bureau of Census sowie im Harvard Laboratory for Computer Graphics entwickelt (Mark et al. 1997). Größere Verbreitung fanden GIS durch desktopbasierte Programme wie ArcView von ESRI ab 1995. Die Fähigkeit zur flächendeckenden Ortung und Selbstlokalisation durch Verfügbarkeit des NAVSTAR GPS-Systems zu Beginn der 1990er Jahre ermöglichte die routinemäßige Verknüpfung von NMEA-konformen Positions- und Zeitdaten mit Maschinenattributen, die üblicherweise aus CAN-Netzwerken stammen. Auf dieser Grundlage wurden erste Lösungen wie Flächen- und Ertragskartierung für Mähdrescher entwickelt.

Dementsprechend waren zahlreiche Definitionen der Precision Agriculture zunächst eher technologiebezogen. Lowenberg-De Boer & Boehlje (1996) bezeichnen Precision Agriculture als ein System zur raumbezogenen Applikation von Betriebsmitteln, der zeitlichen Steuerung von Maßnahmen sowie des Monitorings von Pflanzen und Arbeitskräften. Aber auch Definitionen die Raum-Zeit-Aspekte ausblenden, sind zu finden. Der National Research Council

(Committee on Assessing Crop Yield: Site-Specific Farming & Research Opportunities 1997) definiert Precision Agriculture als Managementstrategie, die Daten verschiedener Quellen zusammen führt und darauf aufbauend Entscheidungen in pflanzenbaulichen verfahren ermöglicht.

Definitionen sind im Laufe der Zeit umfassender geworden. Singh (2007) definiert Precision Agriculture als eine Form des landwirtschaftlichen Managements zur Sicherstellung von Profitabilität, Nachhaltigkeit und Ressourcenschutz unter besonderer Berücksichtigung der Variabilität in der Arbeitsumgebung. Auernhammer (2002) entwickelt eine hierarchische Systematik (siehe Abbildung 2.1) und nennt als Bestandteile ackerbaulicher Verfahren die Bereiche Dokumentation, teilschlagspezifische Bewirtschaftung, Flottenamanagement und Feld-Robotik.

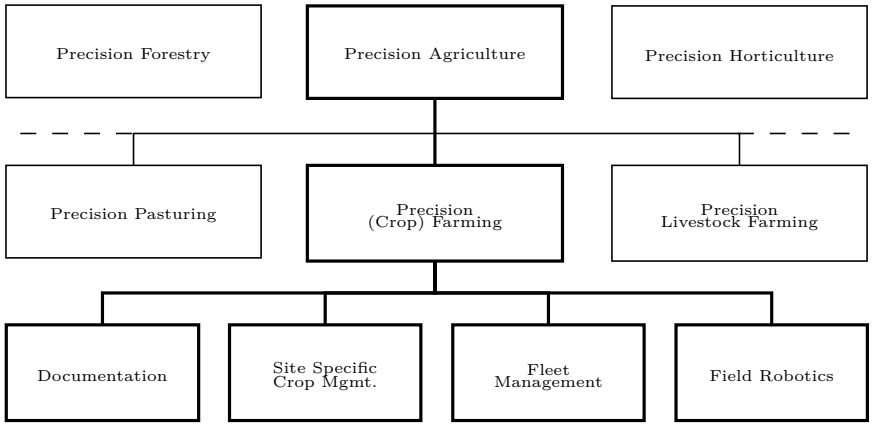


Abb. 2.1: Abgrenzung und Bestandteile von Precision Agriculture nach Auernhammer (2002)

Voraussetzung für eine umfassende Akzeptanz von Precision Agriculture ist aufbauend auf bestehenden Technologien die nahtlose informationstechnische Verknüpfung abhängiger Prozesse und die Schaffung von Entscheidungshilfen einschließlich Algorithmen. Die verwendeten Systeme und Komponenten müssen wissens- und kontextbasiert, interaktiv, adaptiv, transparent und automatisiert sein (Griepentrog 2011). Blackmore (2009) sieht die Erfordernis der Selbstwahrnehmung. Die genannten Eigenschaften charakterisieren Systeme aus Sicht der Künstlichen Intelligenz. Das erweiterte Bild der Precision Agriculture wird zunehmend mit dem Begriff des Smart Farming belegt, woraus sich Analogien zum Begriff der Industrie 4.0 ergeben. Smart-Farming kann auf dieser Grundlage als *System-of-Systems* verstanden werden. Technologien der Precision Agriculture liefern raum- und zeitbezogene Daten und können als technische Basis für die Analyse von Kontexten verstanden werden. Kurz aber umfassend bezeichnet Pierce et al. (1999) Precision Agriculture als eine

Sammlung von Technologien und Prinzipien zur Beherrschung räumlicher und zeitlicher Variabilität in allen landwirtschaftlichen Aspekten.

2.1.2 Automatisierung

Automatisierung ist definiert als die „Übertragung von Funktionen des Produktionsprozesses, insbesondere Prozesssteuerungs- und -regelungsaufgaben vom Menschen auf künstliche Systeme. [...] Je nach Umfang der Übernahme von Steuerungs- und Regelungsaufgaben durch die Maschine wird von Teil- oder Vollautomatisierung gesprochen.[...] Ziel der Automatisierung ist nicht nur die Produktivitätssteigerung, sondern auch Flexibilisierung und eine insgesamt erhöhte Wirtschaftlichkeit.“ (Gabler 2014). Gegenstand der Automatisierung ist der Prozess. Ein Prozess ist nach DIN (2006) die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird“.

Somit sind technische und informationelle Prozesse Gegenstand der Automatisierung. Automatisierung in mobilen Arbeitsmaschinen begann mit mechanischen Lösungen (z.B. Verbrennungsmotor, Knoter). Elektronische Komponenten ermöglichten weitergehende Automatisierung (z.B. Elektronische Hubwerksregelung, Fahrregler). Umfassende Automatisierung erfolgte schließlich durch Regelung von Systemen mit Hilfe eingebetteter Systeme. Das Zusammenwirken mechanischer, elektronischer und informatischer Bestandteile wird als Mechatronik bezeichnet. Von herausragender Bedeutung ist dabei die Vernetzung verteilter Systeme, zunächst innerhalb mobiler Arbeitsmaschinen (Zugmaschine und Anbaugerät) und in nachfolgenden Schritten die Anbindung von Arbeitsmaschinen an zentrale Management-Informationssysteme sowie die Vernetzung von Arbeitsmaschinen untereinander (ISO 11783).

Implementierte mechatronische Systeme und deren Vernetzung stellen, insbesondere durch Berücksichtigung von Methoden der Künstlichen Intelligenz, die Grundlage für „intelligente“ Geschäftsprozesse dar und sind die Basis für eine absehbare Roboterisierung auch in der Landwirtschaft.

2.1.3 Farm-Managementsysteme

Farm-Managementsysteme FMS sind computergestützte, informationstechnische Hilfsmittel zur Planung, Steuerung und Dokumentation betrieblicher Prozesse in landwirtschaftlichen Unternehmen. Sie sind entweder spezialisiert auf konkrete Produktionszweige in Anlehnung an die EU-Betriebsklassifizierung (EWG 1985) oder unternehmerische Abläufe wie bei Stahlknecht & Hasenkamp

(2003) oder aber integriert und im Sinne industrieller ERP-Systeme durch Module serviceorientierter Architekturen erweiterbar. Die Entwicklung von Farm-Managementsystemen orientiert sich dabei an der Verfügbarkeit marktgängiger Entwicklungsumgebungen und Architekturen. Branchenunabhängige Lösungen kommen wegen der speziellen Anforderungen aus der Landwirtschaft nur in Ausnahmefällen zum Einsatz.

Im Zusammenhang mit pflanzenbaulichen Verfahren wurde zunächst die kartenbasierte Ackerschlagkartei mit Hilfe relationaler Datenbanken als *Rich Client* realisiert, in dem Benutzerschnittstelle, Geschäftslogik und Datenhaltung eine untrennbare Einheit darstellen. Aufgrund geringer Unternehmensgrößen stellt dies bis heute den Stand der Technik dar.

Mit der zunehmenden Verbreitung personengebundener Endgeräte wie Smartphones und Tablets steigt der Bedarf zur Nutzung und Verarbeitung von Informationen zu jeder Zeit an jedem Ort. Weil PC-basierte Anwendungen nicht hinsichtlich permanenter Verfügbarkeit konzipiert sind, ist ein Trend zu internetbasierten Systemen wie 365FarmNet oder MyJohnDeere.com zu erkennen. Zeichnen sich PC-basierte Systeme durch eine große Funktionsvielfalt mit geringem herstellerübergreifendem Vernetzungsgrad aus, ist bei den neuen Angeboten zu erkennen, dass Anwendungen modularisiert und dadurch vereinfacht werden und die Vernetzung mit Maschinen sowie Systemen der vor- und nachgelagerten Stufen im Mittelpunkt steht. Die Vernetzbarkeit wird auf verschiedenen Ebenen durch standardisierte Protokolle und vereinheitlichte Datenbeschreibungsformate wie agroXML und ISOXML gefördert. In der Nachfolge von agroXML hat das KTBL 2015 Planungsdaten in Form von Linked Open Data LOD verfügbar gemacht. Hierdurch wird die maschinelle Lesbarkeit und dadurch die Integration der Planungsdaten in die Geschäftsprozesse verbessert.

Nahezu alle pflanzenbaulichen Anwendungen erfolgen durch Nutzung von GPS-Technologien auf der Basis von GIS-Funktionen. Unabhängig von der gewählten Architektur lassen sich die fachlichen Anwendungen der FMS domänenunabhängigen Unternehmensfunktionen zuordnen, wie in Abb. 2.2 auf Grundlage der Value Chain nach Porter (1985) dargestellt.

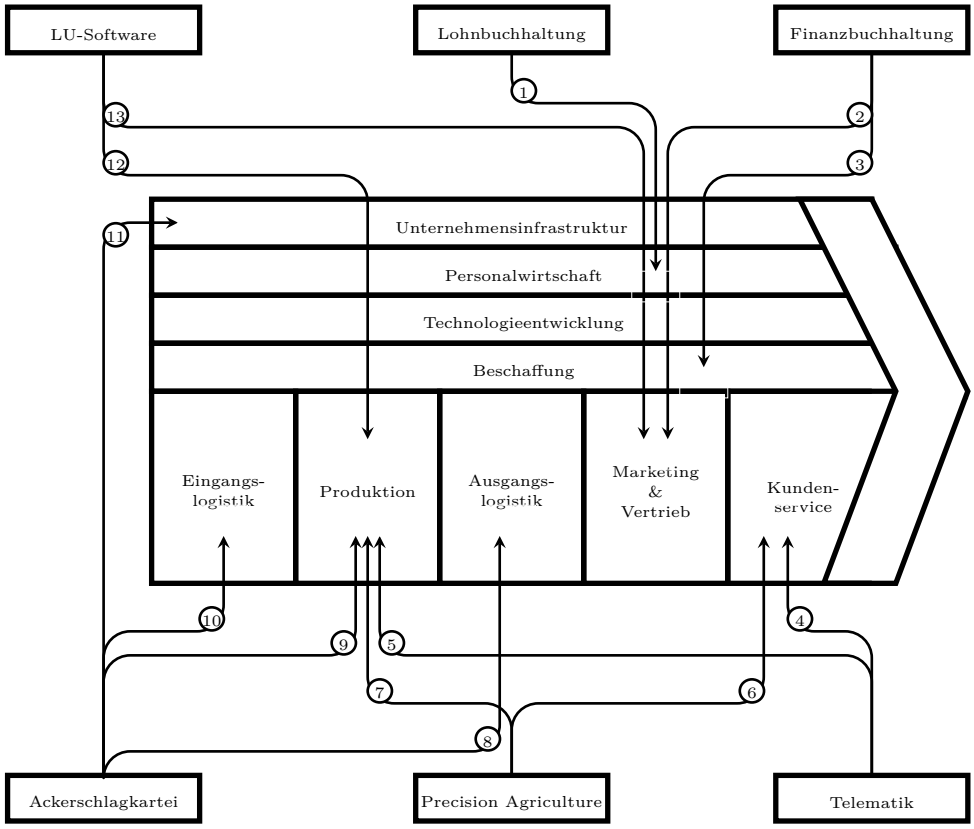


Abb. 2.2: Einordnung von FMS in die Value Chain nach *Porter (1985)*

1. Stundenerfassung, Lohnermittlung
2. Debitoren
3. Kreditoren
4. Instandhaltung
5. Performanceanalyse automatisierte Dokumentation
6. Verfahrensdaten zur weiteren Verwendung
7. Applikationsplanung,-steuerung und -dokumentation
8. Lagerverwaltung
9. Anbauplanung, Verfahrensdokumentation, Anträge, verfahrenstechnische und ökonomische Auswertung
10. Betriebsmittelplanung, Lagerverwaltung
11. Stammdaten, Mechanisierungsplanung
12. Auftragsplanung, Disposition Leistungserfassung, Kostenrechnung
13. Angebotserstellung, Fakturierung

2.2 Organisationstheoretische Analyse des landwirtschaftlichen Arbeitsumfeldes

Funktion und Verhalten von Maschinen wird in dieser Arbeit in Form von Agenten abgebildet. Agenten finden häufig Anwendung in der Analyse und Simulation sozialer Systemen, womit sich auch menschliche Verhaltensweisen (z.B. Koalitionen, Konflikte, Verhandlungen) darstellen lassen. Weil auch maschinengestütze Prozesse in der Landwirtschaft wesentlich durch menschliches Verhalten geprägt werden, ist eine kurze organisationstheoretische Analyse erforderlich. In der Modellierung und Simulation erfolgt jedoch eine Beschränkung auf die Abbildung technischer Aspekte.

Prozesse lassen sich prinzipiell in transformatorische und transaktorische Anteile zerlegen. Transformation ist die Ausführung einer durch technische Systeme oder Menschen getroffenen Entscheidung. Transaktion beschreibt den Entscheidungsweg und den damit verbundenen Aufwand (Transaktionskosten). Intransparenz, Interessenskonflikte und Inkompetenz führen zu aufwändigen und ggf. nicht zielgerechten Entscheidungen im Prozess.

Für die Betrachtung von Transaktionskosten steht eine eigenständige Theorie zur Verfügung. Die Transaktionskostentheorie betrachtet Vorgänge in Organisationen, wobei diese die Rahmenbedingungen liefern, innerhalb derer die Integrität von Vertragsverhältnissen entschieden werden (Williamson 2010). Nachfolgend wird der Bezug landwirtschaftlicher Prozesse zur Transaktionskostentheorie hergestellt.

Pflanzenbauliche Produktionsverfahren erfolgen in einem räumlich begrenzten Umfeld (landwirtschaftliche Nutzflächen eines Betriebes und Wege-Infrastruktur), auf das zahlreiche Umwelteinflüsse einwirken. Diese Einflüsse können diskret (z.B. Niederschlagsereignis) oder kontinuierlich (z.B. Veränderung der Luftfeuchte) sein, sich direkt (Kornfeuchte beim Drusch) oder indirekt (Temperatur x Dauer = Temperatursumme auf Krankheitsbefall) auf den Prozess auswirken. Je nach Systemkenntnis und Detailgrad der Betrachtung können die Ereignisse als deterministisch oder nichtdeterministisch betrachtet werden. Merkmale der Umwelt, wie z.B. die Verteilung der Bodenarten, können räumlich stark variieren und erfordern ein ebenso fein aufgelöstes angepasstes Handeln, d. h. teilflächenspezifische Applikation. Wirkungszusammenhänge des Ökosystems wie die Boden-Stickstoffdynamik haben großen Einfluss auf das Verfahren. Die aktuelle Situation ist zum Entscheidungszeitpunkt jedoch selten hinreichend bekannt und führt zu Entscheidungen unter Unsicherheit.

Die Akteure müssen in den Prozessen mit dieser Unsicherheit umgehen,

sich adaptiv verhalten. Die Umwelt kann somit als ein komplexes System, das sich als „Grey-Box“ darstellt, verstanden werden, die Interaktion als komplexes adaptives System. Im Gegensatz zu den nachfolgend beschriebenen Zusammenhängen wird die Umwelt durch naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten bestimmt, deren einzelne Gesetze bekannt sind, aber deren Wechselwirkungen zu ausgesprochen hoher Komplexität führen.

Bei der Ausführung pflanzenbaulicher Verfahren stehen sich das Ökosystem und das Produktionssystem in einer gerichteten Beziehung gegenüber (Abb. 2.3). Das Produktionssystem kann als organisationstheoretisches, institutionenökonomisches Konstrukt verstanden werden, das sich gegenüber dem umgebenden Ökosystem im Sinne der klassischen Entscheidungstheorie verhält.

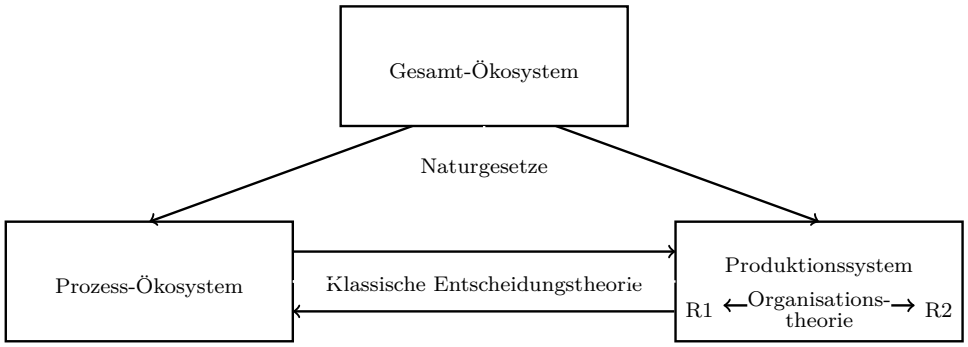


Abb. 2.3: Systembeziehungen im landwirtschaftlichen Arbeitsumfeld (R=Ressource)

Das Produktionssystem ist dadurch gekennzeichnet, dass Institutionen (z.B. landwirtschaftliches Familienunternehmen, Lohnunternehmen) mit Hilfe der von ihnen eingesetzten Ressourcen durch Interaktion eine gestellte Aufgabe erledigen. Unter Ressourcen (= R in Abb. 2.3) sind Menschen und Maschinen zu verstehen. Maschinen sind dabei als technische Hilfsmittel zur Erfüllung der gestellten Aufgaben zu verstehen. Die Rolle des Menschen hinsichtlich der Steuerung von Maschinen ist abhängig vom Umfang der implementierten autonomen Funktionen in den Maschinen.

Eine Zunahme autonomer Teilfunktionen reduziert die Anforderungen an menschliche Eingriffe und setzt Potentiale für weitere Aufgaben frei, so z.B. Qualitätsüberwachung bei nicht sensorisch erfassbaren Zuständen und Entscheidungsfindung. Die in Prozessen beteiligten Akteure sind immer Teil einer Organisation bzw. sie bilden die Organisation – sie sind als Individuum den Möglichkeiten und Zwängen einer Organisation ausgesetzt (Scherer 2006). Im Mittelpunkt steht die Organisation der landwirtschaftlichen Unternehmung, die das Risiko für den wirtschaftlichen Erfolg des pflanzenbaulichen Verfahrens trägt.

Die landwirtschaftliche Unternehmung kann auf vielfältige Weise aufgebaut sein. Das Spektrum reicht von landwirtschaftlichen Familienunternehmen, mit oder ohne Einsatz von Fremd-Arbeitskräften bis zu Kapitalgesellschaften. Damit ist eine zunehmende Arbeitsteilung und Spezialisierung verbunden. In gleicher Weise sind landwirtschaftliche Lohnunternehmen als Dienstleister für landwirtschaftliche Unternehmen organisiert. Je geringer der Spezialisierungsgrad der handelnden Personen ist, desto mehr Rollen vereinigen diese Personen. Sie können als Experten bezeichnet werden, deren Handeln stark erfahrungsbasiert ist. Daraus resultieren spezielle Anforderungen an die informationstechnische Unterstützung.

Zur Ausführung pflanzenbaulicher Verfahren setzen die Akteure Landmaschinen ein, die sie entweder in eigener Verantwortung betreiben oder im Auftrag des Betreibers bedienen. Mit diesem Vorgang werden im Sinne der Organisationstheorie Verfügungsrechte übertragen. Werden ackerbauliche Verfahren durch Lohnunternehmer unterstützt, treffen diese beiden Organisationen aufeinander. Auch hier werden Verfügungsrechte übertragen.
Unterstellt man den Beteiligten als Handlungsmaxime das Streben nach individueller Nutzenmaximierung, dann muss mit Zielkonflikten zwischen den Beteiligten gerechnet werden (Ebers & Gotsch 2006). Gefördert wird dieses Verhalten durch asymmetrische Informationsverteilung in der Beziehung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer.
Im Kontext lassen sich drei Zielkonflikte beschreiben:

1. Lohnunternehmer – Mitarbeiter bzw. Landwirt – Mitarbeiter

   Mitarbeiter (Agenten) führen die ihnen von den Gesamtverantwortlichen (Arbeitgeber als Prinzipal) der jeweiligen Unternehmen übertragenen Arbeiten aus. Dafür überträgt der Prinzipal Verfügungsrechte (Entscheidungskompetenzen) an den Agenten und versetzt ihn in die Lage, eigene Ziele auch zulasten des Prinzipals zu verfolgen (Ebers & Gotsch 2006). Die Transaktionskostentheorie nennt hier die Verhaltensannahmen der begrenzte Rationalität, Opportunismus und Risikoneutralität (Ebers & Gotsch 2006).

2. Lohnunternehmer – Landwirt

   Auch Landwirte (Prinzipal) und Lohnunternehmer als Auftragnehmer des Landwirts (Agenten) verfolgen in der Ausführung von Prozessen unterschiedliche Interessen. Landwirte sind daran interessiert, dass ackerbauliche Verfahren zum optimalen Zeitpunkt zu niedrigsten Kosten in bester Qualität ausgeführt werden. Ziel ist die Minimierung von Stückkosten bezogen auf das erzeugte Produkt. Lohnunternehmer dagegen haben das Ziel, ein

Maximum ihrer bereit gestellten Kapazität zu maximalen Kosten zu vermarkten. Informationsasymmetrie und divergierende Interessen bergen auch hier Konfliktstoff.

3. Mitarbeiter – Mitarbeiter

   Arbeiten mehrere Mitarbeiter sowohl unternehmensintern als auch unternehmensübergreifend in einem gemeinsamen Auftragskontext, handeln sie als Gruppe. Die Prinzipal-Agent-Beziehung tritt in den Hintergrund. Auch in Gruppen stellen sich Probleme der Leistungszurückhaltung und der suboptimalen Ressourcenverwendung (Ebers & Gotsch 2006). So kann in der Praxis beobachtet werden, dass erfahrene Maschinenbediener eigenes Wissen und Prozesszustände nur in unzureichender Weise, d.h. nicht vollständig oder zeitgerecht mit anderen Gruppenmitgliedern teilen.[1]

Die aufgeführten organisationstheoretischen Konstellationen können in einer Gesamtsicht als Kaskade verstanden werden, die vor dem Hintergrund des Handelns in einem Ökosystem ein ausgeprägtes komplexes adaptives System darstellen. In diesem Konstrukt sieht die Institutionenökonomie mehrere Möglichkeiten zur Kompensation: Die Nutzung von Anreiz-, Kontroll- und Informationsmechanismen.

2.3 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen

2.3.1 System, Modell und Komplexität

Unter einem System wird ein „gegliedertes, geordnetes Ganzes“ verstanden (BAdW 2015). Ordnung ergibt sich in Systemen durch die Herstellung von Beziehungen ihrer Einzelteile. Systeme können z.B. organische, politisch-soziale, künstlerische und kognitive Gebilde sein (Siegwart 2004).
Für diese Arbeit sind zwei Systeme von Bedeutung:

1. Die *Anwendungsdomäne* der Landwirtschaft mit den betrachteten Prozessen der Erntelogistik für Silomais. Die Anwendungsdomäne wird analysiert, Defizite ermittelt und Anforderungen für eine Verbesserung abgeleitet.

2. Die entwickelte *Architektur*, die durch Verarbeitung von geringdeterministischen Ereignissen die informationstechnische Abbildung und Optimierung

[1] Beispiele hierfür sind die fehlende Kommunikation „optimaler“ Maschineneinstellung innerhalb einer Flotte oder die nicht zeitgerechte Mitteilung des Bedarfs zur Entleerung des Korntanks beim Mähdrusch mit der Konsequenz von Maschinenstillständen.

von Prozessen ermöglicht. Hierbei handelt es sich um eine teilweise formalisierte Darstellung des unter Punkt 1. genannten Systems. Die in der Anwendungsdomäne beschriebenen Anforderungen werden in der System-Architektur aufgegriffen und umgesetzt.

Systeme können entsprechend den nachfolgend aufgeführten Begriffen charakterisiert werden. Daraus lassen sich Anforderungen für das Architekturdesign ableiten.

- *verteilt*

  Teilprozesse finden an verschiedenen, wechselnden Orten statt. Ressourcen sind mobil. Eine Erreichbarkeit ist nicht an allen Orten sicher gestellt. Die Architektur muss eine robuste Kommunikation ermöglichen. Das beinhaltet auch Kompensationsmechanismen. Die Architektur muss durch Analysemechanismen verteilte Prozesse in Bezug setzen können (Kooperation, Gruppen).

- *adaptiv*

  Der Prozess kann sich an Umgebungsbedingungen anpassen. Die Architektur muss Kontexte ermitteln und verarbeiten können. Die Architektur muss modular aufgebaut sein, um Prozesse entsprechend den Umgebungsbedingungen (Kontexte) ausführen zu können. Die Verknüpfung von Prozessen muss durch Anwendung von Regeln erfolgen.

- *(teil-)autonom*

  Es kommen (teil-)autonome Maschinenfunktionen zur Anwendung. Autonome Ansätze sollen Effizienz und Robustheit der Prozesse fördern. Kontexte müssen so aufbereitet werden, dass sie von Maschinen in entsprechende Handlungen umgesetzt werden können.

- *stochastisch*

  Es treten nicht oder schwer vorhersagbare Systemzustände und Ereignisse auf (Befahrbarkeit, Erntegut-Eigenschaften). Die Architektur muss sicherstellen, dass relevante Ereignisse jederzeit erfassbar sind.

- *deterministisch*

  Zahlreiche Merkmale wie die Geometrie oder Infrastruktur sind bekannt, ebenso die Abhängigkeiten zwischen den Prozessbeteiligten. Die Architektur muss auf vielfältige Informationsquellen zugreifen können.

- *netzartig*

  Beteiligte im Prozess können sowohl Server- als auch Client-Funktionen einnehmen. Die maßgebliche Beeinflussung von Prozessen kann von verschiedenen Partnern ausgehen (z.B. Verdichtungsfahrzeug oder Erntemaschine). Die Architektur muss Peer-Konzepte unterstützen. Die Architektur muss unternehmensfremde Teile flexibel einbinden können. Die Architektur muss den Anforderungen an Datenschutz und Sicherheit betrieblicher Informationen gerecht werden.

Für eine noch genauere Analyse des Systems und damit eine begründbare Auswahl von Modellierungsmethoden und -werkzeugen ist es erforderlich, die dynamischen Merkmale von Systemen feiner zu untergliedern. Jain (2011) nennt vier Modelltypen:

a) Continuous Time Model
b) Discrete Time Model
c) Continuous State Model
d) Discrete State Model

Syriakow (2003) stellt diese Modelltypen als Matrix dar (Abb. 2.4).

Relevant sind solche Modelltypen, die mindestens eine dynamische Komponente aus Zeit und Systemzustand enthalten. Beispiele entsprechend Abb. 2.4 a) bis c) sind:

a) Füllstandveränderung des Transportfahrzeuges während der Beladung
b) Kraftstoffverbrauch pro Stunde
c) Zeitpunkt, zu dem ein Fahrzeug das Feld erreicht hat

Ein weiteres wichtiges Merkmal zur Charakterisierung von Systemen ist der *Determinismus* ihres Verhaltens. Unter Determinismus wird „[...] in der Physik die eindeutige Berechenbarkeit und vollständige Messbarkeit physikalischer Zustandsgrößen [...]"(Siegwart 2004) verstanden. „In der Informatik werden bei determinierten Automaten die Ausgabewerte eindeutig durch Eingabe- und Zustandswerte bestimmt, während sie bei stochastischen Automaten mit Wahrscheinlichkeitswerten belegt sind“ (Siegwart 2004). In industriellen Prozessen wird der Determinismus durch die gezielte Gestaltung des Produktionsumfeldes erhöht. Im Ackerbau ist dies aufgrund der Umweltexposition nur eingeschränkt möglich[2]. Die systematische Erfassung und Interpretation von Prozesskontexten ist daher im Ackerbau für die bestmögliche Ausgestaltung von Prozessen unver-

[2]Ein Beispiel hierfür ist die Schaffung von Entwässerungseinrichtungen zur Verbesserung der Befahrbarkeit

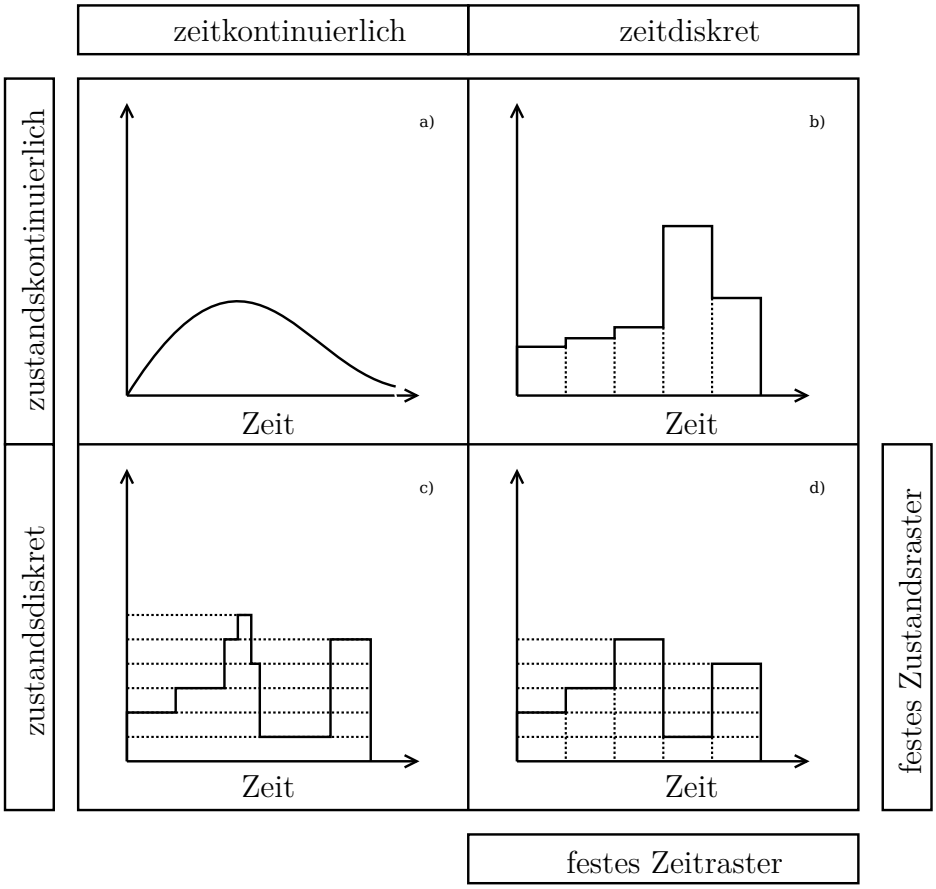


Abb. 2.4: Modelltypen dynamischer Systeme nach Syriakow (2003)

zichtbar. Die entwickelte Architektur leistet einen Beitrag für den verbesserten Umgang mit gering deterministischen Situationen.

Die Beschreibung von Systemen erfolgt in Form von Modellen. *Modelle* sind das Ergebnis des Vorgangs der Modellbildung, bei dem Systeme auf Modelle abgebildet werden. Modelle sind materielle oder immaterielle Systeme, die andere Systeme so darstellen, dass eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände möglich ist (Niemeyer 1977). Zur Darstellung von Modellen werden Modellierungssprachen verwendet. Nach (Engels 2014) sind Modellierungssprachen „[...] künstlich definierte Sprachen, die dazu dienen, Modelle, d.h. abstrahierende Beschreibungen, zu erstellen. Sie werden insbesondere im Rahmen der Softwareentwicklung eingesetzt, um Ausschnitte der realen Welt zu modellieren (z.B. Geschäftsprozessmodelle, Ist-Analyse), Anforderungen an eine zu realisierende Software zu präzisieren oder Entwurfs- und Architekturbeschreibungen zu erstellen.“

Landwirtschaftliche Prozesse sind durch Merkmale von Biosystem, techno-

logischem System und sozialem System bestimmt werden. Jedes dieser Systeme ist durch zahlreiche, beidseitig gerichtete Beziehungen innerhalb und zwischen den Teilsystemen gekennzeichnet. Wenn diese Beziehungen weiterhin überwiegend als gering deterministisch bezeichnet werden können, kann man von hoher *Komplexität* des Gesamtsystems sprechen. Komplex bedeutet in direkter Übersetzung *zusammengesetzt*, ausgedrückt z.B. als „Wahrnehmungen, wenn sie als Ganzes aus miteinander verbundenen Teilen [...] bestimmt werden [...]. [...] In der Systemtheorie [...] wird die Möglichkeit praktischen und technischen Handelns, Theoriebildung eingeschlossen, von der Fähigkeit zur Reduktion von Komplexität, einer Fähigkeit, hinreichend einfache Modelle für die Umwelt des/der Handelnden herzustellen, abhängig gemacht.“ (Siegwart 2004). Die Komplexität eines Systems lässt sich bei einer gegebenen Menge von Elementen und sich daraus ergebender Beziehungen ansatzweise durch Potenzmengen 2^x (Menge aller Teilmengen) und Binomialkoeffizienten $\binom{n}{k}$ (Menge möglicher Kombinationen)[3] darstellen. Die Komplexität erhöht sich jedoch deutlich durch hohe zeitliche und räumliche Dynamik, nicht diskrete Merkmalsausprägungen und stochastische Anteile.

2.3.2 Ereignis und Kontext

Entstehung, Analyse und Verarbeitung von Kontextinformationen stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit und werden als Schlüssel zur Optimierung von Planung, Steuerung sowie Dokumentation von mobilen, verteilten Prozessen gesehen. Dey & Abowd (2000) definiert *Kontext* als jegliche Art von Information, die geeignet ist, die Situation einer Entität zu beschreiben. Dabei kann es sich um Personen, Orte oder Objekte handeln, die als relevant für die Interaktion zwischen Menschen und Anwendungen gesehen werden. Seiner Definition liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die meisten Definitionen dieses Begriffes nur sehr vage sind bzw. lediglich Synonyme aufführen und deshalb für eine konkrete Anwendung nicht geeignet sind. Andere Definitionen sind wiederum zu konkret und liefern dadurch Ausschlusskriterien. Dey (2000) nennt 4 relevante Kontexttypen: Ort, Identität, Zeit und Aktivität. Kontexte lassen sich entsprechend ihrem Abstraktionsgrad als *Low-Level-* und *High-Level-Kontext* bezeichnen ((Hong et al. 2009), (Kotz 2008)). Low-Level-Kontexte, z.B. aus Sensoren, werden durch Aggregations- und Interpretationsprozesse, die auch als Inferenz bezeichnet werden, in High-Level-Kontexte überführt. High-Level-Kontexte werden dann verwendet, um den weiteren Verlauf von Prozessen zu

[3] auch ausgedrückt als $\frac{n(m-1)}{2}$

parametrieren und zu steuern.

Im Gegensatz zu den vier von Dey (2000) genannten Dimensionen erfolgt in hier eine Beschränkung auf drei Dimensionen *Raum*, *Zeit* und *Ressource*, wobei *Raum* dem Begriff *Ort* und *Identität* dem Begriff *Ressource* entspricht. Auf den Begriff *Aktivität* wird verzichtet, weil er aus der Fusion der drei vorgenannten Dimensionen resultiert.

Raum-Kontext

Räumliche Kontexte haben durch die zunehmende Nutzung von Lokalisierungs- und Positionierungsverfahren eine größere Bedeutung erfahren. Definitionen zu den grundlegenden Objekttypen Punkt, Linie, Fläche und Körper sowie ihren Beziehungen definiert DIN EN ISO 19107.

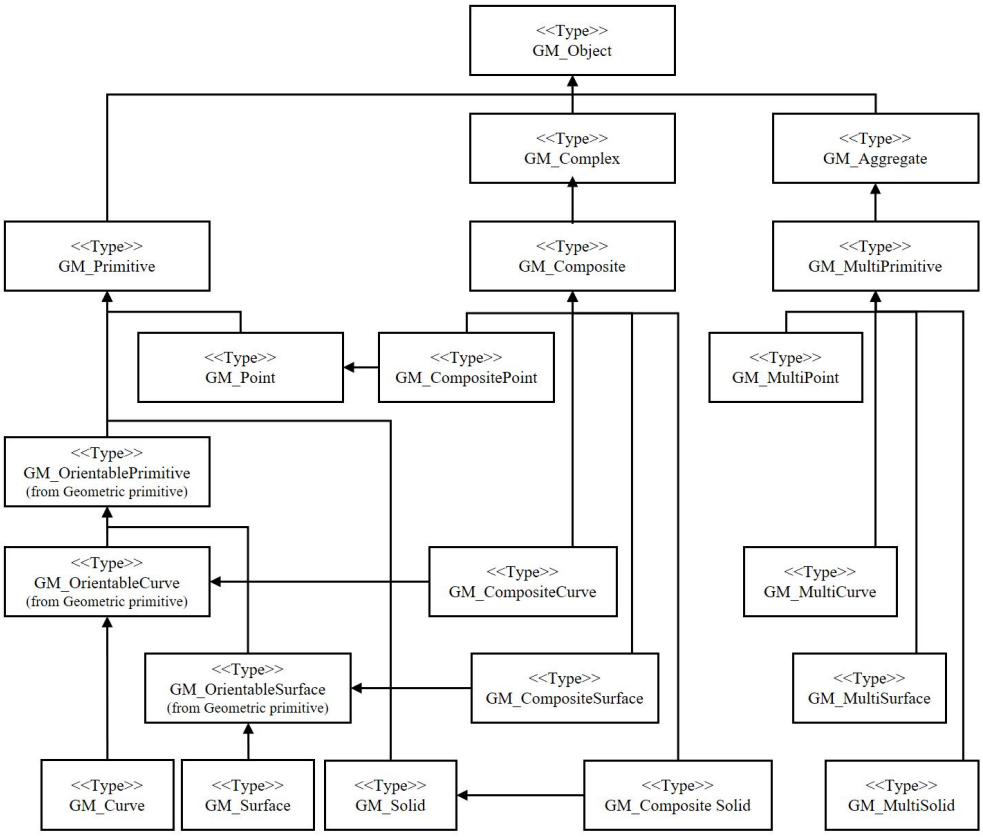


Abb. 2.5: Beziehung von Geoobjekten Francois et al. (2010))

Mobile Arbeitsprozesse, insbesondere pflanzenbauliche Prozesse sind an Orte gebunden, deren Merkmale förderliche oder einschränkende Einflüsse auf den Ablauf von Prozessen haben. Für die Verarbeitung von Ereignissen ist es von Bedeutung, die räumliche Situation strukturiert beschreiben zu können, um eine Situation bewertbar zu machen. Auf Grundlage der in Abb.

2.5 dargestellten Objekttypen können räumliche Beziehung von Geoobjekten systematisiert werden. Eine formale Beschreibung liefert das 9-*Intersection Schema* von Egenhofer (1998) in Abb. 2.6. Erweiterungen auf 3-dimensionale Artefakte, die in der Landwirtschaft von Bedeutung sind, nehmen Ellul & Haklay (2010) vor.

Abb. 2.6: 9-Intersection-Schema nach Egenhofer (1998)

	B^o	∂B	B^-
A^o	$A^o \cap B^o$	$A^o \cap \partial B$	$A^o \cap B^-$
∂A	$\partial A \cap B^o$	$\partial A \cap \partial B$	$\partial A \cap B^-$
A^-	$A^- \cap B^o$	$A^- \cap \partial B$	$A^- \cap B^-$

Die Beschreibung der topologischen Beziehung von zwei zu betrachtenden Geoobjekten kann in Form einer Matrix erfolgen (2.6), wobei A und B die zu betrachtenden Objekte sind, A^o/B^odas Innere des Objektes, ∂A/∂B die Grenze und A^-/B^- das Äußere des Objektes darstellen. Schnittmengen der jeweiligen Bereiche können den Wert $\emptyset$ oder $\neg\emptyset$ annehmen[4]. Topologische Beziehungen lassen sich mittels dieser Matrix beschreiben und klassifizieren. Aufbauend auf Abb. 2.6 zeigt Abb. 6.1 im Anhang die hieraus resultierenden grundlegenden topologischen Typen. Für die Visualisierung können andere Objekte heran gezogen werden, also auch Linien und Körper. Der Ansatz ist anwendbar in den Dimensionen R^0 bis R^3.

Die Topologie beschreibt die relativen Beziehungen von Geoobjekten ohne Anwendung von Bezugssystemen. Daher können Richtungsbeziehungen und metrische Beziehungen nicht berücksichtigt werden. Richtungsbeziehungen werden ordinal als Himmelsrichtungen (z.B. Nord) oder metrisch (180°) ausgedrückt. Entfernungsbeziehungen können ebenfalls ordinal (z.B. nah, weit) oder metrisch (z.B. 150 m) formuliert werden. Durch Einführung eines Bezugssystems, wie in Ebene Geometrie beschrieben, werden diese Relationen verfügbar. Die Darstellung von Objekttypen erfolgt im Anwendungszusammenhang auf der Basis von Koordinatensystemen, die in ISO 19111 definiert werden.

Zeit-Kontext

Neben der räumlichen ist die zeitliche Dimension ein relevanter Aspekt für die Planung und Steuerung pflanzenbaulicher Verfahren. Für die Planung und Steuerung von Prozessen ist es wichtig, auf Definitionen von Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit und zeitlicher Reihenfolgebeziehungen zuzugreifen.

[4] $\emptyset$ entspricht logisch *nicht wahr*, $\neg\emptyset$ entspricht logisch *wahr*

ISO 19107 (2003) definiert Standard-Konzepte, die zur Beschreibung zeitlicher Merkmale geografischer Objekte erforderlich sind (siehe Abb. 2.7, Sumrada 2013). Wie auch bei raumbezogenen Informationen sind zeitbezogene Informationen mit einem Referenzsystem zu hinterlegen. Die Norm führt hier den Gregorianischen Kalender und die Coordinated Universal Time (UTC) auf.

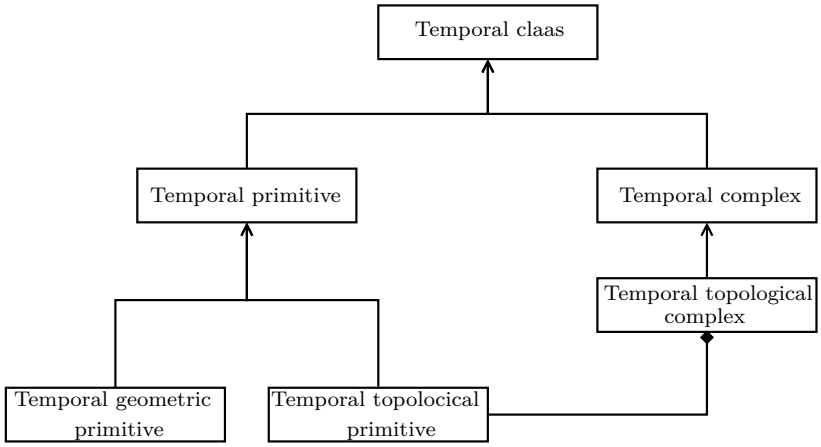


Abb. 2.7: Struktur des Zeit-Kontextes nach ISO 19108

Ressourcen-Kontext

In pflanzenbaulichen Verfahren werden zur Erzeugung von Produkten Produktionsfaktoren eingesetzt, die im betrachteten Zeitraum gebraucht oder verbraucht werden. Die Strukturierung erfolt nach Gutenberg (1975) zitiert in Ellinger & Haupt (1990) (Abb. 2.8).
Die Produktionsfaktoren menschliche Arbeit, Betriebsmittel und Werkstoffe werden nachfolgend in der Zusammenfassung als Ressourcen bezeichnet und lassen sich unabhängig von den Zeit- und Raumkontexten mit Merkmalen und Fähigkeiten beschrieben. In formalisierter Beschreibung liegen sie als Ontologie *agrovoc* (FAO 2007), XML-Schemata *ISOXML* (ISO 11783) oder *agroXML* (KTBL 2006) vor.

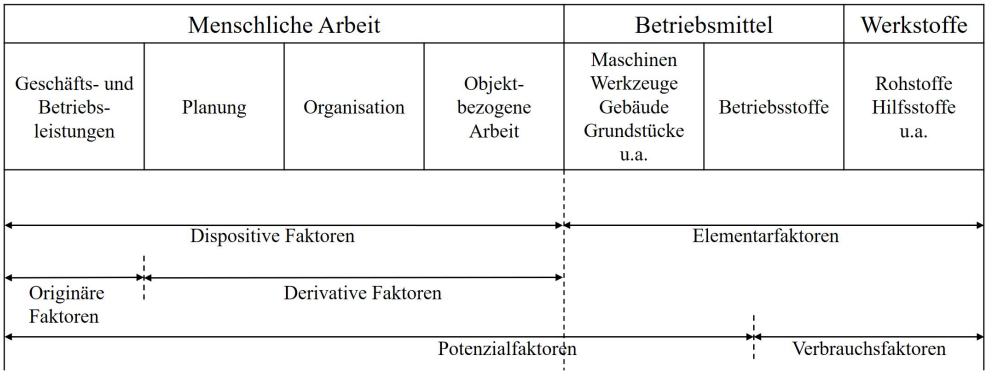


Abb. 2.8: Gliederung von Produktionsfaktoren nach Gutenberg (1975)

2.3.3 Geoobjekte

Die Geoinformatik befasst sich mit der räumlichen Beziehung von Geoobjekten (siehe auch Abschnitt 2.3.2). Geoobjekte lassen sich nach der Systematik von Streit (2005) hinsichtlich Geometrie, Topologie, Thematik und Dynamik beschreiben (Abb. 2.9.

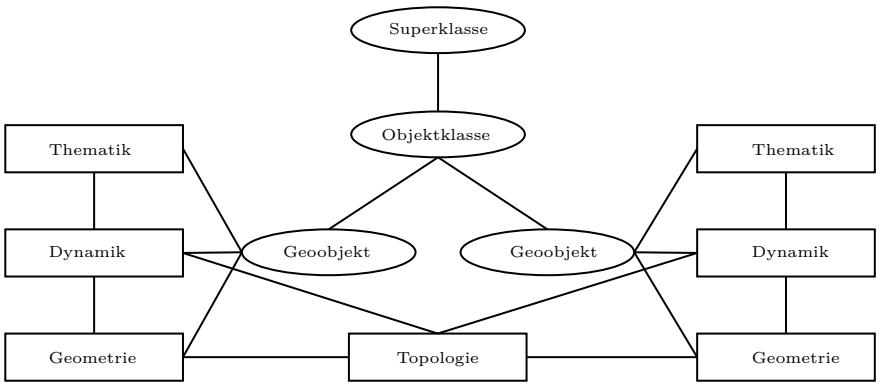


Abb. 2.9: Betrachtungsebenen von Geoobjekten nach Streit (2005), verändert

Streit (2005) nennt hierfür folgende Definitionen:

- Geometrie: Die Geometrie umfasst alle Angaben zur absoluten räumlichen Lage und Ausdehnung des Geoobjektes auf der Basis eines räumlichen Bezugssystems.
- Topologie: Die Topologie charakterisiert die räumlichen Beziehungen von Geoobjekten zueinander. Sie wird auch als Geometrie der relativen Lage bezeichnet.

- Thematik: Die Thematik umfasst alle fachlichen Charakteristika einer Klasse von Geoobjekten. Sie wird durch eine Menge von Attributen mit Attributwerten beschrieben.
- Dynamik: Mit dem Begriff der Dynamik werden die zeitlichen Veränderungen der Geoobjekte charakterisiert. Diese können sowohl die Geometrie, die Topologie wie auch die Thematik der Geoobjekte betreffen.

2.3.4 Prozess

Der Begriff *Prozess* ist als Rechtsterminus und allgemeiner betrachtet als Handlungsweise oder Vorgehen belegt (Pfeifer 1997). Nach IEC IEC 60050 (1999) ist ein Prozess „die [...] Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird." „Im Kontext der jeweiligen wissenschaftlichen Disziplin (Organisationstheorie, Wirtschaftsinformatik, Managementlehre usw.) wird der Begriff [jedoch] sehr unterschiedlich definiert" (Koch 2011). Nicht erwähnt sind hier biologische, chemische und physikalische Prozesse, die naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Eine Zweckbestimmung erfährt der Prozessbegriff im Zusammenhang unternehmerischen Handelns. Der hier verwendete Begriff des Geschäftsprozesses ist definiert als eine „Folge von Wertschöpfungsaktivitäten mit einem oder mehreren Inputs und einem Kundennutzen stiftenden Output." (Gabler 2014). Porter (1985) unterscheidet unmittelbar wertschöpfende Primäraktivitäten und Unterstützungsaktivitäten.

2.3.5 Selbstorganisation

Durch einen kontextorientierten Ansatz und daraus abgeleitete Kontexte und Aktivitäten soll der Automatisierungsanteil im landwirtschaftlichen Prozessen erhöht werden. Dadurch reduziert sich der Managementanteil, und der Grad der Selbstorganisation nimmt zu. Ein selbstorganisierendes System ist ein System, das seine grundlegende Struktur als Funktion seiner Erfahrung und seiner Umwelt verändert (Farley & Clark 1954). Erstmals genannt wurde der Begriff von Ashby (1962). Selbstorganisierende Mechanismen sind Forschungsgegenstand in zahlreichen Disziplinen, so z.B. in den Naturwissenschaften (Nicolis & Prigogine 1977), Wirtschaftswissenschaften (Ostrom 1990), Soziologie (Luhmann 2012) und Ingenieurswissenschaften (Eickenbusch et al. 2005).
Sie sind nach Probst (1987) durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- „*Komplexität*: Komplexität heißt in diesem Fall, dass die verschiedenen Elemente untereinander Beziehungen haben, die sich kontinuierlich ändern

können. Auch die Elemente an sich können ständigen Änderungen unterworfen sein. Das Verständnis eines Systems und die Fähigkeit zu Vorhersagen werden durch zunehmende Komplexität erschwert.

- *Selbstreferenz*: Wenn das System selbständig eine Aktion durchführt, dann hat das Auswirkungen auf den Zustand des Systems und das wirkt wiederum auf die nächsten Aktionen des Systems ein.
- *Redundanz*: Alle Komponenten in einem selbstorganisierenden System können organisieren, gestalten und lenken, dadurch entsteht Redundanz.
- *Autonomie*: Das System verwaltet sich selbst, ohne eine Eingabe von außen, d.h. das System bestimmt selbst, welche Beziehungen und Interaktionen zwischen den Einzelkomponenten auftreten."

Selbstorganisation ist wesentlich von der vom Beobachter gewählten Systemgrenze abhängig. Je nach Grenzziehung kann von einem mehr oder weniger hohen Grad der Selbstorganisation gesprochen werden (Çakar 2007). Das betrachtete (Prozess-)System ergibt sich aus Interaktion natürlicher, sozialer und technischer Systeme mit jeweils unterschiedlichen selbstorganisierenden Mechanismen. Zur Unterstützung selbstorganisierenden Verhaltens sind bei der Architekturentwicklung Regeln, Funktionen und Naturgesetze zu berücksichtigen.

2.3.6 Systemarchitektur

Eine Systemarchitektur ist nach CMU (2014) ein Mittel zur Beschreibung von Elementen und Interaktionen eines vollständigen Systems, seiner Hardware-Elemente und Software-Elemente. Auf Architekturen können unterschiedliche Sichten eingenommen werden. Eine Sicht bzw. Perspektive ist die Repräsentation einer Menge von Systemelementen und ihrer Beziehungen. Eine Sicht liefert eine bestimmte Perspektive des Systems [...] und zeigt das ganze System oder Teile davon. Systematiken zu Perspektiven liefern z.B. TOGAF (The Open Group 2010), Zachman (2014) und SAGA (Bund 2008).

Architekturen sind nach IEC 42010:2011 (2011) grundlegende Konzepte oder Eigenschaften von Systemen. Zur Entwicklung von Systemarchitekturen ist es zweckmäßig, sich Architekturmustern zu bedienen. Architekturmuster beschreiben Buschmann et al. (1996) als wiederverwendbare Bestandteile für eine Software-Architektur, die bestimmte Designprobleme und erprobte Lösungsverfahren beschreiben.

Einen umfassenden Überblick über Architekturmuster liefern z.B. Buschmann et al. (1996) und Rising (2000). Von besonderer Bedeutung im Zusammenhang kontextorientierter Betrachtungen ist dabei das ereignisbasierte

Muster. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass prozessrelevante Ereignisse erfassbar und verarbeitbar gemacht werden. Ereignisse führen aufgrund modellierter Geschäftsprozesse zum Start oder Beenden von Aktivitäten. Beispiel ist der Beginn der Messung und Dokumentation des Kraftstoffverbrauchs bei Eintritt einer Maschine in ein Feldpolygon und Beenden der Aufzeichnung beim Verlassen. Aktivitäten können in Übergangsformen von vollständig sequenziell bis vollständig parallel erfolgen. Die Summe der Aktivitäten, die zur Erreichung eines definierten Zieles führen, werden als Prozess bezeichnet. Das wesentliche Prinzip des ereignisbasierten Architekturmusters nach Page (1995) ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

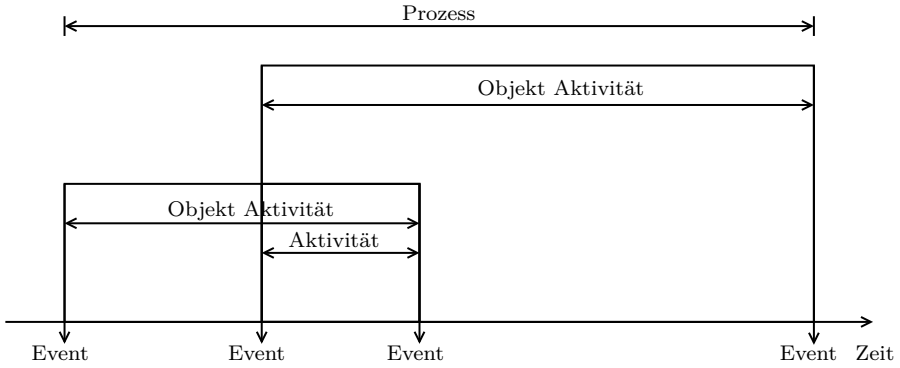


Abb. 2.10: Zusammenhang von Ereignis, Aktivität und Prozess nach Page

2.3.7 Simulation

Etymologisch betrachtet wurde unter Simulation bzw. simulieren zunächst ausschließlich das Vortäuschen einer Krankheit, Schmerzen o. ä. verstanden (Pfeifer 1997). Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erweiterte sich der Begriff durch Aufkommen der Simulation im technischen und wissenschaftlichen Zusammenhang (Spath 2009). Simulation ist in einer allgemeingültigen Definition nach Hartmann (2004) „die stellvertretende Nachbildung eines Prozesses oder einzelner seiner Aspekte durch einen anderen Prozess, wobei simuliertes und simulierendes System auf gleichen oder unterschiedlichen Substraten realisiert werden können." Eine zweckbezogene Definition liefert die VDI-Richtlinie 3633 (VDI-Richtlinie VDI 3633) und bezeichnet Simulation als „[...] das Nachbilden eines dynamischen Prozesses in einem System mit Hilfe eines experimentierfähigen Modells, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind."
Bossel (2004) nennt folgende Kriterien für die Anwendung von Simulationen:

- Anwendung einer einheitlichen Methodologie und vielseitig verwendbare Softwareprogramme
- Kostenvorteil bei Modellerstellung und Simulation im Vergleich mit realen oder analogen physikalischen Modellen
- Raffung oder Dehnung des zeitlichen Ablaufes
- Gefahr der Beeinträchtigung des zu untersuchenden Systems

Weitere Kriterien lassen sich ergänzen:

- Gefahr der Beeinträchtigung des Untersuchenden (Beispiel: Ionisierende Strahlung)
- Der Untersuchungsgegenstand entzieht sich der menschlichen Beobachtung (Beispiel: Astronomie)
- Die Komplexität des realen Systems ist zu hoch. (Beispiel: Soziale Systeme)

Die lange Laufzeit von Experimenten, geringe Wiederholungshäufigkeit und hohe Variantenvielfalt sprechen für die Nutzung von Simulationstechniken.

Eine allgemeingültige Taxonomie von Simulationsbegriffen und -methoden ist in der Literatur nicht zu finden. Die Entscheidung für Simulationsmethoden erfolgt vor dem Hintergrund konkreter Anwendungsdomänen, gegebener Problemstellungen und verfügbarer Simulationssysteme.

Relevant für die Auswahl von Simulationsmethoden ist der zu simulierende Sachverhalt; im vorliegenden Fall handelt es sich um Geschäftsprozesse. Für die Simulation von Geschäftsprozessen werden vorwiegend die Methoden *System Dynamics Simulation*, *Discrete Event Simulation* und *Agent Based Simulation* angewendet. Für die Entwicklung einer kontextbasierten Architektur stehen diskrete bzw. diskretisierte Zustände im Vordergrund. Damit scheidet die System Dynamics Simulation aus. Auch die Discrete Event Simulation erscheint nur teilweise geeignet, weil die Abbildung mobiler, kooperierender Einheiten nur eingeschränkt möglich ist. Agentenbasierte Simulation ermöglicht eine Untersuchung solcher Objekte, weil mit ihnen komplexere Handlungen darstellbar sind.

Simulationen lassen sich in unterschiedlich ausgeprägter Koppelung zu realen Systemen durchführen, von weitgehend von der Realität entkoppelter Simulation bis hin zu *dynamic data driven simulation* (DDDS), in der das Simulationssystem durch einen kontinuierlichen Echtzeit- Datenstrom aus der realen Umgebung beeinflusst wird (Hu 2011). Daraus ergeben sich Möglichkeiten zur Generierung von Input-Daten, echtzeitorientierter Situationsdarstellung und echtzeitorientierter Beeinflussung realer Systeme. Die zunehmende Anwendung von Simulationen ist in MES-Systemen zu beobachten (Böhler 2016).

2.3.8 Agenten und Entscheidungstheorie

Aufgrund des hohen Bedarfs an Analysefähigkeiten und Koordination zur Erzielung eines gemeinsamen Optimums im dargestellten Ernteprozess erscheint die Anwendung eines agentenbasierten Modellansatzes zielführend. Wooldridge (2009) bezeichnet Agenten als in einer bestimmten Umgebung eingesetzte Computersysteme, die in der Lage sind sich autonom zu verhalten und dadurch gegebene Ziele zu verfolgen. Wooldridge nennt sinngemäß Faktoren, die für die Anwendung eines agentenbasierten Ansatzes sprechen:

1. Das System ist offen oder zumindest hochdynamisch, von Unsicherheit gekennzeichnet oder komplex.
2. Agenten lassen sich als Metapher handelnder Organisationen verstehen, die miteinander kooperieren, komplexe Probleme lösen oder im Wettbewerb stehen.
3. Es gibt Situationen, in denen zentrale Datenhaltung, Steuerung und Wissen ein angestrebtes Prozessergebnis verhindern. Verteilte Ansätze sind erforderlich.
4. Es existieren Altsysteme (legacy systems), die in informationstechnische Prozesse einzubinden sind. Problematik dieser Systeme ist, dass sie Prozesse unterstützen müssen, die zum Zeitpunkt ihrer Implementierung noch nicht im Fokus standen.

Das landwirtschaftliche Umfeld, insbesondere der Bereich der Feldwirtschaft, kann aufgrund der einwirkenden Umwelteinflüsse als offen, gering deterministisch und komplex bezeichnet werden. Die in diesem Umfeld operierenden Menschen, Maschinen und stationären Anlagen lassen sich durch Agenten abbilden. Sie nehmen über ihre Sensoren Informationen aus der Umgebung (*environment*) auf (*perception*), treffen Entscheidungen (*decision*) und beeinflussen (*action*) den Prozess und die Umgebung mit Hilfe vorhandener Aktoren (*actuators*). Diese Effekte werden wiederum von anderen Agenten registriert. Eine Zusammenfassung dieses Mechanismus nach Wooldridge (2009) ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

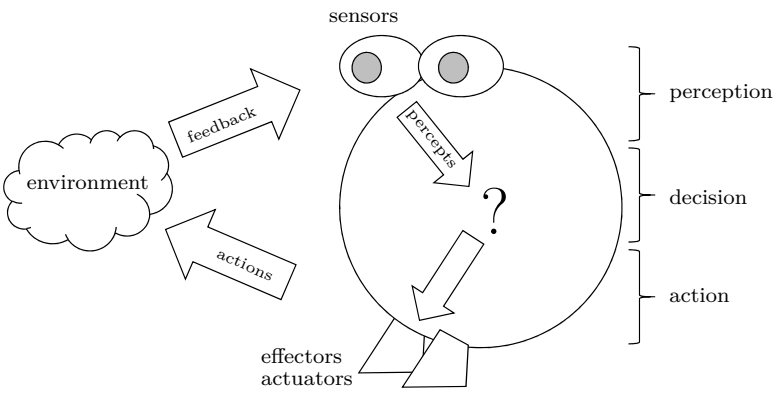


Abb. 2.11: Funktionsprinzip eines Agenten nach Wooldridge (2009)

Agenten sind im Grundsatz autonom, lernfähig und kooperativ (Nwana 1996). Sie liefern das Gerüst zur Koordination von mobilen Prozessen im Anwendungsfall . Im Vordergrund stehen kooperative Aspekte. Detaillierte Handlungsoptionen für Agenten nennen Frank et al. (2004), wie in Abbildung 2.12 dargestellt.

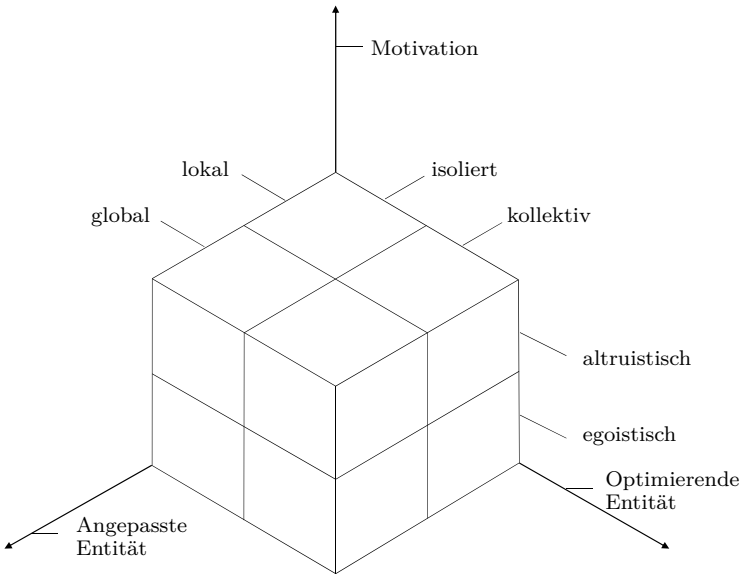


Abb. 2.12: Klassifikation der Dimensionen von Agenten nach Frank et al. (2004)

Zur Beherrschung gering deterministischer Prozesse ist es hilfreich, Agenten im Zusammenhang mit Arbeiten aus den Kognitionswissenschaften (three-level framework for action control (Strube 1998)) sowie der der Mechatronik

(Operator-Controller Modul (OCM) (Frank et al. 2004)) zu betrachten. Den drei Schichten von Strube (1998) stellen Frank et al. (2004) Merkmale mechatronischer Systeme gegenüber. Ausgewählte Merkmale sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Agenten eignen somit zur Darstellung menschlicher und systemtechnischer Verhaltensweisen, wie sie im Anwendungsfall durch Kombination von Menschen und Maschinen vorliegen.

Tab. 2.1: Modellvergleich nach Strube (1998) und Frank et al. (2004) mit Beispiel

Ebene	3-level-Framework (Strube)	Operator-Controller-Module (Frank et al.)	Beispiel
kognitiv	bewusste Entscheidung, Deduktion	kognitive Fähigkeiten, wissensbasierte Systeme	Lösen von Auftragskonflikten
assoziativ	etabliertes motorisches Verhalten	Modifikation von Controllern	Abweichung innerhalb von Aufträgen
reflexiv	reflexartiges Verhalten	Echtzeit-Verhalten	Verfolgung geplanter Pfade

Mit dem betrachteten Operator-Controller-Modul können Agenten grundlegende Fähigkeiten zur Anpassung an die Umgebungsbedingungen zugewiesen werden. Aufbauend auf dem in Abbildung 2.13 dargestellten Regelkreis lässt sich nun der Regler, wie in Tab. 2.1 dargestellt, präzisieren.

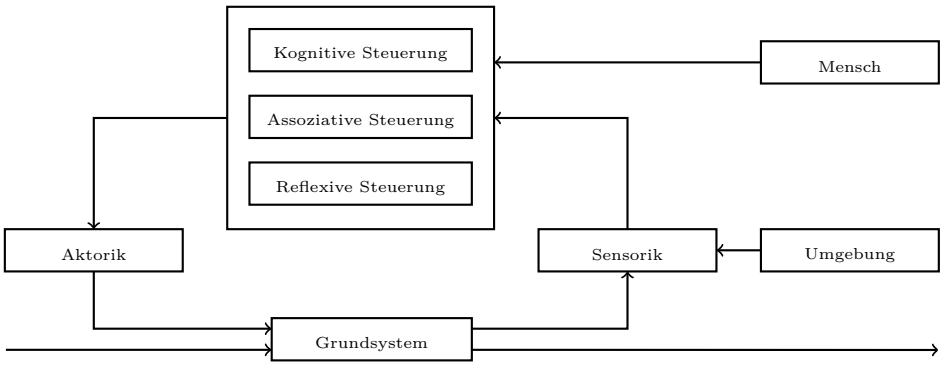


Abb. 2.13: Erweitertes OCM-Modell nach Frank et al. (2004), verändert

Dieser Regler/Agent ist in zunächst isolierter Betrachtung durch nicht kooperatives Verhalten gekennzeichnet. Aufgrund fehlender Beziehungen zu anderen Agenten kann er lediglich ein lokales Bild erzeugen und entsprechend lokale Ziele verfolgen. Ernteprozesse erfolgen jedoch grundsätzlich in Kooperation mehrerer Agenten (Erntemaschinen, Transportfahrzeuge, Verdichtungsfahrzeuge). Hierfür ist der in Abbildung 2.11 dargestellte Agent entsprechend zu erweitern:

- Der Agent vernetzt sich unter Nutzung bestehender Kommunikationsmechanismen zwischen kognitiver und assoziativer Schicht dahin gehend, dass auch Schichten anderer Agenten berücksichtigt werden. Daraus resultieren zwei neue Optionen:
  - So kann ein Agent (z.B. Transportfahrzeug) seine Zielinformationen aus der kognitiven Schicht eines anderen Agenten (z.B. Feldhäcksler) erhalten.
  - Im Umkehrschluss kann ein Agent Zielinformationen seiner eigenen kognitiven Schicht der assoziativen Schicht eines anderen Agenten zur Verfügung stellen.
- Weil landwirtschaftliche Prozesse nicht im Sinne eines selbstorganisierenden Schwarms arbeiten, ist zur Erreichung übergeordneter Ziele ein koordinierender Agent erforderlich. In der Beziehung zwischen ressourcenbezogenen Agenten und koordinierendem Agenten erfolgt die Vernetzung zwischen kognitiver und assoziativer Schicht.

Durch die schrittweise Hinzunahme von Funktionen und Handlungsweisen lassen sich mit Agenten, analog zur Robotik (Granot 2001), unterschiedliche Automatisierungsniveaus erreichen, die bis zu vollautonomen Verhaltensweisen reichen (Abb. 2.14).

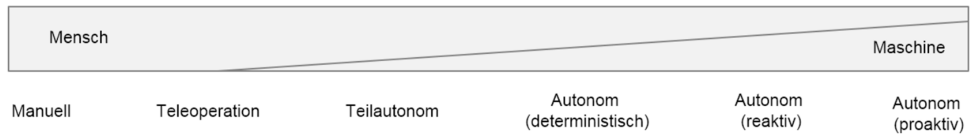


Abb. 2.14: Handlungsbestimmende Anteile in Agenten (Granot (2001), verändert)

2.3.9 Logistische Kennlinien und Kennfelder

In technischen und wertschöpfenden Prozessen stehen Input (Produktionsfaktoren) und Output (Produkte) in einer funktionalen Beziehung. Die Visualisierung der Beziehung kann in Form von Kennlinien erfolgen. Die Darstellung mehrerer, in Beziehung stehender Kennlinien, wird als Kennfeld bezeichnet. Kennfelder sind geeignet, um komplexe Sachverhalte schnell erfassbar zu machen und darauf basierend manuell oder automatisiert Planungs- und Steuerungsaufgaben vorzunehmen. Eine bekannte Anwendung sind Kennfelder zur Beschreibung der Motorcharakteristik. In industriellen Produktionsprozessen werden Kennlinien und Kennfelder umfassend eingesetzt. Sie sind dabei häufig Bestandteile von Leitständen. Nyhuis & Wiendahl (2012) beschreiben die Anwendung logistischer Kennlinien. Logistik wird hierbei als wesentlicher Teil des Produktionsprozesses

verstanden. In dieser Arbeit wird ergänzend zur agentenbasierten Simulation ein mathematisches Modell zur Darstellung sowohl der Charakteristik von Teilprozessen als auch des Gesamtprozesses entwickelt.

2.4 Relevante Forschungsprojekte

2.4.1 AGRICOLA

Im Projekt AGRICOLA wurde die Anwendung der Agenten-Technologie zur Verbesserung der Maschinen-Einsatzplanung in landwirtschaftlichen Prozessen untersucht (Gerber & Klusch 2004). Mit Hilfe der Agenten erfolgt die Bildung vorteilhafter Mechanisierungsketten sowie deren Koordination innerhalb von laufenden Prozessen. Die Agenten versuchen mittels Verhandlungen Angebot und Nachfrage von Maschinenkapazitäten überbetrieblich in Einklang zu bringen. Verhandlungsergebnisse werden als Koalitionen bezeichnet, der Prozess als simulationsbasierte dynamische Koalitionsformierung. Hiermit wird ein für Maschinenringe typisches Szenario nachgestellt.

Agenten wird in AGRICOLA eine übergeordnete, vermittelnde Rolle zugewiesen. Sie repräsentieren nicht die Maschinen selbst. AGRICOLA stellt den Aspekt der Fähigkeit zur Verhandlungsfähigkeit in den Vordergrund. Verhandlungsprozesse im engeren Sinne werden nur beiläufig betrachtet.

2.4.2 INA

Der zunehmende Einsatz von Sensoren und Vernetzungstechnologien ist Basis für die systematische Entwicklung system- und wissensbasierter Dienstleistungen im Sinne des Service-Engineerings (Steckel et al. 2006). Im Projekt *INA*[5] wurde ein Methodenbaukasten entwickelt, der einen strukturierten Dienstleistungsentstehungsprozess in Analogie zu etablierten Produktentstehungsprozessen ermöglicht. Aus landtechnischer Sicht erscheint es sinnvoll, das Produktgeschäft um produktbezogene Leistungen (Services) zu ergänzen. Dienstleistungen liefern einen Beitrag zur Verbesserung der Betriebsbereitschaft, Verfügbarkeit und Produktivität mobiler Arbeitsmaschinen und somit zusätzliche Differenzierungsmerkmale.

Weitere wichtige Ergebnisse waren die prototypische Entwicklung einer Telematik-Lösung[6], eines regelbasierten Einstelloptimierungssystems[7] sowie die

[5] Langtitel: Integrierte, multimedial gestützte Agrardienstleistungen in virtuellen Strukturen
[6] Weiterentwicklung zu CLAAS-Telematics
[7] Weiterentwicklung zu CLAAS CEMOS

Initiative für das landwirtschaftliche Datenbeschreibungs- und Austauschformat KTBL (2006).

Diese Arbeit greift Methoden der Prozess-, Leistungs- und Dienstleistungsmodellierung auf, die im Rahmen des Projektes INA entwickelt wurden.

2.4.3 Robot2Business

Im Projekt *Robot2Business*[8] wurden Methoden zur Automatisierung von Geschäftsprozessen entwickelt und prototypisch implementiert (Steckel et al. 2009). Im Mittelpunkt steht der Ansatz, Prozesskontexte zu modellieren, erfassbar und in der Prozessausführung nutzbar zu machen. Dadurch soll ein hoher Grad von Adaptivität, Selbstorganisation und autonomem Verhalten ermöglicht werden. Vorbild sind intelligente stationäre und mobile Roboter. Ansätze der Robotik wurden für das Service-Engineering adaptiert (Steckel 2011).

Relevante Vorarbeiten aus dem Projekt Robot2Business sind ein Prozess-Konfigurator, ein arbeitswissenschaftliches Zeitschema sowie erste Ansätze zur Formulierung von Prozesskontexten.

Mit dem Prozesskonfigurator lassen sich wertschöpfende Vorgänge strukturiert beschreiben. Der Automatisierungsgrad bei Planung, Steuerung und Dokumentation von Prozessen lässt sich dadurch erhöhen. Das arbeitswissenschaftliche Schema schafft eine durchgängige syntaktische Definiton und Systematik von Begriffen zur Beschreibung und Bewertung von Prozessen. Strukturierte Prozesskontexte ermöglichen eine klare Abgrenzung von Prozesszuständen und nennen Bedingungen für deren Transitionen. Sie sind der Schlüssel für kontextbasierte Steuerung und Automatisierung informationstechnischer Prozesse. Die drei genannten Komponenten sind geeignet, den Grad der Selbstorganisation in Prozessen mobiler Arbeitsmaschinen zu erhöhen.

2.4.4 iGreen

Im Forschungsprojekt *iGreen*[9] wurde ein Ansatz für die umfassende informationstechnische Vernetzung von Wertschöpfungsketten in der Agrarwirtschaft[10] realisiert.

Es wurde eine prototypische Infrastruktur entwickelt, in der mit Hilfe se-

[8] Langtitel: Informationstechnische Integration teilautonomer, mobiler Maschinen und Prozesse in Geschäfts- und Dienstleistungsmodellen

[9] Langtitel: Intelligente Wissenstechnologien für das öffentlich-private Wissensmanagement im Agrarbereich

[10] Unter Agrarwirtschaft wird hier die Summe aus Landwirtschaft, deren Lieferanten und erste Stufe der Abnehmer verstanden

mantischer Technologien Informationen kontextsensitiv bereitgestellt werden. Im Vordergrund steht somit die organisationsübergreifende Vernetzung. Die entwickelte Infrastruktur wird anhand definierter Anwendungsfälle der Bereiche Erntelogistik, Bestandesführung und Instandhaltung validiert. Wesentliche Ergebnisse sind als Intermediär fungierende Netzwerkknoten, eine herstellerübergreifende M2M-Systemarchitektur (Meyer et al. 2012), eine auf agroXML basierende Ontologie (KTBL 2006) sowie ein Leitfaden zu datenschutzrechtlichen Aspekten in der Landwirtschaft (DFKI 2013). Entwickelte Konzepte für die M2M-Kommunikation wurden in die Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF 2015) mit dem Ziel der Standardisierung aufbauend auf dem ISOBUS-Standard 11783 eingebracht.

Die entwickelte Ontologie dient als Basis für die Strukturierung, Ermittlung und Verarbeitung von Prozesskontexten. Das Konzepte der Inter-Maschinenkommunikation (M2M) dient als Grundlage für die direkte, drahtlose Vernetzung von Maschinen in der Systemarchitektur.

2.4.5 marion

Im Projekt *marion*[11] wurde ein Planungssystem zur Koordination autonomer mobiler Arbeitsmaschinen im Ernteprozess entwickelt. Auf Basis eines Pfadplanungssystems für Mähdrescher werden optimale Fahrstrategien ermittelt und abgearbeitet (Reinecke et al. 2013). Die Mähdrescher sind unter Vorgabe von Feldgeometrien und Feldzugangspunkten in der Lage, diesen Plan mit Hilfe von Vorfahrtreglern und Lenkautomaten autonom abzuarbeiten. Die Mähdrescher kommunizieren ihren jeweiligen lokalen Plan einschließlich Korntankfüllstand an eine globale Planungsinstanz, die dem Infield-Transportfahrzeug zugänglich ist. Unter Kenntnis des geplanten Pfades und aktuellen Durchsatzes beim Mähdrescher ermittelt das Transportfahrzeug seinen eigenen Pfad für Ort und Zeitpunkt der erforderlichen Überladung und bewegt sich unter Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich Befahrbarkeit ebenfalls autonom zum Mähdrescher. Der Überladevorgang erfolgt im Master-Slave-Verfahren, in dem der Mähdrescher Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung des Transportfahrzeuges bestimmt. Das Transportfahrzeug ermittelt die Situation mehrerer im Feld operierender Mähdrescher und versucht durch Entwicklung eines eigenen lokalen optimalen Plans einen Stillstand von Mähdreschern zu vermeiden. Ziel ist die Erhöhung der Effektivität von Ernteketten innerhalb der Feldgrenzen unter Berücksichtigung von Zeit-, Kosten- und Qualitätsaspekten.

In dieser Arbeit werden Ansätze zur dynamischen Planung kooperierende

[11] Langtitel: Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten

Prozesse für Transporte außerhalb des Feldes weiter entwickelt. Detaillierte Aspekte der Pfadplanung werden vereinfacht dargestellt.

2.4.6 M2M-Teledesk

Gegenstand des Forschungsprojekts *M2M-Teledesk* ist der Aufbau einer standardisierten, branchenübergreifenden Telemetrielösung für Zwecke der Fernüberwachung, Steuerung und des Controlling von Maschinen über Mobilfunknetze (Rusch et al. 2013). Im Rahmen des Projekts M2M-Teledesk wurden ein Demonstrator für eine offene IT-Integrationsplattform und ein Servicekonzept für eine branchenübergreifende Lösung für Telemetriedienste entwickelt.

Die für die Simulation verwendeten Leistungs- und Verbrauchskennwerte werden mit dem im Projekt LaSeKo begonnenen und in M2M-Teledesk weiter entwickelten Telemetriesystem erfasst (Kapitel 3.6).

2.4.7 pre agro

Gegenstand der Projekte *pre agro* und *pre agro II* war es, für den Einsatz von Precision Farming in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion spezielle Lösungen zu wichtigen Problemen der Standort- und Bestandsanalyse und dem Informationsmanagement im Betrieb zu liefern sowie Voraussetzungen für eine Verbesserung der Praxiseinführung von Precision Farming zu ermitteln (Werner 2008). Die pre-agro-Projekte haben den Präzisionsbegriff hinsichtlich betrieblicher Managementmethoden erweitert.

Diese Arbeit setzt auf den Managementmethoden auf und stellt die zeitlich präzise Koordination von Prozessen in den Vordergrund.

2.4.8 LaSeKo

Zur Unterstützung des automatisierten Datentransfers in der pflanzenbaulichen Prozesskette, z.B. für Zwecke der Rückverfolgbarkeit, wurde im Projekt *LaSeKo*[12] ein Dokumentationssystem entwickelt, in dessen Mittelpunkt eine Kommunikationseinheit steht, die sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich nutzbarer Kommunikationsstandards und Applikationsentwicklung auszeichnet. Es wurden M2M und Store-carry-forward-Szenarien (SCF) untersucht. Aufgrund ermittelter Partner-Signaturen und typischer Verhaltensweisen wurden Kooperationsbeziehungen ermittelt und auf deren Basis die Prozessdokumentation

[12]Langtitel: Landwirtschaftliches, selbstkonfigurierendes Kommunikationssystem zur Überwachung, Optimierung und Dokumentation von Ernteprozessen

automatisiert (LaSeKo 2009). Der hier entstandene Hardware-Prototyp wurde in den Projekten iGreen (2.4.4) und M2M-Teledesk (2.4.6) weiter entwickelt.

Die in LaSeKo entwickelte und in den Projekten iGreen und M2M-Teledesk weiterentwickelte Hardware, einschließlich Ablaufumgebung liefert die initiale Basis für das in dieser Arbeit eingesetzte Modul zur Erfassung von Prozessdaten als Eingangsgrößen in die agentenbasierte Simulation. Besondere Bedeutung kommt den M2M-Kommunikationsverfahren zu. Grundlegende Erkenntnisse dieser Arbeit sind in die Architektur dieses Systems zurück geflossen und werden zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Arbeit im Rahmen von Vorserienversuchen validiert.

2.4.9 FutureFarm

Im Projekt *FutureFarm*[13] wurde eine Vision zum Einsatz informationstechnischer Systeme und Standards erarbeitet. Es ist zu beobachten, dass die informationstechnischen Anwendungen den Anforderungen an das Farmmanagement nicht gerecht werden. Die hohe Komplexität der eingesetzten Systeme behindert eine einfache Einbindung und erschwert Planungen. Durch verbesserte Management-Informationssysteme, weiter entwickelte Standards und präzise Managementmethoden sollten die organisatorischen Rahmenbedingungen verbessert werden (Blackmore & Apostolodi 2011). Das Projekt schafft eine erweiterte Sicht auf das bestehende Problem hinsichtlich divergiernder Wissens- und Entwicklungsstände zwischen naturwissenschaftlichen und technologischen Sachverhalten. Technologische Entwicklungen (z.B. GPS, ISOBUS) eilen den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen (Dynamik in Ökosystemen) voraus und führen zu Akzeptanzproblemen von Precision-Farming-Lösungen. Verstärkt wird das Problem dadurch, dass bei der Integration dieser Technologien den Bedürfnissen der Anwender (z.B. Anwenderfreundlichkeit) nicht ausreichend Rechnung getragen wird. Ursache dafür ist die mangelhafte Interdisziplinarität im Rahmen der Anforderungsanalyse.

2.4.10 PreSeed

Im Projekt *PreSeed*[14] wurde ein neuer Ansatz zur Verarbeitung von Kontexten in Geschäftsprozessen entwickelt. Während die Theorie der Context-Awareness bereits ausführlich untersucht ist, gab es bislang keine Arbeiten zu kontext-

[13] Langtitel: Meeting the challenges of the farm of tomorrow by integrating Farm Management Information Systems to support realtime management decisions and compliance to standards

[14] Langtitel: Integration kontextsensitiver Systeme in Unternehmensprozesse

getriebenen Ansätzen (context-driven) (Füller et al. 2012). Der kontextgetriebene Ansatz ermöglicht bereits in der Modellierung eine Separierung von Prozessen und Kontexten und damit eine starke Vereinfachung in der Anwendungsentwicklung. Zentraler Aspekt ist die Fähigkeit ermittelter Kontexte, relevante Prozessbausteine zu ermitteln und zur Ausführung zu bringen.

Das Projekt PreSeed liefert wichtige theoretische Grundlagen zur Verarbeitung von Kontexten in landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen.

2.4.11 KOMOBAR

Auf der Grundlage praxisfähiger technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Lösungsansätze wurden im Projekt *KOMOBAR*[15] ausgewählte Referenzanwendungslandschaften für die Agrarwirtschaft von der Produktion über die Lagerung bis hin zu der ersten Verarbeitungsstufe entwickelt. Dabei sind alle relevanten Akteure – Landwirte, Lohnunternehmen, Genossenschaft, verarbeitende Betriebe etc. – einzubeziehen, um einen möglichst hohen Grad an Selbstoptimierung innerhalb dieser Lieferkette zu erzielen. Dabei entstehen Systeme mit offenen IT-Schnittstellen und ermöglichen innovationsfähigen KMU, dort mit eigenen Entwicklungs-, Vertriebs- und Optimierungsschritten anzusetzen.

Für die Entscheidungsunterstützung in landwirtschaftlichen Logistikprozessen wird ein agentenbasierter Ansatz verfolgt. Im Vordergrund steht die Entwicklung transparenter *multi-hop* Routing-Mechanismen, insbesondere *store-carry-forward*. Weiterhin wird vor dem Hintergrund der schnellen Entwicklung mobiler Endgeräte die Plattformunabhängigkeit untersucht (Quindt et al. 2011).

2.5 Anwendungsfall Silomaisernte

Die Entwicklung der Architektur wird am Beispiel eines landwirtschaftlichen Prozesses mit folgenden Merkmalen dargestellt:

- Mehrere Beteiligte, von denen niemand in der Lage ist, aufgrund spezifischer Fähigkeiten das angestrebte Prozessergebnis allein zu erreichen, kooperieren miteinander. Das Verhalten eines Beteiligten hat unmittelbare Auswirkungen auf andere Beteiligte und macht diese dadurch voneinander abhängig.
- Relevante Prozessdaten sind messtechnisch erfassbar. Damit lässt sich der Prozess transparent darstellen.
- Aus den erfassten Prozessdaten lassen sich Kennzahlen ermitteln, auf deren

[15] Langtitel: Entscheidungsstrategien und Kommunikationsstrukturen für kooperierende mobile Arbeitsmaschinen in der Agrarwirtschaft

Grundlage im Sinne vorhandener Ziele steuernd eingegriffen werden kann.
- Die Beteiligten verfolgen unterschiedliche Ziele. Der Auftraggeber (Landwirt) strebt minimale Kosten (€/t Erntegut), der Auftragnehmer (Lohnunternehmer) maximale Anzahl verkaufter Maschinenkapazität an. Die Architektur kann divergierende Ziele und Handlungsweisen transparent machen und einen Lösungsbeitrag für diesen Konflikt liefern.
- Der Prozess ist wirtschaftlich relevant und geeignet, Verbesserungspotenziale auf Basis etablierter Verfahren qualitativ und quantitativ zu veranschaulichen.
- Der Prozess zeigt Anknüpfungspunkte zur Übertragung auf andere Anwendungsfälle.

Ein Prozess, der durch diese Merkmale gekennzeichnet ist, ist die Ernte von Silomais. Dabei handelt es sich um ein dreistufiges Verfahren, ausgeführt durch voneinander abhängigen Maschinen und bestehend aus den Teilprozessen:

- Ernten: Ein Selbstfahrender Feldhäcksler (SFH) schneidet die stehende Maispflanze ab, zerkleinert sie zu definierter Partikellänge und überlädt sie auf ein Transportfahrzeug.
- Transportieren: Transportfahrzeuge (TF) bestehend aus Traktor und Anhänger/n nehmen das zerkleinerte Erntegut vom SFH auf, bringen es zum Lagerort (Fahrsilo) und laden es dort entweder vor oder auf dem Silo ab.
- Einlagern: Ein Verdichtungsfahrzeug (VF) bestehend aus einem mit Zusatzgewichten versehenen Traktor und Planierschild schiebt das vor dem Silo abgeladene Erntegut auf das Silo und verdichtet das Material durch mehrfaches Überfahren.

Neben den voran genannten Merkmalen sprechen zwei weitere Kriterien für die Auswahl dieses Anwendungsfalls:

1. Bedeutung landwirtschaftlicher Transportprozesse
   Die wirtschaftliche Bedeutung des Anbaus von Silomais hat in den vergangenen Jahren, ausgelöst durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2012) und seine Vorläufer, stark an Bedeutung gewonnen. So hat sich in Deutschland die Anzahl der Biogasanlagen von 1.750 im Jahr 2003 auf 7.772 Einheiten erhöht (FNR 2013b). Hierfür wurden im Jahr 2013 Energiepflanzen auf einer Fläche von 1.157.000 ha angebaut (FNR 2013a). Davon entfallen auf den hier im Anwendungsfall betrachteten Silomais 800.000 ha (FNR 2013c). In den vergangenen 10 Jahren hat die durchschnittliche installierte elektrische Leistung je Biogasanlage im Bundesgebiet von 108 kW in 2003 auf 423 kW deutlich zugenommen (BMELV 2012). Bei den größeren Anlagen sind sind die Zuwächse besonders groß. So hat sich in Niedersachsen die Anzahl der Biogasanlagen in der Leistungsklasse größer 1.001 kW im Zeit-

raum von 2009 bis 2011 verdoppelt, während mittelgroße Anlagen lediglich um ca. 50 Prozent zugenommen haben (NMELV 2012). Daraus resultiert ein erhöhter Transportbedarf verbunden mit größeren Transportentfernungen. Ein kontinuierlicher Materialfluss vom Feld zum Silo kann in begrenztem Umfang durch die Verwendung größerer Transportfahrzeuge realisiert werden. Sind die gesetzlich zulässigen Grenzen erreicht, ist eine Realisierung des Materialflusses nur durch den Einsatz zusätzlicher Transportfahrzeuge möglich. Mitterleitner et al. (2007) ermittelt für ein typisches Entfernungsspektrum zwischen 2 und 35 km einen Bedarf von 3 bis 14 Transportfahrzeugen (40 m^3) (Abb. 2.15). Die Koordination solcher Ernteketten, gelegentlich auch mehrerer gleichzeitig, stellt hohe Anforderungen an die Beteiligten. Die entwickelte Systemarchitektur soll einen Beitrag zur Unterstützung leisten.

2. Einfluss des Einlagerungsprozesses auf die Produktqualität
   Silomais wird geerntet, wenn die Körner einen Trockenmasse (TM)-Gehalt von 55 bis 60 Prozent aufweisen. Der mittlere TM-Gehalt der Gesamtpflanze liegt dann bei 32 bis 35 Prozent. Zu diesem Zeitpunkt sind Ertrags- und Qualitätszuwachs abgeschlossen (Nußbaum 2010). Ziel des Einlagerungsprozesses ist es, die gegebene Menge und Qualität unter weitgehender Vermeidung von Verlusten durch eine Milchsäuregärung in einem Fahrsilo zu konservieren, um das Erzeugnis zu einem späteren Zeitpunkt entnehmen zu können. Um eine optimale Milchsäuregärung zu ermöglichen, wird das Erntegut mit einem Fahrzeug verdichtet. Dadurch wird die sauerstoffreiche Luft aus dem Silostock verdrängt und anaerobe Bedingungen für die Gärung geschaffen. Nußbaum (2006) liefert Anhaltswerte für anzustrebende Richtwerte bei der Verdichtung (siehe Tab. 2.2).

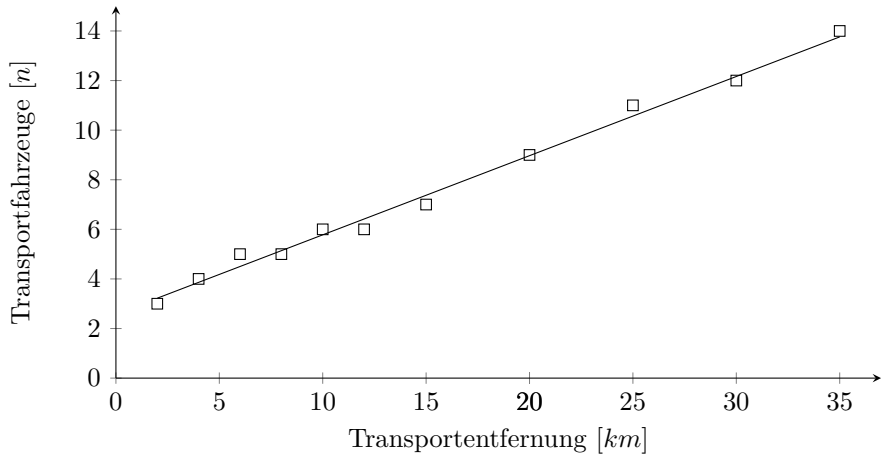


Abb. 2.15: Erforderliche Anzahl Transportfahrzeuge nach Transportentfernung bei konstantem Massenstrom (Mitterleitner et al. (2007), verändert)

Tab. 2.2: Anhaltswerte zur Einschätzung der Silier- und Entnahmebedingungen (Nußbaum (2006), verändert)

Silierbedingungen	gut	mittel	schlecht
Verdichtung Mais	kg TM/m^3	kg TM/m^3	kg TM/m^3
$<$ 30 % TM	230	210	190
30-35 % TM	250	230	200
$>$ 35 % TM	270	250	220

Obwohl der Verdichtungsvorgang der qualitätsbestimmende Teilprozess im gesamten Ernteprozess ist, zeigen Untersuchungen von Richter et al. (2009) (Abb. 2.16) oder Beeker (2003), dass solche Richtwerte in der Mehrzahl der untersuchten Stichproben nicht erreicht werden.

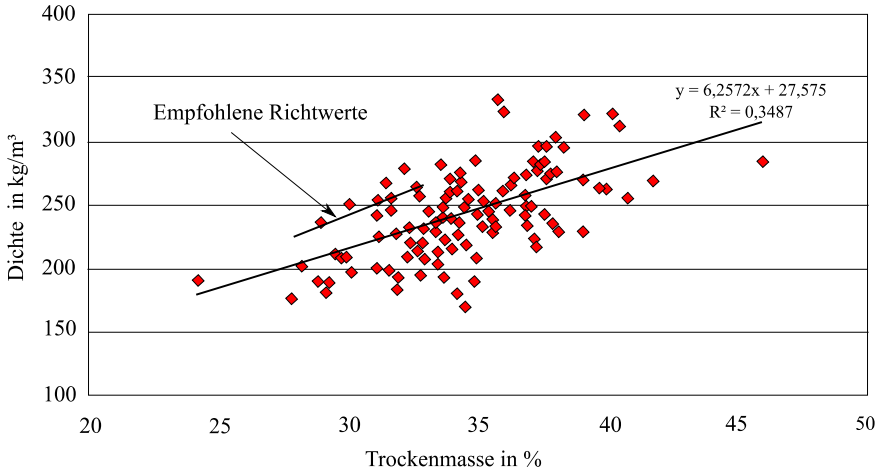


Abb. 2.16: Abhängigkeit der Dichte von der Trockenmasse bei Maissilagen (Richter et al. (2009), verändert)

Ursachen dafür sind:

- Die Richtwerte sind in der Praxis nicht bekannt oder werden nicht strikt beachtet.
- Es ist kein praxistaugliches Verfahren zur Ermittlung der erreichten Dichte verfügbar.
- Die Verdichtung erfolgt unter Randbedingungen, die eine ordnungsgemäße Verdichtung erschweren/verhindern (Witterung, Auftragssituation, nicht ausgewogene Mechanisierungskette).
- Optimale Erntebedingungen werden nicht eingehalten.

2.5.1 Teilprozess „Häckseln von Silomais“

Beim Häckseln von Silomais werden Maispflanzen mit einem Feldhäcksler (siehe Abbildung 2.17) in kleine Partikel zerteilt, die Transport, weitere Verarbeitung und Verwertung ermöglichen. Typische Erträge liegen zwischen 45 t und 65 t Frischmasse (FM) je Hektar (Adolph 2006). Die Ernte erfolgt, wenn der TM-Gehalt der Pflanze 30-35 Prozent beträgt. Abweichende Gehalte erschweren bzw. verhindern einen ordnungsgemäßen Gärprozess, führen zu Verlusten und reduzierter Verwertung.

Der Häckselprozess kann in folgende verfahrenstechnischen Teilprozesse zerlegt werden. Indizes verweisen auf Abb. 2.17

- Die Maispflanzen werden mit einem Vorsatzgerät [1] geschnitten und durch den Einzugskanal der Häckseltrommel zugeführt.
- Die Häckseltrommel [2] zerkleinert das Erntegut auf ein angestrebtes Maß. Die Häcksellänge ergibt sich aus Einzugsgeschwindigkeit und der Schnittfrequenz.
- Mit einem nachgeschalteten Korncracker [3] werden die Maiskörner zerkleinert, um einen späteren Stärkeaufschluss im Verdauungstrakt der Nutztiere zu ermöglichen. Die Intensität kann durch den Abstand der Walzen und Veränderung der Differenzgeschwindigkeit gesteuert werden.
- Mit Hilfe eines Beschleunigers [4] wird das Erntegut auf über $60\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ beschleunigt und mit dem Auswurfkrümmer [5] gezielt auf ein Transportfahrzeug überladen.

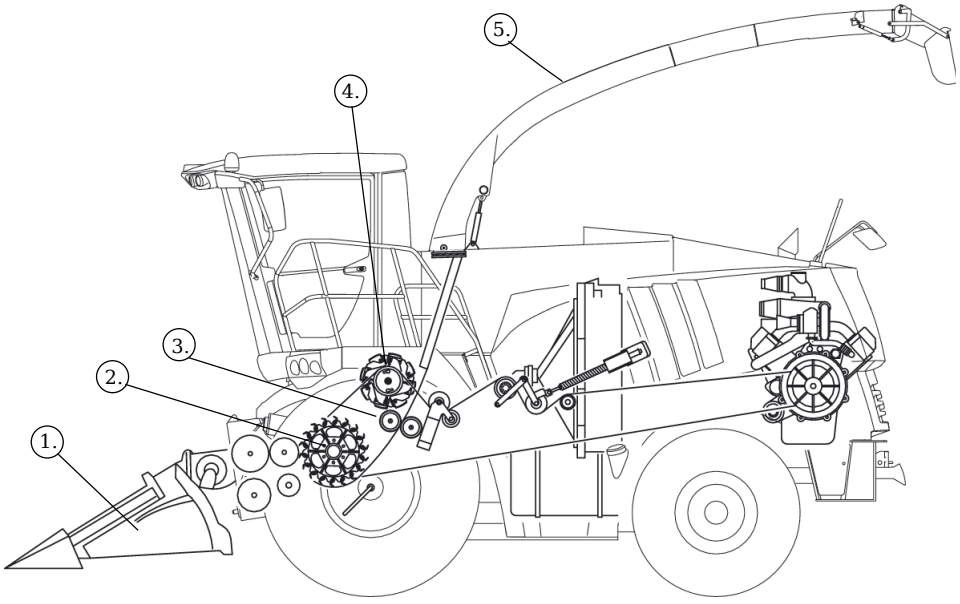


Abb. 2.17: Schnittbild Selbstfahrender Feldhäcksler (Haffert (2003), verändert)

Der Feldhäcksler zerkleinert das Erntegut in Partikel von wenigen Millimeter Größe. Herrmann et al. (2009) bilden drei Fraktionen – fein (4,7-5,4 mm), mittel (6,3-8,4 mm), grob (6,3-8,4 mm) – und zeigen, dass die feine Fraktion bei Verwendung als Futtermittel eine um 1 bis 13 Prozent höhere Methan-Ausbeute im Verdauungstrakt von Wiederkäuern ermöglicht. Ähnliche Effekte ergeben sich bei Verwendung des Substrates in Biogasanlagen zur Erzeugung elektrischer Energie und Wärme. Kleine Partikel vereinfachen den Verdichtungsprozess im Fahrsilo.

2.5.2 Teilprozess „Transport von Erntegut“

Das vom Feldhäcksler auf das Transportfahrzeug überladene Erntegut wird zum Lagerort (Fahrsilo) verbracht und dort abgeladen. Die Auslegung der Transportkette orientiert sich am durch den SFH induzierten Massenstrom und den Kostenfunktionen von SFH und TF. Für die Auslegung der Transportkette ist die Anzahl TF, deren Kapazität (in t bzw. m^3), die realisierbare Fahrgeschwindigkeit ($km\,h^{-1}$) – bestimmt durch die Leistung der Zugmaschine und Eigenschaften der Fahrwege sowie die Transportentfernung zwischen Feld und Silo – zu berücksichtigen.

Aufgrund nicht vorhandener Pufferkapazitäten beim SFH kommt es im Häckselprozess unmittelbar zum Stillstand, wenn nach Befüllung eines TF kein weiteres TF verfügbar ist. Für einen ununterbrochenen Häckselprozess sind somit mindestens zwei TF erforderlich. Eine Empfehlung der Anzahl zu verwendender Transportfahrzeuge zeigt Abb. 2.15.

Typische Ladevolumen von Transportfahrzeugen liegen im Bereich von 30 bis 60 m^3. Das Schüttgewicht von gehäckselten Maispflanzen bewegt sich nach unterschiedlichen Quellen im Bereich von 340 bis 370 kg/m^3 (Achilles 2010) bzw. 380 bis 435 kg/m^3 (Strobl 2012). Somit lassen sich mit einer Fahrt zwischen 11 und 26 t Erntegut zum Abladeort bewegen. Der Transport erfolgt üblicherweise mit Traktoren und eins bis zwei Anhängern, deren Ladekapazität auf die Zugleistung des Traktors abgestimmt ist. Typische Standardtraktoren haben eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40 bzw. 50 $km\,h^{-1}$. Die realisierte Fahrgeschwindigkeit ist abhängig von Motorleistung, Beladungszustand, Geländerelief und Zustand der Fahrstrecke. Auf dem Weg zum Abladeort wird häufig eine Fahrzeugwaage angefahren, um eine genaue, verbindliche Masseninformation für Abrechnungszwecke und Ertragskartierung zu erhalten.

Bei Ankunft des Transportfahrzeuges am Silo wird das Erntegut entweder vor dem Silo oder bei Überfahrt auf dem Silo abgeladen. Die erste Variante wird üblicherweise auf hohen Silos praktiziert, weil dort die Kippgefahr für

die Transportfahrzeuge besonders groß ist. Um beim Abladen vor dem Silo einen reibungslosen Transportprozess durch Aufschieben des Erntegutes mit aufbalastierten und mit Schiebeschild ausgestatteten Traktoren sicherzustellen, muss der Abladevorgang koordiniert erfolgen. Der Fahrer des Verdichtungsfahrzeuges bestimmt den genauen Ort und Zeitpunkt des Abladens. Kann das Erntegut nicht in gleicher Leistung auf das Silo aufgeschoben werden, wie die Transportfahrzeuge es anliefern, kommt es zu Wartezeiten und damit zu einer Warteschlange am Abladeort. Die Dimensionierung des Abladeplatzes orientiert sich an der Einlagerungsleistung der Verdichtungsfahrzeuge.

Der Kraftstoffverbrauch im Rahmen von Transportarbeiten ist abhängig von der Gesamtmasse des Fahrzeugs und damit auch vom Beladungszustand, der Fahrgeschwindigkeit, dem Geländerelief und der abgerufenen Motorleistung des Zugfahrzeugs. Im Gegensatz zu Prozessen mit kontinuierlichem Zugkraftbedarf, wie z.B. Bodenbearbeitung oder Arbeiten mit Zapfwellenantrieb, ist bei Transportarbeiten die Ermittlung typischer Kraftstoffverbräuche aufgrund von Lastwechseln zwischen Zug- und Schubbetrieb problematisch. Ein Datensatz von Moitzi et al. (2008) zur Ermittlung der Beziehung von Transportgeschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch zeigt die lastwechselbedingten Schwankungen. Weiterhin ist dem Datensatz, ausgehend von der unbeladenen Fahrt, ein Mehrverbrauch von ca. 20 Prozent bei beladener Fahrt (Ladung 16,5 t) über den untersuchten Geschwindigkeitsbereich bis $40\,\mathrm{km\,h^{-1}}$ zu entnehmen. Kowalewsky (2011) ermittelt bei Straßenfahrten einen Unterschied von ca. 30 Prozent. Mit bis zu 60 Prozent liegen die Unterschiede in Untersuchungen von Engelhardt (2002) noch höher, hier allerdings ermittelt für LKW. Unterschiede dieser Größe wurden von Engelhardt [16] auch für Gespanne mit Traktoren bestätigt.

2.5.3 Teilprozess „Einlagerung von Erntegut“

Für den Verdichtungsprozess im Fahrsilo kommen schwere, mit Zusatzgewichten versehene Traktoren, in selteneren Fällen Walzen (Tölle et al. 2009)) und Radlader (Rößl et al. 2010) aus dem Tiefbau oder Pistenraupen (Urfell & Nußbaum 2010) zum Einsatz. Diese Maschinen, nachfolgend Verdichtungsfahrzeug (VF) genannt, sind zur Formung des Silostocks teilweise mit Schiebeschildern, Schaufeln oder Siloverteileinrichtungen ausgestattet.

Nachdem Abladen des Ernteguts vom Transportfahrzeug an einem definierten Ort vor dem Fahrsilo wird es durch das Verdichtungsfahrzeug auf den Silostock aufgeschoben. Die entstehende Schicht sollte für einen optimalen, anschließenden Verdichtungsvorgang eine Stärke von maximal 30 cm haben

[16] Mündliche Aussage des Autors

(Nußbaum 2011a). Diese Schicht wird durch mehrfaches Überrollen mit dem Verdichtungsfahrzeug solange komprimiert, bis das Porenvolumen bei späterer Entnahme in der Anschnittfläche nur noch einen Strömungswert von 20 l/m^{2}h Umgebungsluft zulässt (Honig 1987). Eine Methode zur direkten Ermittlung der Verdichtung ist bislang nicht vorhanden. Die Entscheidung zur ordnungsgemäß ausgeführten Verdichtung obliegt dem Bediener des VF.

Nach Honig (1987), zitiert in Nußbaum (2011b), ergibt sich für Silomais im Wertebereich von 25 bis 40 Prozent eine anzustrebende Dichte von 200 bis 320 kg/m^3 bezogen auf TM (Abb. 2.18).

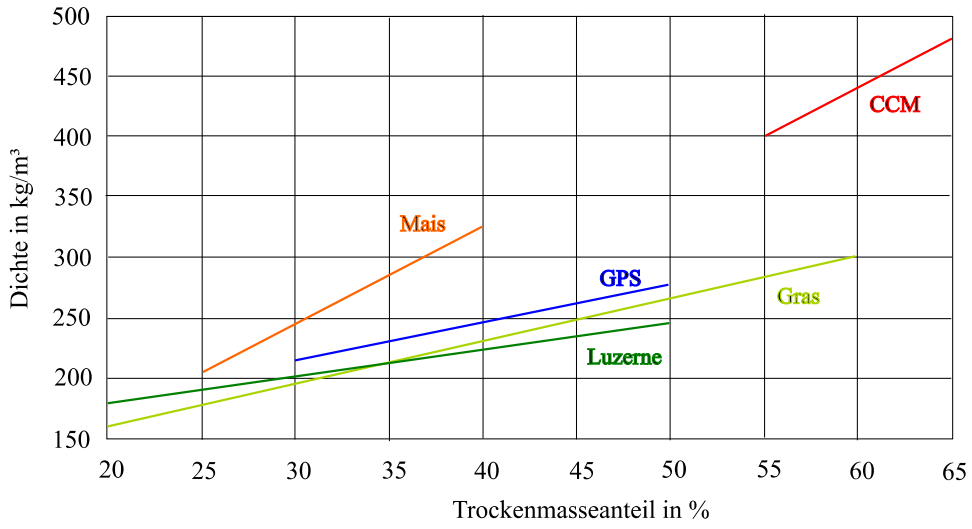


Abb. 2.18: Dichtefunktion für ausgewählte Futterpflanzen (Honig 1987)

Abweichungen von 5 Prozent bezogen auf die anzustrebende Dichte werden als akzeptabel angesehen (Richter et al. 2009). Die Angabe zur Anzahl erforderlicher Überrollungen basiert auf Erfahrungen, weil eine direkte sensorische Ermittlung der aktuellen Dichte während der Verdichtungsvorganges mangels verfügbarer Messtechnik nicht möglich ist. Untersuchungen auf Basis radiometrischer Verfahren sind in (Hoffmann et al. 2014) beschrieben. Die indirekte Ermittlung ist zwar durch Massebestimmung mit einer Fahrzeugwaage und laufende Erfassung der Hüllfläche prinzipiell möglich (Steckel 2008). Praktikable Lösungen sind hierzu jedoch nicht verfügbar.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass ein Verdichtungsfahrzeug zur Erfüllung der von Honig (1991) genannten Anforderungen bei ordnungsgemäßer Überfahrung pro Stunde eine Menge an Erntegut (bezogen auf TM) verdichten kann, die dem drei- bis vierfachen der Eigenmasse entspricht (Nußbaum 2011b).

Der Verdichtungsprozess stellt eine Schlüsselstelle in der Erntekette dar. Um eine Überforderung der Einlagerungsleistung und damit die Gefahr unzureichender Verdichtung zu vermeiden, ist der Materialzufluss zum Abladeort

genau zu steuern. Steuern bedeutet in diesem Zusammenhang die Anpassung der Verdichtungskapazität durch Änderung der Anzahl Verdichtungsfahrzeuge einschließlich Balastierung oder Begrenzung der Annahme mit den daraus resultierenden Effekten in den Teilprozessen Ernten und Transportieren.

3 Material und Methoden

3.1 Kontext-Modell

Für ein situationsadäquates Handeln in variantenreicher und dynamischer Umgebung ist das syntaktische und semantische Verständnis des Prozesskontextes von Bedeutung. Zur Nutzung von Kontextinformationen werden die drei in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Kontextdimensionen *Zeit*, *Raum* und *Ressource* zusammen geführt und in Beziehung gesetzt. Im Sinne der Kombinatorik ergeben sich ein-, zwei- und dreidimensionale Betrachtungen.

Eindimensionale Betrachtung

Die eindimensionale Betrachtung liefert Strukturen innerhalb einer Dimension. Dabei handelt es sich um zeit-, orts- und ressourcenbezogene Ordnungssysteme. Sie können aus Normen und Quasi-Standards oder selbstdefinierten Systemen entnommen werden.

- *Raum*: Absolute und relative Raumangaben und Beziehungen. Beispiele: innerhalb, berührt, daneben
- *Zeit*: Absolute und relative Zeitangaben und Beziehungen. Beispiele: jetzt, danach, während
- *Ressourcen*: Identität, Merkmale, Zustände und Beziehungen. Beispiele: Seriennummer, IP-Adresse, Motor EIN

Zweidimensionale Betrachtung

Die zweidimensionale Betrachtung setzt jeweils zwei Dimensionen in Bezug und liefert zusammengesetzte Einheiten sowie einfache Ressourcenmerkmale.

- *Raum – Zeit*: Bewegungen. Beispiele: Geschwindigkeit, Beschleunigung
- *Raum – Ressource*: Raumbezogene Ressourcenzustände. Beispiele: Größe eines Feldes, Ertragsmuster im Feld
- *Zeit – Ressource*: Zeitbezogene Ressourcenzustände. Beispiele: Maschinenbetriebsstunden, Wartedauer

Dreidimensionale Betrachtung

Die dreidimensionale Betrachtung liefert komplexere Prozesszusammenhänge zu Maschinen, Menschen und Umgebung.
Raum – Zeit – Ressource: Fruchtfolge, Flächenleistung, Gesamtleistung der Prozesskette
Abb. 3.1 zeigt mögliche Aussagen, die sich aus der Zusammenführung der beschriebenen Kontexte-Kategorien ergeben. Die Achsen des Diagrammes sind dimensionslos; es sind für den Anwendungsfall relevante Begriffe aufgeführt.
Am Beispiel von Abb. 3.1 lassen sich folgende Begriffe einordnen:

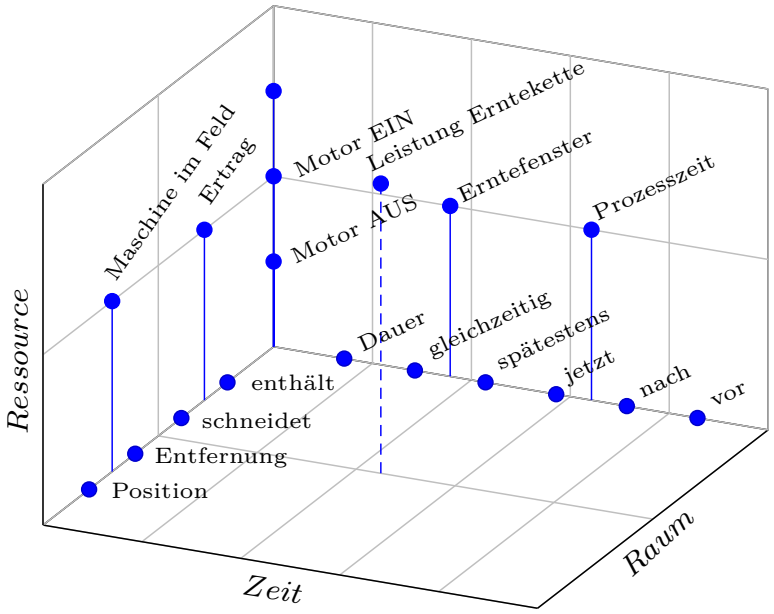


Abb. 3.1: Beziehung der Einzelkontexte

3.2 Ableitung von Komponenten aus dem Kontext-Modell

Aus der Kombination von Attributen der genannten Dimensionen lassen sich Komponenten mit ihren erforderlichen Merkmalen ableiten. Weiterhin ist es möglich, aus der Erfahrung bekannte Fragestellungen und Vorgänge durch kombinierte Attribute strukturiert abzubilden.

3.2.1 Gruppenidentifikation

Pflanzenbauliche Verfahren werden überwiegend von mehreren, miteinander kooperierenden Ressourcen ausgeführt (= Gruppe). Diese Kooperation kann

sowohl parallel (Überladen von Erntefahrzeug auf Transportfahrzeug) als auch sequenziell (Schwaden und Pressen) erfolgen. Beide Kooperationsformen können gleichzeitig in einem Prozess vertreten sein.

Im Rahmen der Arbeitsplanung werden von Verantwortlichen üblicherweise Aufträge definiert, in denen festgelegt wird, welche Leistungen zu einem Zeitpunkt bzw. in einem Zeitraum an einem Einsatzort mit definierten Ressourcen erbracht werden sollen. Dieser Planungsprozess erfolgt im Gegensatz zu industriellen Abläufen aufgrund fehlender systemtechnischer Unterstützung und sich schnell ändernder Randbedingungen informell. Im Ergebnis arbeiten Menschen und Maschinen in Gruppen, die lediglich implizit vorhanden sind.

Im Sinne adaptiven Verhaltens und dafür erforderlicher Automatisierung müssen Kooperationsbeziehungen identifiziert, d. h. explizit gemacht werden. Auf dieser Basis ist eine situationsgerechte Steuerung und Dokumentation der Prozesse möglich[1].

Ist eine Gruppenbeziehung identifiziert und formalisiert, lässt sich darauf eine zielgerichtete (Gruppen-)Kommunikation und damit Koordination/Kooperation aufbauen. Insbesondere bei überbetrieblicher Arbeitserledigung lässt sich auf diese Weise eine den Bedürfnissen von Auftragnehmern und Auftraggebern sowie deren Mitarbeitern ausgerichtete Gruppenkommunikation realisieren. Weiterhin kann auf Grundlage erkannter Beziehungen eine automatisierte gruppenbezogene Dokumentation durchgeführter Arbeiten erfolgen.

Für die Durchführung der Gruppenidentifikation müssen Ressourcen folgende Kriterien erfüllen:

- Ressourcen verfügen über drahtlose, miteinander kompatible Kommunikationstechnologien.
- Ressourcen sind in ihren Merkmalen und Fähigkeiten eindeutig beschrieben. Dazu gehört insbesondere, dass sie über eine eindeutige, informationstechnisch verarbeitbare Kennung verfügen.
- Ressourcen können sich selbst räumlich und zeitlich lokalisieren.

Dieser Abschnitt beschreibt die Systemkomponente *Gruppenidentifikation*, geht zunächst auf das Prinzip der Indikatoren für eine Zugehörigkeit ein, erläutert den Ablauf der Gruppenbildung und zeigt abschließend die entwickelte Komponente.

[1]Das hier beschriebene Verfahren zur Identifikation und formalen Darstellung von Kooperationsbeziehungen wurde von Kersting (2011) und dem Verfasser dieser Arbeit gemeinsam entwickelt

3.2.1.1 Indikatoren für die Beschreibung von Kooperationsbeziehungen

Aufgabe der Systemkomponente *Gruppenidentifikation* ist die formale Nachbildung informell existierender Kooperationsbeziehungen zwischen Ressourcen, die sich im selben Arbeitskontext befinden. Ausgehend vom Wissen um die eigene Situation ist zu ermitteln, in welcher Relation umgebende Ressourcen zur eigenen Ressource stehen. Zu Beginn des Prozesses liegt kein Wissen bzgl. der umgebenden Systeme vor. Grundlegendes Prinzip der Gruppenidentifikation ist die Suche nach Indikatoren, die auf eine mögliche Zusammenarbeit schließen lassen. Es lassen sich drei Indikatoren unterscheiden:

Prozessindikatoren

Prozessindikatoren werden aus der Analyse der eigenen Ressource gewonnen. Hierbei handelt es sich um das eigene Prozesswissen, das im Ressourcenprofil hinterlegt ist (Abschnitt 4.2). Sobald eine Ressource „weiß“, wer sie ist und welche Fähigkeiten sie hat, kann sie zielgerichtet nach passenden Partnern suchen.

Primäre Indikatoren

Primäre Indikatoren werden aus der ermittelten Existenz einer anderen Ressource, ihrer Position und ihres Bewegungsverhaltens ermittelt. Hierfür werden in erster Linie von den Systemen ausgestrahlte Kennungen und Positionen genutzt. Mit zunehmender Häufigkeit oder Dauer des Aufenthaltes in der eigenen Umgebung erhöht sich die Indikation für eine existierende Beziehung. Die Ermittlung primärer Indikatoren lässt sich verbessern, indem weitere Sensoren wie z.B. bildgebende Verfahren und Bildverarbeitung genutzt werden.

Sekundäre Indikatoren

Sekundäre Indikatoren werden aus einer authentifizierten Kommunikationsverbindung, die über die der primären Phase hinausgeht, gewonnen. Ressourcen legen dabei gegenseitig Zug um Zug Detailwissen offen. Primäre und sekundäre Indikatoren lassen sich hinsichtlich ihres Beitrages zur Lösung des Identifikationsproblems strukturieren (siehe Abb. 3.2). In einer zeitlichen Dimension können Indikatoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten Aussagen über die Zugehörigkeit zu einer Gruppe liefern. Die Aussagekraft der gewonnenen Indikatoren wiederum kann ein unterschiedliches Bestimmtheitsmaß haben.

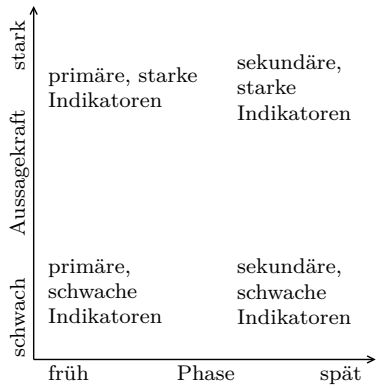


Abb. 3.2: Strukturierung primärer und sekundärer Indikatoren (Kersting 2011)

Als *schwacher* Indikator kann die Fähigkeit zur Kommunikation miteinander betrachtet werden. Nimmt man an, dass zahlreiche Maschinen in der Umgebung, unabhängig von der Zugehörigkeit zu bestimmten Unternehmenseinheiten gehören, reicht dieses Merkmal nicht für eine sichere Einschätzung aus. Die Zugehörigkeit zum selben Unternehmen ist insbesondere bei Lohnunternehmen, die in wechselnden Unternehmenskontexten arbeiten, nur ein schwacher Indikator.

Ein Indikator *mittlerer* Stärke ist der zeitgleiche Aufenthalt auf dem selben Feld. Hier müssen die Verfahren *Häckseln* und *Bodenbearbeitung* nicht im selben Kontext stehen. Genauere Aussagen liefert erst die Auswertung von Prozess-Schablonen.

Im Gegensatz dazu ergeben sich *starke* Indikatoren z.B. aus erkannten Überladeprozessen und den damit verbundenen typischen Verhaltensmustern, wie gemeinsamer und gleichzeitiger Stillstand in unmittelbarer Nähe oder zeitweise parallel verlaufende GPS-Spuren, die typischerweise bei der Silomaisernte beim Überladen während der Fahrt entstehen. Ein weiterer starker Indikator sind synergetische Eigenschaften von miteinander abgeglichenen Prozess-Schablonen.

3.2.1.2 3-stufiges Konzept zur Ermittlung von Indikatoren

Durch die Analyse von Merkmalen, Fähigkeiten und Zuständen der eigenen und anderer Ressourcen können Indikatoren über eine Beziehung und damit Zusammenarbeit mit anderen Ressourcen ermittelt werden (Kersting 2011). Die Anwendung von aufeinander aufbauenden Indikatoren führt über erste unsichere Annahmen bis hin zu einer sicheren Aussage darüber, ob eine Gruppenzugehörigkeit vorliegt oder auch nicht. Hierfür werden die drei zuvor

beschriebenen Indikatoren benötigt: Prozessindikatoren, Primäre Indikatoren und Sekundäre Indikatoren. Das Wirkungsprinzip ist in Abb. 3.3 dargestellt.

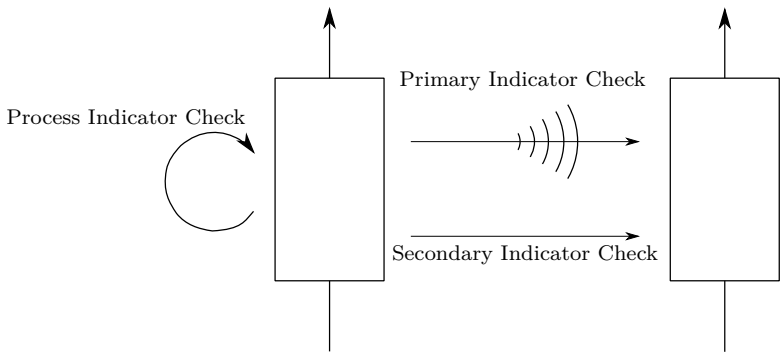


Abb. 3.3: 3-stufiges Verfahren zur Gruppenidentifikation

Schritt 1: Ermittlung von Prozessindikatoren (Process Indicator Check)

Bevor die Beziehung zu anderen Ressourcen geprüft wird, ist es zunächst erforderlich, dass sich eine Ressource ein Selbstbild verschafft. Hierzu greift die Ressource auf ihr eigenes, in der Komponente Prozess- und Leistungskonfiguration hinterlegtes Profil und die damit verbundenen Prozessbeschreibungen zurück (Abschnitt 3.2.2). Weiterhin untersucht sie ihre eigene aktuelle Situation nach den Mechanismen, wie in den Abschnitten 3.2.3 und 3.2.4 beschrieben. Das Ergebnis am Beispiel SFH ist in Tab. 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Ergebnis Process Indicator Check für SFH

Ressource:	Selbstfahrender Feldhäcksler mit Maisgebiss
Identität:	bekannt
Kommunikationsadresse:	bekannt
Unterstütztes Verfahren:	Silomais häckseln
Ergänzende Verfahren:	Transportieren, Verdichten (aus konfigurierter Leistung)
Mögliche Partner:	Transportfahrzeug, Verdichtungsfahrzeug (aus konfigurierter Leistung)
Betriebszustand:	Prozesszeit (aus Zeitschema)
Aufenthaltsort:	Identifiziertes Feld (aus Geoobjekt-Komponente)

Durch Ermittlung der unären Prozessindikatoren verfügt die Ressource über Prozesswissen und untersucht darauf aufbauend ihre Umgebung, um geeignete Partner zu identifizieren.

Schritt 2: Ermittlung von primären Indikatoren (*Primary Indicator Check*)

Basierend auf den Erkenntnissen, die in Schritt 1 gewonnen wurden, wird bei der Ermittlung der primären Indikatoren der Blick über die Systemgrenze der eigenen Ressource erweitert. Während die eigene Situation kontinuierlich fortgeschrieben wird (Betriebszustand, Aufenthaltsort), untersucht die Ressource ihre Umgebung im Hinblick auf potenziell geeignete Prozesspartner. Geeignet sind Partner, die Fähigkeiten der konfigurierten Leistung, identisch oder komplementär, prinzipiell unterstützen. Für einen Feldhäcksler wären dies also wiederum Feldhäcksler bzw. Transport – und Verdichtungsfahrzeuge. Empfangene Signale werden auf typische Muster hin untersucht. Solche Muster sind Häufigkeit von Begegnungen sowie identifizierte Bewegungsmuster. Bewegungsmuster im Sinne potenziell kooperierender Systeme sind wiederholte Annäherungen oder Aufenthalt im selben Bereich (z.B. Feld). Auf Basis gewonnener Erkenntnisse werden primäre Indikatoren erzeugt, die zur Einleitung der Kontaktaufnahme mit geeigneten Kooperationspartnern dienen.

Schritt 3: Ermittlung von sekundären Indikatoren (*Secondary Indicator Check*)

In Schritt 2 erfolgte die Prüfung von Beziehungen in einer einseitig gerichteten Kommunikation. Ressourcen in der Umgebung liefern aufgrund schützenswerter Informationen und Interessen nur elementare Informationen, die potenziellen Partnern erste Hinweise auf eine mögliche Zusammenarbeit ermöglichen[2]. Haben sich im Rahmen der primären Indikatorermittlungen typische Verhaltensmuster ergeben, wird eine initiale Verbindung aufgebaut, in dem die publizierte Identität adressiert wird. Diese temporäre Identität ermöglicht keine Rückschlüsse auf Unternehmenszugehörigkeit und unterstützte Verfahren. Ist eine Verbindung etabliert, also der bidirektionale Austausch von Informationen prinzipiell möglich, werden Zug um Zug Informationen mit dem Ziel preisgegeben, das vollständige Prozesswissen miteinander auszutauschen. Ergeben sich bei diesem Austausch Hinweise, die gegen eine potenzielle Zusammenarbeit sprechen, wird die Kommunikation abgebaut und der Partner als nicht relevant erachtet. Wenn im Rahmen der sekundären Indikatorermittlung eine Zusammenarbeit als gegeben betrachtet wird, wird diese Beziehung formal registriert und hat so lange Bestand, wie keine widersprüchlichen Indikatoren ermittelt

[2]In ähnlichen Fällen kommen häufig Zero-Knowledge-Protokolle zur Anwendung. Siehe auch Goldwasser et al. (1989)

werden, z.B. Wechsel der Zugehörigkeit zu einer anderen Gruppe und damit definitionsgemäß Austritt aus der aktuellen Gruppe. Mit der Registrierung einer Gruppenzugehörigkeit teilen sich Partner auch bestehende Beziehungen mit, so dass sich mittels inferenziellen Schließens Beziehungen zu Prozesspartnern herstellen lassen, die nicht in direkter Beziehung stehen, wie z.B. Feldhäcksler auf dem Feld und Verdichtungsfahrzeug auf dem Silo.

Nach formaler Festlegung der Kooperationsbeziehung lassen sich die betreffenden Ressourcen einem gemeinsamen Adressraum zuordnen wodurch eine sichere Kommunikation gewährleistet ist. Ebenso kann nun durch Anwendung der formalen Beziehungen eine gruppenbezogene Dokumentation der gemeinsam erbrachten und zu verrechnenden Leistung erfolgen.

In den voran gehenden Abschnitten wurde die Indikatorermittlung und -prüfung beschrieben. Dieser Vorgang ist Teil eines umfassenden Lebenszyklus für Arbeitsgruppen (siehe Abb. 3.4), bestehend aus Gruppenbildung, Kooperation und Gruppenauflösung. Die entwickelte Vorgehensweise, einschließlich der im Rahmen der Gruppenbildung erläuterten Indikatorenprüfung, zeigt starke Ähnlichkeiten mit gruppendynamischen Effekten in sozialen Systemen.

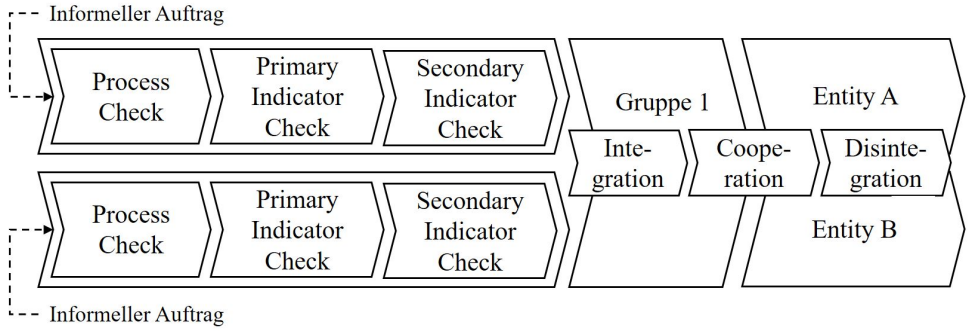


Abb. 3.4: Phasenmodell zum Lebenszyklus einer Arbeitsgruppe

3.2.1.3 Komponentendarstellung

Abb. 3.5 zeigt die Gruppenidentifikation in Komponentendarstellung. Zur Ermittlung der Kooperation mit anderen Ressourcen werden Informationen von den weiteren Komponenten Agent (selbst), Konfigurator, Geoobjektmanager sowie anderen Agenten benötigt. Als Ergebnis liefert die Gruppenidentifikation eine Liste aktueller Beziehungen zwischen den kooperierenden Ressourcen.

3.2.2 Prozess- und Leistungskonfiguration

Zur Realisierung von Produktionsverfahren, hier Erzeugung von Silomais, ist im Verlauf der Anbauperiode eine abgestimmte Abfolge arbeitswirtschaftlicher

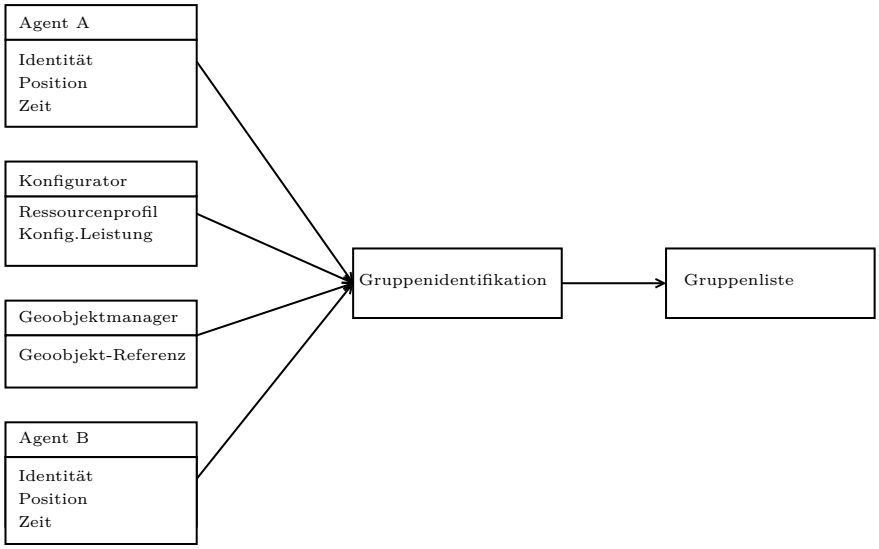


Abb. 3.5: Komponenten-orientierte Darstellung der Gruppenidentifikation

Vorgänge durch Einsatz von Ressourcen (Menschliche Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoffe entsprechend Abb. 2.8) erforderlich. Dabei handelt es sich um Maßnahmen der Bodenbearbeitung, Aussaat, Pflanzenschutz, Düngung, Ernte und Einlagerung. Aufgrund konkreter betriebsspezifischer (Art der Mechanisierung, Ausrichtung konventionell oder ökologisch, Kooperationsformen, Grad der Arrondierung, Betriebsgröße) und umweltspezifischer Merkmale (Klima, Boden, örtliche Auflagen) werden diese Vorgänge konkretisiert. Um solche Prozesse für jeden Anwendungsfall im informationstechnischen Sinne planbar, steuerbar und dokumentierbar zu machen, ist eine systematische Analyse und Dekomposition von Prozessen in Teilprozesse durchzuführen. Ziel dieser Dekomposition ist es, diese einzelnen Teilprozesse im Rahmen einer weitergehenden Konfiguration zu individuellen Prozessen zusammen zu führen. Das betrifft auszuführende Arbeiten im landwirtschaftlichen Betrieb, in landwirtschaftlichen Lohnunternehmen und in unternehmensübergreifenden Aktivitäten, in denen Teile der Leistungserbringung verteilt erfolgen.

In diesem Abschnitt wird eine Komponente zur Konfiguration von Prozessen und Leistungen entwickelt, die sich an das Konzept von Produktkonfiguratoren anlehnt.

Das Ergebnis eines Konfigurationsvorganges ist eine *konfigurierte Leistung*. Sie besteht aus einer formalisierten Prozessbeschreibung, die einen präzisen, prozessbegleitenden Informationsfluss für einen physischen Vorgang ermöglicht. Die Summe der konfigurierten Leistungen kann als Leistungsverzeichnis eines Leistungsanbieters verstanden werden. Im Falle eines landwirtschaftlichen

Betriebes handelt es sich um die im Betrieb selbst ausführbaren Prozesse, beim Lohnunternehmen ist es das Leistungsportfolio. Monetär bewertete Leistungen führen zu einer Preisliste.

3.2.2.1 Typologisierung und Beschreibung von Ressourcen

Die Erbringung von Leistungen erfolgt durch den Einsatz von Ressourcen. Voraussetzung für die Konfiguration von Leistungen ist die Strukturierung von Ressourcen (siehe Abb. 3.6).

Typologisierung von Ressourcen

Im Sinne der objektorientierten Modellbildung (siehe z.B. Balzert (2005)) können Ressourcen als Basisklasse bezeichnet werden. Daraus lassen sich Klassen mobiler Arbeitsmaschinen, stationärer Anlagen und IT-Systeme ableiten (vererben). Vor dem Hintergrund des später untersuchten Anwendungsfalles werden hier lediglich die Klasse der mobilen Arbeitsmaschinen weiter vertieft. Aus der Klasse der mobilen Arbeitsmaschinen lassen sich wiederum Maschinen und Geräte ableiten. Maschinen liefern immer die Antriebsleistung mit Längs- und Querführung. Bei Maschinen wird unterschieden zwischen selbstfahrenden Maschinen und Zugmaschinen. Sie unterscheiden sich dadurch, dass selbstfahrende Maschinen unterschiedlich große Anteile des realisierten Verfahrens ausführen, Zugmaschinen jedoch nicht. So zerkleinert der selbstfahrende Feldhäcksler das Erntegut und fördert es auf ein Transportfahrzeug. Geräte sind als die Verfahren definierenden Klassen in Vorsatz- und Anbaugeräte zu untergliedern. Vorsatzgeräte werden ausschließlich an selbstfahrenden Maschinen eingesetzt (z.B. Maispflücker am Mähdrescher, Maisgebiss am Selbstfahrenden Feldhäcksler).

Entwicklung von Ressourcenprofilen

Nach der Typologisierung der Ressourcen ist eine strukturierte Beschreibung der Ressourcen erforderlich. In den dadurch entstehenden Ressourcenprofilen werden Merkmale aufgeführt, die für die Steuerung von Geschäftsprozessen erforderlich sind. Nachfolgend werden Profile für die Klassen Selbstfahrende Maschine, Zugmaschine, Vorsatzgerät und Implement aufgeführt, die im späteren Beispielszenario zur Anwendung kommen.
Neben den in Tab. 3.2 aufgeführten Merkmalen sind charakteristische Profile zu hinterlegen, die die Auswirkungen des aktuellen Verhaltens im ausgeführten

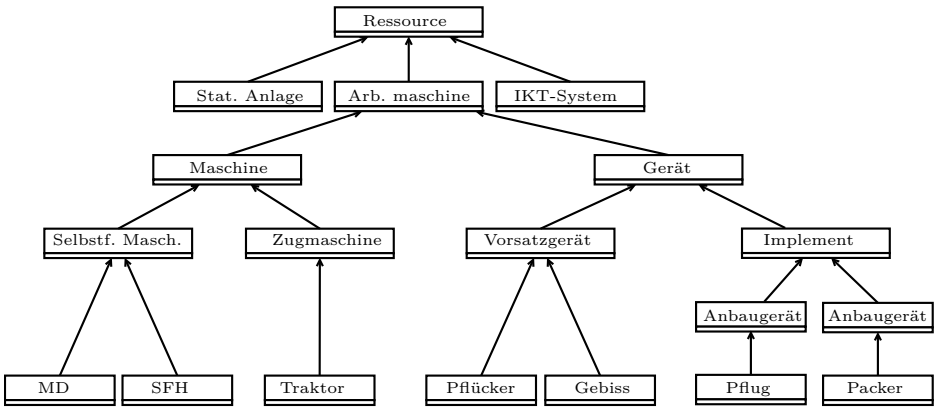


Abb. 3.6: UML-Klassendiagramm zur Strukturierung von Ressourcen

Tab. 3.2: Struktur und Merkmale in Ressourcenprofilen

Ress. Klasse	Maschine		Gerät	
Ress.-Typ	Selbstf. Maschine	Zugmaschine	Vorsatzgerät	Anbaugerät
Ressource	z.B. Feldhäcksler	z.B. Traktor	z.B. Maisgebiss	z.B. Anhänger
UUID	Eindeutige Erkennung und logische Zuordnung für Konfiguration von Gespannen, Planung, Steuerung von Prozessen			
Verfahren			realisierbares Verfahren (z.B. Vorsatzgerät = „Maisgebiss“) Silomais ernten	
Adresse	Für Adressierung in der Datenkommunikation		Werden indirekt adressiert über logische Verknüpfung zur Maschine	
Eigentümer	Für die Zuordnung von ressourcenbezogenen Kosten und Leistungen sowie Steuerung sicherer Kommunikation			
Physikalische Schnittstelle	3-Punkt-Hydraulik incl. Kategorie (Norm), Anhängevorrichtung Zapfwelle (3 Profile), Hydraulik, Norm, Strom 12, 24, 230, 400V Stecker genormt, Position			
Datenschnittstelle	ISOBUS, proprietär			
Kommunikations-standards	GSM (...), WLAN (...), NFC (...)			
Geometrien	Breite, Höhe, Länge, Wenderadius, Spurbreite, Arbeitstiefe			
Massen	Leergewicht, Zuladung, max. Gewicht			
Volumen	z.B. Transportvolumen			
Leistung	Zugleistung, Hubleistung, Zapfwellenleistung			
Geschwindigkeiten	Höchstgeschwindigkeit, Arbeitsgeschwindigkeit			

Prozess quantifizierbar machen. Diese Profile werden den Agenten im Rahmen der Simulation zugeordnet.

Erntemaschine bestehend aus Selbstfahrender Maschine (Feldhäcksler) mit Vorsatzgerät (Schneidwerk für Silomais):

- Kraftstoffverbrauch ($\mathrm{l\,h^{-1}}$) außerhalb der Prozesszeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ($\mathrm{km\,h^{-1}}$) über den gesamten Geschwindigkeitsbereich einschl. Warten im Stillstand mit laufendem Motor
- Kraftstoffverbrauch ($\mathrm{l\,h^{-1}}$) in der Prozesszeit in Abhängigkeit von Durchsatz ($\mathrm{t\,h^{-1}}$)
- Realisierbares Durchsatzspektrum ($\mathrm{t\,h^{-1}}$)

Transportfahrzeug bestehend aus Zugmaschine (Traktor) mit Implement (Anhänger):

- Kraftstoffverbrauch ($\mathrm{l\,h^{-1}}$) über die gesamte Betriebszeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ($\mathrm{km\,h^{-1}}$), Wegbeschaffenheit (befestigte Straße, Feldweg, Feld) und Beladungszustand (leer, voll) einschl. Warten im Stillstand mit laufendem Motor.
- Realisierbare Höchstgeschwindigkeit ($\mathrm{km\,h^{-1}}$) in Abhängigkeit von Wegbeschaffenheit und Beladungszustand.

Verdichtungsfahrzeug bestehend aus Zugmaschine (Traktor) mit Implement (Zusatzgewicht):

- Kraftstoffverbrauch ($\mathrm{l\,h^{-1}}$) in der Prozesszeit (Aufschieben und Verdichten).
- Kraftstoffverbrauch ($\mathrm{l\,h^{-1}}$) außerhalb der Prozesszeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ($\mathrm{km\,h^{-1}}$) über den gesamten Geschwindigkeitsbereich einschl. Warten im Stillstand mit laufendem Motor.
- Verdichtungsleistung ($\mathrm{t\,h^{-1}}$) durch konfigurierbare Balastierung

Die Kraftstoffverbrauchsprofile werden im Fortgang der Arbeit bei der Versuchsbeschreibung durch eigene Messungen und Vergleich mit Versuchen Dritter konkretisiert.

Kombination von Ressourcen zu Gespannen durch Anwendung von Regeln

Die Kombination von Maschinen (Selbstfahrende Maschine, Zugmaschine) mit Geräten (Vorsatzgerät, Implement) im Rahmen der Konfiguration wird durch das auszuführende Verfahren (1), die technischen Merkmale der verbindenden Bauteile (2) sowie technische Merkmale der Ressourcen selbst (3) bestimmt. Möglichkeiten und Grenzen werden nachfolgend nicht vollständig, sondern lediglich an den in der Simulation verwendeten Kombinationen erläutert.

zu (1): Die Verbindung eines Silomaisvorsatzes mit einer Zugmaschine macht aufgrund fehlender komplementärer Eigenschaften keinen Sinn und ist darüber hinaus auch technisch nicht möglich.

zu (2): Dreipunkt-Anbauvorrichtungen sind aufgrund des großen Spektrums hinsichtlich Hub- und Zugkraftbedarfes bzw. Leistung nach ISO 730-1 in Kategorien eingeteilt. Kompatibilität zwischen den Kategorien ist nur über adaptierende Vorrichtungen herzustellen und wegen daraus resultierender möglicher Unausgeglichenheit des Gespanns nicht sinnvoll.

zu (3): Selbst bei identischer Kategorie des Dreipunktanbaues kann bspw. die Masse eines Anbaugewichtes die zulässige Tragkraft der Achsen des Zugfahrzeugs übersteigen und dadurch zu Schäden führen.

Weitere Einschränkungen können sich hinsichtlich Schnittstellen für Hydraulik, Pneumatik, Elektrik und Elektronik ergeben.

Die Kombination von Maschinen mit Geräten lässt sich im informationstechnischen Sinne innerhalb des Konfigurators mit Regelwerken formal beschreiben. Hierbei entstehen Kombinationsgebote und -verbote. Für eine zukünftige Implementierung zum operativen Betrieb des vorgestellten Ansatzes ist es zweckmäßig, dass ressourcenspezifische Profile einschließlich Konfigurationsgeboten und -verboten mit der Maschine direkt vom Hersteller an den Betreiber von Landmaschinen ausgeliefert werden.

3.2.2.2 Strukturierung und Beschreibung von Leistungen

Verfahren

Eine Ressource ist dadurch gekennzeichnet, dass sie mindestens ein (1) Verfahren unterstützt. So unterstützt beispielsweise die Ressource vom Typ *Maisgebiss* das Verfahren *Silomais häckseln*. Während die Beziehung zwischen *Maisgebiss* und *Silomais häckseln* eindeutig ist, lassen sich mit anderen Ressourcen mehrere Verfahren alternativ oder auch in Kombination realisieren. So ist es möglich, mit einer Ressource vom Typ *Pflanzenschutzspritze* die Verfahren *Pflanzenschutzmittel ausbringen*, *Düngemittel ausbringen* sowie *Pflanzenschutzmittel und Düngemittel ausbringen* durchzuführen. Für eine sichere Festlegung ist dann entweder ein Benutzereingriff oder eine weitergehende Kontextermittlung erforderlich. Insbesondere in Ernteprozessen arbeiten mehrere Ressourcen in abgestimmter Weise miteinander. Daraus folgt, dass die Leistungsbeschreibungen mehrere (Teil-) Verfahren enthält. So enthält die kombinierte Leistung *Silomais ernten komplett* die Verfahren *Silomais häckseln*, *Silomais transportieren* und *Silomais einlagern*.

Leistungstyp

Jedes Verfahren ist mit mindestens einem Leistungstyp (bzw. Angebotstyp) verbunden, da Ziel ihres Einsatzes die Wertschöpfung im Rahmen laufender Prozesse ist. Leistungstypen stellen Bezugsgrößen für auszuführende Verfahren dar. Beispiele für Bezugsgrößen sind *Hektar* (ha), *Stunden* (h), *Tonnen* (t) oder gewichtete Kombinationen daraus. Die Wahl des Leistungstyps hat stimulierende Auswirkungen auf das Verhalten der Partner im Prozess (Bsp. Akkord). Kombinierte Leistungstypen sind geeignet, unterschiedliche Interessen zwischen Leistungsempfänger (Landwirte: maximale Qualität zu minimalen Kosten) und Leistungserbringer (Lohnunternehmer: maximale Anzahl Leistungseinheiten) auszugleichen. Leistungstypen können vorab festgelegt und im Prozess aufgrund erkannter Kontexte gesteuert werden. Beispiel: Die Leistung *Silomais häckseln* wird grundsätzlich auf Basis verbrauchter Zeit abgerechnet. Beim Erreichen eines im Auftrag definierten Feldes wird der vereinbarte Leistungstyp aktiviert. Die nachfolgende Dokumentation erfolgt entsprechend den vereinbarten Regeln.

Dienste

Jede Kombination aus Verfahren und Leistungstypen ist mit mindestens einem Dienst verbunden. Dienste unterstützen im Vergleich zur traditionellen Verfahrensweise (ohne Anwendung der hier entwickelten Systemarchitektur) die kontextspezifischen informationstechnischen Abläufe hinsichtlich Planung, Steuerung und Dokumentation. Dienste lassen sich untergliedern in Basisdienste und höherwertige Dienste. Basisdienste stellen Informationen bereit, die von darauf aufbauenden höherwertigen Diensten genutzt werden. Höherwertige Dienste liefern wertschöpfende Beitrage für das eigene Unternehmen oder auch beauftragende Unternehmen.

Beispiele für Basisdienste sind:

- Gruppenidentifikation
- Automatische Sensorkalibrierung
- Ermittlung und Visualisierung von aktuellen Ressourcenzuständen

Beispiele für höherwertige Dienste sind:

- Realtime-Logistikkettensteuerung
- Automatisierte Buchung für Fakturierung und Schlagkartei
- Prognosebasierte Instandhaltung

3.2.2.3 Konfiguration

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Ressourcen und Leistungsbestandteile erfolgt im Anschluss die eigentliche Konfiguration. Eine Konfiguration umfasst die Zusammenstellung einzelner definierter Bestandteile unter Beachtung von formalen Regeln hinsichtlich Kombinationsgeboten und -verboten. Das Ergebnis der Konfiguration ist eine vollständig definierte Leistung, die ein Leistungserbringer, entweder ein Lohnunternehmer gegenüber seinen Kunden oder ein Landwirt gegenüber sich selbst, erbringt.

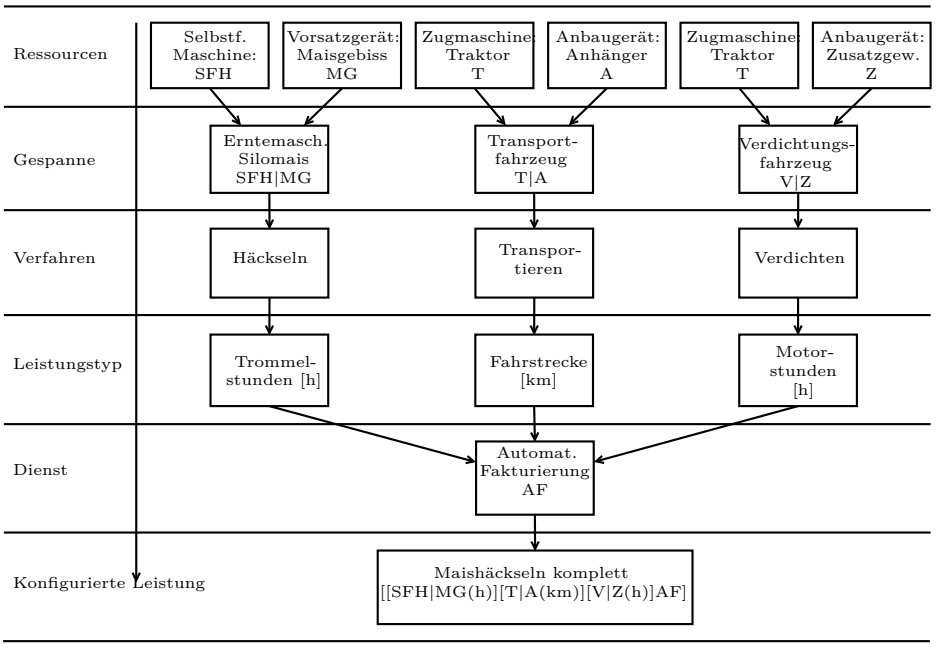


Abb. 3.7: Ablauf und Prinzip der Leistungskonfiguration

Die Konfiguration erfolgt entweder auf abstrakte oder konkrete Weise. Abstrakt bedeutet, dass die Leistungen zunächst nicht mit konkreten Ressourcen verbunden werden. Dies entspricht der Analogie des Leistungsverzeichnisses. Auch hier wird erst im Rahmen des Dispositionsvorganges durch Verknüpfung mit konkreten Ressourcen eine Konkretisierung vorgenommen. Der Konfigurationsvorgang besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden Schritten und ist in Abb. 3.7 anhand der in der Erntekette Silomais eingesetzten Ressourcen dargestellt. Jeder gewählte Bestandteil lässt sich durch eine Kennung ergänzen. Mit dieser als Token formalisierten Darstellung ist eine informationstechnische, kontextgesteuerte Verarbeitung innerhalb der Systemarchitektur möglich. Abb. 3.8 zeigt in einer Übersicht die im Rahmen der Leistungskonfiguration verwendeten Begriffe und ihre Beziehungen zueinander.

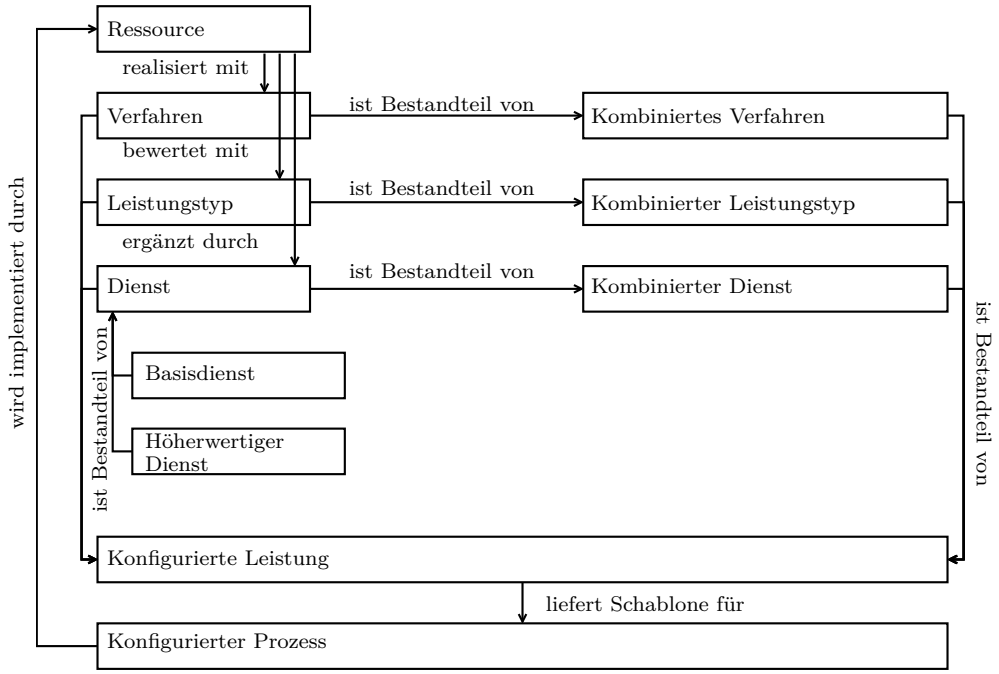


Abb. 3.8: Begriffsbeziehungen der Leistungs- und Prozesskonfiguration

3.2.2.4 Komponentendarstellung

Für die spätere Einbindung der Leistungskonfiguration in die Gesamtarchitektur ist in der nachfolgenden Abb. 3.9 der Konfigurator abschließend als Komponente dargestellt. Unter Verwendung von Ressourcenprofilen mit abgeleiteten Verfahren, sowie Leistungstypen, Diensten und Konfigurationsregeln werden konfigurierte Leistungen für spätere Prozesse geliefert.

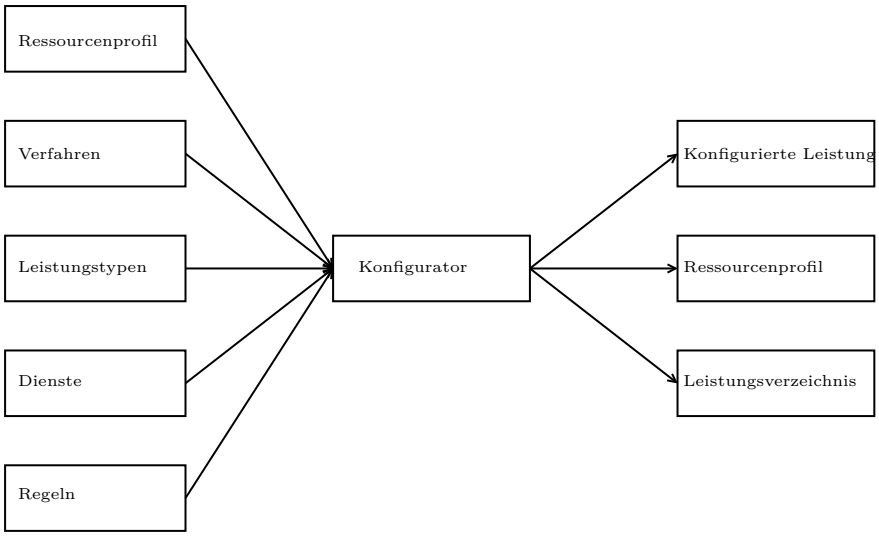


Abb. 3.9: Komponenten-orientierte Darstellung des Konfigurators

3.2.3 Geoobjekt-Managementkomponente

In Abschnitt 2.3.2 wurde der Raumkontext als eine von drei zentralen Dimensionen beschrieben. In der nachfolgend beschriebenen Geoobjekt-Managementkomponente wird die Verarbeitung raumbezogener Informationen implementiert. Gegenstand der Betrachtung sind Geoobjekte, ihre Merkmale und Beziehungen zueinander. Bei der Ausführung von landwirtschaftlichen Verfahren bewegen sich mobile Arbeitsmaschinen in einem definierten Raum. In Analogie zur Fertigungstechnik können Objekte im Raum als Werkstück und die beweglichen Arbeitsmaschinen als Werkzeug verstanden werden. Für eine qualifizierte Planung, Steuerung und Dokumentation dieser Verfahren ist der Raum auf mehreren Betrachtungsebenen zu beschreiben. Für die Integration raumbezogener Aspekte in Geschäftsprozesse werden Objekte nach der Systematik von Streit (2005) betrachtet. Darin werden Geoobjekte hinsichtlich Geometrie, Topologie, Thematik und Dynamik beschrieben. Nachfolgende Betrachtungen liegt ein vektorbasiertes Modell zugrunde.

3.2.3.1 Geometrie von Geoobjekten

Von Relevanz sind alle Objekte mit Bezug zu den ausgeführten pflanzenbaulichen Verfahren. Hierzu zählen die landwirtschaftlichen Flächen, die Wegeinfrastruktur, betriebliche Einrichtungen (z.B. Verarbeitungs- und Lagerorte) und die mobilen Arbeitsmaschinen. Geoobjekte lassen sich durch Abstraktion auf wenige Objekttypen reduzieren: Punkte, Linien, Flächen und Körper. Die Wahl der Repräsentation der Objekte hängt dabei von der Aufgabenstellung ab. So kann beispielsweise das Geoobjekt Feld 2- oder 3-dimensional dargestellt werden. Wenn in einem Prozess das Relief und die im Feld vorhandenen Hindernissen nicht relevant sind, ist eine 2-dimensionale Darstellung hinreichend. Ist jedoch bei Bodenbearbeitungsmaßnahmen die Bearbeitungstiefe relevant, z.B. bei Gefahr der Beschädigung von Drainageleitungen durch Tiefenlockerung, muss die Lage dieses Objekts bekannt sein, um die Arbeitsmaschine angepasst führen zu können. Hier ist ein 2,5 bzw. 3-dimensionales Modell erforderlich. In 2,5-dimensionaler Darstellung werden Hindernisse in der Ebene mit entsprechenden Metadaten, hier Lageinformationen, beschrieben. Auf Basis geometrisch beschriebener Objekte lassen sich Methoden anwenden, die die Planung und Steuerung landwirtschaftlicher Prozesse unterstützen. Aus einer Vielzahl von Methoden sind hier von Bedeutung:

- Abfrage geometrischer Merkmale und Beziehungen (Lage, Entfernung, Fläche, Volumen)
- Erzeugung von Puffern (z.B. Abstandsvorgaben zu Nichtziel-Objekten im

Sinne des Pflanzenschutzgesetzes, Anwendung auch bei nicht diskret beschreibbaren Grenzen)

- Verschneidung von Geoobjekten (z.B. Erzeugung von Teilschlägen im Sinne von Precision Farming)

Die Erzeugung, Manipulation und Abfrage geometrischer Objekte und ihrer Merkmale erfolgt mit vektorbasierten Operationen.

3.2.3.2 Topologie von Geoobjekten

Basierend auf den in Abb. 2.6 und 6.1 dargestellten abstrakten Geoobjekten und Topologietypen lassen sich konkrete Beispiele aus der landwirtschaftlichen Praxis beschreiben, die von der Systemarchitektur für die Steuerung ereignisorientierter Prozesse zu erkennen und zu verarbeiten sind (Abb. 6.1).

Tab. 3.3: Mögliche topologische Beziehungen und Beispiele

A	body				poly			line	
B	body	poly	line	point	poly	line	point	line	point
disjoint	Arbeits-masch.						Haltepo-sition (LKW)	Gewässer-abstand	
meet					Nachbar-feld	Feldein-fahrt	Grenz-stein	Einbahn-abschnitt	Ver-kehrs-hinweis
overlap		Boden-hori-zont			Kataster-stück			Kreuzung Feldwege	
contains			Drai-nage	Geod. Ref.	Mgmt. zone	Überla-dekorri-dor	Ertrags-mess-wert		
covers	Wurzel-zone	Pflug-sohle			Pflanzen-bestand	Fahr-spur			
equal					Feld-grenze				

Erläuterungen zu Abb. 6.1:

- Beispiel Bodenhorizont: Eine Bewirtschaftungseinheit (Feld) kann als Körper verstanden werden, der sich aus vertikal geschichteten Bodenhorizonten unterschiedlicher Mächtigkeit, ebenfalls ein Körper, zusammen setzt. Die Geoobjekte Feld und Bodenhorizont überlappen sich, wenn dieser nicht nur innerhalb, sondern auch außerhalb des Feldes zu beobachten ist.
- Beispiel Managementzone: Innerhalb eines Feldes ergeben sich z.B. aufgrund unterschiedlicher Bodengüte (Ertragsfähigkeit) Zonen, die im Sinne von Precision Farming mit unterschiedlicher Intensität bewirtschaftet werden. In diesem Beispiel ist die Managementzone vollständig enthalten, kann sich jedoch auch Grenzlinien mit dem anderen Objekt teilen. Sie geht jedoch nicht darüber hinaus.

3.2.3.3 Thematik von Geoobjekten

Zur Ermittlung des Kontextes mobiler landschaftlicher Prozesse ist für Geoobjekte zusätzlich zu den geometrischen und topologischen Merkmalen eine Zuweisung von Attributen erforderlich (Metadaten). Zu beschreibende Geoobjekte sind im landwirtschaftlichen Prozess die bewirtschafteten Flächen, Wege, stationären Einrichtungen und Ressourcen. Zur Steuerung von Prozessen ist relevant, welche Werte die zugewiesenen Attribute haben. Tabelle 3.4 zeigt die wichtigsten Geoobjekte im Anwendungsfall, Attribute und ableitbare Informationen zur Planung und Steuerung von Prozessen.

Tab. 3.4: Themen von Geoobjekten und resultierende Merkmale

Objekt	Attribute	Ableitbare Informationen für den Prozess
Feld	Identität, Name, Bewirtschafter, Kultur, Größe, Lage	Adressat, Verfahren, Dauer, Kapazität, Ketten-Konfiguration
Weg	Identität, Name, Kategorie, Breite, Länge, Tragfähigkeit	Geschwindigkeit, Begegnung, Transportleistung, Dauer
Hindernis	Identität, Typ, Größe, Lage	Maschinensteuerung, Gefahren- und Schadenspotential, Einfluss auf Zeitanspruch

Das Feld liefert mit seinem Polygon ein Kriterium zur Abgrenzung typischer Verfahrensdaten. Erreicht eine Ressource ein benanntes Feld (Relation Punkt in Polygon), werden entsprechend einem definierten Geschäftsprozess z.B. Arbeitsdauer und bearbeitete Fläche ermittelt. Mit Hilfe des aus einer topologischen Prüfung ermittelbaren Attributs *Name* kann auf das Attribut *Bewirtschafter* und damit den Adressaten für eine erbrachte Dienstleistung geschlossen werden.

Hindernisse stellen eine Hauptquelle von produktivitätssenkenden Einflüssen im Prozess dar. Für eine kontextsensitive Steuerung von Prozessen ist es deshalb wichtig, Hindernisse zu typisieren und darauf aufbauend verfahrensspezifische Verhaltensweisen abzuleiten (Tab. 3.5). So ist beispielsweise eine Drainage ein permanent vorhandenes physisches, aber nicht sichtbares Hindernis. Bei Durchführung von Bodenbearbeitungsmaßnahmen, die eine bestimmte Arbeitstiefe überschreiten, ist die Gefahr der Beschädigung der Drainage gegeben, bei massiveren Hindernissen auch der Maschine. Somit ist das Risiko verfahrensbedingt. Im Sinne kontextsensitiven Verhaltens ist der Bediener in der entsprechenden Situation zu warnen oder es ist in direkter Eingriff in die Steuerung des Anbaugerätes (Höhenregulierung) möglich.
Aus der fachlich präzisen Beschreibung des Hindernisses, der Kenntnis des durchzuführenden Verfahrens und der dafür eingesetzten Ressourcen lässt sich

Tab. 3.5: Typisierung von Hindernissen

Attribut	Ausprägung	Beispiele					
		Drainage	Eigentumsgrenze	Wasserloch	Zaun	Schutzfläche	Hydrant
Beschaffenheit	materiell	x		x	x		
	immateriell		x			x	
Präsenz	permanent	x	x		x	x	x
	temporär			x			
Abgrenzbarkeit	diskret	x	x		x	x	
	diffus			x			
Perzeption	wahrnehmbar			x	x		x
	nicht wahrnehmbar	x	x			x	x
Determiniertheit	vorhersagbar	x	x		x	x	x
	nicht vorhersagbar			x			
Veränderlichkeit (passiv)	statisch	x	x		x	x	x
	dynamisch			x			
Veränderlichkeit (aktiv)	ja	x			x		
	nein		(x)	x		(x)	(x)

ermitteln, welche Einschränkungen mit dem betreffenden Geoobjekt verbunden sind. Den Geoobjekten zugewiesene Attribute können in unterschiedlichen Maßskalen gemessen werden: nominal, ordinal, metrisch. Darauf aufbauend lassen sich thematische Operationen nach der Set-Theorie durchführen.

3.2.3.4 Dynamik von Geoobjekten

Die Dynamik von Geoobjekten stellt eine Hauptursache für das gering- bzw. nicht-deterministische Systemverhalten dar. Der Grad der Determiniertheit ist dabei abhängig vom Betrachtungsgegenstand (inkl. Möglichkeit zur Beeinflussung), dem gewählten Detailgrad und dem zeitlichen Horizont. Die Dynamik von Geoobjekten hat sowohl direkten, als auch indirekten Einfluss auf die landwirtschaftlichen Prozesse. Direkter Einfluss ergibt sich z.B. aus der veränderten Befahrbarkeit von Feldern durch Niederschläge. Indirekter Einfluss resultiert z.B. aus veränderten Eigenschaften von Pflanzen aufgrund hoher oder niedriger Bodenfeuchte. Ursachen der Dynamik reichen von ausschließlich umweltinduziert (z.B. Wasserstellen) bis ausschließlich prozessinduziert (z.B. Bearbeitungsfortschritt). Tab. 3.6 nennt Beispiele dynamischer Veränderungen für die drei zuvor behandelten Betrachtungsebenen von Geoobjekten.

Tab. 3.6: Beispiele dynamischer Veränderungen von Geoobjekten für drei Betrachtungsebenen

Ebene	Beispiel	
	beeinflussbar	nicht beeinflussbar
Geometrie	Bearbeitungsfortschritt	Nasse Stellen (mit Auswirkung auf Bearbeitung)
Topologie	Bildung von Ackerrandstreifen	Vorkommen von Schaderregern
Thema	Kauf oder Tausch von Flächen	Entwicklungsstadium von Kulturpflanzen

3.2.3.5 Geoobjekte und damit verbundene Zustände und Ereignisse

Landwirtschaftliche Prozesse, die mit mobilen Arbeitsmaschinen ausgeführt werden, haben durch ihre Bewegung einen sich ständig ändernden räumlichen Bezug zu konkreten Geoobjekten. Damit kommt den Geoobjekten bei einer objektorientierten Betrachtung eine herausragende Bedeutung zu. Durch die Dynamik treten zuvor definierte Ereignisse ein, auf die wiederum in definierter Weise reagiert wird. Veränderungen von Geoobjekten im Sinne der vier betrachteten Ebenen stellen Ereignisse dar, die für die Planung, Steuerung und Dokumentation relevant sind. Die Relevanz auftretender Ereignisse ergibt sich aus der gestellten Aufgabe und wird mit Regeln abgebildet. Ereignisse ergeben sich aus der Zustandsänderung von Geoobjekten. Das betrifft alle genannten Ebenen: Geometrie, Topologie, Thema. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob diese Änderungen aus dem Ökosystem (z.B. Niederschlag) oder dem ausgeführten Prozess (z.B. Erreichen eines Feldes) resultieren. Relevante Ereignisse führen zu adaptivem Verhalten. Für eine systematische Verarbeitung von mit Geoobjekten verbundenen Bedingungen und Ereignissen ist es erforderlich, diese zu kennen und zu beschreiben. In der nachfolgenden Tab. 3.7 werden die in Prozessen relevanten Ereignisse und Eigenschaften ohne Negation aufgeführt.

3.2.3.6 Komponentendarstellung

Die Geoobjektmanagement-Komponente (Abb. 3.10) empfängt Informationen einer Ressource und liefert unter Verwendung der Ressourcenbeschreibung und im Geoobjekt-Katalog hinterlegten Informationen einen raumbezogenen Kontext. Der gelieferte Raumkontext ermöglicht die Auslösung von Ereignissen wie Starten und Stoppen von Zählern für Zeit, Fläche, geerntete Güter, Mittelverbrauch und Kosten im laufenden Prozess.

Tab. 3.7: Bedingungen und Ereignisse im Kontext von Geoobjekten

Ebene	Ereignis/Eigenschaft	Erläuterung
Geometrie	Existenz (exist)	Geoobjekt wird wahrgenommen und ist im Modell existent
	Änderung (change)	Geoobjekt ändert Form oder Größe oder Lage
	Entstehung (create)	Neues Geoobjekt ist entstanden
Topologie	Berührung (touch)	Eine Ressource berührt ein Geoobjekt
	Enthalten (inside)	Eine Ressource befindet sich in einem Geoobjekt
Thema	Änderung (change)	Das Thema eines Geoobjektes hat sich geändert
Sonstiges	Richtung (direction)	Richtung zum betrachteten Geoobjekt
	Entfernung (distance)	Entfernung zum betrachteten Geoobjekt

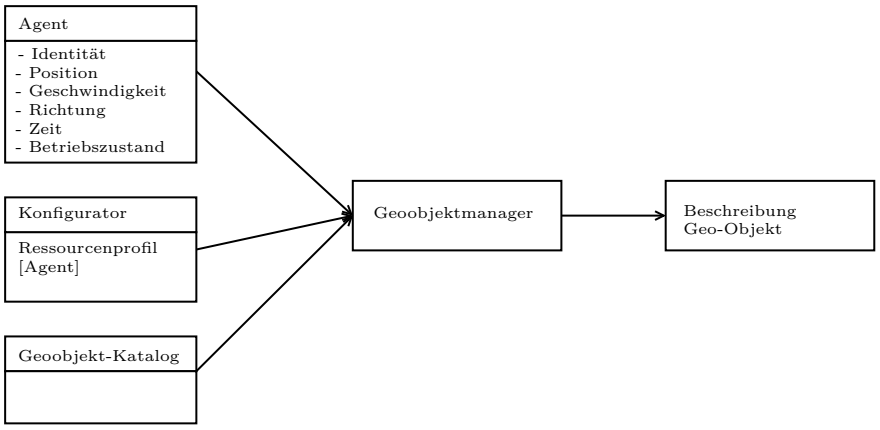


Abb. 3.10: Komponenten-orientierte Darstellung des Geoobjektmanagers

3.2.4 Ressourcenspezifisches Zeit-Arbeitsschema

Für die Steuerung und Dokumentation mobiler Prozesse ist es wichtig, zu jedem Zeitpunkt den Betriebszustand der eingesetzten Ressourcen zu kennen. Mit Hilfe des ressourcenspezifischen Zeit- Arbeitsschemas erfolgt eine Abbildung relevanter Ressourcenzustände auf einen definierte arbeitswirtschaftliche Typologie von Begriffen.

3.2.4.1 Ressourcenzustände

Ressourcenzustände lassen sich aus gelieferten Sensorinformationen und topologischen Beziehungen zwischen Ressourcen und Geoobjekten ermitteln. Durch eine Abstraktion verschiedener Antriebsformen für das verfahrensbestimmende Aggregat (mechanisch, elektrisch, hydraulisch) auf den Begriff Hauptantrieb sowie verschiedene mögliche Arbeitspositionen und ihre Zustände auf den Begriff

Arbeitsstellung lässt sich die in Tab. 3.8 aufgeführte Systematik erstellen und für unterschiedliche Kombinationen von Maschinen und Anbau-/Vorsatzgeräten anwenden.

Tab. 3.8: Ressourcenmerkmale und ihre Ausprägungen

Komponente/Sensor	mögliche Zustände	
Motor	$ein \vee aus$	
GPS	Position im Geoobjekt Feld: $ja \vee nein$ Position im Geoobjekt Fahrsilo: $ja \vee nein$ Position im Geoobjekt Hofstelle (Werkstatt): $ja \vee nein$ Fahrgeschwindigkeit: $0 \vee > 0$	
Hauptantrieb	$ein \vee aus$	Bsp. SFH: Hauptantrieb = Zustand Häckselaggregat Bsp. Mähwerk: Hauptantrieb = Zustand Zapfwelle
Arbeitsstellung	$ein \vee aus$	Bsp. SFH: Arbeitsstellung = Vorsatzgerät abgesenkt Bsp. Mähwerk: Arbeitsstellung = Mähwerk abgesenkt

3.2.4.2 Arbeitswirtschaftliche Typologie

Für die systemtechnische Unterstützung von Planung, Steuerung und Dokumentation von Prozessen ist eine systematische Zerlegung in abgrenzbare Teilprozesse erforderlich. Die Strukturierung erfolgt in Anlehnung an das Zeitschema des KTBL von Winkler & Frisch (2014). Dieses Schema wird jedoch auf die Anforderungen systemtechnisch erfassbarer Zustände für die Automatisierung der Informationsverarbeitung hin modifiziert. Teilprozesse werden wie die Ressourcenmerkmale so weit generalisiert, dass eine hierarchische Abbildung auf Zeit-Arbeitselemente für eine Vielzahl landwirtschaftlicher Verfahren möglich wird (Abb. 3.11).

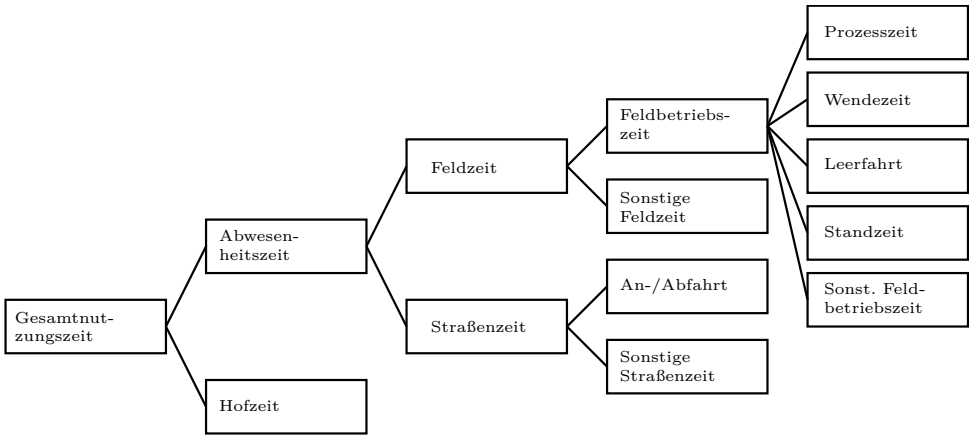


Abb. 3.11: Hierarchie der Zeit-Arbeitselemente

Ausgehend von der Gesamtnutzungszeit, dem Zeitraum, in dem eine Ressource

verfügbar ist, wird eine Unterteilung in Hofzeit und Abwesenheitszeit (vom Hof) vorgenommen. Dieser Darstellung unterliegt bei pflanzenbaulichen Verfahren die Annahme, dass die Ressource auf dem Hof keine wertschöpfenden Prozesse ausführt. Das Kriterium wird über eine topologische Beziehung ermittelt, in der die Hofstelle als Polygon hinterlegt ist und die letzte ermittelte GPS-Position entweder innerhalb oder außerhalb dieses Polyones ermittelt wurde. Die Abwesenheitszeit wird ebenfalls auf Basis topologischer Beziehungen in *Feldzeit* und *Straßenzeit* unterteilt. Bei der *Feldzeit* unterteilt man je nach Motorbetriebszustand: Bei laufendem Motor erfolgt eine Zuordnung zur *Feldbetriebszeit*, im anderen Fall zur *Sonstigen Feldzeit*. In der *Sonstigen Feldzeit* ist vorrangig die Verweildauer erfasst, wenn die Maschine über Nacht auf dem Feld verbleibt. Die *Feldbetriebszeit* umfasst fünf Zeit-Arbeitselemente, davon vier sensorisch ermittelbar und einer ableitbar. Die *Prozesszeit* beschreibt den bestimmungsgemäßen Kern wertschöpfender Arbeiten, z.B. *Feldhäcksler häckselt*. *Wendezeit* umfasst unvermeidbaren aber aufgrund von Pfadplanungen in Grenzen beeinflussbare Zeitanteile zum Wechsel der Fahrspuren. Eine *Leerfahrt* findet statt, wenn der Arbeitsort innerhalb des Feldes aufgrund der vorhandenen Geometrie geändert wird oder ein Mähdrescher zum Überladen des Getreides zu einem am Feldrand wartenden Transportfahrzeug fährt. Wartet eine Maschine im Feld bei laufendem Motor, handelt es sich um *Standzeit*. Die *Sonstige Feldbetriebszeit* ist die Differenz aus *Feldbetriebszeit* und den vier zuvor genannten Zeit-Arbeitselementen. Definitionsgemäß sind hier z.B. tägliche Wartungsarbeiten zuzuordnen. Die *Straßenzeit* unterscheidet aufgrund des Motor-Betriebszustandes die Zeit-Arbeitselemente *An-/Abfahrt* (Motor EIN) sowie *Sonstige Straßenzeit* (Motor AUS). *Sonstige Straßenzeit* enthält geplante (Pause) und ungeplante Ereignisse (Störungen).

3.2.4.3 Zusammenführung von Ressourcenzuständen und arbeitswirtschaftlicher Typologie

Die Zeit-Arbeitselemente lassen sich über sensorisch erfassbare Ressourcenzustände ermitteln. Daraus entsteht die Möglichkeit, mobile landwirtschaftliche Arbeitsverfahren – ohne zusätzliche Ausrüstung der Maschinen – weitgehend automatisch zu analysieren und diese Informationen zur ebenfalls automatischen Steuerung und Dokumentation von Prozessen zu nutzen. Beispiele hierfür sind das Starten und Stoppen von Zeit-, Flächen- und Kraftstoffverbrauchszählern. Voraussetzung für die korrekte Interpretation ist die Kenntnis der im Konfigurator (Abschnitt 3.2.2) vorhandenen Ressourcen und der für sie spezifizierten Leistungen.

Tab. 3.9: Ressourcenspezifisches Schema Feldhäcksler

		Gesamtnutzungszeit								
		Abwesenheitszeit								Hofzeit
		Feldzeit (FZ)						Straßenzeit (SZ)		
		Feldbetriebszeit (FBZ)					Sonst. FZ	An-/ Ab-fahrt	Sonst. SZ	
		Prozess-zeit	Wende-zeit	Leer-fahrt	Stand-zeit	Sonst. FBZ				
Motor	ein/aus	1	1	1	1	1	0	1	0	0
GPS	Feld	1	1	1	1	1	1	0	0	0
GPS	Hof	0	0	0	0	0	0	0	0	1
GPS	$v > 0$	1	1	1	0	0	0	1	0	0
Main	ein, aus	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Work	ein, aus	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Im Gegensatz zu Strukturen, wie sie beispielsweise im Zusammenhang mit REFA (REFA 1997) oder MTM (Baszenski 2012) zur Anwendung kommen, ist hier nicht der Mensch in seiner Rolle als Bediener, sondern die Maschine das zu betrachtende Objekt. Die Typologisierung orientiert sich also an den Möglichkeiten der sensorgestützten Identifikation von Ressourcenzuständen und der systemgestützten Umsetzung informationstechnischer Prozesse.

Das in Tab. 3.9 dargestellte Schema orientiert sich an der Idee, dass landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen ihre Arbeiten auf dem Feld verrichten und diese Maschinen durch Zustände hinsichtlich Hauptantrieb und Arbeitsstellung beschreibbar sind[3]. Für selbstfahrende Erntemaschinen und Traktoren mit angetriebenen Anbaugeräten sind diese Bedingungen erfüllt.

Für Traktoren mit nicht angetriebenen Anbaugeräten (z.B. Grubber) ist das Schema zu modifizieren. Die Abgrenzung der Zeit-Arbeitselemente Wenden und Leerfahrt ist erschwert und macht weitergehende topologische Analysen erforderlich, die z.B. durch zusätzliche Hinterlegung von Geoobjekten für das Vorgewende ermöglicht werden. Für Arbeitsorte außerhalb des Feldes, wie Silo oder Hof, sind ebenfalls zusätzliche Geoobjekte zu hinterlegen. Größere Modifikationen am Schema sind für die Abbildung von Transportprozessen erforderlich. Die wertschöpfende Leistung wird nur in geringem Umfang auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche erbracht. Weiterhin kann der Beladungszustand nur durch ergänzende Maßnahmen sicher ermittelt werden (Füllstands- oder Gewichtssensoren, Ermittlung von Be- und Entladevorgängen vom Kontext, Fahrtrichtung).

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise des Zeit-Arbeitsschemas wird in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3.10) eine Leistung mit den folgenden Merkmalen konfiguriert:

[3] ($1 \rightarrow$ *wahr*, $0 \rightarrow$ *falsch*)

Tab. 3.10: Konfigurierte Leistung

Ressourcen	Maschine: Selbstfahrender Feldhäcksler Vorsatzgerät: Reihenunabhängiges Maisgebiss
Gespann	Selbstfahrender Feldhäcksler mit reihenunabhängigem Maisgebiss
Verfahren	Maishäckseln
Leistungstyp	außerhalb des Feldes: - An- und Abfahrt nach zurückgelegter Wegstrecke - Ermittlung und separate Ausweisung des Kraftstoffverbrauches innerhalb des Feldes: - Prozesszeit (Häckseltrommel = EIN) - Ermittlung und separate Ausweisung des Kraftstoffverbrauches
Dienst	Erstellung von Buchungssätzen auf Basis ermittelter Kontexte

Das Zustandsdiagramm in Abb. 3.12 zeigt für die konfigurierte Leistung die dafür erforderliche Identifikation von Elementen des Zeit-Arbeitsschemas.

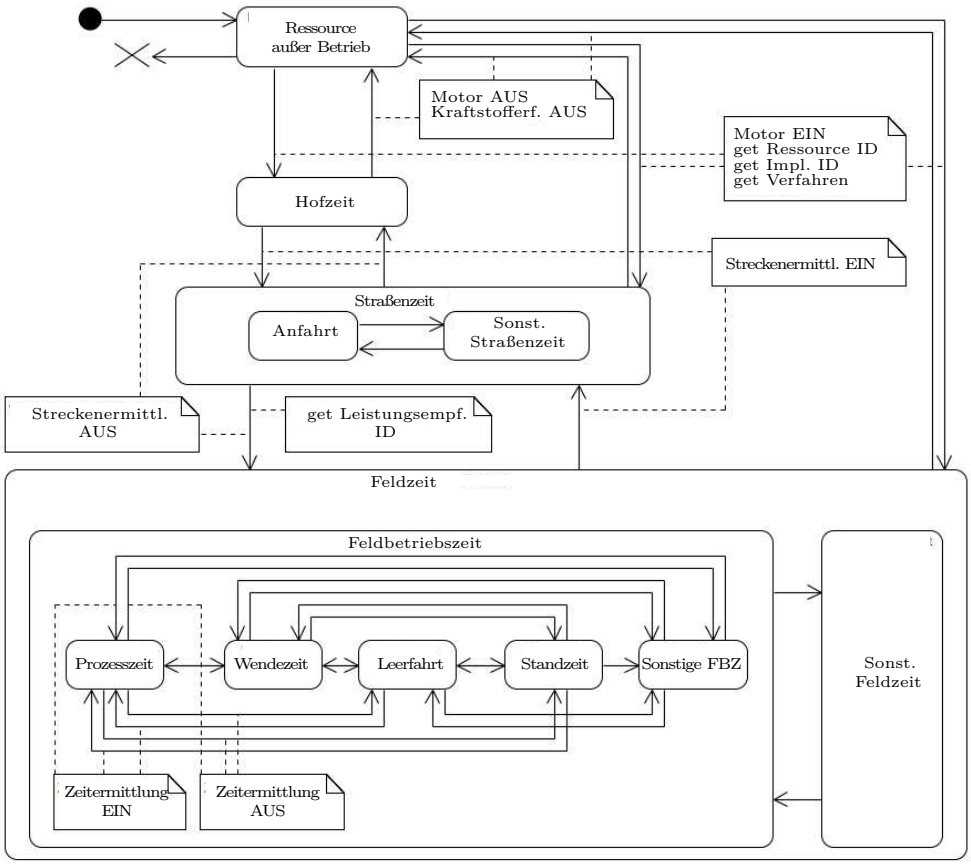


Abb. 3.12: Darstellung der Elemente des Zeit-Arbeitsschemas als Zustandsdiagramm

3.2.4.4 Komponentendarstellung

Das Zeit-Arbeitsschema lässt sich als Komponente darstellen (Abb. 3.13). Zur Ermittlung des relevanten Arbeitselementes greift die Komponente auf die in Abschnitt 3.2.4.1 beschriebenen Zustände einer Ressource zu, führt wie in Abschnitt 3.2.4.3 beschrieben eine Abbildung auf das ressourcenspezifischen Schema durch und liefert auf Basis der getroffenen Zuordnung das identifizierte Zeitelement an den Agenten zurück. Der Agent steuert auf dieser Grundlage den nächsten Schritt im Prozess wie beispielsweise Starten und Stoppen von Zählern.

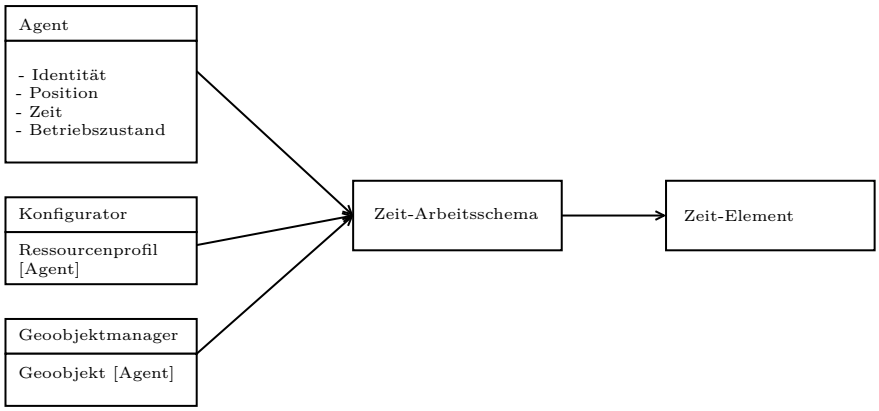


Abb. 3.13: Komponenten-orientierte Darstellung des Zeit-Arbeitsschemas

3.2.5 Speicherobjekte

3.2.5.1 Merkmale von Speicherobjekten

Speicherobjekte repräsentieren stationäre und mobile Bausteine der Infrastruktur, deren Eigenschaften sich während der Ausführung landwirtschaftlicher Prozesse durch Be- und Entladung verändern und Einfluss auf das zeitliche Verhalten haben. Stationäre Speicherobjekte (z.B. Feld, Abladeplatz, Silo) werden explizit modelliert, mobile Speicherobjekte (z.B. Anhänger, Bunker und Vorratsbehälter in Arbeitsmaschinen) sind integraler Bestandteil von Arbeitsmaschinen und werden für die Agenten implizit modelliert. Agenten können über die in Tabelle 3.11 dargestellten Methoden die Eigenschaften von Speicherobjekten abfragen und verändern. Speicherobjekte verfügen über die Fähigkeit, definierte Ereignisse wie *voll* oder *leer* an ebenfalls definierte Agenten zu senden. Die Speicherobjekte lassen sich durch Eigenschaften, Methoden und Ereignisse beschreiben 3.11.

Tab. 3.11: Eigenschaften, Ereignisse und Methoden von Speicherobjekten

	Feld	Anhänger	Abladeplatz	Silo
		Eigenschaften		
ID	Bezeichnung	Bezeichnung	Bezeichnung	Bezeichnung
Kapazität	t	t	t	t
Zufluss-/Abflussrate	t/h	t/min	t/h	t/h
Füllstand	t	t	t	t
		Methoden		
Füllen	entfällt	Beladen	Anhänger entladen	Erntegut aufschieben
Leeren	Ernten	Entladen	Erntegut abschieben	entfällt
Kapazität festlegen/ermitteln	Gesamtertrag	Transportkapazität	Zulässige Erntegutmenge	Gesamtkapazität (>Gesamtertrag(Feld))
Abflussrate festlegen/ermitteln	Durchsatz Häcksler	Entladegeschwindigkeit am Abladeplatz	Abschiebeleistung durch Verdichter	entfällt
Zuflussrate festlegen / ermitteln	entfällt	Durchsatz Häcksler	Abladeleistung Anhänger	Leistung Verdichter
Füllstand ermitteln	Arbeitsfortschritt	Befüllungsgrad	Auslastung	Arbeitsfortschritt
		Ereignisse		
Ereignis „leer“	Feld abgeerntet	Anhänger abgeladen	Abladeplatz leer	entfällt
Ereignis „voll“	entfällt	Anhänger beladen	Annahmekapazität erschöpft	Lagerkapazität erschöpft

3.2.5.2 Komponentendarstellung

Das Speicherobjekt ist in Abb. 3.14 als Komponente dargestellt.

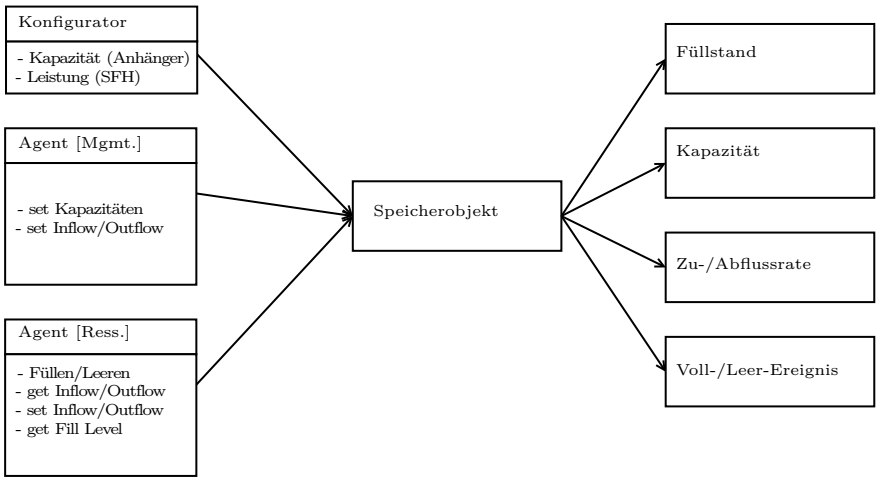


Abb. 3.14: Komponenten-orientierte Darstellung des Speicherobjektes

3.2.6 Managementsysteme

Managementsysteme sind fachliche Anwendungen, die im Rahmen der Planung, Ausführung und Dokumentation landwirtschaftlicher Prozesse genutzt werden. Von Relevanz sind hier Schlagkartei- und Fakturierungssysteme. Farm-

Managementsystemen erfüllen im Kontext der entwickelten Architektur zwei Aufgaben:

- Bereitstellung von Stammdaten zu Kunden, Flächen, Ressourcen und Speicherobjekten, die durch Agenten abgefragt werden können.
- Entgegennahme von Prozessdaten – geliefert durch Agenten – für ausgeführte Geschäftsprozesse. In der Schlagkartei werden die Prozessdaten für die Betriebsdokumentation verwendet, im Fakturierungssystem für die Erstellung von Rechnungen im Rahmen überbetrieblicher Arbeitserledigung.

Für die Vereinfachung der Integration verfügen die meisten Systeme über ISOXML-Schnittstellen. Die detaillierte Darstellung zur Einbindung von Managementsystemen erfolgt im Anwendungsfall exemplarisch am Beispiel der Fakturierung. Es wird gezeigt, welchen Beitrag Agenten zur automatischen Erstellung eines Rechnungsdokumentes leisten. Eine vertiefte Darstellung von FMS erfolgt nicht.

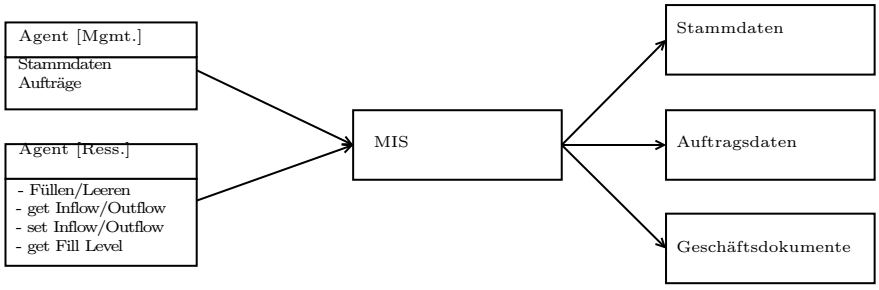


Abb. 3.15: Komponenten-orientierte Darstellung für Management-Informationssysteme

3.2.7 Ressourcen als verteilte, kooperierende Agenten

In Abschnitt 2.3.8 wurden Agenten als Paradigma für selbstständig handelnde, miteinander kooperierende Ressourcen erläutert. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Komponenten kommt dem Agent als einzig aktivem Objekt eine besondere Bedeutung zu.

Der Agent repräsentiert die im landwirtschaftlichen Arbeitsprozess aktiven Ressourcen. Ressource bedeutet in diesem Zusammenhang die Einheit von Maschine und Mensch als ihr Bediener. In seiner Gesamtheit stellt der Agent eine eigenständig handelnde Einheit dar, die gegebenenfalls gewissen Restriktionen unterliegt. Wo die Maschine bezüglich ihres eigenständigen Verhaltens, realisiert z.B. durch Regel- und Assistenzsysteme, an Grenzen stößt, unterstützt

der Bediener durch seine ergänzende Wahrnehmung (Sensoren), Erfahrung und manuellen Eingriffe (siehe auch Abb. 2.14).
Der Agent steht in enger Beziehung zu den beschriebenen Komponenten (Abb. 3.16). Für das selbstorganisierende Verhalten erforderliche Informationen erhält er von diesen Komponenten bzw. er stellt sie diesen zur Verfügung. Das beinhaltet auch die Kommunikation zwischen den Agenten, woraus in Summe ein Multi-Agentensystem (MAS) resultiert. Agenten können sich darin aktiv oder reaktiv verhalten.

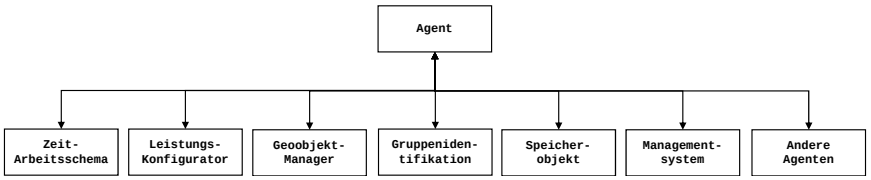


Abb. 3.16: Alle Komponenten in der Übersicht

Jede im Arbeitsprozess befindliche Ressource wird durch einen Agenten repräsentiert. Das konkrete Verhalten der Agenten ergibt sich aus

- den im Ressourcenprofil hinterlegten Merkmalen,
- der konfigurierten Leistung,
- den konkreten Umgebungsbedingungen sowie,
- den im Prozess identifizierten Partnern.

Mit dem in der konfigurierten Leistung enthaltenen Leistungstyp und den damit verbundenen Kostensätzen bzw. Preisen werden wesentliche Grundlagen für das Verhalten definiert. Agenten versuchen, ihr Verhalten entsprechend diesen Vorgaben lokal zu optimieren. Im Zusammenspiel mehrerer Agenten, z.B. in Ernteketten, kann es zu divergierenden Optimierungszielen kommen, die im Sinne des Gesamtprozesses zu berücksichtigen bzw. abzustimmen, d.h. global zu optimieren sind.

3.3 Kontext-basierte Systemarchitektur für den Anwendungsfall der Silomaisernte

3.3.1 Aufbau der Systemarchitektur

Basierend auf den beschriebenen Komponenten wird das Kontext-basierte Verhalten durch Integration der dargestellten Kontextarten für mobile landwirtschaftliche Prozesse realisiert. Dazu werden die Komponenten gegenseitig in Beziehung gesetzt (Abb. 3.18). Eine Komponente kann Informationen von einer anderen Komponente erhalten (Consumer) oder einer anderen Komponente

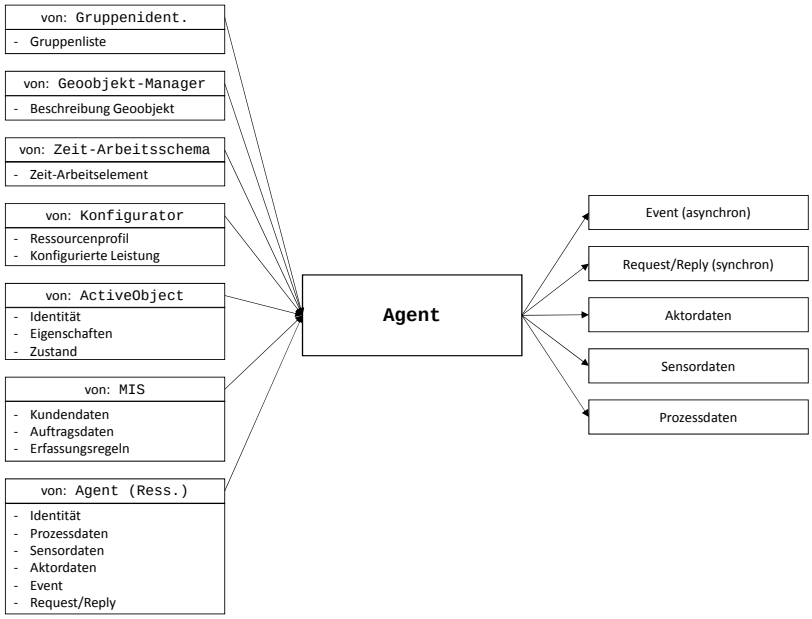


Abb. 3.17: Darstellung des Agenten als Komponente mit benötigten und generierten Informationen

zur Verfügung stellen (Provider).

Abb. 3.18: Verallgemeinerte Darstellung von Komponentenbeziehungen

Abb. 3.19 zeigt alle Komponenten smit ein- und ausgehenden Informationen. Zur Darstellung kooperierender Ressourcen ist die Komponente Agent zweifach aufgeführt (A und B).
Gegenstand der Architekturentwicklung ist nicht nur die Herleitung und Benennung von Komponenten, sondern auch deren physische Verortung. Insbesondere bei mobilen Arbeitsprozessen in Regionen mit nicht vorhandenen oder nicht sicher verfügbaren Mobilfunknetzen ist es erforderlich, die Abhängigkeit von den öffentlichen Netzen durch dezentrale (maschinennahe) Ansiedlung von Funktionen und Schaffung einer ebenfalls dezentralen M2M-Kommunikationsinfrastruktur zu reduzieren. Hierzu sind Verfahren der *Mobile Adhoc Networks* (MANET) oder *Delay Tolerant Networks* (DTN) geeignet. Orte für eine Ansiedlung sind somit die im Prozess beteiligten Ressourcen: mobile Arbeitsmaschinen, Menschen, immobile Objekte der Infrastruktur, sowie stationäre informationsverarbeitende Systeme. Abb. 3.20 zeigt die zugeordneten

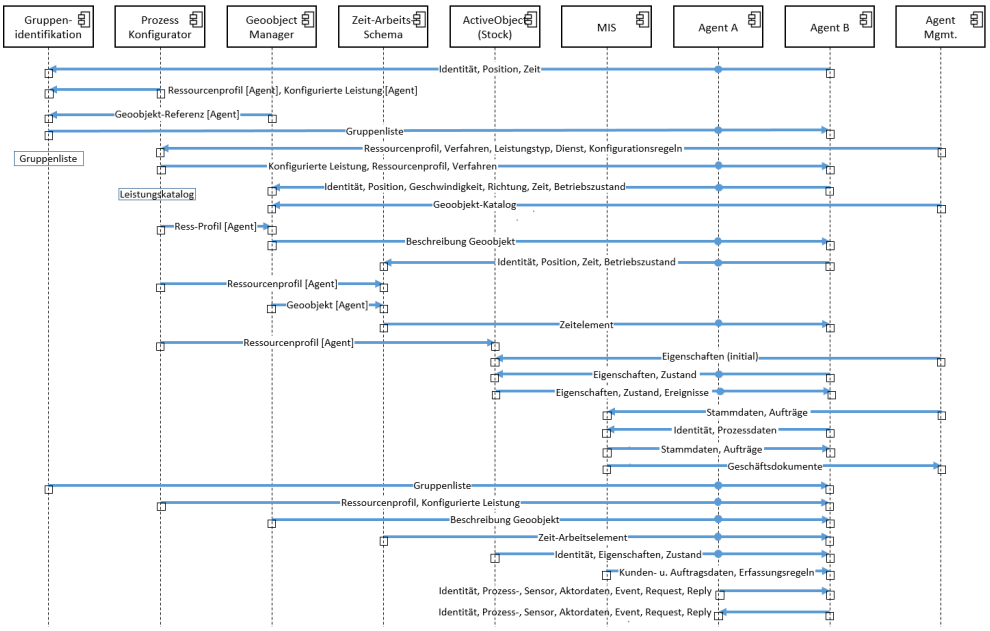


Abb. 3.19: Zusammenfassende Darstellung der Beziehungen zwischen den entwickelten Komponenten

Komponenten für die im Anwendungsfall beteiligten Ressourcen. Die Komponenten sind innerhalb der einzelnen Ressourcen über eine busartige Struktur miteinander verbunden. Gleiches gilt auch für die Vernetzung zwischen den Ressourcen.

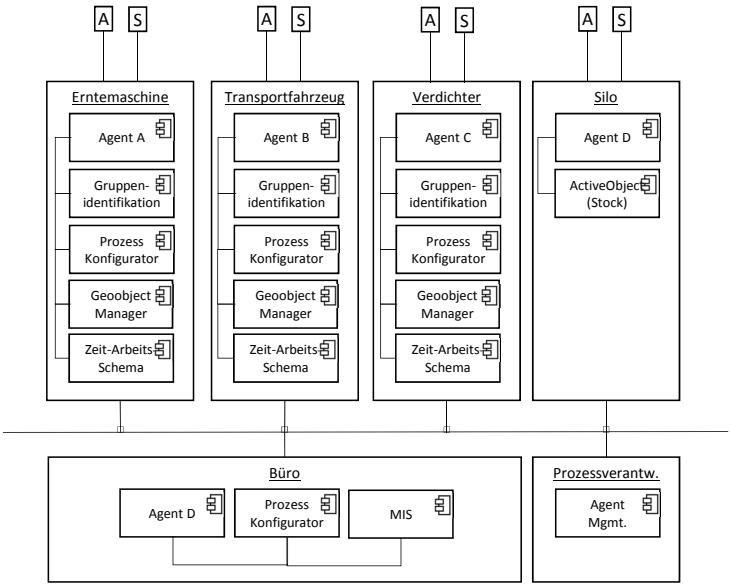


Abb. 3.20: Zuordnung von Komponenten zu Ressourcen

3.3.2 Verarbeitung von Ereignissen in der Systemarchitektur

Zentraler Betrachtungsgegenstand in der Systemarchitektur sind im Prozess auftretende Ereignisse, die exogene (Umwelt) oder endogene (Verhalten der Beteiligten) Ursachen haben. Der Systemarchitektur liegt als wesentliches Prinzip die Erfassung von Ereignissen mit unterschiedlichem Grad der Determiniertheit zugrunde.

3.3.2.1 Funktionsprinzip am Beispiel eines Anwendungsfallfragmentes

Im vorangehenden Abschnitt wurde der Aufbau der Systemarchitektur entwickelt. Auf dieser Grundlage wird an einem möglichen Anwendungsfall das grundlegende Funktionsprinzip – der Ablauf – erläutert. Das in Abb. 3.21 dargestellte Beispiel zeigt in einem Auftraggeber/Auftragnehmer-Szenario die Schlagerkennung und Dokumentation des Kraftstoffverbrauches zur Verwendung in der Rechnungserstellung.

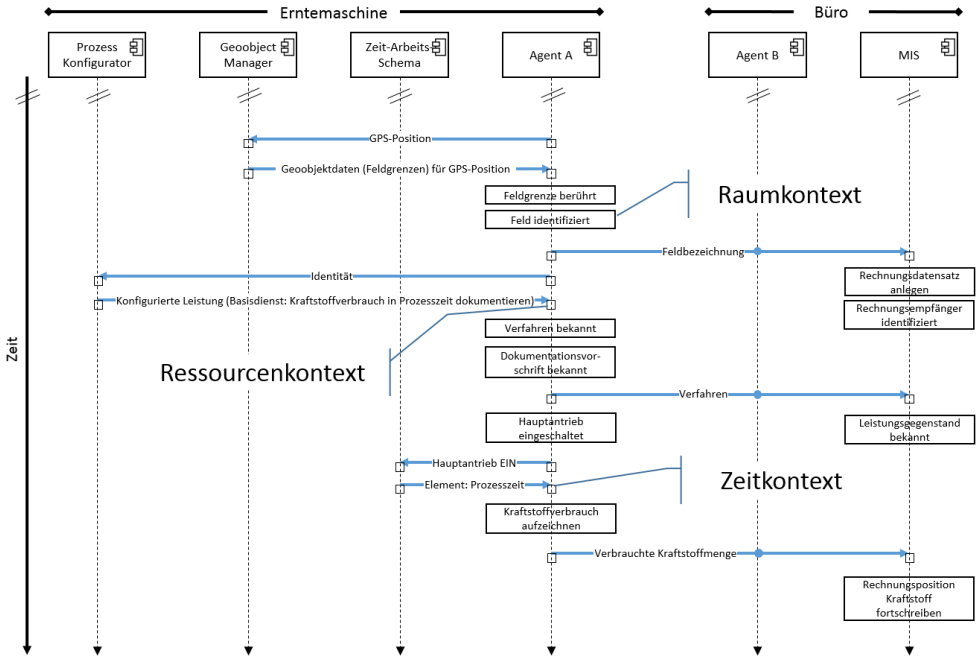


Abb. 3.21: Beispielhafte Darstellung des Funktionsprinzips der Ereignisverarbeitung

Darin erfasst eine Erntemaschine unter Verwendung eines GPS-Empfängers (Sensor) ihre aktuelle Geo-Position. Der Agent sendet die Position an den Geoobjekt-Manager, der als Reaktion darauf mit Beschreibungsdaten von in

der Umgebung dieser Position befindlichen Geoobjekten (Feldgrenzen) antwortet. Der Agent ist nun in der Lage, einen Grenzübertritt der Erntemaschine zu erkennen (Relation: Punkt in Polygon) und durch Anwendung einer im Agenten hinterlegten Regel darauf angepasst zu reagieren. Die zum betreffenden Geoobjekt gehörende Beschreibung (Feldname) sendet der Agent der Erntemaschine an die MIS-Komponente. Zur Sicherstellung eines einheitlichen und definierten Kontaktpunktes in jeder Ressource (hier: Erntemaschine und Büro) fungiert der Agent als Proxy für weitere enthaltene Komponenten. Die MIS-Komponente, hier als Ausschnitt das Fakturierungssystem, registriert den Feldnamen, ermittelt daraus den Bewirtschafter (= Rechnungsempfänger) und legt einen Rechnungsdatensatz an, der im Laufe des Arbeitsfortschritts mit weiteren Prozessdaten angereichert wird.

Nachdem der neue Raumkontext bekannt ist, muss der Agent sein eigenes Verhalten verfahrens- und kundengerecht präzisieren. Von der Komponente Prozesskonfigurator erhält er die dafür erforderlichen Informationen, hier dass das Verfahren *Mais häckseln* realisiert werden soll und dazu der Kraftstoffverbrauch zu erfassen ist, sobald die Maschine arbeitet (d.h. sich in der *Prozesszeit* (Hauptantrieb = EIN) befindet). Der Agent sendet nun die Verfahrensbezeichnung an die MIS-Komponente, womit für die Rechnungserstellung auch der zu fakturierende Leistungsgegenstand bekannt ist. Wird auf der Erntemaschine (Feldhäcksler) die Häckseltrommel eingeschaltet, befindet sich die Maschine definitionsgemäß in der *Prozesszeit*. Dieses Ereignis löst die Aufzeichnung des Kraftstoffverbrauchs aus. Die verbrauchte Kraftstoffmenge meldet der Agent wiederum an die MIS-Komponente, die auf dieser Grundlage eine separate Ausweisung der Kraftstoffkosten in der Rechnung für den betrachteten Prozess durchführen kann.

Dieses Prozesssegment zeigt, wie ohne eine formale Auftragsplanung durch Anwendung des kontextbasierten Ansatzes eine weitgehend automatisierte Informationsverarbeitung und -übermittlung realisiert werden kann. Der im weiteren Fortgang dargestellte Anwendungsfall zeigt als Nebenresultat die vollständig automatisierte Erstellung von Rechnungen.

Aufbauend auf dem dargestellten Beispiel lässt sich die Verarbeitung von Ereignissen in der Systemarchitektur verallgemeinern.

3.3.2.2 Verallgemeinerung des Funktionsprinzips

Die Kommunikation erfolgt im betrachteten Prozess durch Nachrichten, die von zuvor definierten und eingetretenen Ereignissen ausgelöst werden. Das System kann darauf in unterschiedlichen Weisen reagieren. Dieses Reaktionsverhalten

lässt sich in zwei Beziehungen beschreiben:

Zeitliche Beziehung:

Die Kommunikation ist synchron oder asynchron ausgeprägt. Synchrone Kommunikation liegt vor, wenn Sender und Empfänger miteinander verbunden sind und der Empfänger – falls modelliert – in einem definierten Zeitraum auf eine Anfrage des Senders mit einer Antwort reagiert. Der Sender verharrt so lange im Wartezustand, bis er eine Antwort vom Empfänger erhalten hat. Die Antwort liegt innerhalb eines definierten Zeitintervalls vor. Im Falle der asynchronen Kommunikation kann der Sender weder davon ausgehen, dass der Empfänger erreichbar ist, noch ist das Antwortverhalten sichergestellt. Im Ergebnis ist das Vorliegen einer Antwort innerhalb eines definierbaren Zeitraums nicht sichergestellt. Aus diesen Bedingungen lassen sich Übergangsformen ableiten (Abb. 3.22).

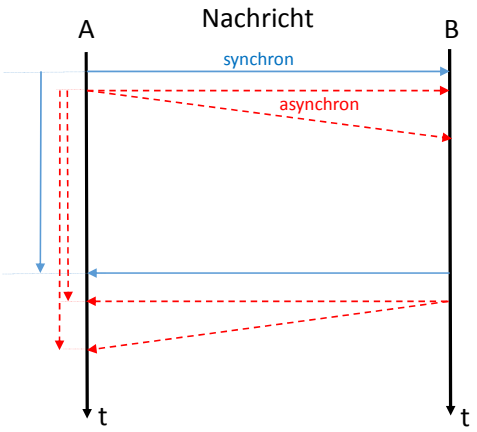


Abb. 3.22: Zeitliche Beziehungen in der Kommunikation

Logische Beziehung:

Weiterhin ist die logische Beziehung (Reihenfolge) zwischen ausgetauschten Nachrichten für die Steuerung von Prozessen relevant. Das Spektrum reicht von strikter Einhaltung der Reihenfolge bis Einweg-Kommunikation, bei der auf eine gesendete Nachricht keine explizite Antwort erwartet/geliefert wird. Zum Austausch von Nachrichten stellt das Gesamtsystem drei Kanäle zur Verfügung:

- Prozess-Nachrichtenkanal (1a) zur Vernetzung der im Prozess beteiligten Ressourcen, stationären Einrichtungen und Menschen

- CAN-BUS (1b) zur Anbindung der Agenten als Bestandteil der Systemarchitektur an Sensoren und Aktoren der Maschine
- System-BUS (1c) zur Vernetzung des Agenten mit seinen unterstützenden Komponenten innerhalb der System-Architektur

Der Agent wartet auf den genannten Kanälen auf für ihn relevante Nachrichten, die entsprechend den im Agenten (2) hinterlegten Regeln verarbeitet werden. Dazu greift der Agent auf die in seinem lokalen Umfeld angesiedelten Komponenten (3) zurück. Als Ergebnis dieses Vorganges können die zwei folgenden Kommunikationsereignisse resultieren:

- Senden einer Nachricht an den Agenten eines anderen Prozessteilnehmers über den Prozess-Nachrichtenkanal (4)
- Senden einer Nachricht an einen Sensor oder Aktor des lokalen Systems über den CAN-Bus (5)

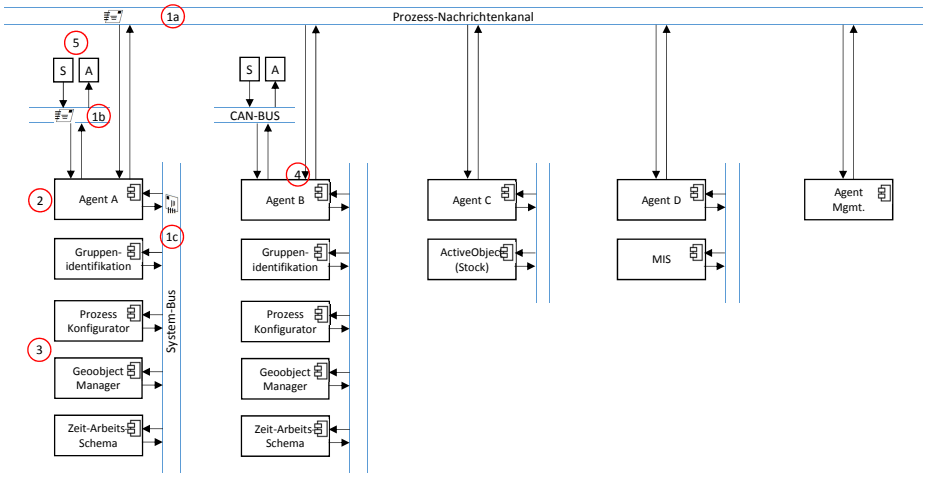


Abb. 3.23: Informationsfluss im Gesamtsystem

3.4 Gesamtmodell

Zur Bildung des fachlichen Gesamtmodells werden die Teilprozesse *Ernte*, *Transport* und *Einlagerung* unter Verwendung der BPMN-Notation zum Gesamtprozess *Ernte von Silomais* modelliert (Abb. 3.24 und 3.25).

Das Modell zeigt für SFH, TF1, TF2 und VF die Folge der auszuführenden Aktivitäten und die dazugehörigen auslösenden Ereignisse. Ereignisse und Aktivitäten werden für eine klare Darstellung des Modells präzisiert. Physische und informationstechnische Aktivitäten werden durch Ereignisse unterschiedlicher Art ausgelöst (Abb. 3.26). Abb. 3.24 zeigt die physischen Prozesse mit der minimal möglichen Ressourcenausstattung. Das Modell beschreibt sowohl das Verhalten der beteiligten Ressourcen als auch die nachrichtenbasierte Interaktion.

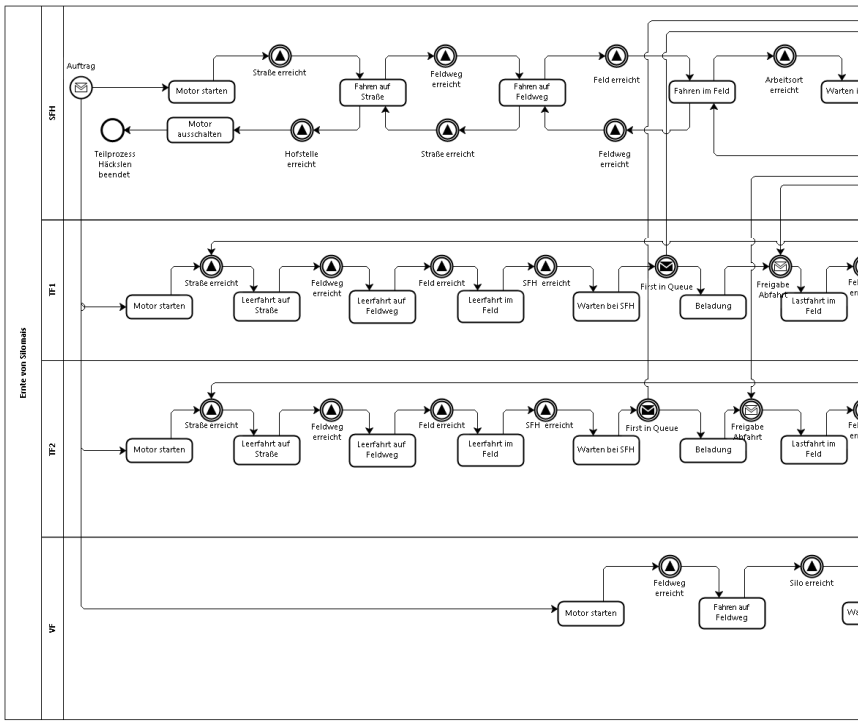


Abb. 3.24: Modellierter Prozess Ernte von Silomais (links)

3.4.1 Konzept kommunizierender Speicherobjekte

Im Anwendungsfall wird auf einem Feld Silomais mit einem SFH geerntet, das Erntegut mit TF vom Feld zum Silo verbracht und anschließende mit einem VF eingelagert. Zur Veranschaulichung des Massenstroms lassen sich Feld, TF, Abladeplatz und Fahrsilo als kommunizierende Speicherobjekte darstellen (Abb. 3.27). Der SFH mobilisiert (erntet) die zu erntende Menge Mais vom Speicherobjekt Feld und überlädt auf das Speicherobjekt TF, bis dessen Kapazität erschöpft ist. Das Erntegut wird zum Speicherobjekt Abladeplatz gebracht und abgeladen, wenn dessen momentane Kapazität dies zulässt. Das VF schiebt das Material vom Speicherobjekt Abladeplatz ins Speicherobjekt Silo und verdichtet es dort. Das entleerte TF kehrt unbeladen zum Feld zurück. Dieser Vorgang erfolgt so lange, bis die Speicherobjekte Feld, TF und Abladeplatz vollständig entleert sind.

Die Geschwindigkeit zur Entleerung und Füllung der Speicherobjekte (Massenstrom) ergibt sich aus

- den Merkmalen der eingesetzten Maschinen (Anzahl, Leistung)
- den Merkmalen der Infrastruktur (Entfernung, realisierbare Geschwindigkeit)
- den auftretenden Ereignissen im Arbeitsumfeld (z.B. Befahrbarkeit durch Niederschläge)
- und darauf basierendem benutzerspezifischen Verhalten der Maschinenbediener.

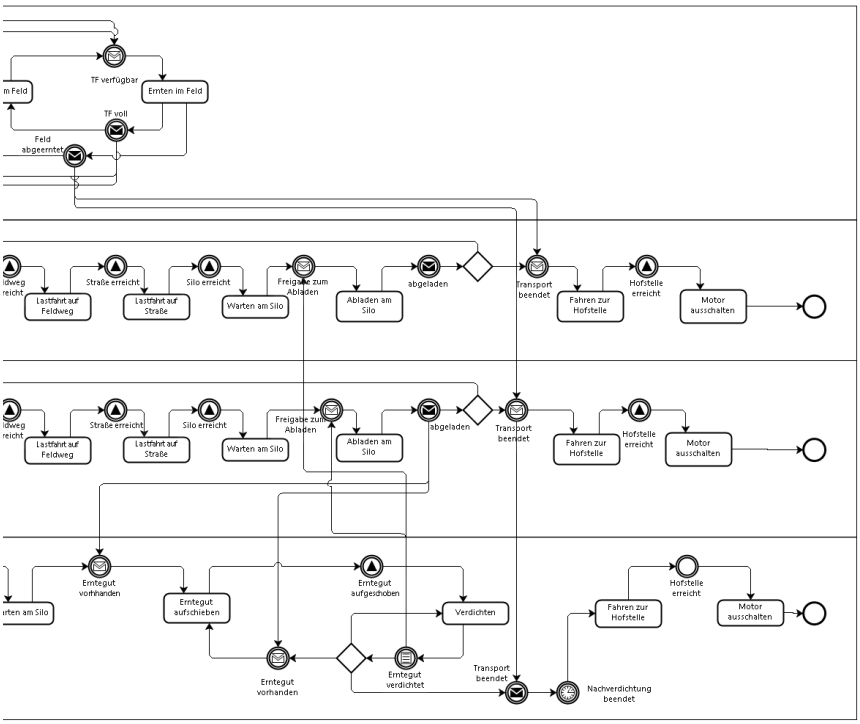


Abb. 3.25: Modellierter Prozess Ernte von Silomais (rechts)

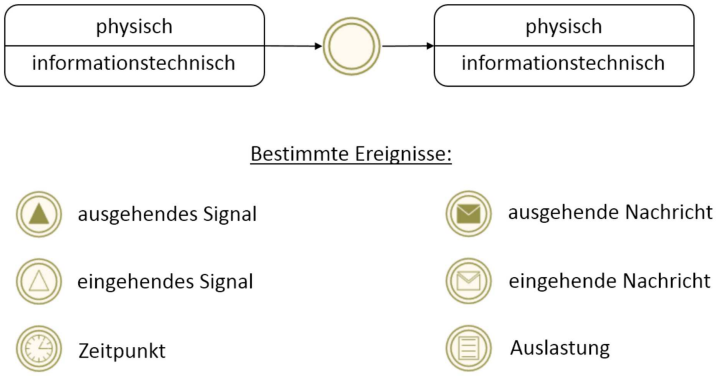


Abb. 3.26: Präzisierung von Ereignissen und Aktivitäten

3.4.2 Maschinen-Prozessparameter und daraus abgeleitete Größen

Für die Planung und Steuerung von Prozessen sind die maschinenrelevanten Parameter zu beschreiben:

- Die Parametrierung ist von den im Prozess realisierten Verfahren (Abschnitt 3.2.2), den sie ausführenden Ressourcen und den für sie definierten Zeit-Arbeitselementen abhängig (Abschnitt 3.2.4).
- Die Parameter sind entweder fix oder innerhalb definierter Grenzen variabel. Varia-

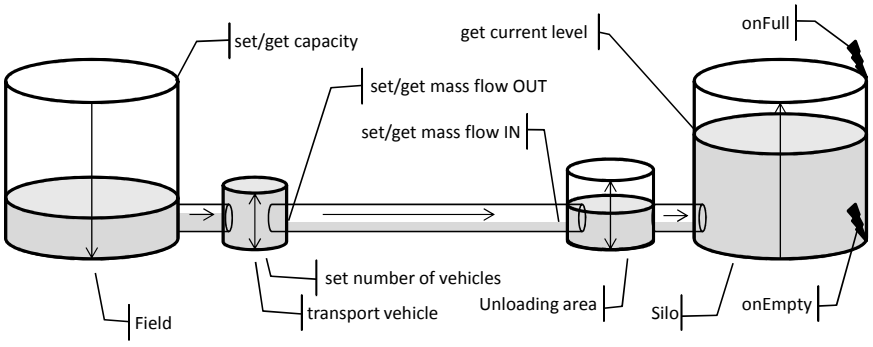


Abb. 3.27: Kommunizierende Speicherobjekte im Ernteprozess Silomais

ble Parameter ermöglichen ein angepasstes Verhalten in konkreten Situationen, z.B. Anpassung der Fahrgeschwindigkeit zur Vermeidung von Wartezeiten und Senkung von Kraftstoffverbrauch.

- Aus der Kombination von Parametern ergeben sich abgeleitete Größen und prozessspezifische Beträge.
- Parameter und abgeleitete Parameter dienen als Kennzahlen für die Beschreibung des Prozesszustandes und sind Grundlage für darauf aufbauende Optimierungen in der Simulation.

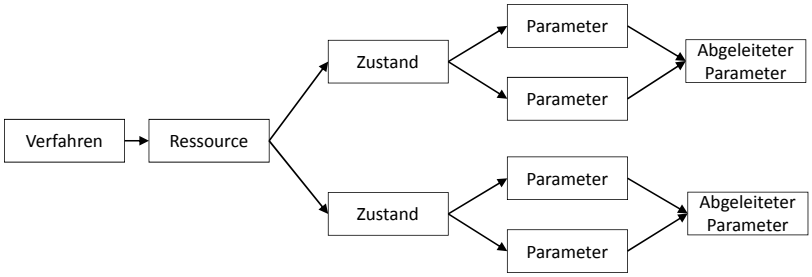


Abb. 3.28: Verfahrensspezifische Parameter und daraus abgeleitete Kennzahlen

Aus den in Abb. 3.28 dargestellten Zusammenhängen lassen sich alle Parameter und deren abgeleitete Größen bestimmen. Tab. 3.12 zeigt die in der Simulation verwendeten Parameter und abgeleiteten Größen. Angaben erfolgen für Teilprozesse und den Gesamtprozess [4].

[4]Teilprozesse und Gesamtprozess werden für nachfolgende Bezüge (Simulation) mit Kennungen (a) bis (d) versehen.

Tab. 3.12: Prozessparameter und Kennzahlen

		Einheit	(a) Ernten	(b)Transport	(c) Verdichten	(d) Gesamt
Parameter						
1	Kraftstoffverbrauch	l/h	x	x	x	
2	Fahrgeschwindigkeit	km/h	x	x	x	
3	Fahrzeugmasse	t			x	
4	Durchsatz	t/h	x			
5	Transportkapazität	t		x		
6	Verdichtungsfaktor	l/h			x	
7	Entfernung	km	x	x	x	
Abgeleitete Parameter						
8	Dauer Leerfahrt	h	x			
9	Dauer Wartezeit	h	x	x	x	
10	Dauer Prozesszeit	h	x	x	x	
11	Dauer Teilprozess	h	x	x	x	
12	Dauer Gesamtprozess	h				x
13	[Zurückgelegte Strecke Teilprozess]	km		x		
15	[Zurückgelegte Strecke Gesamtprozess]	km				x
16	Verarbeitete Menge Erntegut Teilprozess	t	x	x	x	
17	Verarbeitete Menge Erntegut Gesamtprozess	t				x
18	Verbrauchter Kraftstoff Leerfahrt	l	x			
19	Verbrauchter Kraftstoff Wartezeit	l	x	x	x	
20	Verbrauchter Kraftstoff Prozesszeit	l	x	x	x	
21	Verbrauchter Kraftstoff Teilprozess	l	x	x	x	
22	Verbrauchter Kraftstoff Gesamtprozess	l				x
23	Spezifische Leistung Teilprozess	t/h	x	x	x	
24	Spezifische Leistung Gesamtprozess	t/h				x
25	Streckenbezogener Kraftstoffverbrauch Teilprozess	l/km		x		
26	Streckenbezogener Kraftstoffverbrauch Gesamtprozess	l/km				x
27	Spezifischer Krafstoffverbrauch Teilprozess	l/t	x	x	x	
28	Spezifischer Krafstoffverbrauch Gesamtprozess	l/t				x
28	Zeitbezogener Kraftstoffverbrauch Teilprozess	l/h	x	x	x	
29	Zeitbezogener Kraftstoffverbrauch Gesamtprozess	l/h				x

3.4.3 Visualisierung der Prozessumgebung

Für die Visualisierung der Simulation wird eine symbolische Darstellung[5] entworfen (siehe Abb. 3.29).

Ortsfeste Objekte

Die Landkarte besteht aus den ortsfesten Objekten Hof, Feld, Abladeplatz und Fahrsilo. Die in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Speicherobjekte werden mit dem aktuellen Füllstand im Bereich von 0 bis 100 Prozent dargestellt. Ortsfeste Objekte sind durch Fahrwege mit parametrisierbarer Streckenlänge dargestellt. Aus der Addition der Wegstreckenlängen ergibt sich die Entfernung zwischen den ortsfesten Objekten. Für eine realitätsnahe Darstellung werden Fahrwege in Straße (schwarz), Feldweg (oran-

[5]Eine kartografische Darstellung (z.B. unter Verwendung von Google-Maps oder Open Streetmap) ist ebenso möglich.

ge) und Feld (grün) unterteilt. Sie können mit typischen Maximalgeschwindigkeiten hinterlegt werden. Zur Ermittlung von Reihenfolgebeziehungen von Fahrzeugen und die davon bestimmten Kommunikationsbeziehungen sind die Streckenabschnitte als Queues modelliert. Es gilt das FIFO-Prinzip. Das zuerst in eine Queue eintretende Fahrzeug wird im folgenden Teilprozess zuerst bedient. Überholvorgänge werden nicht betrachtet.

Bewegliche Objekte

Auf der beschriebenen Kartenbasis bewegen sich die für den Anwendungsfall modellierten Maschinen Selbstfahrender Feldhäcksler (SFH), Transportfahrzeug (TF) und Verdichtungsfahrzeug (VF). Dazu bewegen sich die Maschinen zu Beginn der Simulation an ihre Arbeitsorte und setzen einen Materialfluss in Gang.

- Der SFH fährt vom Hof zum Feld, das VF vom Hof zum Abladeplatz
- Die TF fahren über das Wegstreckennetz zum Feld und werden bei Erreichen der ersten Position der Warteschlange beladen. Dadurch verringert sich die Erntemenge im Feld. Der Füllstand im TF erhöht sich.
- Die TF transportieren das Erntegut zum Abladeort und laden bei Erreichen der erste Position der Warteschlange ab, wenn der dort ermittelte Füllstand dies zulässt (siehe hierzu Abschnitt 2.5.2 und Abb. 3.27). Der Füllstand am Abladeort erhöht sich und sinkt im TF. Anschließend kehren die TF in unbeladenem Zustand zurück in die Warteschlange am SFH.
- Sobald sich Erntegut auf dem Abladeplatz befindet, schiebt das VF dieses Material ins Silo und verdichtet es. Dadurch verringert sich der Bestand am Abladeplatz und erhöht sich im Silo.
- Der Gesamtprozess ist beendet, wenn auf dem Feld der SFH den kompletten Bestand abgeerntet hat, die TF das gesamte Material zum Abladeplatz transportiert haben und das VF das gesamte Material vorschriftsgemäß (siehe Abschnitt 2.5.3) verdichtet hat.
- Die Maschinen fahren nach Beendigung ihrer jeweiligen Aufgaben zurück zum Hof.

Die Maschinen werden initial parametriert (Tabelle 3.12 Zeilen 1 bis 6) und liefern Kennzahlen (Zeilen 8 bis 29) aufgrund der initialen Einstellungen oder im Prozess erfolgter Parameteränderungen. Das Verhalten der Maschinen wird maßgeblich durch die Zustände der Speicherobjekte bestimmt.
Zur Reduktion der Komplexität in der Simulation werden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Das Bewegungsverhalten des SFH im Feld wird nicht berücksichtigt: Der SFH nimmt eine Arbeitsposition in der Feldmitte ein. Die zurückgelegte Strecke für die TF ergibt sich aus der Entfernung Feldzugangspunkt - Feldmitte.
- Das Bewegungsverhalten des VF im Silo wird nicht berücksichtigt: Das Bewegungsverhalten hinsichtlich Position und Anzahl Überrollungen wird durch auf Trockenmasse bezogene Einlagerungsleistung (siehe auch Tab. 4.6) abstrahiert.
- Es kommt nur 1 SFH zum Einsatz: Der Materialfluss im Szenario wird durch die Maximalleistung des SFH begrenzt.

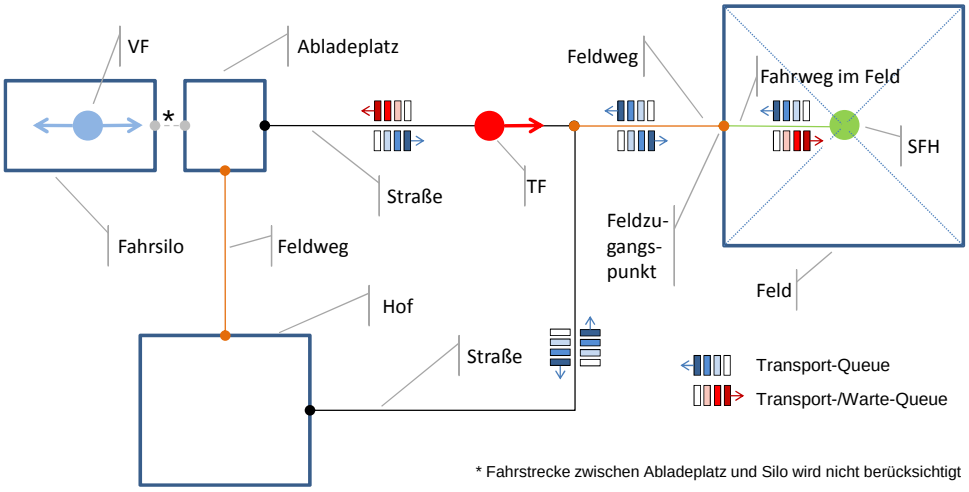


Abb. 3.29: Visualisierung der Prozessumgebung

3.4.4 Nachrichten für die Analyse, Steuerung und Dokumentation des Prozesses

Wie in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben, stehen Ereignisse im Zentrum der Betrachtung informationstechnischer Prozesse. Ereignisse werden durch die Bewegung der Maschinen auf der Kartenbasis oder Zustandsänderungen ausgelöst. Auf Basis ausgelöster Ereignisse werden Nachrichten versendet und informationstechnische Prozesse gestartet oder beendet.
Mit allen im Prozess auftretenden Ereignissen sind die folgenden Aktivitäten verbunden:

- Zeit-Arbeitselement ermitteln
- Zeitpunkt und Dauer für Element ermitteln
- Fahrgeschwindigkeit setzen
- Kraftstoffverbrauch erfassen
- Verfahren ermitteln
- Gruppenzugehörigkeit ermitteln

Tab. 3.13 und Abb. 3.30 stellen die mit bestimmten Orten verbundenen, spezifischen Ereignisse und mögliche Reaktionen darauf dar.

3.4.5 Implementierung des Anwendungsfalles in die Simulationsumgebung

Der beschriebene Anwendungsfall wird mit der Mehrmethoden-Simulationssoftware Anylogic Professional (Anylogic 2012) in der Version 6.9 implementiert. AnyLogic ist eine Java-basierte Modellierungs- und Simulationsumgebung basierend auf der Eclipse Rich Client Platform (RCP) (Eclipse 2014) für die Methoden *System Dynamics (SD)*, *Discrete Event Simulation (DES)* und *Agent-based Simulation (AB)*. Die drei Methoden

Tab. 3.13: Ereignisse und mögliche Reaktionen

Ort (entspr. Abb. 3.30)	Ereignis/Zustand	Mögliche Reaktion
Hof (1)	start Motor stop Motor	
Übergang Hof-Straße (2)	exit Hof-enter Straße exit Straße-enter Hof	
Übergang Straße-Feldweg (3)	exit Straße-enter Feldweg exit Feldweg-enter Straße	 Ankunftszeit ermitteln Fahrgeschwindigkeit anpassen Transportmasse erfassen
Übergang Feldweg-Feld (4)	exit Feldweg-enter Fahrweg i.F. exit Fahrweg i.F.-enter Feldweg	 Feld/Bewirtschafter identifizieren Ankunftzeit ermitteln Fahrgeschwindigkeit anpassen Transportmasse erfassen
Arbeitsort SFH (5)	exit Fahrweg i.F-enter Feld Queue TF voll exit Feld Queue-enter Feldfahrt	 Wartezeit erfassen Durchsatz setzen/anpassen Erntemasse erfassen Ernte/Beladung starten/stoppen
Übergang Hof-Feldweg (6)	exit Hof-enter Feldweg exit Feldweg-enter Hof	
Übergang Feldweg-Abladeplatz (7)	exit Feldweg-enter Abladeplatz exit Abladeplatz-enter Feldweg	
Übergang Straße-Abladeplatz (8)	exit Straße-enter Abladeplatz Queue TF leer exit Abladeplatz Queue-enter Straße Abgeladene Masse Erntegut erfassen	 Wartezeit erfassen
Verdichtungsfahrzeug (9)	stop Warten-start Verdichten stop Verdichten-start Warten	
Feld (10)	(Feld voll) Feld leer	 Beendigung des Transportprozesses
Abladeplatz (11)	Schwellwert Abladen unterschritten Schwellwert Abladen überschritten	 TF abladen TF warten
Silo (12)	(Silo leer) Silo voll	 Beendigung des Verdichtungsprozesses

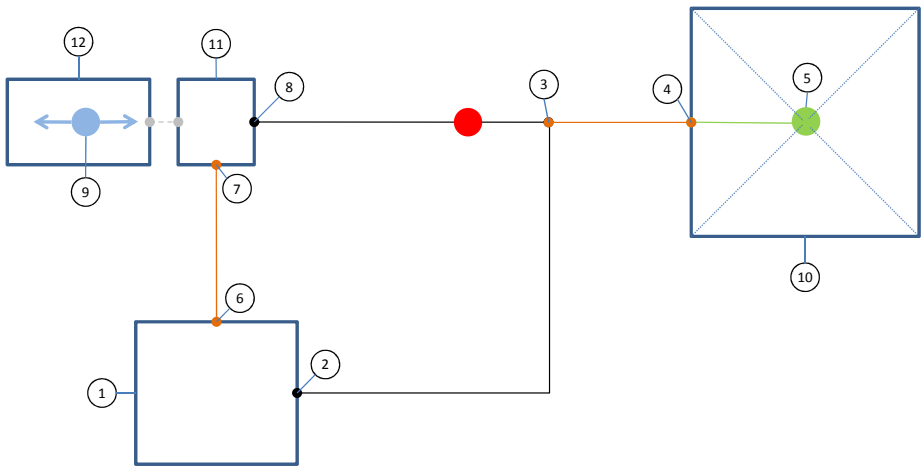


Abb. 3.30: Raumbezogene Zuordnung von prozessrelevanten Ereignissen

lassen sich in hybriden Modellen kombinieren. Im vorliegenden Anwendungsfall wird die agenten-basierte Methode angewendet.

Abb. 3.31 zeigt den Bewegungsraum der Agenten.

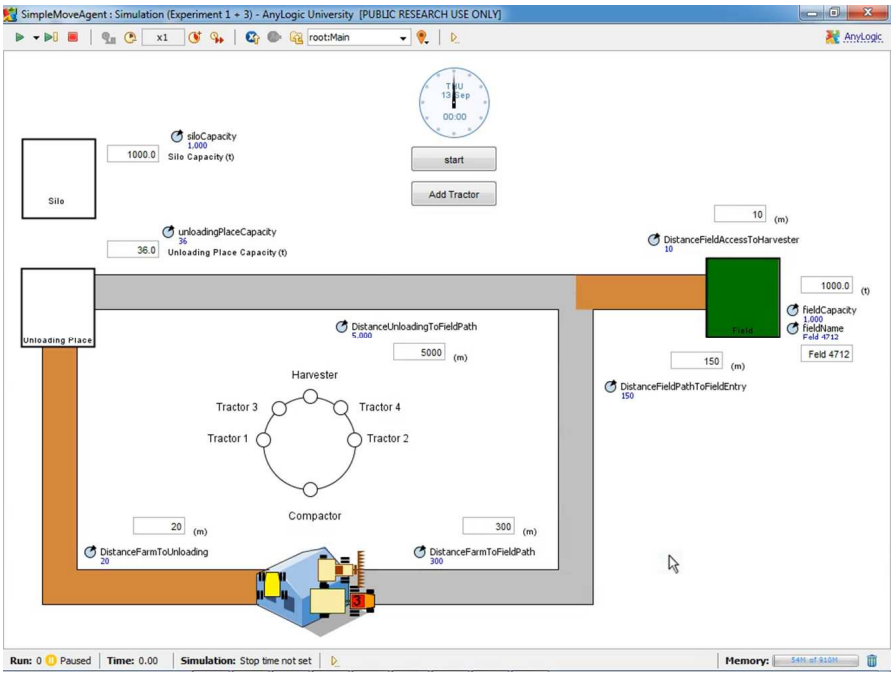


Abb. 3.31: Visualisierung des Anwendungsfalles in der Simulationsumgebung

Die Teilprozesse Ernten, Transportieren und Verdichten werden unter Verwendung von Zustandsdiagrammen modelliert. Wesentliche Elemente sind darin die Zustände und Aktivitäten (z.B. Fahren, Warten) sowie die Transitionen (z.B. Feld erreicht). Zustände und Transitionen lassen sich mit Programmcode hinterlegen. Bei den Zuständen sind dies Entry- und Exit-Actions, bei den Transitionen werden auf programmatische Weise (Java) die Ereignisse hinterlegt, die zum Übergang von einem Zustand in den nächsten führen. Die Zustandsdiagramme tauschen Nachrichten miteinander aus und realisieren auf diese Weise die Agentenkommunikation. Als Beispiel ist das Zustandsdiagramm für den Teilprozess Ernten in Abb. 3.32 einschließlich Code-Ausschnitten für Zustand und Transition dargestellt. Die weiteren Zustandsdiagramme sind im Anhang in den Abb. 6.1 und 6.2 aufgeführt.

Im Simulator nicht verfügbare Agenten-Funktionen wie maschinenspezifische Individualisierung, Optimierung, Protokollierung von Verhalten und Ereignissen sowie die Interaktion der Speicherobjakte wurden in Form eigenständiger Java-Klassen nachimplementiert.

Die Prozessumgebung enthält weiterhin Eingabefelder für den Konfigurator und Bedienelemente zum Starten und Stoppen der Simulation. Simulationsergebnisse werden für nachfolgende Auswertungen in CSV-Dateien geschrieben. Die Simulationsergebnisse lassen sich grafisch darstellen.

Mit Hilfe der Simulation des modellierten Anwendungsfalles und darauf aufbauender Parametervariation wird dargestellt, welche Auswirkungen sich hinsichtlich Zeit und Kosten durch variierende Konfigurationen und Verhaltensweisen im Prozessergebnis ergeben. Die Leistungslücke wird damit konkretisiert.

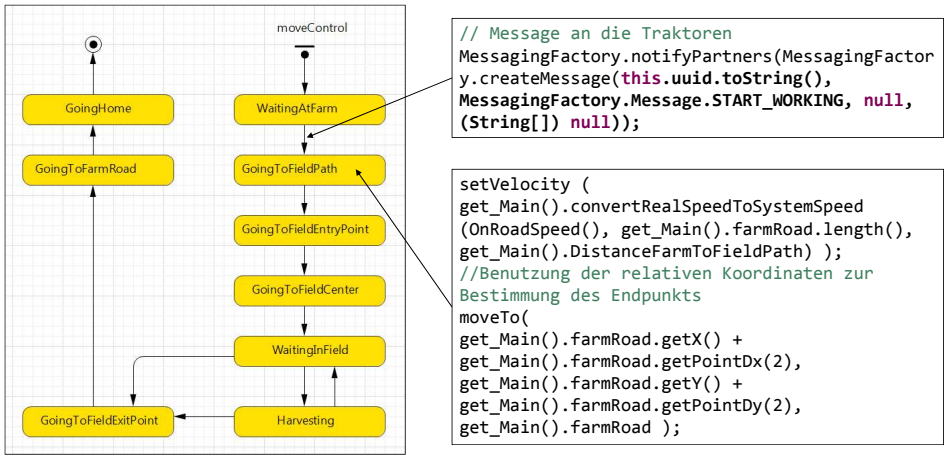


Abb. 3.32: Zustandsdiagramm für Teilprozess Ernten

3.5 Mathematisches Modell zur Erzeugung von Kennfeldern

Der im Anwendungsfall beschriebene Prozess lässt sich nicht nur simulativ sondern auch mathematisch untersuchen und beschreiben. Beide Verfahren ergänzen sich.

3.5.1 Teilprozess Häckseln

Die effektive Ernteleistung (Massenstrom) $\dot{m}_{eff}$ ergibt sich aus

$$\dot{m}_{eff} = (1 - \mu_t) \cdot \mu_H \cdot \dot{m}_{nenn} \tag{3.1}$$

für unterschiedliche relative Wartezeiten $\mu_t = \{0{,}0; 0{,}15; 0{,}5\}$

$$\mu_t = 1 - \frac{\dot{m}_{eff}}{\mu_H \cdot \dot{m}_{nenn}} \tag{3.2}$$

und unterschiedliche relative Ernteleistungen $\mu_H = \{0{,}5; 0{,}85; 1{,}0\}$

$$\mu_H = \frac{\dot{m}_{eff}}{(1 - \mu_t) \cdot \dot{m}_{nenn}} \tag{3.3}$$

Die Stückkosten für den Häckselprozess (3.4) ergeben sich aus der Summe der Stückkosten aus den Subprozessen[6].

$$CPU_H = \sum_{(Formel 6.1)}^{(Formel 6.4)} \tag{3.4}$$

[6]Berechnung der Einzelpositionen siehe Formeln 6.1 bis 6.4 im Anhang auf S. 152

Das Kennfeld für den Häckselprozess ist im Abschnitt 4.3.1 in Abb. 4.4 unter Anwendung der in Tab. 4.6 aufgeführten Parameter dargestellt.

3.5.2 Teilprozess Transport

Zur Ermittlung der Transportleistung ist zunächst die Umlauffrequenz (f_{RT}) zu ermitteln.

$$f_{RT} = \frac{1}{t_{RT}} \tag{3.5}$$

Hierfür ist die Berechnung der Transportdauer (3.6) erforderlich.

$$t_{RT} = \frac{m_{Load}}{\dot{m}_{Loading}} + \frac{2 \cdot \Delta s}{v} + \frac{m_{Load}}{\dot{m}_{Unloading}} \tag{3.6}$$

3.6 eingesetzt in 3.5 ergibt die Umlauffrequenz in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (3.7).

$$f_{RT(v)} = \frac{1}{\frac{m_{Load}}{\dot{m}_{Loading}} + \frac{2 \cdot \Delta s}{v} + \frac{m_{Load}}{\dot{m}_{Unloading}}} \tag{3.7}$$

Formel 3.8 liefert die Berechnung des Massenstromes $\dot{m}_{eff}$ unter Berücksichtigung der relativen Wartezeit (μ_t) der Zuladung (m_{Load}) und der Umlauffrequenz (f_{RT}).

$$\dot{m}_{eff} = (1 - \mu_t) \cdot m_{Load} \cdot f_{RT} \tag{3.8}$$

3.7 eingesetzt in 3.8 ergibt schließlich den geschwindigkeitsabhängigen Massenstrom für den Transportprozess.

$$\dot{m}_{eff}(\mu_t, v) = \frac{1 - \mu_t}{\frac{1}{\dot{m}_{Loading}} + \frac{2 \cdot \Delta s}{v \cdot m_{Load}} + \frac{1}{\dot{m}_{Unloading}}} \tag{3.9}$$

3.9 umgeformt nach v liefert nach 3.10 die Transportgeschwindigkeit für einen gegebenen Massenstrom m_{eff} und gegebene relative Wartezeit μ_t.

$$v(\dot{m}_{eff}, \mu_t) = \frac{2 \cdot \Delta s}{m_{Load} \cdot \left(\frac{(1 - \mu_t)}{\dot{m}_{eff}} - \frac{1}{\dot{m}_{Loading}} - \frac{1}{\dot{m}_{Unloading}} \right)} \tag{3.10}$$

Die Stückkosten für den Teilprozess Transport (Formel 3.11) ergeben sich aus der Summe der Stückkosten aus den Subprozessen[7].

[7] Berechnung der Einzelpositionen siehe Formeln 6.5 bis 6.11 im Anhang auf S. 152

$$CPU_T = \sum_{(Formel 6.5)}^{(Formel 6.11)} CPU_T(Teilprozesse) \tag{3.11}$$

Das Kennfeld für den Transportprozess ist im Abschnitt 4.3.2 in Abb. 4.5 unter Anwendung der in Tab. 4.6 aufgeführten Parameter dargestellt.

3.5.3 Teilprozess Verdichten

Die effektive Verdichtungsleistung (Massenstrom) $\dot{m}_{eff}$ ergibt sich aus

$$\dot{m}_{eff} = \frac{(1 - \mu_t) \cdot \eta_v \cdot \mu_m \cdot m_{max}}{DMC} \tag{3.12}$$

Durch Umformung lassen sich die relative Wartezeit

$$\mu_t = 1 - \frac{\dot{m}_{eff} \cdot DMC}{\eta_v \cdot \mu_m \cdot m_{max}} \tag{3.13}$$

sowie die relative Verdichtermasse ermitteln.

$$\mu_m = \frac{\dot{m}_{eff} \cdot DMC}{(1 - \mu_t) \cdot \eta_v \cdot m_{max}} \tag{3.14}$$

Die Stückkosten für den Teilprozess Verdichten (Formel 3.15) ergeben sich aus der Summe der Stückkosten aus den Subprozessen[8].

$$CPU_C = \sum_{(Formel 6.12)}^{(Formel 6.15)} CPU_C(Teilprozesse) \tag{3.15}$$

Das Kennfeld für den Verdichtungsprozess ist im Abschnitt 4.3.3 in Abb. 4.6 unter Anwendung der in Tab. 4.6 aufgeführten Parameter dargestellt.

3.5.4 Gesamtprozess

Die Summe der Stückkosten für den Gesamtprozess ergibt sich aus der Addition der Einzelfunktionen für die minimalen Stückkosten der Teilprozesse Häckseln (Formeln 6.1 bis 6.4), Transport (6.5 bis 6.11) und Verdichten (6.12 bis 6.15).

$$c_{unitP} = c_{unitH} + c_{unitT} + c_{unitC} \tag{3.16}$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der effektive Gesamtmassenstrom durch den Teilprozess mit dem geringsten Massenstrom determiniert ist (Formel 3.17).

[8]Berechnung der Einzelpositionen siehe Formeln 6.12 bis 6.15 im Anhang auf S. 152

$$\dot{m}_{eff} = min\left(\dot{m}_{H,eff}, \dot{m}_{T,eff}, \dot{m}_{C,eff}\right) \tag{3.17}$$

Das Kennfeld für den Gesamtprozess ist im Abschnitt 4.3.4 in Abb. 4.7 unter Anwendung der in Tab. 4.6 aufgeführten Parameter dargestellt.

3.6 Technische Grundlagen zur Ermittlung realistischer Parameterwerte und Parameterfunktionen für Simulation und Kennfelder

Für die Durchführung der Simulation und Entwicklung der Kennfelder sind Kennlinien zur Leistungscharakteristik der verwendeten Maschinen erforderlich. Hierzu werden Maschinen mit Datenerfassungsgeräten ausgestattet. Im laufenden Betrieb werden der Kraftstoffverbrauch und die jeweils relevanten Leistungsparameter erfasst:

- SFH: Durchsatz
- TF: Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand
- VF: Arbeitszustand

Hierfür wird das Telematik-Modul ESX TC3 des Herstellers STW (Wiedemann 2014) mit folgenden Merkmale eingesetzt:

- ARM Cortex A9, 800 MHz, 4 Kerne
- Flash Speicher 8 GB
- 4G-Kommunikation (LTE)
- Sub-Gigahertz-Schnittstelle für drahtlose Kommunikation mittlerer Reichweite nach DIN EN 13757-4
- 2 zusätzliche CAN-Schnittstellen
- 8 zusätzliche IOs (digital und analog) entsprechend ISO 11786.

Vor der Einbindung des Telematik-Moduls in die Maschinenumgebung sind zunächst die relevanten Parameter und anschließend die zugehörigen Ereignisse in Form von Regeln zu definieren. Eine Mapping-Applikation (siehe Abb. 3.33) bildet interne CAN-Botschaften und darin enthaltene Signale auf verständliche Begriffe wie z.B. Fahrgeschwindigkeit oder GPS-Position ab. Die Ergebnisliste wird in eine ausführbare Anwendung eingebunden.

Für jede Maschine bzw. ausführbare Datei wird im nächsten Schritt ein korrespondierendes Regelwerk für die Sensordatenerfassung erstellt. Mögliche Regeln sind: *Erfasse und übermittele eine GPS-Position, wenn die Richtungsabweichung den Betrag von* 5° *übersteigt* oder *... wenn die Fahrgeschwindigkeit größer als* 0 km/h *und der Durchsatz größer als* 0 t/h *ist.* Abb. 3.34 zeigt einen Codeausschnitt aus dem Regelwerk.

Die ausführbare Datei und das Regelwerk werden im CAN-Gateway des Telematik-Moduls abgelegt. Im laufenden Betrieb werden für auftretende Ereignisse JSON-Dokumente erzeugt und an den Server übertragen. Eine Rekonfiguration ist im laufenden Betrieb der Maschinen möglich. Mit der hier beschriebenen Vorgehens-

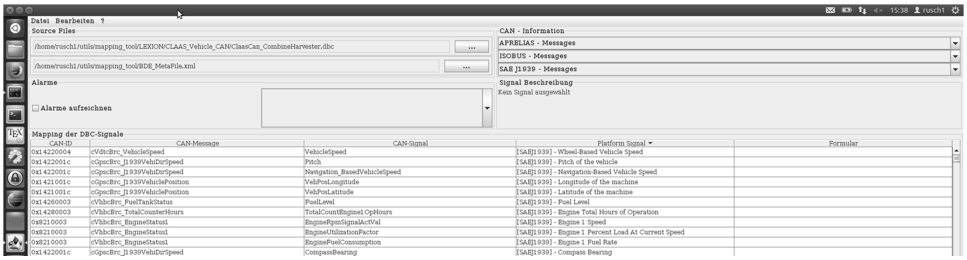


Abb. 3.33: Benutzeroberfläche der Mapping-Anwendung (Ausschnitt)

```
{"aprelias-data-recorder-config": {
    "session": 1,
    "interval" : 300,
    "items": [
        {
            "name":"sae.j1939.spn.584",
            "DataLogMethod":"time_interval",
            "DataLogMethodValue":"1000"
        },
        {
            "name":"sae.j1939.spn.585",
            "DataLogMethod":"time_interval",
            "DataLogMethodValue":"1000"
        },
        {
            "name":"sae.j1939.spn.2927.f",
            "DataLogMethod":"on_change",
            "DataLogMethodValue":"1"
        },
```

Abb. 3.34: Regeln für die Erfassung von CAN-Bus-Parametern

weise ist sicher gestellt, dass kein internes Herstellerwissen publiziert wird und dass nur solche Daten erfasst werden, die auch tatsächlich für diesen Untersuchungsgegenstand benötigt werden und ausschließlich Zustandsänderungen übertragen (Vermeidung von Redundanz). Dadurch wird das Volumen der zu übertragenden Daten minimiert.

Auf Basis eines modifizierten Embedded-Linux-Kernels wurde eine service-orientierte Geräte-Architektur entwickelt, die das kontext-sensitive Verhalten auf Basis der Sensordatenverarbeitung realisiert. Die Architektur ist in Abb. 3.35 dargestellt. Nachfolgend wird der informationstechnische Prozess dargestellt:

- Die Daten werden entsprechend kontextabhängiger Definitionen von einem der vier angebundenen CAN-Busse erfasst.
- Die anzuwendenden Definitionen sind im CAN-Gateway hinterlegt. Das CAN-Gateway kontrolliert den Datenverkehr zwischen CAN-Bus und der restlichen Architektur, um sicherheitskritische Zustände auf der Maschine auszuschließen und einen störungsfreien Betrieb in der Maschine zu gewährleisten.
- Die Daten werden an die Messaging Engine ZeroMQ-Komponente iMatix Corporation (2014) weiter gegeben, womit sie für darüber gelagerte Schichten verfügbar sind. ZeroMQ ist ein Messaging-Framework, das mit Hilfe bereit gestellter Sockets eine schnelle asynchrone Intra- und Inter-Prozesskommunikation ermöglicht.

- Im Common Service Layer stellen generische Komponenten Dienste für fachliche Anwendungen bereit. Die Kommunikation der fachlichen Anwendungen erfolgt über die ZeroMQ-Schicht. So listet beispielsweise der Blackboard-Agent ein- und ausgehende Nachrichten von fachlichen Anwendungen zur Weiterverwendungen in anderen Anwendungen. Common Services ermöglichen aufgrund ihrer generischen Eigenschaften einen hohen Grad der Wiederverwendung.
- Im Vordergrund der durchgeführten Prozess-Datenerfassung steht der BDE-Dienst, mit dem definierte Daten in definierten Kontexten erfasst und übertragen werden. Alle Anwendungen sind mit einer Signatur versehen, um die Herkunft aus vertrauenswürdiger Quelle sicher zu stellen.
- Die erfassten Daten werden vom BDE-Dienst via ZeroMQ und WWAN-Schnittstelle (LTE) an einen Server gesendet.
- Die auf dem Server befindlichen Daten werden auf den lokalen Arbeitsplatz übermittelt und wie nachfolgend beschrieben ausgewertet.

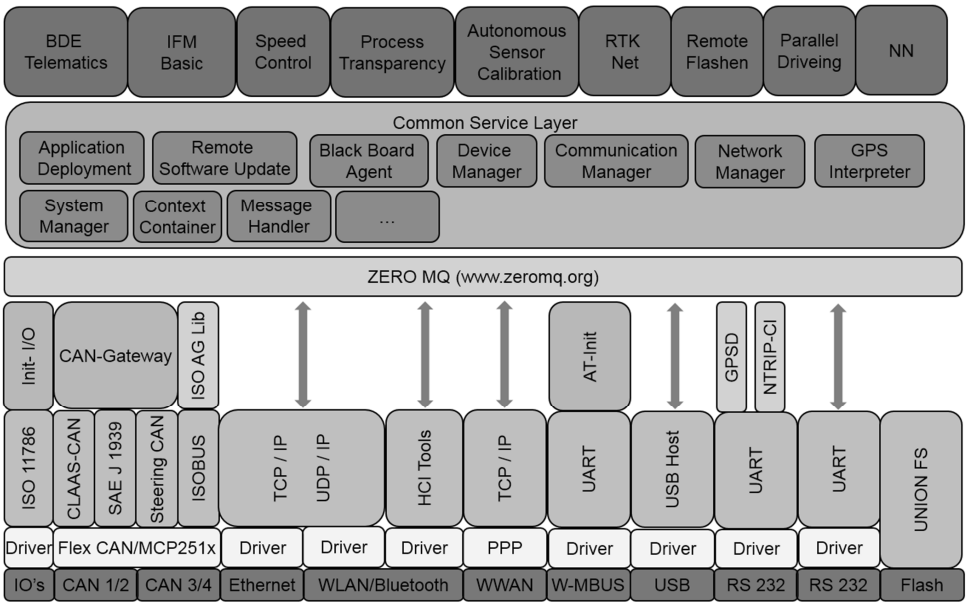


Abb. 3.35: Architektur des eingesetzten Telematikmoduls

Ein auf dem Modul implementiertes service-orientiertes Framework[9] schafft durch Einbindung der ZeroMQ-Bibliothek als *message-oriented middleware* eine Ablaufumgebung zur Unterstützung vielfältiger fachlicher Anwendungen im mobilen Arbeitsumfeld. Applikationen können im laufenden Betrieb verteilt und installiert werden. Für eine frei – auch aus der Ferne – konfigurierbare Erfassung von Maschinenprozessdaten

[9]Das Framework wurde im Projekt M2M-Teledesk (siehe Abschnitt 2.4.6) entwickelt

wurde die Anwendung BDE entwickelt. Damit ist es möglich, Prozessdaten aller am Anwendungsfall beteiligten Maschinen zu erfassen. Hierzu werden fahrzeugspezifische Merkmale aus der jeweiligen DBC-Datei[10] mit Metadatenbeschreibungen abgebildet und als ausführbare Datei an die betreffende Maschine gesendet. Diese Datei implementiert die Logik des Maschinen-CAN-Gateways. Sie beschreibt lieferbare Parameter sowie Grenzwerte und spezifiziert die Umrechnung in von Dritten nutzbare Signale. Zur Vorbereitung der Datenerfassung kann die aktuelle Erfassungskonfiguration abgerufen und bedarfsgerecht angepasst werden. Die im Laufe des Betriebes der gültigen Konfiguration entsprechenden Daten wurden in einem passend dazu entwickelten Backend in Form verschlüsselter CSV-Dateien abgelegt. Nach Entschlüsselung der Daten erfolgt die Ermittlung maschinen- und prozessspezifischer Kennzahlen, wie in den nachfolgenden Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 dargestellt. Der beschriebene Ablauf ist zusammengefasst in Abb. 3.36 dargestellt.

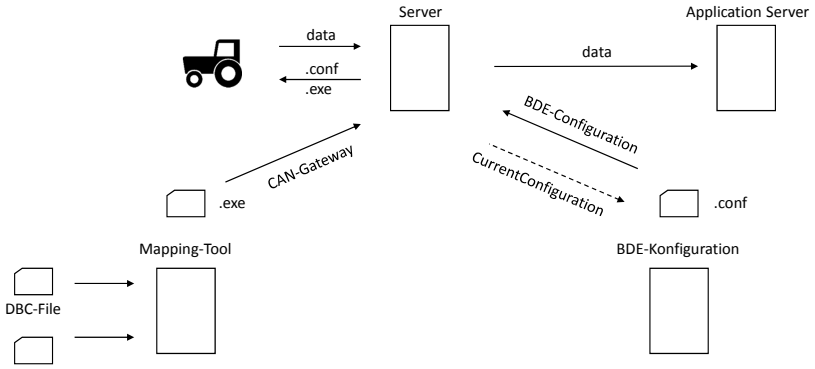


Abb. 3.36: Maschinenspezifische Konfiguration für BDE

[10]DBC: Datenbankformat für die Beschreibung der Kommunikation eines verteilten Steuergerätenetzwerkes basierend auf CAN.

4 Ergebnisse

4.1 Empirische Erhebung zur Absicherung prozessrelevanter Kennzahlen

In Abschnitt 3.6 werden auf experimentellem Wege Parameterwerte und Parameterfunktionen für den logistischen Prozess ermittelt. Zu deren Absicherung wurde mit Unterstützung der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG) im September 2016 eine anonyme, internetbasierte Umfrage mit 42 Fragen durchgeführt. Es wurden 6.140 Unternehmen aus dem Adressbestand der DLG mit folgenden Selektionskriterien angeschrieben:

- Agrargenossenschaften bundesweit
- Landwirtschaftliche Lohnunternehmen bundesweit
- Landwirtschaftliche Betriebe mit Biogas
- Landwirtschaftliche Betriebe mit Rinderhaltung und Grünlandwirtschaft in den ostdeutschen Bundesländern

Es wurden 152 Beantwortungen registriert, was einer Rücklaufquote von 2,5 % entspricht. Zur Reduzierung der Abbruchquote während der Beantwortung wurden sämtliche Antworten als optional vorgegeben, d. h. die Nichtbeantwortung einer Frage führt nicht zu einer Sperrung nachfolgender Fragen. Als Konsequenz daraus ergibt sich eine schwankende Anzahl von Nennungen.

Bei Ergebnisdarstellungen mittels Whisker-Boxplot wurde der Whisker mit einem Interquartilabstand (IQR) von 1,5 parametriert. Auf eine Darstellung von Ausreißern wurde verzichtet. In Ergänzung zur üblichen Darstellungsweise wurde das arithmetische Mittel hinzu genommen.

Erste Erkenntnisse aus der Umfrage sind in Steckel et al. (2016) veröffentlicht. Die Umfrageergebnisse stützen die eingangs (Kapitel 1, S. 1) beschriebene Beobachtung, dass sich die in der Praxis realisierte Leistung auf einem Niveau von 40 bis 50 % der installierten Leistung bewegt (Abb. 4.1). Unter der Annahme, dass eine typische realisierte Leistung als Mittelwert aus den Medianen eines „schlechten“ und eines „guten“ Prozesses und die installierte Leistung auf dem Niveau des *upper whisker* eines „sehr guten“ Prozesses verstanden wird, ergibt sich für die realisierte Leistung ein Niveau von 46 % [sic!].
Fragen und Antworten sind in Kapitel 6 (Anhang) aufgeführt. In den folgenden Abschnitten wird, wenn erforderlich, auf die Ergebnisse referenziert.

Die entwickelte Architektur ermöglicht die systematische Darstellung von Prozesskontexten basierend auf zeitlichen, räumlichen und systemtechnischen Zuständen der

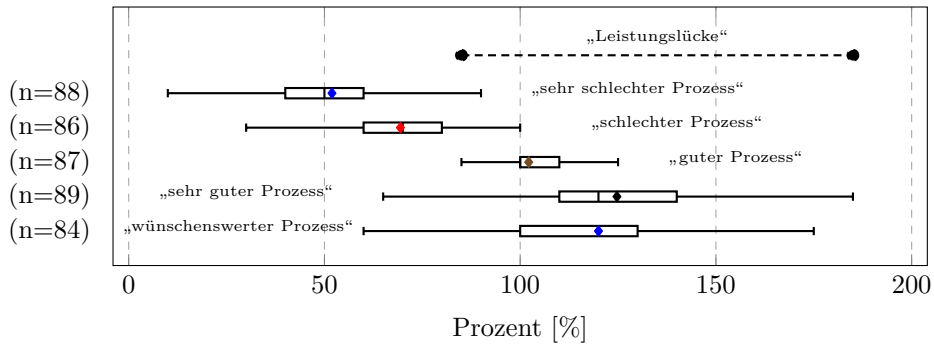


Abb. 4.1: Einschätzung der Befragten zu unterschiedlichen Leistungsniveaus von Prozessen und Ermittlung der relativen Leistungslücke

beteiligten mobilen (SFH, TF, VF) und stationären (Feld, Silo, Abladeplatz) Objekte. Durch die Nutzung von Kontexten, technisch-betriebswirtschaftlichen Maschinenmerkmalen und Berücksichtigung definierter Ziele (QKT) ist es möglich, eine Bewertung von geplanten Prozesskonfigurationen und der aktuellen Situation im laufenden Prozess (Kontext) vorzunehmen. Es lassen sich Verhaltensweisen ableiten, die zu einer Erfüllung definierter Ziele führen. Um eine Vergleichbarkeit der Teilprozesse Häckseln, Transportieren und Verdichten herzustellen, werden die Zielgrößen *Stückkosten* und *Prozessdauer* verwendet. Stückkosten (in €) beziehen sich auf die Tonne verarbeiteten Erntegutes, also gehäckselte, transportierte und verdichtete und in der Summe verarbeitete Tonne. Die Prozessdauer beschreibt den für die Durchführung des Prozesses erforderlichen Zeitraum.

Nachfolgend wird der Ernteprozess für die Niveaus von 100 %, 85 % und 50 % mit Hilfe einer Parametersimulation simuliert, ein mathematisches Modell erstellt und beide Ergebnisse in Beziehung gesetzt.

Die Wertebereiche orientieren sich an den aus der Messwerterfassung gewonnenen Daten (Tab. 4.6) sowie daraus plausibel ableitbaren weiteren Größen. Kennwerte aus der Umfrage (Kapitel 4.1) sind in eckigen Klammern dargestellt.

Feldhäcksler:
In Abschnitt 4.2.1 wurde für den Feldhäcksler ein Durchsatzspektrum von 25 bis 280 $\mathrm{t\,h^{-1}}$ ermittelt [30-247 $\mathrm{t\,h^{-1}}$]. Für die Simulation wird ein Intervall von 25 bis 275 $\mathrm{t\,h^{-1}}$ und eine Schrittweite von 10 $\mathrm{t\,h^{-1}}$ festgelegt.

Transportfahrzeuge:
Die Datenbasis in Abschnitt 4.2.2 liefert ein Geschwindigkeitsspektrum von 0 bis 40 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ für beladene und unbeladene Fahrten [15-42,5 $\mathrm{km\,h^{-1}}$]. In der Simulation wird ein Intervall von 5 bis 40 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ und eine Schrittweite von 1 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ festgelegt. Die Anzahl der Transportfahrzeuge wird im Bereich von 2 bis 10 Einheiten variiert [2-7,8 TF].

Verdichtungsfahrzeug:
Das untersuchte Verdichtungsfahrzeug weist eine Gesamtmasse von 16,5 t auf. Damit ist es entsprechend der Formel **??** (Abschnitt 4.2.3, S.**??**) nicht möglich, den vom SFH induzierten maximalen Massenstrom von 275 t h^{-1} ordnungsgemäß zu verdichten. In der Simulation wird von 2 VF ausgegangen (Intervall: 1 bis 2 VF) und mit einer Schrittweite von 1 VF gerechnet [1-3,4 TF; 6-20 t].

Durch Multiplikation der Anzahl Schritte innerhalb der Bereiche jedes Parameters für jede Maschine ergeben sich 16.848 durchzuführende Simulationen (Tab. 4.1):

Tab. 4.1: Ermittlung der Anzahl durchzuführender Variationen

Maschine	SFH	TF		VF	
Parameter	Durchsatz	Geschw.	Anzahl	Anzahl	
Bereich	25–275 t h^{-1}	5–40 km h^{-1}	2–10 Stück	1–2 Stück	
Schrittweite	10	1	1	1	
Anzahl Werte	26 ×	36 ×	9 ×	2	=16.848

4.2 Ermittelte Parameterwerte und Parameterfunktionen

4.2.1 Teilprozess Häckseln

Für die Ermittlung der Leistungscharakteristik des Feldhäckslers wurden Kraftstoffverbrauch und Durchsatz mit einem *CLAAS Jaguar* 950 (440 kW; ECE R 120) und reihenunabhängigem Maisgebiss ORBIS 750 (7,5 m Arbeitsbreite) aufgezeichnet. Der Teilprozess *Häckseln* lässt sich in drei weitere Sub-Prozesse untergliedern (Tab. 4.2):

Tab. 4.2: Teilprozesse Häckseln

Nr.	Subprozess	Ermittlung
1.	Häckseln	Polynom für Häckseln (l h^{-1}) Fahrgeschwindigkeit >0 km h^{-1}, Durchsatz >0 t h^{-1}
2.	Warten	Kraftstoffverbrauch im Stand (l h^{-1}) Fahrgeschwindigkeit = 0 km h^{-1}, Durchsatz =0 t h^{-1}
3.	Fahren	zum Feld und vom Feld; wird nicht betrachtet.

Der Kostensatz für den SFH von 230 € h^{-1} ergibt sich aus den summierten Stundensätzen für die Basismaschine (192 € h^{-1}) und das Vorsatzgerät (38 € h^{-1})

entsprechend Formel 4.1[1].

$$c_{SFH,fix} = c_{SFH,Basismaschine,fix} + c_{SFH,Vorsatzgerät,fix} \tag{4.1}$$

Die Werte wurden dem KTBL-Kalkulationsprogramm *MaKost* (KTBL 2015) für die nächstliegende Leistungsklasse von 450 kW und eine jährliche Nutzung von 300 h entnommen. Darin enthalten sind Abschreibungen, Zinsen, Versicherung, und Reparaturkosten. Nicht berücksichtigt sind Kosten für Schmierstoffe und Unterbringung. Die Kraftstoffkosten werden im Rahmen der Simulation mittels einer durchsatzabhängigen Verbrauchskurve ermittelt. Nachfolgend wird mit einem Fix-Kostensatz von 230 €$\,\mathrm{h}^{-1}$ gerechnet.

Der für den SFH erfasste Durchsatz (= Massenstrom) und der daraus resultierende Kraftstoffverbrauch sind in Abbildung 4.2 dargestellt. [2]

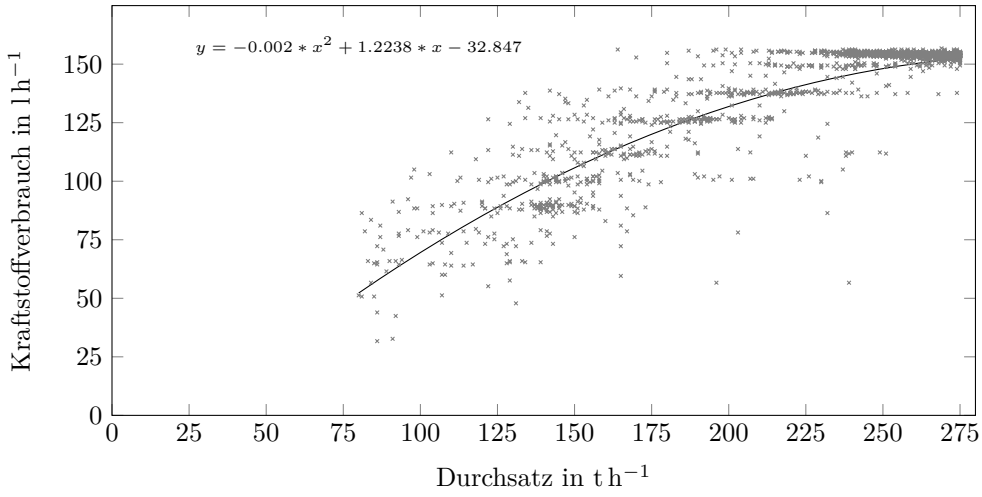


Abb. 4.2: Durchsatzabhängiger Kraftstoffverbrauch SFH

Durch Approximation der Messwerte mittels Polynoms 2. Ordnung, wie von Kalk & Hülsbergen (1999) vorgeschlagen, lässt sich für den SFH der leistungsabhängige Kraftstoffverbrauch nach Formel 4.2 darstellen:

$$\dot{V}_{SFH,Fuel,harvesting} = -0,002 \cdot \dot{m}_H{}^2 + 1,2238 \cdot \dot{m}_H - 32,847 \tag{4.2}$$

Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des SFH für Warten ($v_{SFH} = 0\,\mathrm{km\,h^{-1}}$) beträgt:

[1] Die in den nachfolgenden Formeln verwendeten Abkürzungen und Symbole sind auf Seite xv bis xix erläutert.

[2] Bei einem Durchsatz kleiner 80 t h^{-1} ist zu berücksichtigen, dass der Messfehler konstruktionsbedingt zunimmt.

$$\dot{V}_{SFH,Fuel,waiting} = 10{,}5\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.3}$$

Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des SFH für Fahren (¬ Arbeitsposition) beträgt:

$$\dot{V}_{SFH,Fuel,driving} = 16{,}94\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.4}$$

4.2.2 Teilprozess Transport

Für die Ermittlung der Leistungscharakteristik der Transortfahrzeuge wurde der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von Transportgeschwindigkeit und Beladungszustand erfasst, weiterhin der Verbrauch im Stand für Wartesituationen bei laufendem Motor. Weil eigene Messungen nur im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 25 km/h vorliegen, jedoch der Bereich bis 40 km/h realistisch ist[3], wurden eigene Werte zugunsten des Datensatzes von (Moitzi et al. 2008) verworfen. Diese Datenbasis ist geeignet, weil die hier untersuchte Transportmasse genau den Mittelwert der eigenen Untersuchungen widerspiegelt.

In der Untersuchung kamen ein Standardtraktor vom Typ *Steyr 6125 A* mit einer Leistung von 92 kW sowie zwei 2-Achskipper mit einer Kapazität von je 12 t zum Einsatz. Nachfolgende Tabelle 4.3 führt die relevanten Angaben zu den Fahrzeugmassen im Versuches auf.

Tab. 4.3: Masse der verwendeten Transportfahrzeuge

	Masse in kg
Allradtraktor *Steyr 9125a*	6.580
2-Achskipper 12 t	3.700
2-Achskipper 12 t	3.250
Gesamtmasse leer	13.530
Transportierte Nutzmasse	16.530
Gesamtmasse beladen	30.060

Moitzi hat in seinen Untersuchungen 4 beladene und 5 unbeladene Versuchsfahrten im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ durchgeführt. Der funktionale Zusammenhang zwischen Transportgeschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch lässt sich, analog zur Darstellung in Abschnitt 4.2.1, auf Basis eines Polynoms 2. Ordnung ermitteln. Der Teilprozess *Transport* wird entsprechend Abb. 4.4 in sechs Subprozesse untergliedert.

[3]Die Umfrage liefert Transportgeschwindigkeiten von 15 bis 42,5 $\mathrm{km\,h^{-1}}$

Tab. 4.4: Teilprozesse Transport

Nr.	Subprozess	Ermittlung
1.	Fahren beladen	Polynom für beladene Fahrt ($l\,h^{-1}$) nach Formel 4.6 Fahrgeschwindigkeit $>0\,km\,h^{-1}$ Fahrtrichtung Silo
2.	Fahren unbeladen	Polynom für unbeladene Fahrt ($l\,h^{-1}$) nach Formel 4.5 Fahrgeschwindigkeit $>0\,km\,h^{-1}$ Fahrtrichtung Feld
3.	Fahren beim Beladen	Polynom für Beladen ($l\,h^{-1}$) nach Formel 4.8 Geschw. TF $km\,h^{-1}$ = ∅ Arbeitsgeschw. SFH $km\,h^{-1}$
4.	Abladen	Kraftstoffverb. für Abladen ($l\,h^{-1}$) nach Formel 4.9 Fahrgeschwindigkeit $=0\,km\,h^{-1}$ Position = Abladeplatz
5.	Warten vor Beladen	Kraftstoffverbrauch im Stand ($l\,h^{-1}$) nach Formel 4.7 Position = Feld
6.	Warten vor Abladen	Kraftstoffverbrauch im Stand ($l\,h^{-1}$) nach Formel4.7 Position = Abladeplatz

Für die Kalkulation des Kostensatzes für eine Transporteinheit sind die Kosten für den Traktor und die zwei damit verbundenen Anhänger zu ermitteln. Der Kostensatz für den Traktor wird ebenfalls mit *MaKost* ermittelt. Weil im Kalkulationsprogramm die Klassengrenze bei 92 kW angesiedelt ist, wird der Kostensatz aus dem Durchschnitt der angebotenen Klassen 75 bis 92 kW und 93 bis 111 kW berechnet. Der Kostensatz beträgt 17,68 €$\,h^{-1}$ (Allradantrieb, Lastschaltgetriebe). Der Kostensatz für die Anhänger mit 12 t zulässigem Gesamtgewicht basiert auf den von Maschinenringen und der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen ermittelten Erfahrungswerten LWK-NRW (2013), weil zeitbezogene Angaben mit MaKost nicht ermittelbar sind. Er beträgt 9 €$\,h^{-1}$ je Anhänger. Der Gesamt-Kostensatz für ein Transportgespann beträgt somit 36 €$\,h^{-1}$. Abbildung 4.3 zeigt den leistungsabhängigen Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand aus dem Datensatz von (Moitzi et al. 2008). Aufgrund der durch häufige Lastwechsel verursachten starken Streuung der Messwerte[4], erfolgt eine Klassifizierung nach Fahrgeschwindigkeit; die Klassenbreite beträgt 1 $km\,h^{-1}$. Die Polygone werden auf Basis der Klassen-Mediane errechnet. Auf die Verwendung des arithmetischen Mittels wird wegen der Empfindlichkeit gegenüber den vorhandenen Ausreißern verzichtet.

Durch Approximation der Messwerte mittels Polynoms 2. Ordnung lässt sich für das unbeladene TF der geschwindigkeitsabhängige Kraftstoffverbrauch ermitteln (Formel 4.5).

[4]Im Anhang Abb. 6.3 sind diese Rohdaten zur Veranschaulichung geplottet.

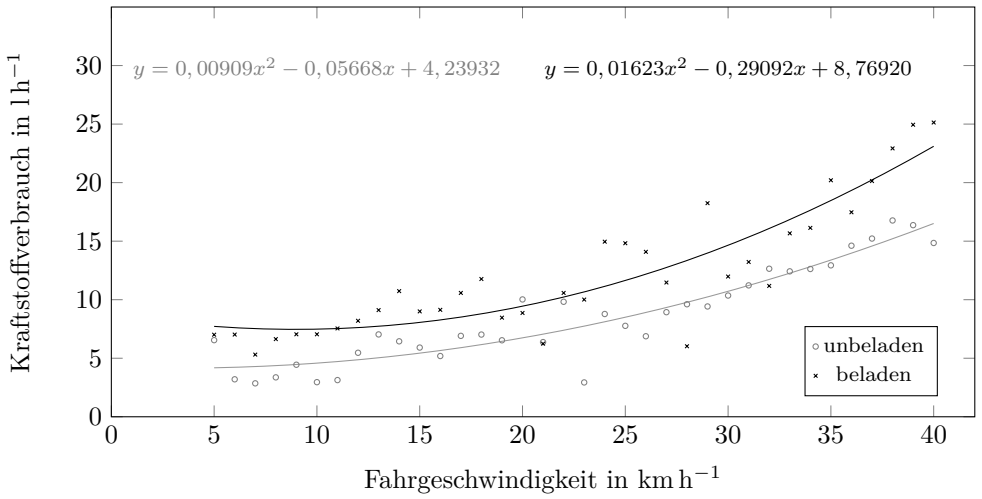


Abb. 4.3: Kraftstoffverbrauch der Transportfahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand

$$\dot{V}_{TF,Fuel,driving,empty} = 0,00908557 \cdot {v_{TF}}^2 - 0,0566813 \cdot v_{TF} + 4,23932 \tag{4.5}$$

Analog ergibt sich für beladene TF der geschwindigkeitsabhängige Kraftstoffverbrauch nach Formel 4.6.

$$\dot{V}_{TF,Fuel,driving,full} = 0,0162306 \cdot {v_{TF}}^2 - 0,290919 \cdot v_{TF} + 8,76920 \tag{4.6}$$

Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch für TF im Stand (Warten) beträgt nach Formel 4.7

$$\dot{V}_{TF,Fuel,waiting} = 2{,}34\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.7}$$

Der Kraftstoffverbrauch für TF während der Beladung $\dot{V}_{TF,loading}$ orientiert sich an der Fahrgeschwindigkeit des Feldhäckslers v_{SFH} während des Häckselns, die sich typischerweise im Bereich von 6 bis 10 km h^{-1} bewegt.

$$\dot{V}_{TF,Fuel,loading} = 16{,}82\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.8}$$

Als Kraftstoffverbrauch für TF während der Entladung $\dot{V}_{TF,unloading}$ wird vereinfachend der Wert für TF während der Beladung $\dot{V}_{TF,loading}$ angenommen (Formel 4.9).

$$\dot{V}_{TF,Fuel,unloading} = 16{,}82\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.9}$$

4.2.3 Teilprozess Verdichten

Für die Ermittlung der Leistungscharakteristik der Verdichtungsfahrzeuge wurde der Kraftstoffverbrauch im Teilprozess Verdichten in Abhängigkeit von der eingesetzten Masse des VF und dem Arbeitszustand erfasst. Hierfür wurde der Kraftstoffverbrauch eines Traktors vom Typ *CLAAS XERION 4500* (Nennleistung 330 kW; Fahrzeuggewicht: 14,5 t mit zusätzlich 2 t Frontgewicht) während der Arbeit auf dem Fahrsilo aufgezeichnet. Der Teilprozess *Verdichten* wird in drei weitere Subprozesse untergliedert (siehe Tab. 4.5):

Tab. 4.5: Teilprozesse Verdichten

Nr.	Subprozess	Ermittlung
1.	Verdichten	Kraftstoffverbrauch bei $> 0\,\mathrm{km\,h^{-1}}$
2.	Warten	Kraftstoffverbrauch bei $0\,\mathrm{km\,h^{-1}}$
3.	Fahren	zum Silo und vom Silo. Wird nicht weiter betrachtet.

Die Fixkosten für den Traktor und das damit verbundene Planierschild werden entsprechend Formel 4.10 und MaKost (KTBL 2015) ermittelt.

$$c_{VF,fix} = c_{VF,Basismaschine,fix} + c_{VF,Planierschild,fix} \tag{4.10}$$

Der Kostensatz beträgt 60,16 €$\,\mathrm{h^{-1}}$ (Traktor) + 6,86 €$\,\mathrm{h^{-1}}$ (Planierschild) = 67 €$\,\mathrm{h^{-1}}$ (gerundet).

Der aus den Prozessdaten ermittelte Kraftstoffverbrauch im Subprozess Verdichten bei einer Eigenmasse von 16,5 t beträgt $19{,}04\,\mathrm{l\,h^{-1}}$ (Formel 4.11).

$$\dot{V}_{VF,Fuel,compacting} = 19{,}04\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.11}$$

Der auf die Erntemasse bezogene Kraftstoffverbrauch des VF errechnet sich nach Formel 4.12.

$$\dot{V}_{VF,Fuel,compacting,spec} = \frac{\dot{V}_{VF,Fuel,compacting}}{m_{VF} \cdot CF \cdot DMC} \tag{4.12}$$

Der Kraftstoffverbrauch für das VF im Zustand Warten beträgt

$$\dot{V}_{VF,Fuel,waiting} = 7{,}64\,\mathrm{l\,h^{-1}} \tag{4.13}$$

4.2.4 Zusammenfassende Darstellung von Kennzahlen

In Tab. 4.6 sind die in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 ermittelten Kennzahlen, sowie weitere für die Simulation und das analytische Modell relevante Daten zusammen gefasst dargestellt. Für eine grobe Verifikation werden den ermittelten Kennzahlen die entsprechenden Werte (als Median $\tilde{x}$) aus der Umfrage (Kapitel 4.1) in eckigen Klammern in der letzten Spalte gegenüber gestellt. Die experimentell ermittelten Kennzahlen und Funktionen finden Anwendung in der nachfolgenden agentenbasierten Simulation und im kennfeldbasierten Modell. Die in genannten Lohnkosten sind dem Tarifvertrag der IGBAU (2015) entnommen.

Tab. 4.6: Statische Parameter und funktionale Zusammenhänge für die Simulationsexperimente

		Umfrage
Allg.	Kapazität von Feld und Silo: 1.000 t Distanz Ernteort - Abladeort: 5.000 m Kapazität Abladeort: Verdichtungsleistung VF Kraftstoffkosten: 1,10 € l^{-1} Lohnkosten: 12,30 € h^{-1}	[2,5]
SFH:	Durchsatzabhängiger Kraftstoffverbrauch ($l\,h^{-1}$): $\dot{V}_{SFH,fuel,\text{Häckseln}} = -0,002 \cdot \dot{m}_{SFH}{}^2 + 1,2238 \cdot \dot{m}_{SFH} - 32,847$; Kraftstoffverb. Warten: $\dot{V}_{SFH,fuel,waiting} = 10{,}51\,l\,h^{-1}$; Maschinenstundensatz: $c_{SFH,fix} = 230{,}00$ € h^{-1}	[37,5 $l\,h^{-1}$] [12 $l\,h^{-1}$]
TF:	Geschwindigkeitsabhängiger Kraftstoffverbrauch unbeladen ($l\,h^{-1}$): $\dot{V}_{TF,fuel,unloaded} = 0,00908557 \cdot v_{TF,unloaded}{}^2 - 0,0566813 \cdot v_{TF,unloaded} + 4,23932$; Geschwindigkeitsabhängiger Kraftstoffverbrauch beladen ($l\,h^{-1}$): $\dot{V}_{TF,fuel,loaded} = 0,0162306 \cdot v_{TF,unloaded}{}^2 - 0,290919 \cdot v_{TF,unloaded} + 8,76920$; Kraftstoffverb. Warten: $\dot{V}_{TF,fuel,waiting} = 2{,}34\,l\,h^{-1}$; Kraftstoffverb. beim Beladen: $\dot{V}_{TF,fuel,loading} = 16{,}82\,l\,h^{-1}$ Kraftstoffverb. beim Entladen: $\dot{V}_{TF,fuel,unloading} = 16{,}82\,l\,h^{-1}$ Ladekapazität: $m_{TF,Load} = 16{,}50$ t; Abladegeschwindigkeit: $\dot{V}_{TF,unloading} = 160{,}00\,t\,h^{-1}$ Maschinenstundensatz: $c_{SFH,fix} = 36{,}00$ € h^{-1}	[12 $l\,h^{-1}$] [18 $l\,h^{-1}$] [3 $l\,h^{-1}$] [15 t]
VF:	Verdichtungsleistung bez. auf TM mit CF = 4 ($t\,h^{-1}$): $\dot{m}_{VF} = m_{VF} \cdot \times CF$ Kraftstoffverb. Warten: $\dot{V}_{VF,fuel,waiting} = 7{,}64\,l\,h^{-1}$; Spez. Kraftstoffverb. Aufschieben u. Verdichten: $\dot{V}_{VF,fuel,compacting} = 19{,}04\,l\,h^{-1}$; Maschinenstundensatz: $c_{VF,fix} = 67{,}00$ € h^{-1}	[4 $l\,h^{-1}$] [15 $l\,h^{-1}$]

4.3 Simulation des Ernteprozesses und analytisches Modell

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der agentenbasierten Simulation und des mathematischen Modells auf der Grundlage des Anwendungsfalls

(Abschnitt 2.5), des Gesamtmodells (Abschnitt 3.4), des mathematischen Modells zur Erzeugung von Kennfeldern (Abschnitte 3.5 und 6), der ermittelten Parameterwerte (Abschnitt 3.6) und des vorangehenden Abschnitts 4 erzeugt und erläutert. Die verwendeten Symbole sind in der Symbol-Tabelle auf Seite xix erläutert.

4.3.1 Ergebnisse Teilprozess Häckseln

Abb. 4.4 zeigt die Beziehung von Häckselleistung $\mathrm{t\,h^{-1}}$ (x-Achse) zu Stückkosten $€\,\mathrm{t^{-1}}$ (y-Achse) für die 16.848 durchgeführten Simulationen im Rahmen der Parametervariation (graue Datenpunkte), sowie die Funktionen für die auf den Massenstrom bezogenen Stückkosten im Bereich der Häckselleistung von 60 bis $275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$. Die untere der beiden Kurven zeigt Ergebnisse bei maximaler SFH-Leistung ($\mu_H = 1$) und variabler Wartezeit. Die obere Kurve zeigt Ergebnisse ohne Wartezeit ($\mu_t = 0$) und variabler SFH-Leistung. Es ist zu erkennen, dass eine bestimmte Ernteleistung aus unterschiedlichen Kombinationen von Ernteleistung und Wartezeit realisiert werden kann. Sie unterscheiden sich jedoch in den resultierenden Stückkosten. Bei einer isolierten Betrachtung des SFH lässt ist zu erkennen, dass es aufgrund der hinterlegten Kosten-Leistungsfunktion mit abnehmendem spezifischem Kraftstoffverbrauch günstig erscheint, den SFH auf Nennleistung zu betreiben und bei Bedarf Wartezeiten in Kauf zu nehmen. Die in Abb. 4.4 dargestellte Funktion für die effektive Ernteleistung (Massenstrom) $\dot{m}_{eff}$ ergibt sich aus den in 3.5.1 genannten Formeln.

4.3.2 Ergebnisse Teilprozess Transport

Abb. 4.4 zeigt für 2 bis 10 TF die Beziehung von Transportleistung $\mathrm{t\,h^{-1}}$ (x-Achse) zu Stückkosten $€\,\mathrm{t^{-1}}$ (y-Achse) für die 16.848 durchgeführten Simulationen im Rahmen der Parametervariation (graue Datenpunkte), sowie die Funktionen für die auf den Massenstrom bezogenen Stückkosten im Bereich der Häckselleistung von 60 bis $275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$.

Für jede Anzahl eingesetzter TF ergibt sich ein eigenes Kennfeld, das die Ergebnisse aus der Parametervariation abgrenzt. Zur Ermittlung der minimalen Stückkosten im Transportprozess wird zunächst ein als realistisch angesehener Massenstrom (z.B. x =$180\,\mathrm{t\,h^{-1}}$) gewählt. Dieser Massenstrom lässt sich beim gewählten Massenstrom mit 5 bis 10 TF realisieren. Dabei variieren die Stückkosten zwischen 1,82 € und 3,28 €. Geringste Stückkosten ergeben sich beim Einsatz von 5 TF. Wie beim Kennfeld für den SFH ergeben sich auch bei den TF mehrere Lösungen in Abhängigkeit von der gewählten relativen

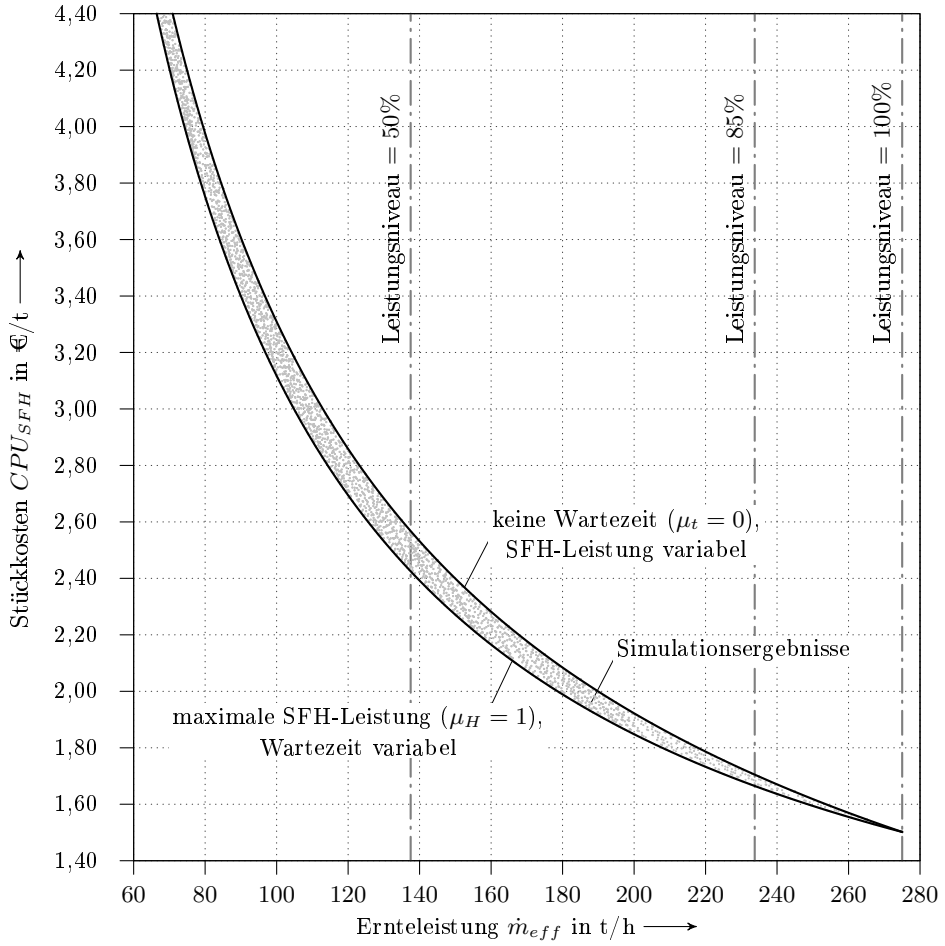


Abb. 4.4: Stückkosten für den Teilprozess Häckseln

Transportgeschwindigkeit und der relativen Wartezeit. Für 5 TF liegen sie zwischen 1,82 € (μ_t = variabel, $\mu_h = 0$) und 1,87 € ($\mu_t = 0$, μ_h = variabel). Wie beim SFH ist es auch hier vorteilhaft, auf einem Niveau von 100 % der Nennleistung zu transportieren und gegebenenfalls Wartezeiten in Kauf zu nehmen.

Die in Abb. 4.5 dargestellte Funktion für die effektive Ernteleistung (Massenstrom) $\dot{m}_{eff}$ ergibt sich aus den in 3.5.2 genannten Formeln.

4.3.3 Ergebnisse Teilprozess Verdichten

Abb. 4.6 zeigt die Beziehung von Verdichtungsleistung $\mathrm{t\,h^{-1}}$ (x-Achse) zu Stückkosten $€\,\mathrm{t^{-1}}$ (y-Achse) für die 16.848 durchgeführten Simulationen im Rahmen der Parametervariation, sowie die Funktion (Erläuterung weiter unten) für minimale Stückkosten im Bereich der Verdichtungsleistung von 60 bis $275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$. Die grauen Datenpunkte aus der Simulation werden von den

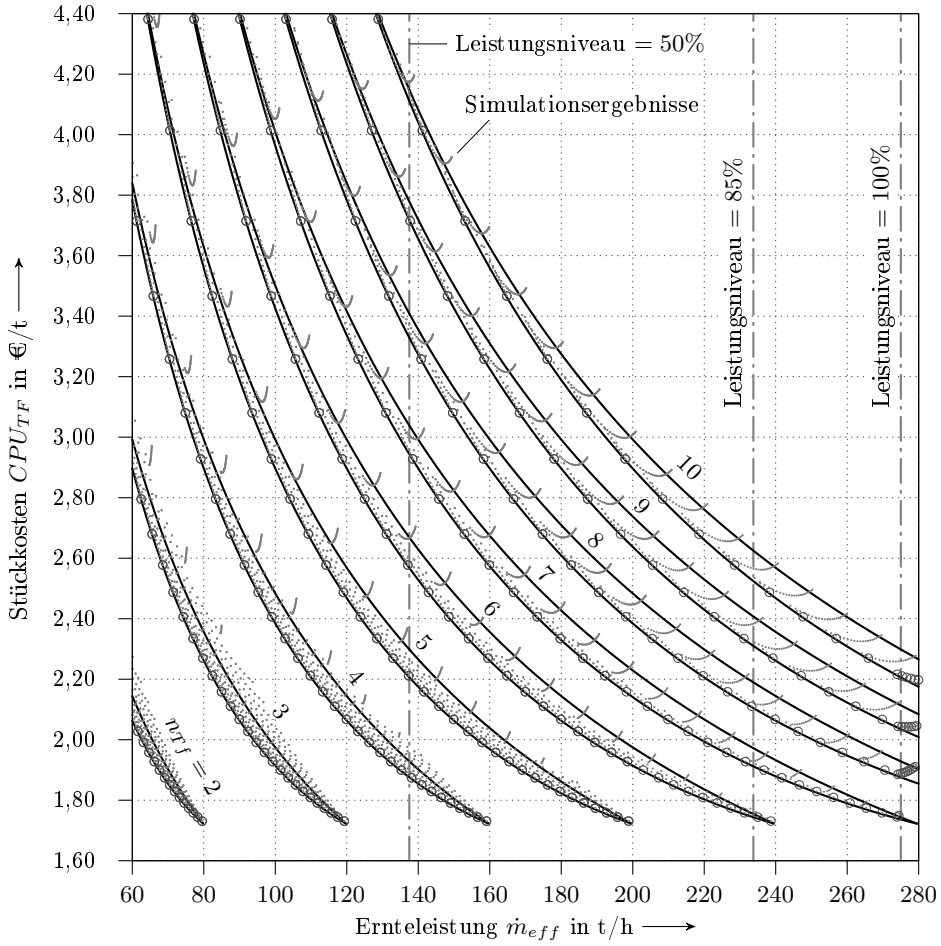


Abb. 4.5: Stückkosten für den Teilprozess Transport

Kennlinien verdeckt.

Wie bei TF ergibt sich auch bei VF für jede eingesetzte Maschine ein eigenes Kennfeld, das die Ergebnisse aus der Parametervariation abgrenzt. Für ein einen geplanten Massenstrom im Teilprozess Verdichtung können aus der Simulation entsprechende Konfigurationen ausgewählt werden.

4.3.4 Ergebnisse Gesamtprozess

Abb. 4.7 zeigt die Beziehung von Gesamternteleistung $\mathrm{t\,h^{-1}}$ (x-Achse) zu Stückkosten $€\,\mathrm{t^{-1}}$ (y-Achse) für die 16.848 durchgeführten Simulationen im Rahmen der Parametervariation (graue Datenpunkte), sowie die Kennlinie für minimale Stückkosten im Bereich der Ernteleistung von 65 bis $275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$.

Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind identische Randbedingungen der Modelle (Simulation und Analyse). Beide Modelle basieren grundsätzlich auf einem Prozess ohne nennenswerte (Entkopplungs-)Puffer.

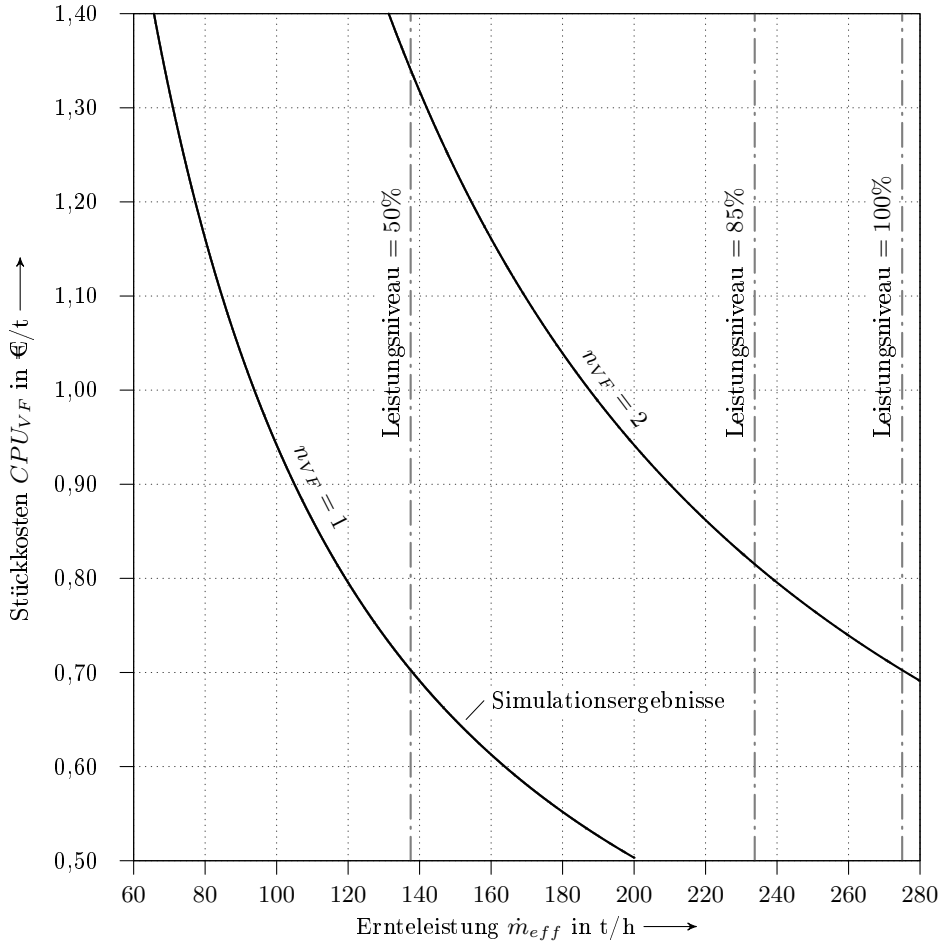


Abb. 4.6: Stückkosten für den Teilprozess Verdichten

Jedoch wurde die Simulation aus anderen Gründen mit einer variablen Kapazität des Abladeplatzes implementiert. Die Kapazität kann mehrere hundert Tonnen erreichen. Dadurch kann der Verdichtungsprozess mit einem deutlich anderen Massenstrom als der Transportprozess ablaufen. Die Prozesse wären dadurch teilweise entkoppelt. Der kleine Anteil an Simulationsergebnissen, bei denen die Kapazität des Abladeplatzes eine tatsächliche Entkopplung bewirkt, werden daher nicht in den Vergleich einbezogen. Somit werden nur Ergebnisse verglichen, für die die o.a. Randbedingung zutreffen.
Simulationsergebnisse, die auf einer Ladeleistung von $275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$ basieren, sind mit kreisförmigem Symbol (○) dargestellt. Sie liefern Ergebnisse unter Vernachlässigung von Rundungsfehlern identische Ergebnisse, wie die Kennlinie.
Eine Interpretation von Abb. 4.7 lässt erste Aussagen zu:

- Mit zunehmender Ernteleistung (hohe Nennleistung, geringer Wartezeitanteil) lassen sich abnehmende Stückkosten realisieren. Ernteleistungen unterhalb des definierten Wertebereiches führen aufgrund der hinterlegten

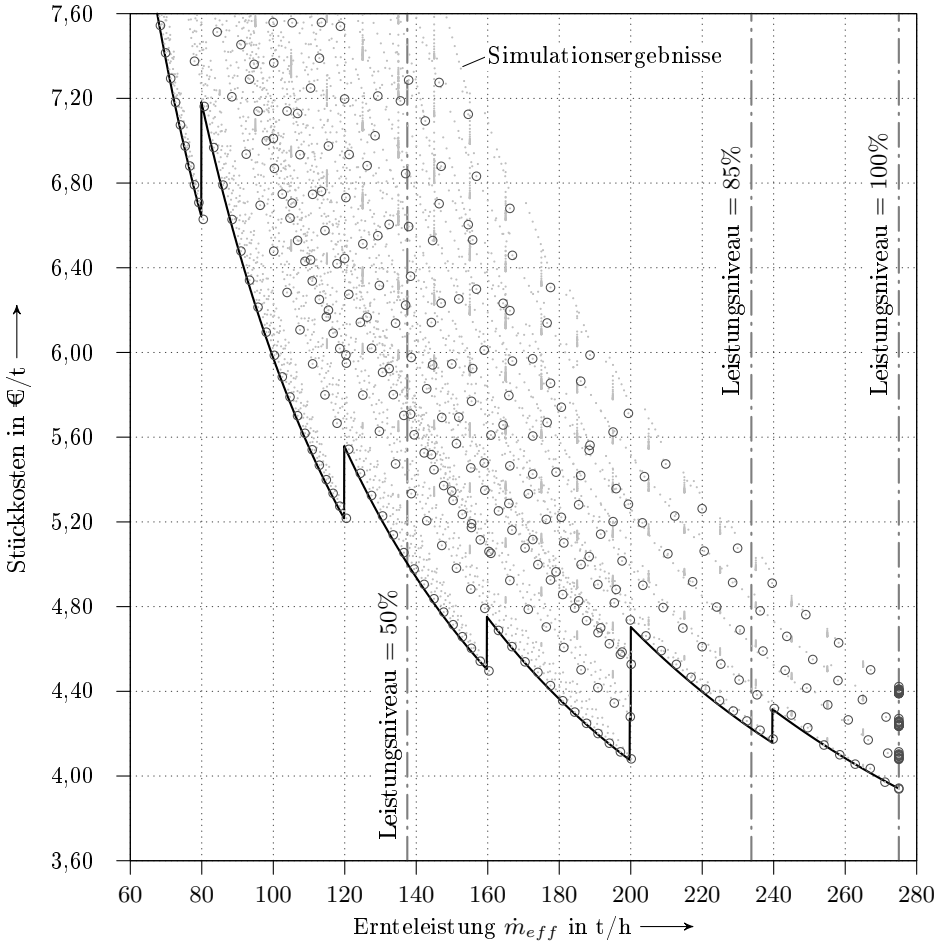


Abb. 4.7: Stückkosten für den Gesamtprozess

Funktionen (quadratischer Anteil) zu unendlich hohen Stückkosten. Eine weitere Betrachtung ist hier nicht zielführend.

- Eine bestimmte Ernteleistung (vertikaler Schnitt der x-Achse) kann mit einer Vielzahl von Parametervariationen erreicht werden. Dabei ergeben sich Spannweiten von ca. 2,00 €$\,\mathrm{t}^{-1}$ im mittleren Leistungsbereich von 180 $\mathrm{t\,h}^{-1}$ und ca. 0,60 €$\,\mathrm{t}^{-1}$ im oberen Leistungsbereich von 240 $\mathrm{t\,h}^{-1}$.
- Ein bestimmtes Stückkostenniveau (horizontaler Schnitt der y-Achse) kann mit einer Vielzahl von Parametervariationen erreicht werden. Dabei ergeben sich Abweichungen von bis zu ca. 60 $\mathrm{t\,h}^{-1}$ im oberen Stückkostenbereich. Die Differenz reduziert sich auf 0 $\mathrm{t\,h}^{-1}$, weil die minimalen Stückkosten durch genau 1 Konfiguration erzielt werden.
- Die Simulationsergebnisse zeigen wiederkehrende Muster, die durch die Variation von Parametern entstehen.
- Sprünge in der Kennlinie resultieren aus der Veränderung der Anzahl TF bei 80, 120, ..., 240 $\mathrm{t\,h}^{-1}$ und VF bei 200 $\mathrm{t\,h}^{-1}$.

Das in Abb. 4.7 dargestellte Kennfeld ergibt sich aus der Addition der Einzelfunktionen (Abschnitt 3.5.4) für die minimalen Stückkosten der Teilprozesse Häckseln (Formeln 6.1 bis 6.4), Transport (6.5 bis 6.11) und Verdichten (6.12 bis 6.15) und stellt somit die untere Grenze des Kennfeldes dar (Formel 3.16).

4.4 Ergebnisdetails für unterschiedliche Leistungsniveaus

In Abschnitt 4.3 wurden Ergebnisse für den gesamten simulierten Leistungsbereich, sowohl für den Gesamtprozess, als auch die Teilprozesse, dargestellt. In Kapitel 1 wurde erläutert, dass ein Niveau von 50 % im Vergleich zur installierten Leistung als praxisüblich angesehen werden kann (Feiffer 2004) und ein Niveau von 85 % anstrebenswert ist (Blanchard (1997), McKone & Schroeder (1999) und Nakajima (1988)). Nachfolgend werden diese Niveaus auf Basis der Darstellungen in Abschnitt 4.3 genauer betrachtet. Angaben zu Niveaus beziehen sich auf den Gesamtprozess (=Ernteleistung). In der nachfolgenden Abbildung wird aus Gründen der Übersicht auf die Darstellung von Simulationsergebnissen verzichtet, weil erkennbar ist, dass das analytische Modell die Simulationsergebnisse zuverlässig wiedergibt.

4.4.1 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Häckseln

Abb. 4.8 zeigt für den SFH Kennlinien der relativen Ernteleistung in Abhängigkeit von relativer Häckselleistung im Bereich von $0,5 \leq \mu_H \leq 1$ (x-Achse) unter Berücksichtigung der relativen Wartezeit μ_t (y_1-Achse) sowie die resultierenden Stückkosten CPU_{SFH} (gepunktete Linie und y_2-Achse).

Bei Betrachtung der 50 %-Kennlinie variieren die Stückkosten zwischen 2,57 €$\,\mathrm{t}^{-1}$ ($\mu_H = 0,5, \mu_t = 0$) und 2,43 €$\,\mathrm{t}^{-1}$ ($\mu_H = 1, \mu_t = 0,5$). Hier kommt zum Ausdruck, dass trotz in Anspruch genommener Wartezeiten mit zunehmender relativer Nennleistung die Stückkosten sinken. Es ist also unter den gegebenen Randbedingungen wirtschaftlich sinnvoll, ein hohes Leistungsniveau zu wählen.

4.4.2 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Transport

Abb. 4.9 zeigt, anders als Abb. 4.8, nicht das gesamte Kennfeld im Spektrum der relativen Ernteleistung. Für jedes Leistungsniveau wird zugunsten der

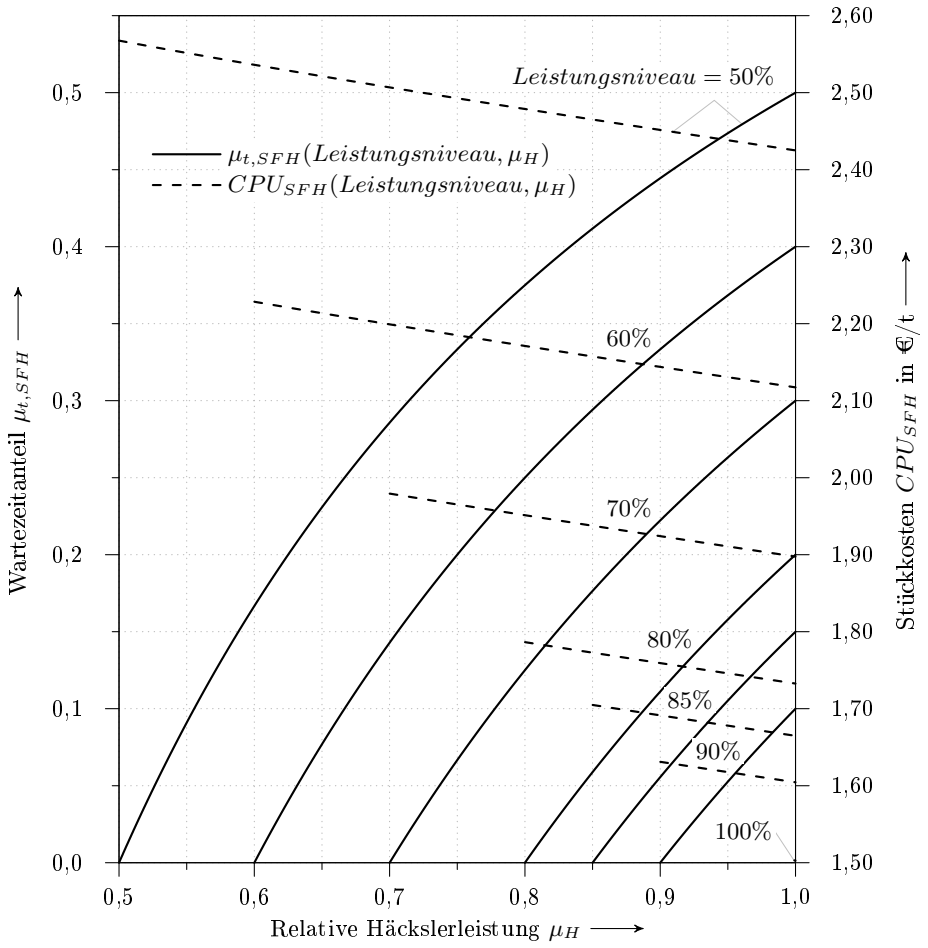


Abb. 4.8: Kennlinien für den Teilprozess Häckseln auf den Niveaus [50, 60, ...,100] sowie 85 % Ernteleistung

Lesbarkeit ein separates Kennfeld generiert, hier für das Niveau von 50 %. Für die Anzahl von 4 bis 10 TF werden die möglichen Kombinationen aus relativer Fahrgeschwindigkeit und relativer Wartezeit dargestellt, die eine relative Ernteleistung von 50 % liefern. Beim Einsatz von 4 TF bewegen sich die Stückkosten zwischen 1,88 € ($\mu_v = 0,78$, $\mu_t = 0$) und 1,93 € ($\mu_v = 1$, $\mu_t = 0,14$). Für 9 TF gilt: 3,79 € ($\mu_v = 0,27$, $\mu_t = 0$) und 3,71 € ($\mu_v = 0,66$, $\mu_t = 0,5$). Der gegebene Prozess ist auf dem 50 %-Niveau mit 3 TF nicht ausführbar. Darstellungen für die Niveaus 85 und 100 % sind Abb. 6.4 und 6.5 im Anhang zu entnehmen.

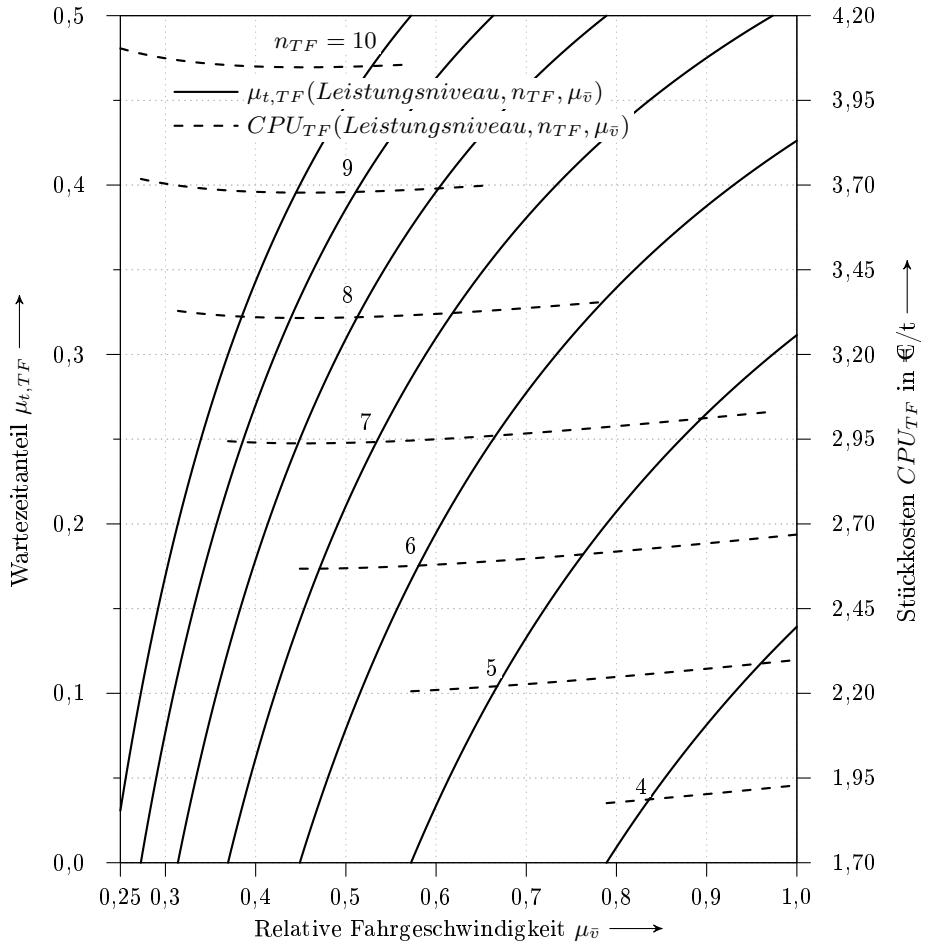


Abb. 4.9: Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 50 % Ernteleistung

4.4.3 Ergebnisse für unterschiedliche Leistungsniveaus im Teilprozess Verdichten

Abb. 4.10 zeigt für 2 VF Kennlinien für das relative Leistungsniveau in Abhängigkeit von der Anzahl VF im Bereich von 50 bis 100 % (x-Achse), den resultierenden Wartezeitanteil μ_t (y_1-Achse) und Stückkosten CPU_{VF} (y_2-Achse).

Mit 1 VF kann ein Massenstrom von bis zu 73 % der relativen Ernteleistung bewältigt werden, darüber hinaus ist der Einsatz eines zweiten VF zwingend erforderlich. Die Stückkosten betragen bei 1 VF und 73 % Leistungsniveau 0,50 €. Liegt der Massenstrom darunter, steigt der relative Wartezeitanteil. Bei einem Leistungsniveau von 50 % beträgt der Wartezeitanteil 0,31, die Stückkosten 0,70 €. Ergebnisse beim Einsatz von 2 VF lassen sich in analoger Weise ermitteln. VF wechseln in den Sub-Prozess Warten, wenn die am Abladeplatz

verfügbare Menge Erntegut eingelagert ist. In der Praxis wird davon abgewichen und so lange weiter verdichtet, bis neues Erntegut am Abladeplatz verfügbar ist.

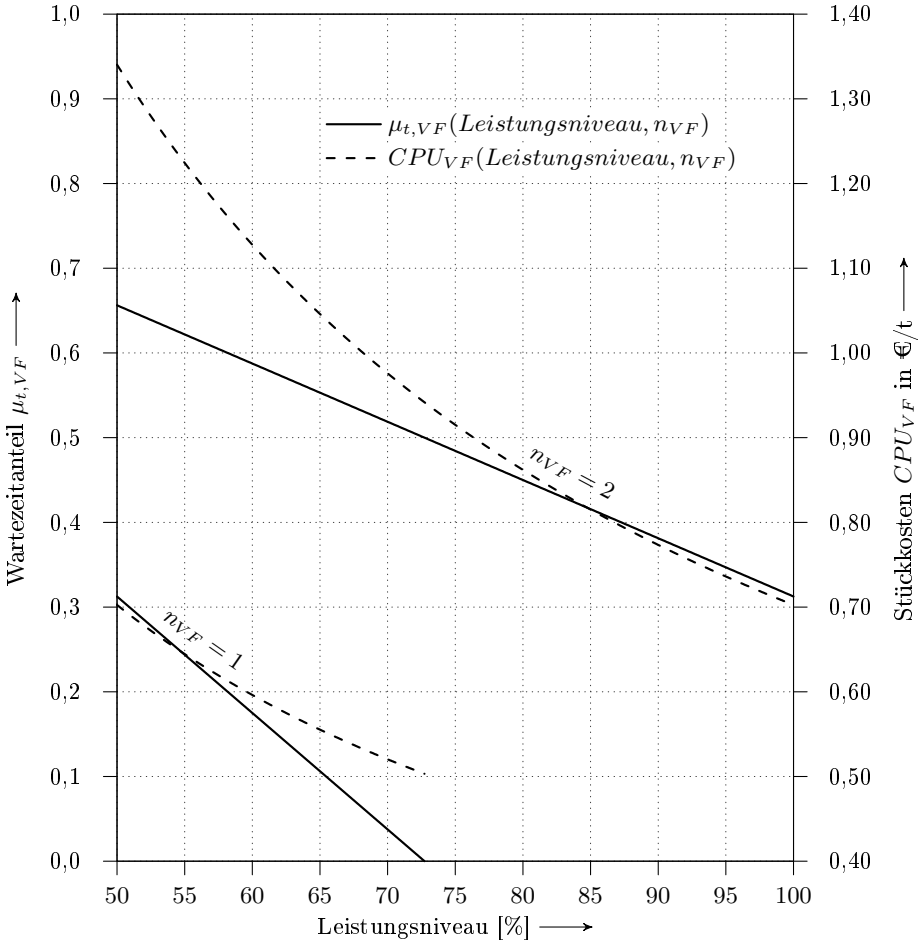


Abb. 4.10: Kennlinien für den Teilprozess Verdichten auf den Niveaus [50, 60, ...,100] sowie 85 % Ernteleistung

4.5 Zusammenfassende Darstellung der Kennfelder

Gegebene oder geänderte Konfigurationen sowie veränderte Verhaltensweisen von einzelnen Maschinen in der Erntekette haben aufgrund bestehender Abhängigkeiten unmittelbare Auswirkungen auf kooperierende Systeme. Die sieben in den vorangehenden Abschnitten 4.3 und 4.4 entwickelten Kennfelder bringen dies in quantitativer Form zum Ausdruck. Ihre Beziehungen sind in Abb. 4.11 dargestellt. Jede konkrete Situation lässt sich in den Kennfeldern durch einen Betriebspunkt darstellen. Diese Betriebspunkte korrespondieren. Der dargestellte Zusammenhang ermöglicht eine *top-down*- oder *bottom-up*-orientierte Vorgehensweise zur Planung und Steuerung von Prozessen. Je nach Interesse des Anwenders kann also ausgehend vom Gesamtprozess oder einem der drei Teilprozesse geplant oder gesteuert werden.

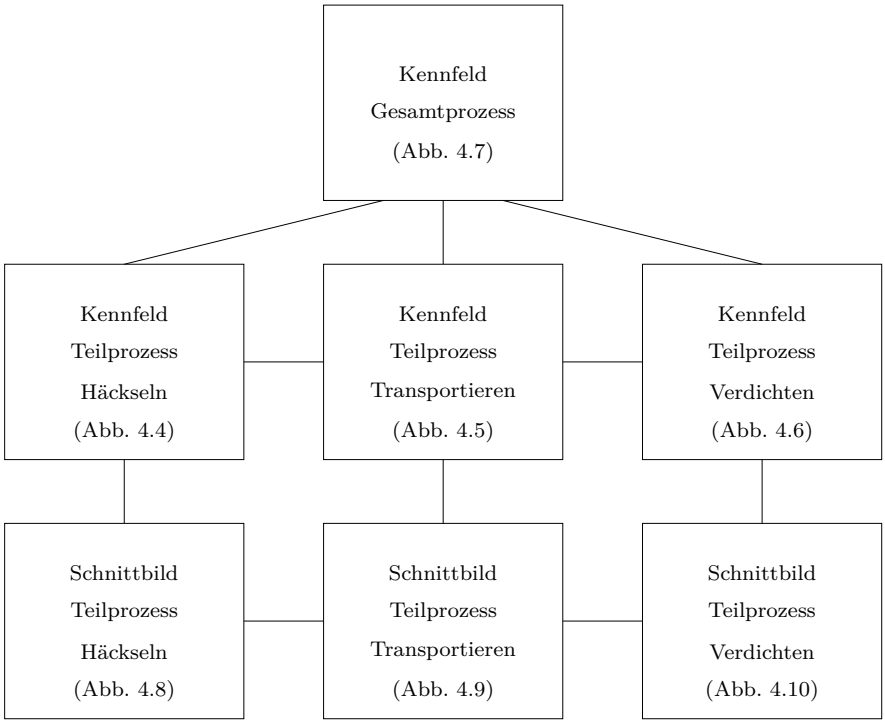


Abb. 4.11: Zusammenfassende, symbolische Darstellung der Kennfelder und ihrer Beziehungen

Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus dem Planungsbeispiel

Aus dem beschriebenen Planungsprozess lassen sich die Konfiguration der Erntekette, bevorzugte Verhaltensweisen sowie daraus resultierende Zeiten und

Kosten vollständig darstellen.

Tab. 4.7: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung aus dem Planungsbeispiel (50 %-Niveau)

	SFH	TF	VF	Gesamt
Anzahl	1	4	1	6
Max rel. Leistung: $\mu_{SFH} = 1, \mu_{\overline{v},TF} = 0,5$				
Ernteleistung	$275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	$40\,\mathrm{km\,h^{-1}}$	$200\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	
Rel. Wartezeit	50 %	14 %	31 %	
Stückkosten	$2{,}43\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$1{,}93\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$0{,}70\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$5{,}06\,€\,\mathrm{t^{-1}}$
Min. rel. Wartezeit: $\mu_{t,SFH} = 0$, $\mu_{t,TF} = 0$				
Ernteleistung	$137{,}5\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	$31{,}2\,\mathrm{km\,h^{-1}}$	$200\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	
Rel. Wartezeit	0 %	0 %	31 %	
Stückkosten	$2{,}57\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$1{,}88\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$0{,}70\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$5{,}15\,€\,\mathrm{t^{-1}}$
Prozessdauer				394 min

In analoger Weise kann die Planung für jedes andere Leistungsniveau zwischen 50 und 100 % durchgeführt werden. Die Planung gibt keine Auskunft über die tatsächliche Realisierbarkeit unter den gegebenen Bedingungen. Diese Einschätzung obliegt dem Prozessverantwortlichen und ist weitgehend erfahrungsbasiert.

Zur Einordnung der Ergebnisse in Tab. 4.7 sind in Tab. 4.8 (oberer Bereich) die Resultate für das 100 %-Niveau dargestellt. Hier wird sichtbar, dass ein Gesamt-Bestergebnis nur durch Abweichung von optimalen Betriebspunkten bei den kooperierenden Maschinen möglich ist. TF müssen 2 % und VF 31 % Wartezeit in Kauf nehmen. Die Stückkosten reduzieren sich von 5,06 bzw. $5{,}15\,€\,\mathrm{t^{-1}}$ auf $3{,}96\,€\,\mathrm{t^{-1}}$ (ca. 23 %). Der Zeitverbrauch reduziert sich von 394 min auf 238 min (40 %).

Tab. 4.8: Vergleichende Ergebnisdarstellung für 100 %-Niveau und vollständig entkoppelten Prozess

	SFH	TF	VF	Gesamt
Anzahl	1	7	2	10
Max rel. Leistung				
Ernteleistung	$275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	$40\,\mathrm{km\,h^{-1}}$	$400\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	
Rel. Wartezeit	0 %	2 %	31 %	
Stückkosten	$1{,}50\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$1{,}76\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$0{,}70\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$3{,}96\,€\,\mathrm{t^{-1}}$
Prozessdauer				238 min
Anzahl	frei	frei	frei	frei
Max. rel. Leistung entkoppelt				
Ernteleistung	$275\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	$40\,\mathrm{km\,h^{-1}}$	$200\,\mathrm{t\,h^{-1}}$	
Rel. Wartezeit	0 %	0 %	0 %	
Stückkosten	$1{,}50\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$1{,}72\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$0{,}50\,€\,\mathrm{t^{-1}}$	$3{,}72\,€\,\mathrm{t^{-1}}$
Prozessdauer				218 min

Eine weitere, hier jedoch sehr theoretische Ergebnisverbesserung lässt sich durch eine vollständige Entkoppelung der Teilprozesse Häckseln, Transportieren

und Verdichten realisieren. Unter diesen Bedingungen kann jede Maschine in ihrem optimalen Betriebspunkt eingesetzt werden. Wartezeiten aufgrund fehlender Verfügbarkeit von Partnern entfallen. Der untere Bereich in Tab. 4.8 zeigt hierfür die entsprechenden Ergebnisse. Die Stückkosten lassen sich von 3,96 € t^{-1} auf 3,72 € t^{-1} (7 %) reduzieren. Der Zeitanspruch reduziert sich von 238 min auf 218 min (8,4 %). Für eine realitätsnahe Betrachtung sind jedoch neue Maschinenkonzepte sowie physiologische Prozesse im Erntegut zu betrachten und in die Kalkulation einzubeziehen, die ein absätziges Verfahren ermöglichen (z.B. Ablage des Erntegutes in Big Bags).

5 Diskussion

In der Einleitung dieser Arbeit wurde festgestellt, dass bei mobilen Arbeitsmaschinen zwischen installierter und realisierter Leistung häufig eine Lücke von 50 % zu beobachten ist. Für Prozesse mit diskreten und kontinuierlichen Anteilen kann insbesondere aus dem industriellen Umfeld festgestellt werden, dass diese Lücke ähnliche Dimensionen hat und eine Erhöhung der realisierbaren Leistung auf bis zu 85 % wirtschaftlich und organisatorisch machbar erscheint und daher angestrebt werden sollte. Die Leistungslücke in landwirtschaftlichen Prozessen kann auf vielfältige Ursachen zurück geführt werden, so z.B. witterungsbedingte Unwägbarkeiten, nicht optimale Konfiguration von Mechanisierungsketten und mangelnde Transparenz im laufenden Prozess. Gemeinsames Merkmal dieser Ursachen ist der Mangel an präziser Beschreibung konkreter Prozesszustände und darauf aufbauender Entscheidungen. Ziel dieser Arbeit ist es, durch Anwendung kontextorientierter Methoden und Technologien eine Verbesserung der Planung und Steuerung von Prozessen herbeizuführen. Auf Basis einer Systemanalyse wurden Komponenten identifiziert, zu einer Architektur zusammen geführt und soweit implementiert, dass das Wirkprinzip für wesentliche Teilprozesse des Anwendungsfalles mit Hilfe einer agentenbasierten Simulation darstellbar ist. Die agentenbasierte Simulation liefert für gegebene Randbedingungen (z.B. Kosten-/Leistungsfunktionen der Maschinen, Erntemenge, Transportentfernung) Konfigurationsvorschläge und Verhaltenswerte zur Erreichung bestimmter relativer Leistungsniveaus mit Bezug zu Bestwerten (z.B. aus Rekordversuchen). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Rekordversuche oftmals nicht unter wirtschaftlichen, sondern verfahrenstechnischen Gesichtspunkten durchgeführt werden. Überkapazitäten im Transport werden zur Sicherstellung einer maximalen Leistung in Kauf genommen.

Parallel zur Simulation, die diskrete Lösungen (Lösungsräume) liefert, wurde ein mathematisch-analytisches Modell entwickelt, das insbesondere für Bestwerte von Zeit und Kosten in Form von Kennfeldern, Kennlinien die funktionalen Grenzen aufzeigt. Um in dem Modell eine Verbindung zwischen den Teilprozessen herzustellen und Aussagen für den Gesamtprozess machen zu können, wurden die Kennwerte auf die Begriffe der Ernteleistung und damit verbundenen Stückkosten reduziert. Für den konkret dimensionierten

Anwendungsfall lassen sich Aussagen hinsichtlich Konfiguration und Verhalten zur Erreichung minimaler Kosten und Zeit für Leistungsniveaus zwischen 50 und 100 % treffen. Die Möglichkeit zur tatsächlichen Realisierung eines bestimmten Leistungsniveaus obliegt dem Anwender auf Basis der tatsächlichen Prozessbedingungen. Anpassungen ergeben sich aus der Dimensionierung der eingesetzten Maschinen, der relativen Ernteleistung und der relativen Wartezeit.

5.1 Beitrag der Architektur zur entwickelten Lösung

Mit Hilfe der identifizierten Komponenten ist es gelungen, eine für den Anwendungsfall ausreichende Präzision zur Beschreibung von Kontexten zu liefern. Darauf aufbauend lässt sich das erforderliche Verhalten zur Verbesserung der Kooperation auf quantitative Weise beschreiben. Die Komponenten wurden nur so weit implementiert, wie für den Anwendungsfall erforderlich. Die Beschreibungen in Kapitel 3.2 gehen teilweise weit darüber hinaus und liefern Hinweise für eine umfassende Implementierung, die nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

Für die Beschreibung der Arbeitsgruppe (Komponente *Gruppenidentifikation*; Abschnitt 3.2.1) wurden die Maschinenbeziehungen beim Beladen (TF $\leftrightarrow$ SFH) sowie Entladen (VF $\leftrightarrow$ TF ermittelt). Die Gruppenidentifikation findet exemplarisch Anwendung in der automatisierten, kontextbasierten Dokumentation (siehe Abb. 6.6 im Anhang). Eine für die Praxis geeignete Implementierung ist aufwändig, weil sensorische Fähigkeiten für den *Primary Indicator Check* in der Arbeitsumgebung noch nicht vorhanden sind. Weiterhin ist der Aufwand zur rückwirkenden Zuweisung von Beziehungen nach Erreichen eines ausreichenden Signifikanzniveaus für alle Indikatoren mit hohem Implementierungsaufwand verbunden. Schließlich kann der Abbau von Beziehungen nur unter vorab getroffenen Annahmen erfolgen. Für eine Lösung dieses Problems ist eine umfassende, semantische Betrachtung erforderlich.

Mit Hilfe des Konfigurators (Komponente *Prozess- und Leistungskonfiguration*; Abschnitt 3.2.2) wurden in der Simulation die Kosten-Leistungsfunktionen sowie statische und dynamische Kennwerte der mobilen Arbeitsmaschinen und stationären Objekte der Infrastruktur hinterlegt. Hierdurch kann die Simulation einfach auf den Untersuchungsgegenstand angepasst werden. Die in Abschnitt 3.2.2.3 vorgestellte Nomenklatur zur systematischen Beschreibung von ausführbaren Prozessen wurde aufgrund der geringen Varianz verwendeter Maschinentypen nicht angewendet.

In der Simulation wurden in sämtlichen Teilprozessen Raumbeziehungen

(Komponente *Geo-Objektmanagement*; Abschnitt 3.2.3) für die Steuerung des Informationsflusses genutzt. Die Beziehungen wurden in den Zustandsdiagrammen implementiert und steuern als Entry- und Exit-Conditions die Übergänge der Zustände über die modellierten Kanten. Die strikte Trennung von räumlichen und zeitlichen Bedingungen hat die Erstellung eines leicht konfigurierbaren Modells ermöglicht. Das Bewegungsverhalten von SFH und TF im Feld (Vorgewende, Fahrspuren und Überladekorridore) und von VF im Fahrsilo und auf dem Abladeplatz wurde aus Gründen der Vereinfachung nicht modelliert. Jedoch ermöglicht das Modell segmentierte Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen, die sich in der Feldfahrt unmittelbar auf Stückkosten und Prozessdauer auswirken.

Die Prozesszustände für den SFH wurden schematisch modelliert. Die Zustände von TF und VF wurden entsprechend implementiert. Die Veränderung an Maschineneinstellungen (z.B. Häckseltrommel einschalten) oder Änderung des Raumkontextes (z.B. Feldgrenze erreicht) führt zu neuen Prozesszuständen, die weitere informationstechnische Ereignisse auslösen (z.B. Kraftstoffverbrauch auftragsbezogen aufzeichnen). Einmal definierte Zustände lassen sich in immer neuen Zusammenhängen wieder verwenden. Eine von Herstellern unabhängige Nutzung dieser Zustände erfordert eine Vereinheitlichung der Begriffe, die idealerweise maschinenlesbar sind. Durch Anwendung von Begriffen aus der formalen Logik lassen sich Begriffe leicht in Bezug setzen.

Speicherobjekte (Komponente *Speicherobjekte* Abschnitt 3.2.5) sind eine wichtige Metapher zur Modellierung der Quelle, Strecke und Senke. Im vorliegenden Anwendungsfall sind dies das Feld, die Transportstrecke mit Ladekapazität der Anhänger, Abladeplatz und Silo. Eine Abstraktion auf Kapazität sowie ein- und ausgehenden Massenstrom ermöglicht eine universelle Verwendung von Speicherobjekten nicht nur in diesem Anwendungsfall, sondern auch im Fall von Stückgütern (Ballen) und Flüssigkeiten (Gülle, Spritzbrühe). Weiterhin lassen sich Stoffströme in inverser Richtung, also vom Hof zum Feld betrachten, so z.B. in der Gülle-Logistik. Im Anwendungsfall wurden alle Angaben auf Masse (t) bezogen. Die Verwendung anderer Einheiten wie Stück und Volumen ist ebenfalls möglich. Die eigene Implementierung hat gezeigt, dass durch eine separate Berechnung von Zugang/Abgang und Bestand im Speicherobjekt eine unnötige Komplexität verursacht wurde. Die Verwendung von Liquid-Stock-Objekten, wie sie in der aktuellen Version von AnyLogic mittlerweile verfügbar sind, hätten die Berechnung vereinfacht. Eine detailliertere Betrachtung von Puffern schafft die Möglichkeit zur Potenzialanalyse hinsichtlich Optimierung und Entkoppelung von Prozessen. Diese Ansätze werden in der Industrie insbesondere im Bereich der Intralogistik genutzt.

In einer vollständig implementierten Umgebung übernehmen Managementsysteme (Komponente *Managementsysteme*; Abschnitt 3.2.6) die Aufgabe, Stammdaten für den Konfigurator und den Geo-Objektmanager zu liefern und dokumentierte Teilprozesse für die Fakturierung und Kostenrechnung aufzunehmen. Zur Vermeidung von Komplexität wurde auf die direkte Einbindung von FMS verzichtet. Maschinen- und infrastrukturbezogene Daten wurden in den potenziell mit den FMS kommunizierenden Komponenten eingegeben. Der Prozess zur automatischen Rechnungsgenerierung wurde mit den Werkzeugen der Simulationsumgebung implementiert. Für eine umfassende Einbindung von FMS sind Dokumente in standardisierter Form (z.B. ISOXML) oder branchenneutralen Notationen (z.B. ebXML) zu erzeugen.

Agenten (Komponente *Agenten*; Abschnitt 3.2.7) kommt in der Simulation per Definition eine zentrale Bedeutung zu. In Abschnitt 2.3.8 werden Agenten weitreichende Fähigkeiten und Verhaltensweisen (altruistisch, egoistisch, autonom) zugeschrieben. Der Anwendungsfall erfordert jedoch nur einfache Mechanismen wie die Beschreibung der eigenen Situation und gerichtete Kommunikation von darauf basierenden Statusinformationen (z.B. Ankunft am SFH, Anhänger voll) an andere Agenten. Das Agentenprinzip hat sich als flexibel anzuwendende Methode heraus gestellt, mit der das informationstechnische Abbild einer realen Maschine geschaffen werden kann. Die nachträgliche Erweiterung um zusätzliche Fähigkeiten ist problemlos möglich. So ist für die zur Verbesserung von nicht optimalen Lösungen ein lokales, dynamisches Optimierungsverhalten denkbar. Eine Implementierung entsprechend dem in Abb. 6.7 (Anhang) gezeigten Schema ist erfolgt; auf eine Darstellung wird aus Platzgründen verzichtet. Ein globales Optimierungsverfahren liefert diese Arbeit nicht. Die geschaffene Grundlage ist dafür jedoch geeignet.

5.2 Diskussion von simulativem und analytischem Ansatz

Agentenbasierte Systeme fanden in den 1990er Jahren große Aufmerksamkeit, in der Landwirtschaft jedoch nur marginal. Mangels ausreichender Rechenleistung und Vernetzung bei dezentralen Anwendungen hat das Interesse an dieser Technologie abgenommen. In den letzten Jahren ist nach Überwindung der genannten Einschränkungen und durch Fortschritte im Bereich der Künstlichen Intelligenz eine wieder zunehmende Bedeutung zu erkennen.

Das Framework AnyLogic, sowie Hochsprachen wie Java und Python ermöglichen auch Nicht-Informatikern, wie Agrarwissenschaftlern und Logistikern, die Auseinandersetzung mit agentenbasierten Systemen. Der implementierte

Anwendungsfall nimmt eine strikte Trennung der ausführenden Maschinen als Agenten vor (Physisches System ↔ Cyberphysical System). Jedoch erfolgt die Simulation in einer zentralen Applikation, die reale Bedingungen nur eingeschränkt widerspiegelt. Der Einsatz agentenbasierter Simulation unter Praxisbedingungen setzt weitere Untersuchungen im Zusammenhang mit verteilten Systemen voraus. Von besonderer Bedeutung ist hier der Umgang mit nicht verfügbarer Kommunikation, die eine Synchronisation dezentral ermittelter Optimierungsergebnisse und somit abgestimmtes Verhalten erschwert. Eine monolithisch aufgebaute Simulation ist in verteilt ablaufende Simulationen mit Sychronisationsmechanismen zu zerlegen.

Der implementierte Anwendungsfall hat gezeigt, dass durch die isolierte Modellierung einzelner Maschinentypen und die integrierte Fähigkeit zur Kommunikation zwischen den Agenten Prozesse nachvollziehbar ausgeführt und somit bewertet werden können. Die anschließend durchgeführte Parametervariation ist in der Lage, bei getroffenen Annahmen einen nahezu beliebig großen und beliebig fein abgestuften Lösungsraum zu präsentieren. Einschränkend wirkt hier die erforderliche Rechenleistung. Mit einem Standard-PC konnten 10 Varianten pro Sekunde gerechnet werden. Hieraus resultierte eine Rechenzeit von 1 bis 3 h. Diese Rechenzeit lässt sich durch die Parallelisierung von Rechenprozessen und die Einschränkung des Parameterraumes (Lieferung von Ist-Daten als Startwerte aus den realen Maschinen) deutlich reduzieren. Für Automatisierungszwecke mit der Anforderung an geringe Latenzzeiten ist der Ansatz jedoch kritisch zu hinterfragen.

Ergebnis der Parametervariation sind diskrete Vorschläge zur Konfiguration der Kette und Verhaltensweisen einzelner Maschinen. Die je nach Parametrierung gelieferten Ergebnisse haben einen Umfang, der zwar sinnvolle Lösungen enthält, aber intuitives Erschließen erschwert. Aus diesem Grund wurde nach einem ergänzenden Ansatz gesucht, der den Prozess auf wenige Kenngrößen reduziert und mit Hilfe einer geeigneten Visualisierung eine sinnvolle Dimensionierung ermöglicht. In der Produktionsplanung und -steuerung sowie im Bereich technischer Systeme (z.B. Verbrennungsmaschinen) ermöglichen kennfeldbasierte Darstellungen eine intuitive Erfassung von Systemzusammenhängen. Basierend auf einem mathematischen Modell ist diese Darstellung gelungen. Die Funktionen grenzen den Lösungsraum der Parametervariation kontinuierlich ab. Sinnvolle Konfigurationen und Verhaltensweisen können jeweils mit der Parametervariation und Kennfeldern getrennt, aber auch in Verbindung ermittelt werden. Die Darstellung mit Kennfeldern unterstützt bei der Auswahl von Arbeitspunkten mit geringer Sensitivität (Sensitivitätsanalyse), indem zunächst ein optimaler Betriebspunkt gewählt wird und dieser dann unter

Inkaufnahme von erhöhten Stückkosten verschoben wird, um die Änderung von laufenden Konfigurationen, z.B. Hinzunahme eines zusätzlichen TF, vermeiden zu können.

5.3 Ansätze zur Weiterentwicklung der dargestellten Lösung

Die entwickelte Methode ermöglicht die Planung, Steuerung und lokale Optimierung von kooperativen Prozessen mit mobilen Arbeitsmaschinen unter zahlreichen getroffenen Annahmen und Vereinfachungen. Für die Planung wird ein umfassender Ansatz geliefert, für Steuerung und Optimierung ein Ansatz. Im Verlauf der Arbeit haben sich zahlreiche Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung ergeben.

5.3.1 Technologiezentrierte Ansätze

In der Simulation wurden die Transportstrecken lediglich mit Entfernungen und Geschwindigkeitsprofilen hinterlegt. Für eine automatisierte Ermittlung der Wegstreckenanteile ist es sinnvoll, einen GIS-basierten Kartenhintergrund zu nutzen. Dieser bietet bei ausreichend genauer Attributierung die Möglichkeit, optimale Wegstrecken hinsichtlich Fahrzeit, Begegnungsverkehr und Tragfähigkeit zu ermitteln.

Moderne SFH verfügen über die Möglichkeit, je nach Leistungsbedarf alternative Motorkennfelder anzuwenden (CLAAS *Dynamic Power*). Die Prozesskennfelder schaffen die Möglichkeit, die Auswahl von Motorkennfeldern aus der Gesamtprozesssicht zu wählen. Simulation und mathematisches Modell liefern Verhaltensweisen, die in unterschiedlicher Weise im Prozess genutzt werden können. Im einfachsten Fall wird den Prozessbeteiligten das Ergebnis der am besten geeigneten Parametervariation oder das Kennfeld mit IST- und SOLL-Arbeitspunkten auf einem mobilen Anzeigegerät (z.B. Tablet) angeboten. Wenn Probleme von Latenzzeiten bei der Ergebnisermittlung und sicherheitsrelevante Fragestellungen gelöst sind, ist vorstellbar, dass Vorschläge in bestimmten Teilprozessen, z.B. auf dem Feld, unmittelbar in die Aktorik der Maschinen eingreifen. Hier kann sich eine Ergänzung bestehender regelbasierter Systeme für Einzelmaschinen (CLAAS CEMOS) durch übergeordnete Prozessregelsysteme ergeben. In der Simulation wurde vereinfacht angenommen, dass die Kommunikation von Agenten jederzeit gewährleistet ist. In der Praxis kann davon nicht ausgegangen werden, so dass ergänzende Übertragungsverfahren aus den Bereichen Mobile Adhoc-Network (MANET) und Delay Tolerant Network (DTN)

zu integrieren sind. Solche Verfahren sind besonders dann sinnvoll, wenn die Maschinen für eine zuverlässige M2M - Kommunikation zu den bestehenden GSM- und WLAN-Technologien mit mittelweit reichenden Funktechnologien, wie LoRaWAN ausgestattet werden. Die Fähigkeit der implementierten Agenten reduziert sich im entwickelten Ansatz auf die einfache Wahrnehmung der eigenen Situation und Austausch der Situation mit anderen Agenten. Damit ist das Potential der Agententechnologie nur ansatzweise ausgeschöpft. Die Implementierung weiterer Fähigkeiten, etwa um divergierende Interessen von Landwirten und Lohnunternehmern auszugleichen, erfordert eine detailliertere Auseinandersetzung mit der Agententechnologie. In dieser Arbeit wurden keine standardisierten Verfahren zur Agentenkommunikation genutzt. FIPA-ACL liefert hierzu einen umfassenden Ansatz hinsichtlich Sprachakten, Nachrichtentransport, Inhaltsrepräsentation und Verwaltung von Agenten. Auf die konkrete Anbindung von FMS wurde verzichtet. Relevante Funktionen wurden nachimplementiert. Insbesondere die Anbindung von Schlagkartei, Fakturierung und Flotten-Managementsystemen ist erforderlich. Hierzu bietet sich der ISOXML-Standard an.

5.3.2 Organisationszentrierte Ansätze

Der Einsatz von Agenten und die damit verbundene direkte Kommunikation ermöglicht die zunehmende Verlagerung von Entscheidungen auf die Ausführungsebene und somit eine Erhöhung des Grades der Selbstorganisation. Die eingesetzte Technologie schafft die Möglichkeit zur unmittelbaren und qualifizierten Reaktion auf Kontextänderungen. Sie leistet somit einen Beitrag zur Konkretisierung cyberphysikalischer Systeme, wie sie im Kontext der Industrie 4.0 vorgeschlagen werden. Daraus ergeben sich Ansatzpunkte, die praktizierte Organisation zu überdenken. Der steigende Ausstattungsgrad von Sensoren in mobilen Arbeitsmaschinen in Kombination mit zunehmend intelligenten Verhaltensweisen von Agenten oder ähnlichen Technologien erfordert eine intensive Betrachtung datenschutzrechtlicher Aspekte. Häufig wechselnde, die Unternehmensgrenzen überschreitende Zusammenarbeit von Systemen muss der informationellen Selbstbestimmung von Personen und Organisationen Rechnung tragen.

5.3.3 Methodenzentrierte Ansätze

Im Rahmen der Entwicklung der agentenbasierten Simulation und des analytischen Modells – angesiedelt im TPM – ist aufgefallen, dass die Produkti-

onsforschung zahlreiche Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) liefert. Eine explizite Anwendung dieser Methoden in der Landwirtschaft ist kaum zu beobachten. Ursachen sind die geringen Überschneidungen von landwirtschaftlicher und industrieller Forschung und Entwicklung in Hochschulen und Unternehmen. Es erscheint sinnvoll, Methoden wie Kanban und Fortschrittszahlen auf eine Anwendung für landwirtschaftliche Prozesse hin zu untersuchen. In der Automobilindustrie (z.B. BMW) ist zu erkennen, dass Fertigungsleitstände durch Simulatoren ergänzt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, bei Planabweichungen zeitnah neue Konfigurationen zu ermitteln. Dieser Ansatz kann für die Landwirtschaft von großer Bedeutung sein, weil Störungen im Arbeitsumfeld schnell zu Konfigurations- und damit zu Verhaltensänderungen führen können. Die gleichzeitige Anwendung der vorliegenden Simulation und des analytischen Modells liefert hierfür einen ersten Ansatz in der Landwirtschaft.

5.3.4 Fachliche Ansätze

Aus Vereinfachungsgründen wurden nicht alle fachlichen Aspekte in der Arbeit berücksichtigt oder implementiert. Es existieren jedoch teilweise konkrete Vorstellungen für eine fachliche Umsetzung.

- Für den SFH wurde auf dem Feld eine konstante Arbeitsposition angenommen (Eliminierung von Bewegungsmustern), woraus sich konstante Fahrstrecken für die TF ergeben. Typische Situationen im Feld wie Wendevorgänge und unterschiedliche Entfernungen zwischen SFH und Feldzugangspunkten beeinflussen die Fahrtdauer der TF und müssen berücksichtigt werden. Vorarbeiten zur Pfadplanung wurden im Projekt Marion (Abschnitt 2.4.5) gemacht, auf die aufgesetzt werden kann.
- Es wurde von einem konstanten Ertrag ausgegangen. Schwankende Massenströme beim SFH sind deshalb ausschließlich auf verändertes Maschinenverhalten zurück zu führen. Geschätzte Ertragsvariationen müssen für eine Weiterentwicklung, z.B. mit Daten aus der Fernerkundung oder einer Simpson-Verteilung abgebildet werden. Die Anpassung an variierende Ertragsniveaus erfordert Aufwand für die Regelung und beeinflusst das Ergebnis.
- Der Zustand des Wegenetzes und die Befahrbarkeit des Feldes mit den verbundenen Auswirkungen auf die Prozessleistung wurden mit hinterlegten Geschwindigkeitsrestriktionen nur ansatzweise berücksichtigt. Die Nutzung von Realdaten aus Maschinen und die Ermittlung von Trends führen zu einer realitätsnäheren Darstellung von Prozessen.

- Zustandsänderungen wie Änderung von Fahrgeschwindigkeit und Durchsatz wurden vereinfachend als diskret angenommen, d. h. Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge sind nicht modelliert. Schwankende Leistung und damit verbundenes adaptives Verhalten hat ebenfalls Auswirkungen auf den Prozess.
- Die Anzahl TF wurde im laufenden Prozess, d. h. einer einzelnen Instanz innerhalb der Parametervariation, nicht variiert. In der Praxis werden gelegentlich TF entsprechend dem Bedarf hinzugenommen oder fallen weg. Für eine realitätsnahe Steuerung von Prozessen ist diese Option zu berücksichtigen. Eine Betrachtung dieses Aspektes entfällt in dieser Arbeit, weil dadurch die Vergleichbarkeit von Simulationsläufen erschwert wird.
- Bei TF und VF wurde angenommen, dass es keine Varianten in den leistungsbestimmenden Kennwerten gibt. VF und TF sind immer identisch zu sehen. Dies widerspricht der Realität, in der ein Fuhrpark durch Heterogenität geprägt ist. Das mathematische Modell ist hinsichtlich dieser Tatsache vorbereitet. Ergebnisse dazu folgen im Nachgang zu dieser Arbeit.
- Wenn Fahrzeuge gleichen Typs, jedoch mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen zum Einsatz kommen, ergibt sich die Anforderung zur Auswahl des am besten geeigneten Fahrzeugs beim Einfügen oder Entfernen aus der Kette entsprechend der identifizierten Über- oder Unterkapazität. Für eine qualifizierte Entscheidung ist die Erfassung des aktuellen Prozesskontextes und gegebenenfalls eine Prognose erforderlich. Ein Online-Simulator bzw. eine Online-Fähigkeit des mathematischen Modells durch Lieferung von Prozessdaten ist erforderlich.
- Es wurde angenommen, dass TF zu Beginn des Beladungsvorganges leer und zum Ende vollständig befüllt sind. Die jeweils transportierte Masse ist konstant. In der Realität variiert der Befüllungsgrad aufgrund von Fähigkeiten der Maschinenbediener, Gutfeuchte und Häcksellänge. Die tatsächliche Auslastung muss über die Nutzung von Realdaten aus der Ertragsermittlung und ausreichend genaue Kalibrierung des Messsystems sicher gestellt werden.
- Die Auswirkungen der Dimensionierung des Abladeplatzes auf den Prozess (vom Puffer ausgehendes Optimierungspotenzial, Entkoppelungswirkungen) wurden nicht eingehend untersucht. Die konzeptionelle Vergrößerung von Puffern kann helfen, absätzige Prozesse zu entwickeln. Dies ermöglicht bei Berücksichtigung konstruktionstechnischer Aspekte für jede Maschine den optimalen Betriebspunkt und damit minimale Stückkosten. In der Forstwirtschaft wird, wie in der Einleitung erwähnt, durch die strikte Entkoppelung von Teilprozessen (Harvesting, Forwarding, Transport) ein Leistungsniveau

von 65 % erreicht (Bolding 2008). Dieses Niveau kann aufgrund vergleichbarer Umgebungsbedingungen als eine realistische Zielgröße auch für landwirtschaftliche Prozesse gesehen werden. Hierzu ist es jedoch erforderlich, existierende Maschinenkonzepte im Sinne von Cyberphysikalischen Systemen und Schwärmen entsprechend Herlitzius et al. (2011) zu überdenken.

- Verdichtungsleistung und -fortschritt haben starken Einfluss auf das Verhalten von TF und SFH. Wird mehr Erntegut angeliefert, als die eingesetzten VF einlagern können, besteht die Gefahr der ungenügenden Verdichtung mit den beschriebenen Konsequenzen. Für eine quantitative Bestimmung des Verdichtungserfolgs ist eine Online-Dichtebestimmung erforderlich. Solche Sensoren sind bislang nicht verfügbar.
- Ergebnisse von Planungs- und Steuerungsprozessen liegen in Form von strukturierten Datensätzen (Simulation) und visualisierten Kennfeldern (mathematisches Modell) vor. Eine unmittelbare Anwendbarkeit für die Maschinen und deren Bediener ist damit nur eingeschränkt gegeben. Prinzipiell sind zwei miteinander kombinierbare Vorgehensweisen denkbar, manuelle Umsetzung durch den Bediener und automatisierte Umsetzung durch maschinenseitige Regelung. Bei der maschinenseitigen Umsetzung ergeben sich sicherheitsrelevante Fragestellungen, z.B. Änderung der Fahrgeschwindigkeit im Straßenbetrieb. Bei der manuellen Umsetzung müssen Ergebnisse in einfach verständlicher Form (Usability) auf ein Terminal oder mobiles Endgerät (z.B. Smartphone) übermittelt werden. Beide Fälle sind noch nicht implementiert. Die Realisierung einer mobilen Anwendung („App“) ist vorstellbar. CLAAS-Mähdrescher verfügen teilweise über das regelbasierte Einstellsystem CEMOS. Unter der Voraussetzung, dass alle am Prozess beteiligten Maschinen über solche Einstellsysteme verfügen, kann die entwickelte Lösung als verbindendes Element zur Bereitstellung von Soll-Werten gesehen werden.
- Die lokale Optimierung einzelner Maschinen durch dynamische Anpassung von Verhaltensweisen wurde diese in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Die agentenbasierte Simulation ermöglicht hier lediglich Verbesserungen durch manuelle Auswahl geeigneter, konkreter Lösungen aus der Parametervariation oder die Identifikation von anzustrebenden Betriebspunkten in den Kennfeldern. Auf Basis des bestehenden mathematischen Modells erscheint eine Optimierung mittels ganzzahlig linearen Optimierung plausibel.

5.3.5 Übertragung auf andere Anwendungsfelder

Kooperative Arbeitsweisen, insbesondere in logistischen Prozessen, sind nicht nur bei der Ernte von Silomais zentrale Prozess-Bestandteile. Nahezu alle landwirtschaftlichen Verfahren, sowohl der Innenwirtschaft (Stall, Hofstelle) als auch der Außenwirtschaft (Feld, Straße) sind dadurch gekennzeichnet. Auch nicht-landwirtschaftliche Prozesse zeigen bei hinreichendem Abstraktionsgrad durch Betrachtung von Quelle-Senke-Beziehungen, Reduktion von Systemen auf wesentliche Leistungsmerkmale und stark komponentenbasierter Modellierung einen hohen Anteil von Gleichteilen. Vom vorliegenden Anwendungsfall ausgehend erscheint die Übertragung auf den Mähdruschprozess naheliegend, der über eine Anpassung von Zustandsdiagrammen leicht realisierbar ist[1]. Auch die Anwendung in verketteten Prozessen der Fütterung sind leicht vorstellbar, von der Entnahme aus dem Lagerort über die Futtermischstation bis zum Trog. Auch die Umkehrung von Materialflüssen – statt *vom* Feld *zum* Feld – stellt lediglich eine Variante dar. Hier erfolgt auch der Übergang von der Massenstrom- auf die Volumenstrombetrachtung. Ebenso ist die Planung und Steuerung von Prozessen mit Stückgütern möglich, z.B. Ballengüter. Auch eine Übertragung auf Anwendungsfelder außerhalb der Landwirtschaft ist denkbar, so z.B. in die Forst- und Bauwirtschaft sowie in die Bereiche kommunaler Dienstleistungen, Straßentransporte (Spedition) und Fabrikprozesse. Der entwickelte Ansatz ist einfach, plausibel und trotzdem neuartig.

5.4 Bezug zu den eingangs formulierten Zielen

1. Es ist gelungen, die prozess-relevanten Kontexte zu identifizieren und zu systematisieren. Für die Verarbeitung der Kontextinformationen wird mit der entwickelten Systemarchitektur ein schlüssiges Konzept vorgestellt. Die Komponenten nutzen die beschriebenen Wirkmechanismen nur teilweise. Eine umfassende Nutzung sollte Gegenstand einer praxis-orientierten Implementierung sein. Die Berücksichtigung von Kontextinformationen ermöglicht eine für die Prozessanalyse, -planung und -steuerung ausreichend detailgetreue Nachbildung.
2. Die auf der Grundlage der Systemarchitektur entwickelte agenten-basierte Simulation liefert für gegebene Randbedingungen eine detailreiche Prozessbeschreibung. Weiterhin liefert sie alternative Konfigurationen und

[1] Hierbei ist jedoch der Einfluss des Massenstroms auf die Druschqualität besonders zu beachten.

Verhaltensweisen, die ein bestimmtes Leistungsniveau kennzeichnen. Ein als Ergänzung zu sehendes analytisches Modell beschreibt in funktionaler Weise die Grenzen der Simulation und vereinfacht die Planung und Analyse.

3. Die bislang qualitative, erfahrungsbasierte Planung und Steuerung von Prozessen wurde um eine quantitative Methode ergänzt. Für ein angestrebtes Leistungsniveau werden alternative Lösungen ermittelt, aus denen sich kosten- und zeit-minimale Konfigurationen und Verhaltensweisen wählen lassen. Die Bestimmung relativer Niveaus von Ernteleistung und Wartezeit ermöglicht die Anpassung an individuelle Prozessumgebungen. Der Erfolg eines ausgeführten Prozesses hängt damit noch immer von der individuellen Einschätzung des Anwenders ab. Jedoch verbessert sich die Entscheidungsgrundlage. Das angestrebte Ergebnis und der Weg dahin lassen sich jedoch wesentlich präziser beschreiben.
4. Für den Anwendungsfall Erntekette Silomais wurde eine abstrakte Modellierung von Arbeitsmaschinen, Fahrsilo, Abladeplatz und Fahrstrecken angestrebt. Durch die Reduktion von Kennzahlen auf relative Leistung, relative Wartezeit und Stückkosten ist es möglich, beliebige Maschinen und Teilprozesse in Bezug zu setzen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, modellierte Prozesse um weitere absätzige oder simultane Teilprozesse, z.B. Infield-Transport, zu ergänzen. Auch die Hinzunahme neuer Teilprozesse wie Wiegen ist möglich. Schließlich ist es für die Modellierung unerheblich, welche Art von Gütern im Prozess und in welcher Richtung diese transportiert werden. Die vorgestellte Methode unterstützt die Konzeption völlig neuer Szenarien, aus denen Anforderungen an neue Maschinenkonzepte (z.B. Zerlegung in Funktionsbestandteile) ableitbar sind, so z.B. für landwirtschaftliche Prozessen, die durch autonome Systeme im Schwarm ausgeführt werden. Das Modell kann mit geringem Aufwand auch für die Getreideernte, Ballen-Logistik oder Gülle-Logistik angewendet werden. Auch eine Anwendung für nicht-landwirtschaftliche Prozesse ist möglich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Beim Einsatz mobiler Arbeitsmaschinen in der Landwirtschaft ist – insbesondere in Mechanisierungsketten – zu beobachten, dass installierte und realisierte bzw. realisierbare Leistung signifikant auseinanderfallen. Große Teile der mit einer Investition geschaffenen Kapazität werden nicht realisiert. Leistungswettbewerbe und Versuche unter Idealbedingungen liefern Indikatoren für die Leistungsfähigkeit einzelner Maschinen oder Ketten. Die vorliegende Arbeit untersucht diese Leistungslücke, zeigt am Beispiel des Ernteprozesses von Silomais Wege zur präzisen Beschreibung auf und legt darauf aufbauend Methoden zur Reduzierung dieser Lücke dar. Wesentliche Ursachen für die Lücke sind der geringe Determinismus und die teilweise hohe Dynamik von Merkmalen in der Arbeitsumgebung. Auch mit viel Erfahrung ist es problematisch, Zeitpunkt und Ausmaß von Veränderungen abzuschätzen. Die Fähigkeit zur Anpassung an dynamische Umgebungsbedingungen ist ein wesentlicher Faktor für erfolgreiche Prozesse.

Hierfür ist eine systematische Auseinandersetzung mit dem Kontextbegriff erforderlich. In dieser Arbeit wurden Prozesskontexte systematisch beschrieben, strukturiert und in einem universell anwendbaren Kontextmodell dargestellt. Aus dem Kontextmodell wurden Komponenten abgeleitet, die kontext-basierte Handlungsweisen ermöglichen. Diese Komponenten wurden in einer Systemarchitektur konzeptuell zusammen geführt.

Zur Veranschaulichung des Wirkprinzips wurden die Systemarchitektur und die Arbeitsmaschinen in Form einer agentenbasierten Simulation implementiert. Jeder Teilprozess wurde zustandsorientiert modelliert und die Agenten mit Kosten-/Leistungsfunktionen versehen. Die Funktionen wurden aus Prozessdaten realer Maschinen ermittelt. Mittels Parametervariation wurden Konfigurationen, Verhaltensweisen und Stückkosten für beobachtete Leistungsspektren ermittelt. Ergänzend wurde ein mathematisch-analytisches Modell entwickelt, das eine Ergebnisdarstellung in Form universell anwendbarer Kennfelder ermöglicht.

Das vorliegende Ergebnis ermöglicht in Ergänzung zu erfahrungsbasierten Handlungsweisen eine auf quantitativer Basis abgestützte Planung und Steuerung von Prozessen. Für jedes Leistungsniveau lassen sich konkrete Konfigurationen und Verhaltensweisen errechnen. Die anschauliche Darstellung von Kapazitätsgrenzen ermöglicht die Auswahl robuster Konfigurationen. Die Methode liefert keine Aussagen darüber, ob ein gewünschtes Leistungsniveau tatsächlich realisierbar ist. Falls der Anwender aufgrund seines Erfahrungswissens ein bestimmtes Leistungsniveau für realistisch hält, gibt die entwickelte Methode detaillierte Hinweise, wie es zu erreichen ist.

Die entwickelte Methode ist mit ihren Konzepten und dem erreichten Implementierungsstand in der Lage, einen Funktionsnachweis zu liefern. Für eine Anwendung unter Praxisbedingungen sind jedoch zahlreiche weitere Faktoren zu berücksichtigen, so z.B. variable Erträge, Transportfahrzeuge mit unterschiedlichen Ladekapazitäten, Verdichtungsfahrzeuge mit unterschiedlichen Massen.

Auf Basis der hier geschaffenen Grundlage lassen sich neue kooperative Prozesse modellieren, planen und steuern. Ein wesentlicher und erforderlicher Schritt ist die Schaffung eines aufbauenden Optimierungsverfahrens sowie einer Implementierung, die den Bedürfnissen potenzieller Anwender gerecht wird. Im Mittelpunkt steht nicht die ingenieurmäßige Verbesserung von einzelnen mechatronischen Systemen sondern die mit ihnen ausgeführten, verketteten Prozesse sowie die Menschen als Bediener der Systeme.

Mit dieser Arbeit wird erstmals eine universell einsetzbare, quantitative Methode zur Planung und Steuerung mobiler, landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen in Mechanisierungsketten jeglicher Art geliefert.

Literaturverzeichnis

11783, I. (2011). Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network.

11786, I. (1995). Agricultural tractors and machinery, Tractor-mounted sensor interface.

13757-4, D. (2014). Kommunikationssysteme für Zähler und deren Fernablesung.

19107, I. (2003). Geographic Information: Temporal schema.

19111, I. (2011). Geographic information - spatial referencing by coordinates: Information géographique - systeme de références spatiales par coordonnées.

730-1, I. (1994). Agricultural wheeled tractors: Rear-mounted three-point linkage.

Achilles, W. (2010). *Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11: Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 22 edition.

Adolph, J. (2006). *Überlegungen zum Thema Energiemais*. Berlin: TCON Biogas CH4.

AEF (2015). Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF). `http://www.aef-online.org/`. letzter Zugriff 21.6.2015.

Anylogic (2012). AnyLogic Professional 6.9. `http://www.anylogic.com`. Zugriff am 26.07.2012.

Ashby, W. R. (1962). Principles of the self-organizing system. In H. von Foerster & G. W. Zopf (Eds.), *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium* (pp. 255–278). London: Pergamon Press.

Auernhammer, H. (2002). The Role of Mechatronics in Crop Product Traceability. *CIGR Journal of Scientific Research and Development*.

BAdW (2015). Das Digitale Wörterbuch der deutschen Sprache. `http://www.dwds.de/?qu=System`. Zugriff am 25.06.2014.

Balzert, H. (2005). *Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf mit der UML 2*. Lehrbücher der Informatik. Heidelberg: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 2 edition.

Baszenski, N. (2012). *Methodensammlung zur Unternehmensprozessoptimierung.* ifaa-Taschenbuchreihe. Köln: Wirtschaftsverlag Bachem, 4 edition.

Beeker, W. (2003). *Untersuchung zur Nacherwärmung von Maissilage, Erntejahr 2002.* PhD thesis, Fachhochschule Südwestfalen, Soest.

Böhler, T. (2016). Wenn das MES mit der Simulation spricht. `http://www.produktion.de/technik/it/wenn-das-mes-mit-der-simulation-spricht-311.html`. Zugriff am 23.06.2016.

Blackmore, S. (2009). New concepts in agricultural automation. In *Proceedings of HGCA Conference on Precision in arable Farming – Current Practice and Future Potential* (pp. 28–39). Thessaly, Greece.

Blackmore, S. & Apostolodi, K. (2011). FUTUREFARM: Project Final Report. `http://www.futurefarm.eu/system/files/FFD8.9_Final_Report_4.1_Final_0.pdf`. Letzter Zugriff 3.12.2013.

Blanchard, B. S. (1997). An enhanced approach for implementing total productive maintenance in the manufacturing environment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(2), 69–80.

BMELV (2012). *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2012.* Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

BMJV (2012). Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung: EBO.

BMJV (2013). Straßenverkehrsordnung: StVO.

Bolding, M. C. (2008). Increasing forestry machine utilization. *Sawmill and Woodlot*, (pp. 22–27).

Bossel, H. (2004). *Systeme Dynamik Simulation – Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme.* Norderstedt: Books on Demand.

Bund (2008). SAGA: Standards und Architekturen für E-Government-Anwendungen. `http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/SAGA/SAGA%205-aktuelle%20Version/saga_5_aktuelle_version_node.html`. Zugriff am 26.06.2014.

Buschmann, F., Meunier, R., Rohnert, H., & Sommerlad, P. (1996). *Pattern-oriented software architecture: A System of Patterns.* Chichester: Wiley, 1 edition.

Çakar, E. (2007). Towards a Quantitative Notion of Self-Organisation. In *Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 4222–4229). IEE.

Chase, R. B., Jacobs, F. R., & J., A. N. (2007). *Operations Management for Competetive Advantage*. McGraw-Hill.

CMU (2014). Glossary. `http://www.sei.cmu.edu/architecture/start/glossary/`. Letzter Zugriff 26.06.2014.

Committee on Assessing Crop Yield: Site-Specific Farming, I. S. & Research Opportunities, N. R. C. (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: The National Academies Press.

Deter, A. (2011). top agrar online - Claas nimmt New Holland Weltrekord wieder ab. `http://www.topagrar.com/news/Technik-News-Claas-nimmt-New-Holland-Weltrekord-wieder-ab-628364.html`. Letzter Zugriff 5.2.2012.

Dey, A. K. (2000). *Providing Architectural Support for Building Context-Aware Applications*. Georgia Institute of Technology.

Dey, A. K. & Abowd, G. D. (2000). Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In *CHI 2000 - The Future is Here*.

DFKI (2013). Datenschutzaspekte bei Dienstleistungen im Pflanzenbau: Studie unter Mitarbeit des Unabhängigen Landeszentrum für Datenschutz Schleswig-Holstein. `http://www.igreen-projekt.de/iGreen/fileadmin/_migrated/content_uploads/Datenschutzaspekte_bei_Dienstleistungen_im_Pflanzenbau_03.pdf`. Letzter Zugriff 15.3.2014.

DIN (2006). Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: International electrotechnical vocabulary.

Ebers, M. & Gotsch, W. (2006). Institutionenökonomische Theorien der Organisation. In A. Kieser & M. Ebers (Eds.), *Organisationstheorien* (pp. 247–308). Stuttgart: Kohlhammer.

Eclipse (2014). Rich Client Platform - Eclipsepedia.

EEG (2012). Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz): EEG.

Egenhofer, M. J. (1998). A Model for Detailed Binary Topological Relationships.

Eickenbusch, H., Hoffknecht, A., Holtmannspötter, D., & Wechsler, D. (2005). *Technologiefrüherkennung: Kontrollierte Selbstorganisation für zukünftige technische Anwendungen*. Düsseldorf: VDI.

Ellinger, T. & Haupt, R. (1990). *Produktions- und Kostentheorie*, volume 111 of *Sammlung Poeschel*. Stuttgart: Poeschel, 2., neu bearb. aufl edition.

Ellul, C. & Haklay, M. M. (2010). Using a B-Rep Structure to Query 9-Intersection Topological Relationships in 3D GIS – Reviewing the Approach and Improving Performance. In *5th International 3D GeoInfo Conference* (pp. 127–151).

Engelhardt, D. (2002). *Transportfahrzeuge im Agrarbereich*. PhD thesis, Justus-Liebig-Universität, Gießen.

Engels, G. (2014). Definition: Modellierungssprache. In N. Gronau, J. Becker, N. Leimeister, E. Sinz, & L. Suhl (Eds.), *Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik, Stichwort: Modellierungssprache: Online-Lexikon*. Potsdam: Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Universität Potsdam.

EWG (1985). 85/377/EWG: Entscheidung der Kommission vom 7. Juni 1985 zur Errichtung eines gemeinschaftlichen Klassifizierungssystems der landwirtschaftlichen Betriebe. In *Amtsblatt L 220/85*. Europäische Kommission.

FAO (2007). Agricultural Information Management Standards (AIMS). `http://aims.fao.org/standards/agrovoc/functionalities/hierarchy`. Letzter Zugriff 20.7.2012.

Farley, B. G. & Clark, W. A. (1954). Simulation of self-organizing systems by digital computer. In *Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory*, volume 4 (pp. 76–84).: IEEE.

Feiffer, A. (2004). Großversuch mit dem CR 980: Einfluss des YARA N-Sensors auf die Mähdrescherleistung. `http://www.agricon.de/nc/unternehmen/downloads/produkte?cid=22/&did=393/&sechash=66a2fad0`, Sondershausen. Letzter Zugriff 13.1.2012.

Füller, M., Nüßer, W., & Rustemeyer, T. (2012). Context driven process selection and integration of mobile and pervasive systems. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(3), 467–482.

FNR (2013a). *Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland für die Jahre 2012/2013*. Technical report, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

FNR (2013b). *Basisdaten Bioenergie Deutschland: August 2013*. Technical report, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

FNR (2013c). *Maisanbau in Deutschland*. Technical report, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Francois, A., Raffin, R., & Daniel, M. (2010). Geometric data structures and analysis in gis: Iso 19107 case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 115–120.

Frank, U., Giese, H., Klein, F., Oberschelp, O., Schmidt, A., Schulz, B., Vöcking, H., & Witting, K. (2004). *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus: Definitionen und Konzepte*, volume 155 of *HNI-Verlagsschriftenreihe*. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst.

Gabler (2014). Geographic Information Technology Training Alliance. `http://wirtschaftslexikon.gabler.de`. Letzter Zugriff 21.6.2015.

Gerber, A. & Klusch, M. (2004). Agricola - agenten für mobile planungsdienste in der landwirtschaft. *KI - Künstliche Intelligenz, German Journal on Artificial Intelligence - Organ des Fachbereiches "Künstliche Intelligenz"der Gesellschaft für Informatik e.V. (KI)*, 1/2004, 38–42.

GITTA (2017). Gabler Wirtschaftslexikon. `http://www.gitta.info/SpatialQueries/de/html/TopoBasedOps_learningObject1.html`. Letzter Zugriff 15.2.2017.

Goldwasser, S., Micali, S., & Rackoff, C. (1989). The Knowledge Complexity of Interactive Proof Systems. In *SIAM Journal on Computing*, volume 18(1) (pp. 186–208). Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Granot, R. (2001). Telerobotics a new paradigm. International Symposium on Mechatronics: The Challenges of the new Millenium in Research and Education Budapest.

Griepentrog, H. W. (2011). Smart Farming: Praxisreife Lösungen, Erfordernisse und Techniken für morgen. Pressemitteilung.

Gutenberg, E. (1975). *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*, volume 1 of *Die Wirtschaftswissenschaften A*. Wiesbaden: Gabler.

Haffert, A. (2003). *Der Schnittvorgang in einem selbstfahrenden Feldhäcksler: Dissertation*. Forschungsberichte des Instituts fär Landmaschinen und Fluidtechnik. Shaker.

Hansen, R. (2002). *Overall Equipment Effectiveness*. South Norwalk: Industrial Press.

Hartmann, S. (2004). Simulation. In J. Mittelstrass, S. Blasche, G. Wolters, & M. Carrier (Eds.), *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, volume 3 (pp. 807–809). Stuttgart: Metzler.

Herlitzius, T., Mueller, H., Kranke, G., Wittig, H., & Wolf, J. (2011). Concept Study of a Self Propelled Harvester versus a Modular System. In *Tagung Landtechnik 2011*, VDI-Bericht 2124 Düsseldorf: VDI-Verlag.

Herrmann, C., Heiermann, M., Idler, C., & Hertwig, F. (2009). Einfluss von Trockenmassegehalt (Abreife), Häcksellänge und Silierung auf die Biogasausbeute von Mais. In F. J. Schwarz (Ed.), *Optimierung des Futterwertes von Mais und Maisprodukten*, volume 331 of *Landbauforschung Sonderheft* (pp. 87–105). Braunschweig: vTI.

Hoffmann, T., Berg, W., & Prochnow, A. (2014). Futtereinlagerung im Fahrsilo - Anforderungen und Lösungen. In Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V. (Ed.), *Verfahren und Technik fär die Futterernte* (pp. 57–66). Frankfurt am Main: DLG-Verlag.

Hong, J., Suh, E., & Kim, S. (2009). Context-aware systems: A literature review and classification. In *Expert Systems with Applications* Oxford: Elsevier.

Honig, H. (1987). Gärbiologische Voraussetzungen zur Gewinnung qualitätsreicher Anwelksilage. In *Grünfutterernte und -konservierung*, volume 318 (pp. 47–58). Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Honig, H. (1991). Reducing losses during storage and unloading of silage. In G. Pahlow & H. Honig. (Eds.), *Proc. of a conference on Forage Conservation towards 2000* (pp. 116–128). Braunschweig: Thünen-Institut.

Horsch (2004). Weltrekord im Combiseeding.

Hu, X. (2011). Dynamic Data Driven Simulation. *SCS M&S Magazine*, 1, 16–22.

Hunt, D. (2001). *Farm power and machinery management*. Iowa City: Iowa State University Press.

IEC 42010:2011 (2011). Systems and software engineering - Architecture description.

IEC 60050 (1999). Automatisierungstechnik: Identisch mit IEC 60050-351:1998-09 = automatic control.

IEC61512 (1997). Batch control - Part 1: Models and terminology.

IGBAU (2015). Landwirtschaft: Deutliches Lohnplus. `https://www.igbau.de/Landwirtschaft_Deutliches_Lohnplus.html`. Zugriff am 01.04.2015.

iMatix Corporation (2014). ZeroMQ Code Connected. `http://zeromq.org/`. Zugriff am 20.03.2015.

Jain, R. (2011). Introduction to Simulation. `http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/k_24its.htm`. Zugriff am 22.1.2013.

Kalk, W.-D. & Hülsbergen, K.-J. (1999). Dieselkraftstoffeinasatz in der Pflanzenproduktion. In *Landtechnik*, volume 54 (pp. 332–333). Darmstadt.

Kennedy, R. (2005). Introduction to TPM and TPM^3. `http://www.ctpm.org.au/system/files/download/o26/Introduction_to_TPM_and_TPM3.pdf`, Wollongong. Zugriff am 05.05.2015.

Kersting, T. (2011). *Gruppenidentifikation in dynamischen Umgebungen*. Paderborn: Fachhochschule der Wirtschaft.

Koch, S. (2011). *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen: Six Sigma, Kaizen und TQM*. Berlin und Heidelberg: Springer.

Kotz, D. (2008). A Survey of Context-Aware Mobile Computing Research. In *Dartmouth Computer Science Technical Report TR2000-381* Dartmouth: Dartmouth College.

Kowalewsky, H.-H. (2011). Schlepper, Unimog und Lkw im Vergleichstest. In *Biogas Journal*, volume 4 (pp. 44–50). Freising: Fachverband Biogas e.V.

KTBL (2006). agroXML. `http://www.agroxml.de/index.php`. Zugriff am 05.07.2012.

KTBL (2015). MaKost. `http://daten.ktbl.de/makost/`. Zugriff am 30.03.2015.

Kutzbach, H. D. (2001). Mähdrescher. In H. J. Matthies & F. Meier (Eds.), *Jahrbuch Agrartechnik*, volume 13. Münster: Landwirtschaftsverlag.

Kutzbach, H. D., Wacker, P., & Böttinger, S. (2006). Mähdrescher. In H.-H. Harms & F. Meier (Eds.), *Jahrbuch Agrartechnik*, volume 18 (pp. 143–153). Münster: Landwirtschaftsverlag.

Leachman, R. C. (1997). Closed loop measurement of equipment efficiency and equipment capacity. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 10(1), 84–97.

Lee, M. D. & Shahidul, M. I. (2013). An approach to optimize machinery capacity utilization for sustainable manufacturing performance. *Journal of Manufacturing, Operations Research and Sustainability*, 1(2), 21–32.

Lowenberg-De Boer, J. & Boehlje, M. (1996). Revolution, Evolution or Dead End: Economic Perspectives on Precision Agriculture. In P. C. Robert & R. H. Rust (Eds.), *Proceedings of the third international conference on precision agriculture, June 23-26, 1996 Minneapolis, Minnesota*. Madison und Wisc: ASA.

Luhmann, N. (2012). *Soziale Systeme: Grundriss einer allgemeinen Theorie*, volume 666. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 15 edition.

LWK-NRW (2013). Damit die Rechnung stimmt. In *Landwirtschaftliches Wochenblatt*, volume 18 (pp. 21–23). Münster: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.

Mark, D. M., Chrisman, N., Frank, A. U., McHaffie, P. H., & Pickles, J. (1997). The GIS History Project.

May, C. & Koch, A. (2008). Overall Equipment Effectiveness (OEE) - Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. *Zeitschrift der Unternehmensberatung (ZuB)*, 6, 245–250.

The Open Group (2010). *The Open Group Architecture Framework TOGAF Version 9*. Zaltbommel: Van Haren Publishing.

McKone, K. E. & Schroeder, R. G. (1999). Total Productive Maintenance: A contextual View. *Journal of Operations Management 17*, 17, 123–144.

Meyer, A., Kormann, G., Rusch, C., & Grothaus, H.-P. (2012). Entwicklung und Standardisierung einer herstellerübergreifenden drahtlosen Kommunikation im Forschungsprojekt iGreen. In *Land.Technik 2012*, volume 2173 of *VDI-Berichte* (pp. 103–109). Düsseldorf: VDI-Verlag.

Mitterleitner, H., Schilcher, A., & Demmel, M. (2007). NawaRo-Transport: Konzepte zur Reduzierung der Kosten beim Transport von nachwachsenden Rohstoffen für Biogasanlagen. Freising-Weihenstephan.

Moitzi, G., Refenner, K., Weingartmann, H., & Boxberger, J. (2008). Kraftstoffverbrauch beim landwirtschaftlichen Transport. *Landtechnik*, 63(5), 284–285.

Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge: Productivity Press.

Nicolis, G. & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structure to order through fluctuations*. A Wiley-Interscience publication. New York: Wiley.

Niemeyer, G. (1977). *Kybernetische System- und Modelltheorie: System dynamics*. München: Vahlen.

NMELV (2012). *Biogas in Niedersachsen: Entwicklung, Stand und Perspektiven*. Technical report, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft Verbraucherschutz, Hannover.

Nußbaum, H. (2006). Auswahl von Siliermitteln der Wirkungsrichtung 2 zur Verbesserung der aeroben Stabilität. In DLG Bundesarbeitskreis Futterkonservierung (Ed.), *Praxishandbuch Futterkonservierung* (pp. 197–201). Frankfurt am Main: DLG-Verlag.

Nußbaum, H. (2010). Top-Silomais von der Ernte bis in den Trog. *Innovation*, 3, 20.

Nußbaum, H. (2011a). *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*. Frankfurt/Main: DLG-Verlag, 8 edition.

Nußbaum, H. (2011b). Silagelagerung. In D.-B. Futterkonservierung (Ed.), *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung* (pp. 97–120). Frankfurt/Main: DLG-Verlag.

Nwana, H. S. (1996). Software Agents: An Overview. *The Knowledge Engineering Review*, 11(3), 205–244.

Nyhuis, P. & Wiendahl, H.-P. (2012). *Logistische Kennlinien.* Berlin: Springer.

Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action.* The Political economy of institutions and decisions. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

Page, E. H. (1995). *Simulation modeling methodology: Principles and etiology of decision support.* Virginia Polytechnic Institute and State University.

Pfeifer, W. (1997). *Etymologisches Wörterbuch des Deutschen.* München: Dt. Taschenbuch Verlag.

Pierce, F., Nowak, P., & Roberts, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. In *Advances in Agronomy*, volume 67 (pp. 1 – 85). Oxford: Elsevier.

Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance.* New York: Free Press.

Probst, G. (1987). *Selbst-Organisation: Ordnungsprozesse in sozialen Systemen aus ganzheitlicher Sicht.* Berlin: Parey.

Quindt, J., Reetz, E., Kukuck, V., Tönjes, R., & Westerkamp, C. (2011). Agent Based Decision Support System for Optimizing Logistical Processes in Agricultural Production. In *9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2011* Lisbon: IEEE.

REFA (1997). *Datenermittlung*, volume REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation of *Methodenlehre der Betriebsorganisation.* München: Hanser.

Reinecke, M., Grothaus, H.-P., Hembach, G., Scheuren, S., & Hartanto, R. (2013). Dynamic and distributed Infield-Planning System for Harvesting. In *2013 Kansas City, Missouri, July 21 - July 24, 2013.*

Richter, W., Zimmermann, M., Abriel, M., Schuster, M., Kölln-Höllrigl, K., Ostertag, J., Bauer, J., & Spiekers, H. (2009). Hygiene bayerischer Silagen – Controlling am Silo. Freising-Weihenstephan.

Rising, L. (2000). *The pattern almanac 2000.* Software patterns series. Boston, Mass: Addison-Wesley.

Rößl, G., Thurner, S., & Ostertag, J. (2010). Vergleich Verdichterrad - Radlader bei der Maissilageernte 2010 in Grub.

Rudolph, M. (1988). Energy savings in the manufacture of crankshafts – an example of integrated analysis based on detailed measurements. In *Energy Efficiency in Industry* (pp. 28–36). London: CRC Press.

Rusch, C., Horster, B., Großmann, U., & Gansemer, S. (2013). M2M-Teledesk - Manufacturer independent telemetry solution for agricultural machinery. In *Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions*, volume 2193 of *VDI-Berichte* (pp. 307–313). Düsseldorf: VDI-Verlag.

Scherer, G. (2006). Kritik der Organisation oder Organisation der Kritik? - Wissenschaftstheoretische Bemerkungen zum kritischen Umgang mit Organisationstheorien. In A. Kieser & M. Ebers (Eds.), *Organisationstheorien* (pp. 19–61). Stuttgart: Kohlhammer.

Siegwart, G. (2004). System. In J. Mittelstraß, S. Blasche, G. Wolters, & M. Carrier (Eds.), *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, volume 4 (pp. 183–185). Stuttgart: Metzler.

Singh, A. K. (2007). Precision Farming. `http://www.iasri.res.in/ebook/EBADAT/6-Other%20Useful%20Techniques/14-Precision%20Farming%20Lecture.pdf`. Letzter Zugriff 14.06.2012.

Spath, C. (2009). *Simulationen - Begriffsgeschichte, Abgrenzung und Darstellung in der wissenschafts- und technikhistorischen Forschungsliteratur*. PhD thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Stahlknecht, P. & Hasenkamp, U. (2003). *Einführung in die Wirtschaftsinformatik*. Berlin: Springer, 10 edition.

Steckel, T. (2008). Verfahren zur Steuerung der Verdichtung eines landwirtschaftlichen Guts in einem Fahr- bzw. Flachsilo und Verdichtungsfahrzeug. Patentschrift DE102008063852A1.

Steckel, T. (2011). Verbundvorhaben Robot2business - Informationstechnische Integration teilautonomer, mobiler Maschinen und Prozesse in Geschäfts- und Dienstleistungsmodellen (r2b): Teilvorhaben: Selbstorganisation und teilautonome Funktionen in der Grünfutterernte. BMWi Projektschlussbericht.

Steckel, T., Griepentrog, H. W., & Volz, F. (2016). Schwachstellen der Häckselkette. In *Eilbote* (pp. 9–11). Winsen/Luhe: Boomgarden Verlag.

Steckel, T., Grothaus, H.-P., & Lange, U. (2006). Verbundvorhaben INA - Integrierte, multimedial gestützte Agrardienstleistungen in virtuellen Strukturen. BMWi Projektschlussbericht.

Steckel, T., Loeser, C., & Trunko, R. (2009). Increasing Productivity in Agriculture using Context-aware and Self-organizing Systems. In *ASABE 2009 – Annual International Meeting*: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Streit, U. (2005). Einführung in die Geoinformatik. `http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geoinformatik/frames/fsteuer.htm`. Zugriff am 26.4.2013.

Strobl, M. (2012). Biomasse-Ernte-Logistik (BEL): Planzahlen, Methoden und Anwendung für den Praxiseinsatz. `http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/44297/linkurl_0_2.pdf`. Zugriff am 4.11.2013.

Strube, G. (1998). Modelling Motivation and Action Control in Cognitive Systems. In U. Schmid (Ed.), *Mind modelling* (pp. 89–108).: Pabst.

Syriakow, M. (2003). *Web- und Komponenten Technologien in der Modellierung und Simulation: Habilitationsschrift.* Karlsruhe: Universität Karlsruhe.

Taylor, F. W. (1967). *The principles of scientific management.* New York: Norton.

Tölle, R., Häbler, J., & Hahn, J. (2009). Gute Verdichtung im Silo – der Schlüssel zu hoher Konservatqualität. In *Bornimer Agrartechnische Berichte*, volume 68. Potsdam-Bornim: Leibnitz-Institut für Agrartechnik.

Urfell, J. & Nußbaum, H. (2010). DLG-Prüfbericht 5936F. Groß-Umstadt.

Werner, A. (2008). Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung - pre agro II: Abschlussbericht. Müncheberg.

Wiedemann, S. (2014). Telematikplattform ESX-TC3.

Williamson, O. E. (2010). *The economic institutions of capitalism: Firms, markets, relational contracting.* New York, NY: Free Press.

Winkler, B. & Frisch, J. (2014). Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. In L.-I. für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V

(Ed.), *19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau*, volume 83 of *Bornimer Agrartechnische Berichte* (pp. 14–21).

Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. Chichester: Wiley, 2 edition.

Zachman, J. A. (2014). The Zachman Framework for Enterprise Architecture. `http://www.zachman.com/about-the-zachman-framework`. Zugriff am 26.06.2014.

Anhang

Anhang zum Kapitel *Stand der Forschung und der Technik*

Tab. 6.1: Grundlegende Typen topologischer Beziehungen für ausgewählte Geoobjekte nach GITTA (2017)

disjoint	2 Objekte teilen keine gemeinsame Position	$\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	
meet	2 Objekte berühren sich und teilen mind. 1 nach außen begrenzenden Punkt	$\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	
overlap	2 Objekte überlappen sich. Teile eines Objektes befinden sich im Koordinatenraum des anderen Objektes	$\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	
contains	Ein Objekt ist vollständig im Koordinatenraum des anderen Objektes enthalten	$\neg\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	
covers	Ein Objekt wird durch ein anderes Objekt völlig abgedeckt, teilt sich aber mind. einen nach außen begrenzenden Punkt	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\emptyset$ $\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	
equal	2 Objekte sind identisch	$\neg\emptyset$ $\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	$\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$ $\neg\emptyset$	

Anhang zum Kapitel *Material und Methoden*

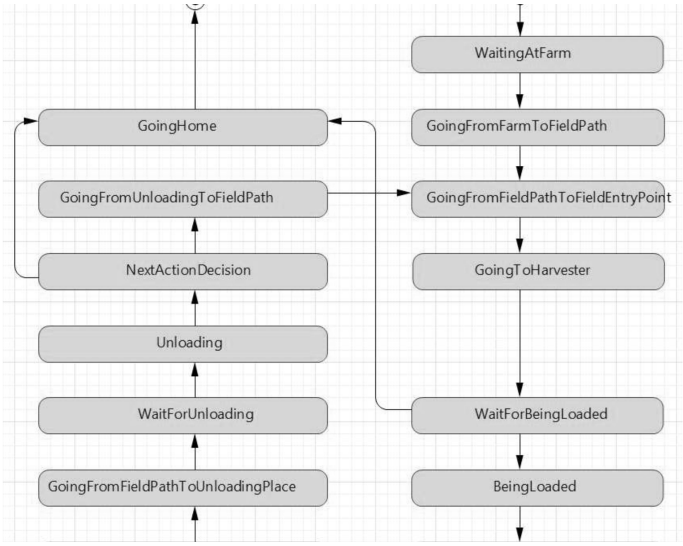


Abb. 6.1: Zustandsdiagramm für Teilprozess Transport

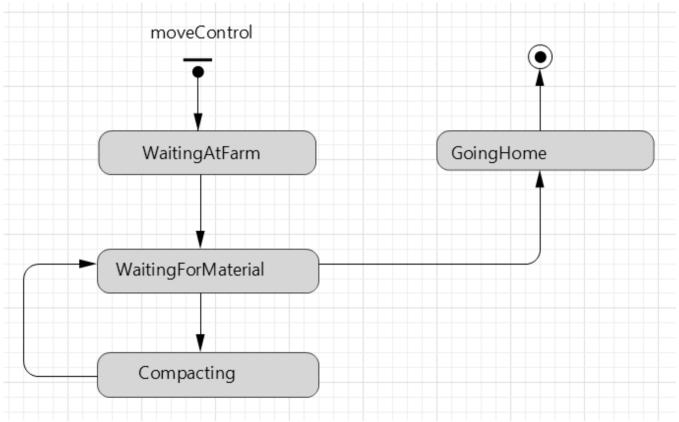


Abb. 6.2: Zustandsdiagramm für Teilprozess Verdichten

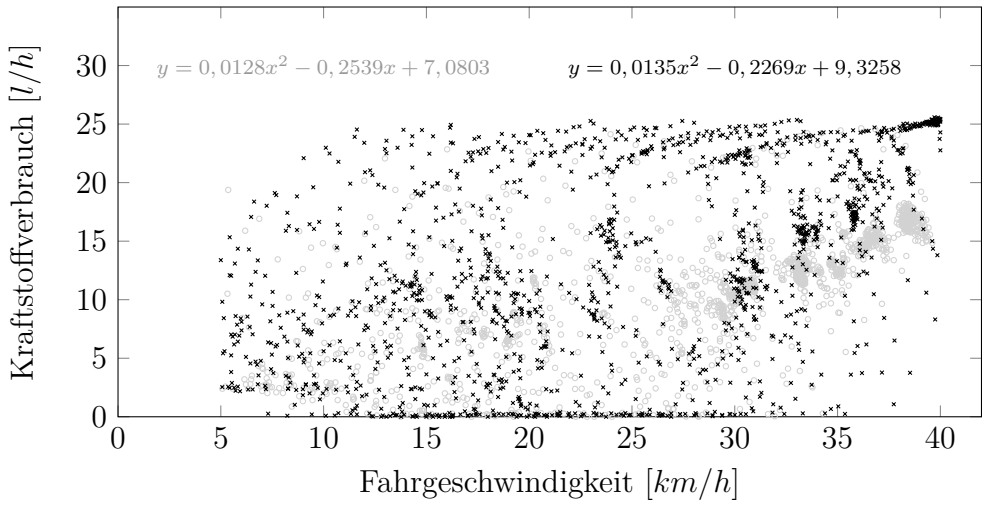


Abb. 6.3: Kraftstoffverbrauch der Transportfahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Beladungszustand; Darstellung der Rohdaten

Anhang zum Kapitel *Ergebnisse*

Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 85 %

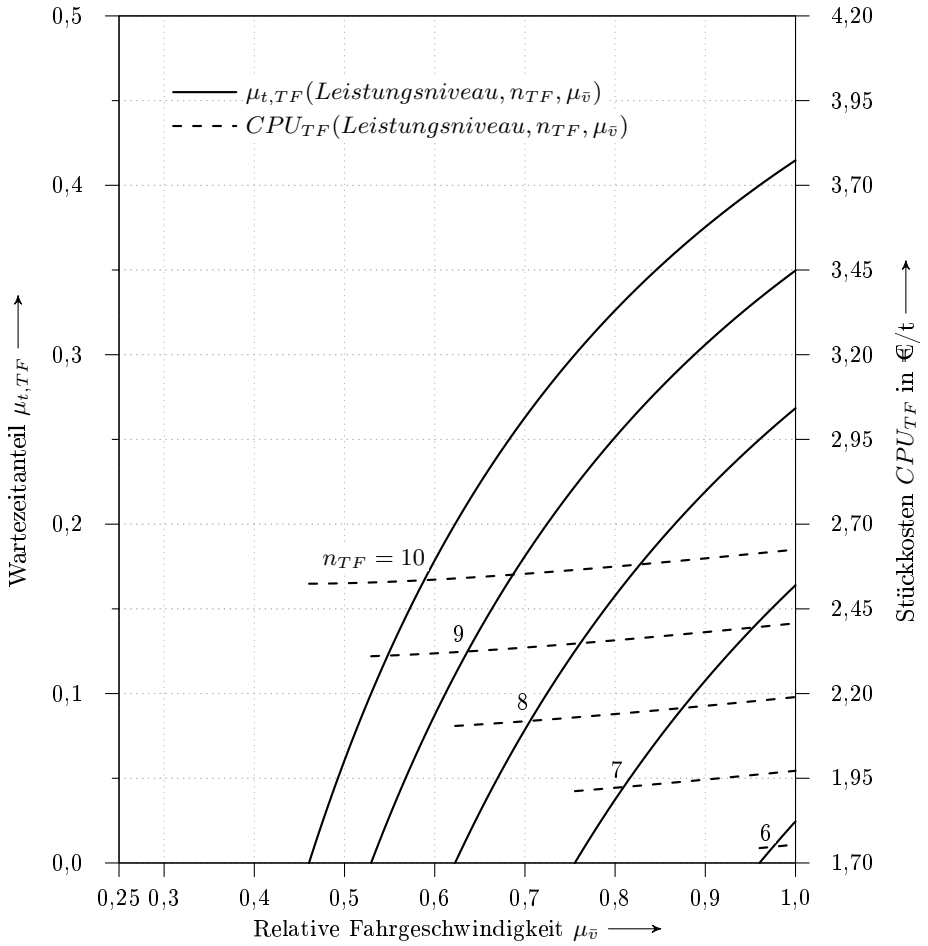


Abb. 6.4: Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 85 %

Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 100 %

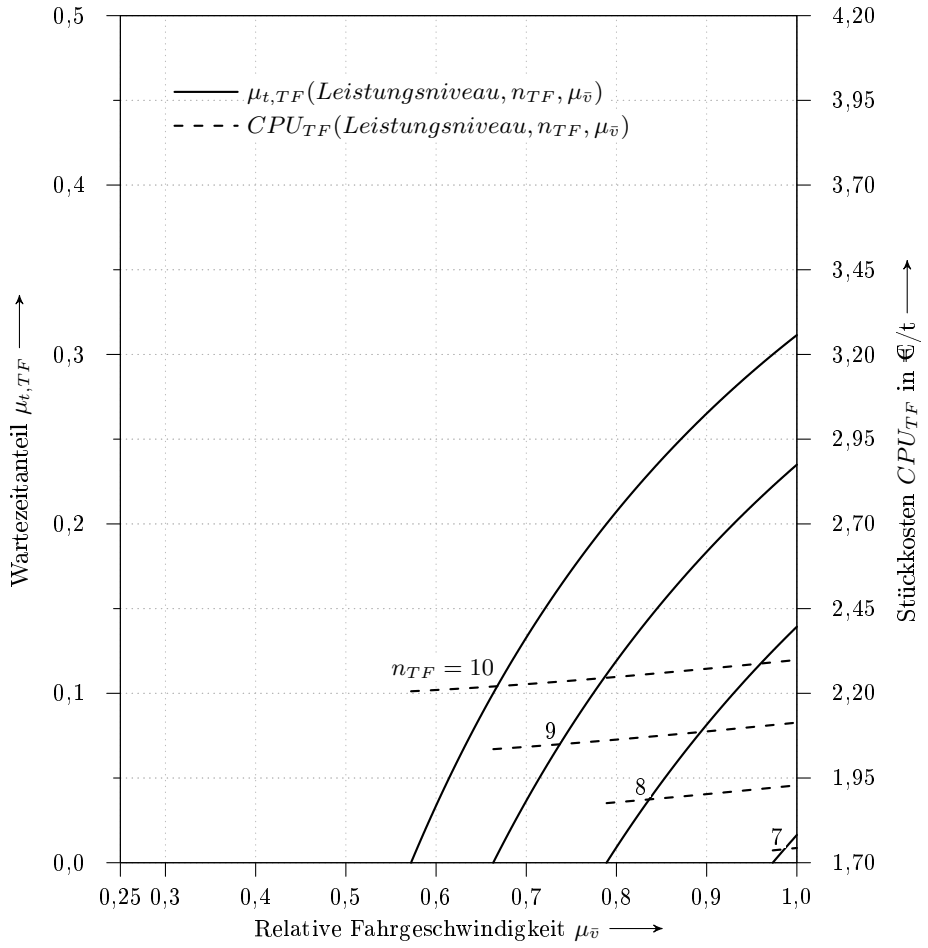


Abb. 6.5: Kennlinien für den Teilprozess Transport auf dem Niveau 100 %

Anhang zum Kapitel *Diskussion*

Automatisch generierte Rechnung durch Auswertung von Prozesskontexten im Rahmen der agentenbasierten Simulation

Rechnung

Feld: Sim_Field **Datum:** 13.8.2012
Besitzer: Kunde_1

Maschine	Anzahl	Verbrauch (l)	Kosten (€)
Feldhäcksler	1	569.94	626.94
Verdichter	1	0.00	0.00
Traktoren	6	469.36	516.30

Maschine	Anzahl	Einsatzzeit (m)	Kosten (€)
Feldhäcksler	1	250.184	959.04
Verdichter	1	0	0.00
Traktoren	6	1,511.939	907.16

Gesamtkosten (€)
3,009.44

Abb. 6.6: Automatisch generierte Rechnung

Konzept zur Realisierung dynamischen Verhaltens von Agenten

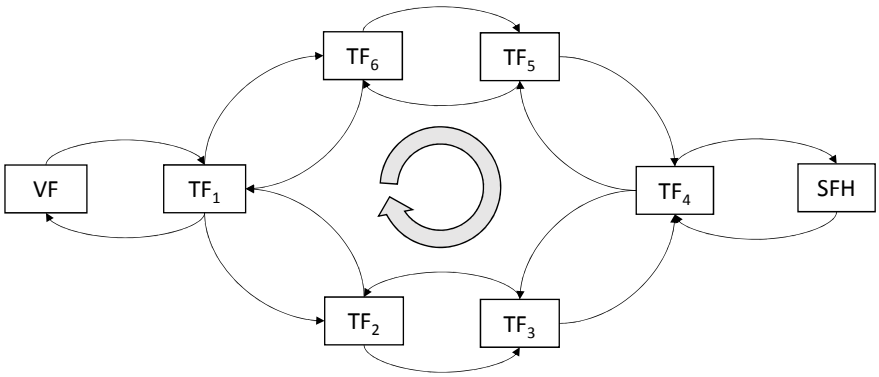
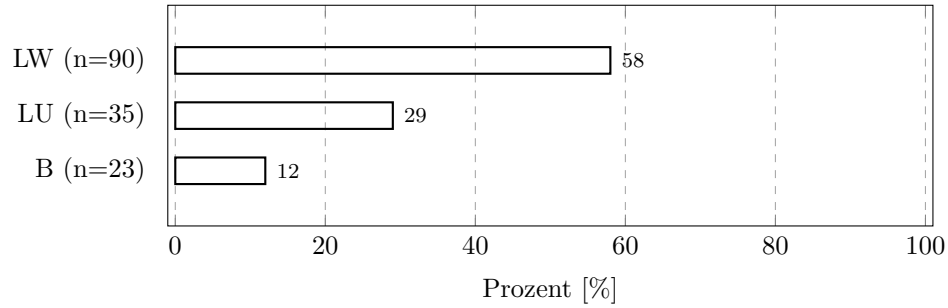


Abb. 6.7: Interaktion von Agenten im ungerichteten Graphen

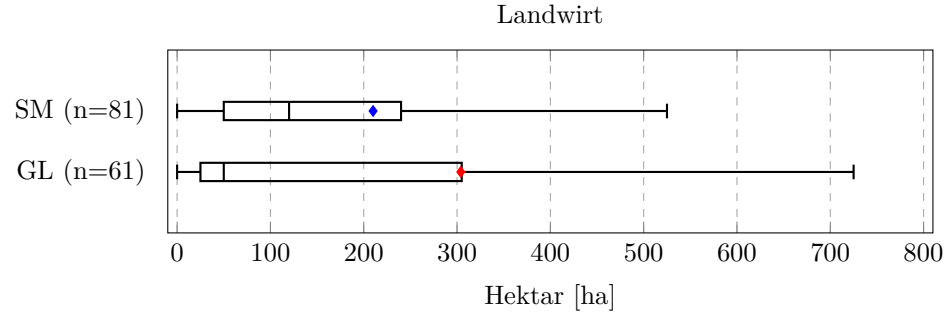
Fragebogen DLG-Praxismonitor *Ernteketten und Transportlogistik*

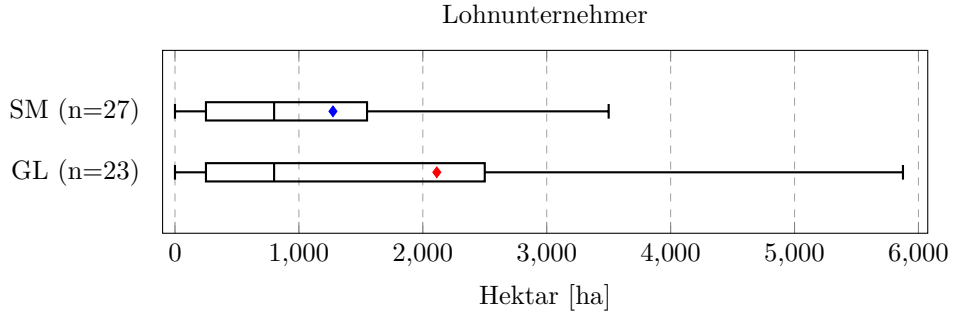
Anmerkungen: Zugunsten einer kompakten Darstellung der nachfolgenden Abbildungen werden folgende Abkürzungen verwendet: A = Alle, B = Beides, LW = Landwirt, LU = Lohnunternehmer, SM = Silomais, GL = Grünland, n = Anzahl Nennungen. Für alle nachfolgenden Whisker-Boxplot-Darstellungen gilt: Interquartilabstand (IQR) = 1,5. Auf eine Darstellung von Ausreißern wird verzichtet.

1. Sie sind ...

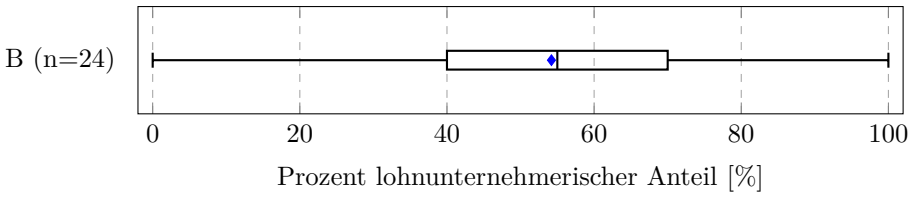


2. Wie viele Hektar ernten Sie pro Jahr bzw. lassen Sie pro Jahr ernten?

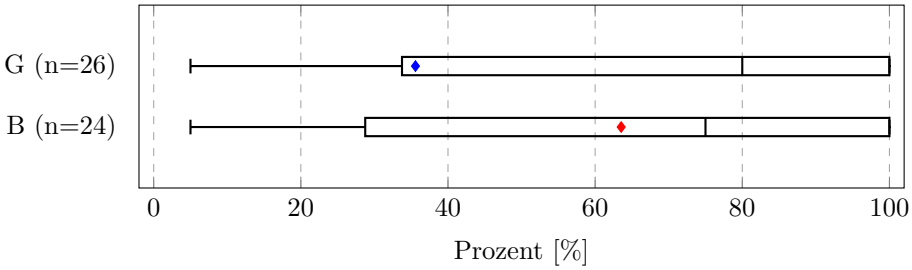




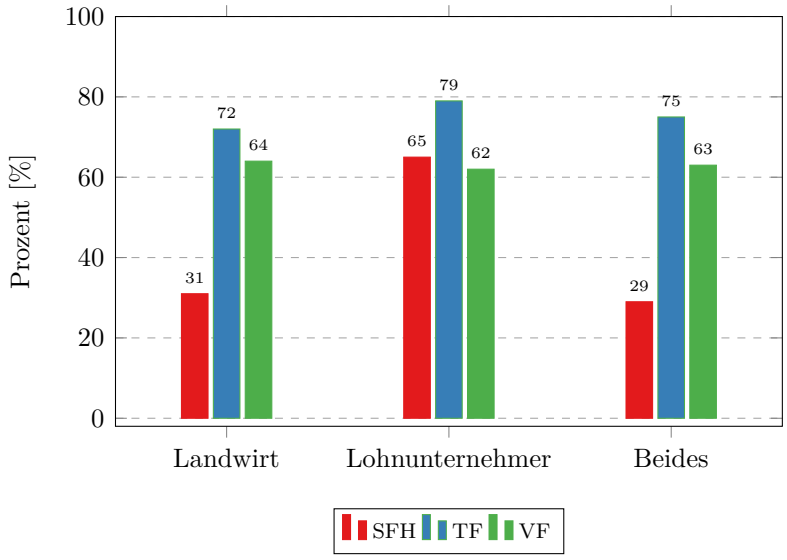
3. Wenn Sie sowohl Landwirt, als auch Lohnunternehmer (= Beides) sind: Wie hoch ist der lohnunternehmerische Anteil in Ihrem Betrieb? (100 % = „ausschließlich lohnunternehmerisch“.)



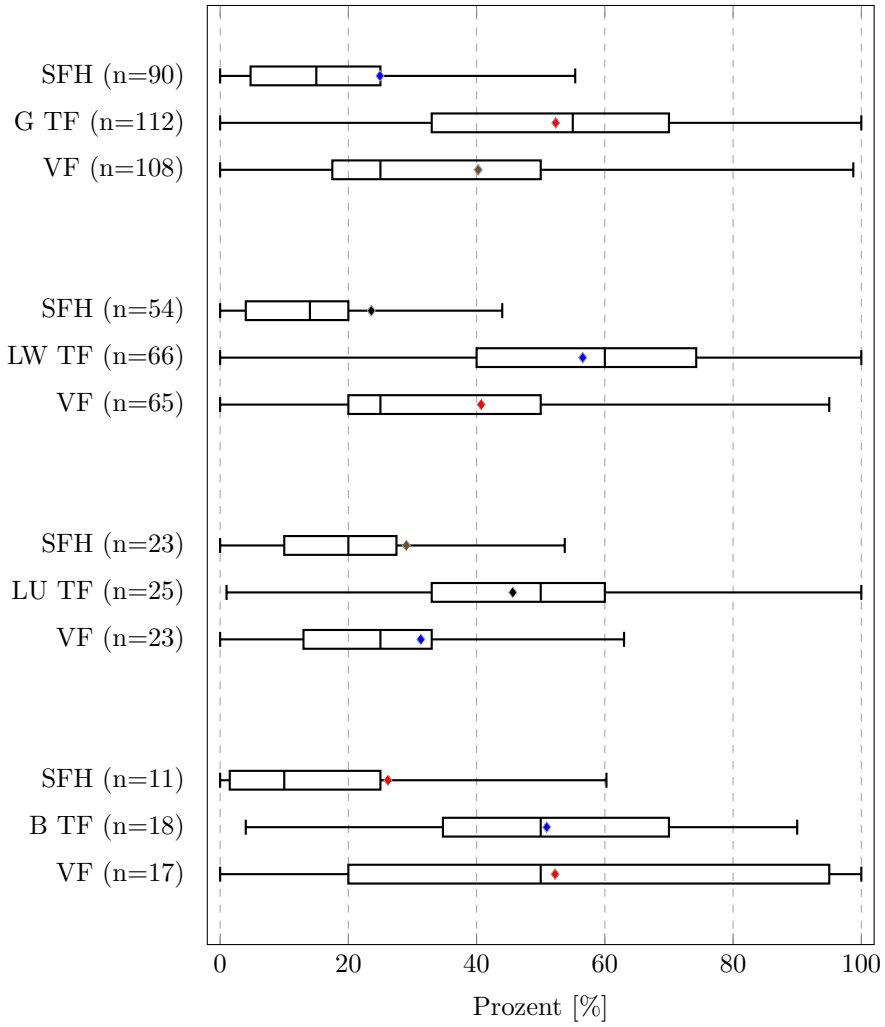
4. Wie hoch ist der typische Anteil, den Sie mit Ihrem Betrieb an der Mechanisierung der Erntekette stellen?



5. Welche Maschinen stellen Sie im Ernteprozess bzw. in der Erntekette zur Verfügung?

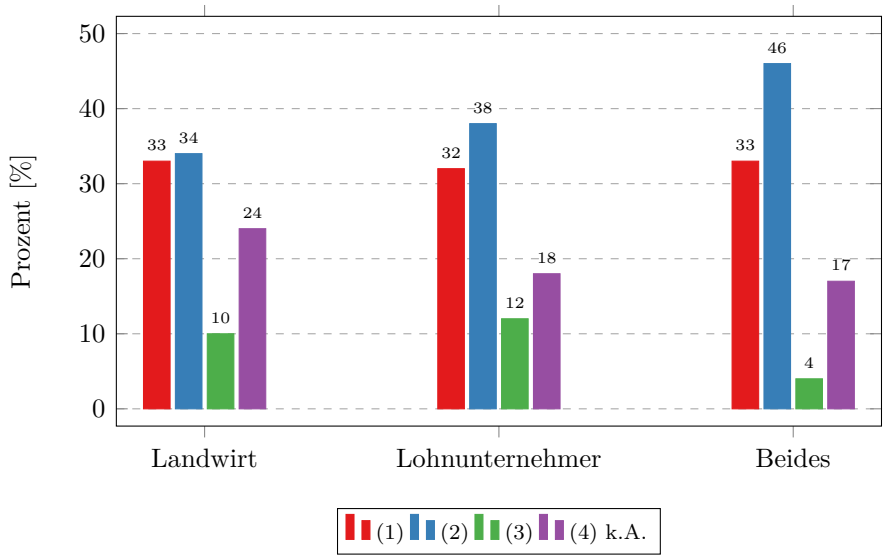


6. Wie hoch ist der Anteil an der Anzahl der entsprechenden Maschinen in der gesamten Erntekette?

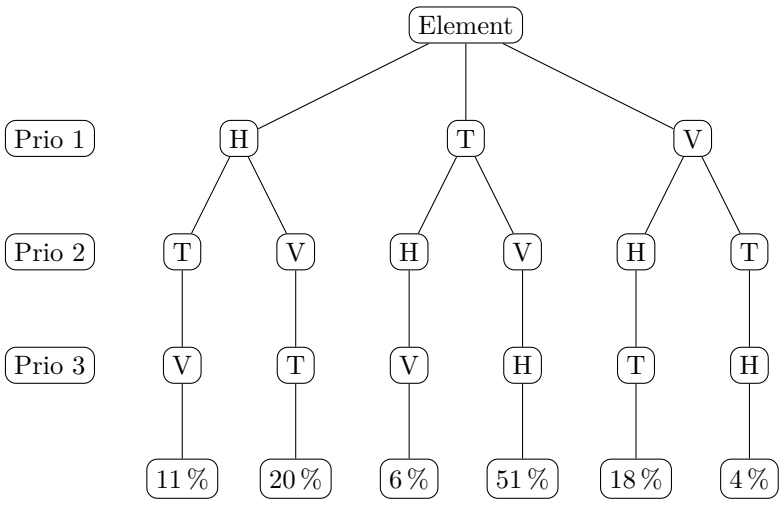


7. Wie gehen Sie bei der Planung einer Erntekette vor?

1. Ich plane zuerst den Häcksler und davon abhängig die weiteren Fahrzeuge.
2. Ich plane in Abhängigkeit von der Feld-Silo-Entfernung und unter Berücksichtigung der Transportkapazität zuerst die Anzahl der Transportfahrzeuge und davon abhängig die anderen Fahrzeuge.
3. Andere Vorgehensweise

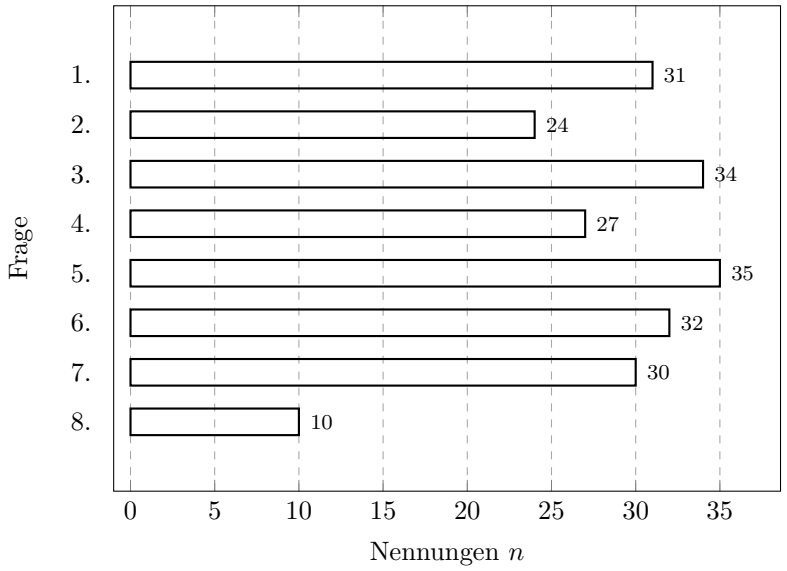


8. Welche Priorität (von 1 = hoch bis 3 = niedrig) haben die drei Teilprozesse der Erntekette (*H*äckseln, *T*ransportieren, *V*erdichten) aus Ihrer Sicht?



9. Welche Schwachpunkte sehen Sie in Ihren Prozessen?

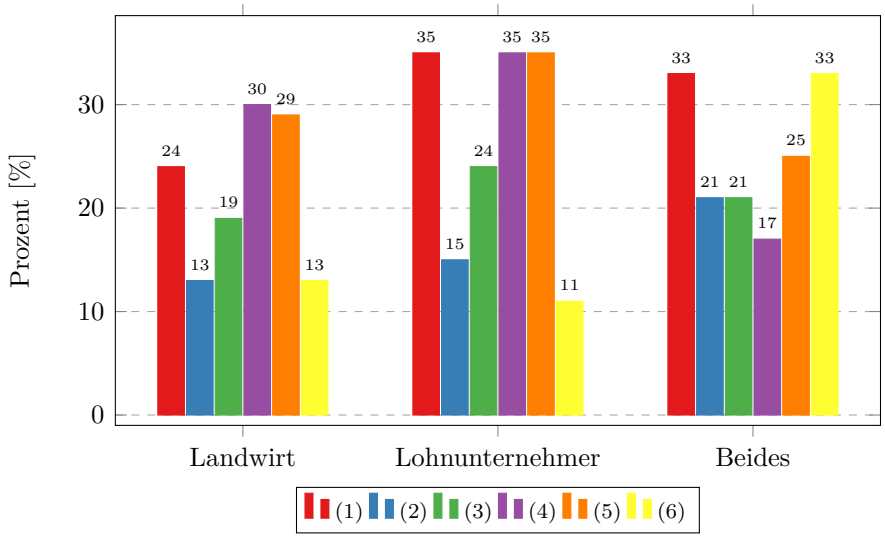
1. Der Anteil Wartezeiten beim Häcksler ist häufig zu hoch.
2. Der Anteil Wartezeiten bei den Transportfahrzeugen auf dem Feld ist häufig zu hoch.
3. Die Verdichtungsqualität ist häufig zu gering.
4. Die Koordination am Abladeplatz ist häufig schwierig.
5. Manche Maschinen werden in ihrer Leistung nicht genau genug angepasst (Häcksler oder Transportfahrzeuge zu langsam oder zu schnell).
6. Mein ursprünglicher Plan lässt sich aufgrund unvorhergesehener Ereignisse (z.B. Wetter, Befahrbarkeit) häufig nicht so umsetzen, wie ursprünglich geplant.
7. Die Fahrer stimmen sich nicht intensiv genug aufeinander ab.
8. Die Transparenz im Prozess wird von den Beteiligten als zu gering empfunden.



10. Welche der genannten Hilfestellungen würden zur Verbesserung Ihrer Ernteketten und Transportprozesse beitragen?

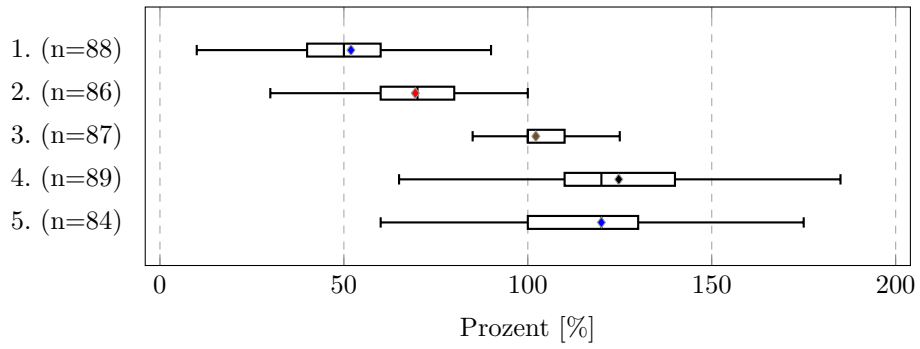
1. Genauere Empfehlungen zum Verhalten der Fahrer (z.B. wie schnell häckseln, wie schnell fahren?).
2. Informationen für den Traktorfahrer zu ermittelten Wartezeiten am Zielort (in Abhängigkeit vom eigenen Verhalten)
3. Informationen für den Häckslerfahrer zu ermittelten Ankunftszeiten von Transportfahrzeugen

4. Automatisierte Erfassung von Erntemengen, Zeiten und Kraftstoffverbrauch zur Erstellung von Lieferscheinen, Rechnungen und Schlagkarteibuchungen
5. Automatisierte Erstellung von Leistungskennzahlen für die Analyse und Verbesserung von Prozessen (Wartezeiten, Durchsätze, Zeitbedarf und Kosten pro Tonne Erntegut)
6. Direkter Austausch von Kennzahlen zwischen den Maschinen (Maschine zu Maschine-Kommunikation)



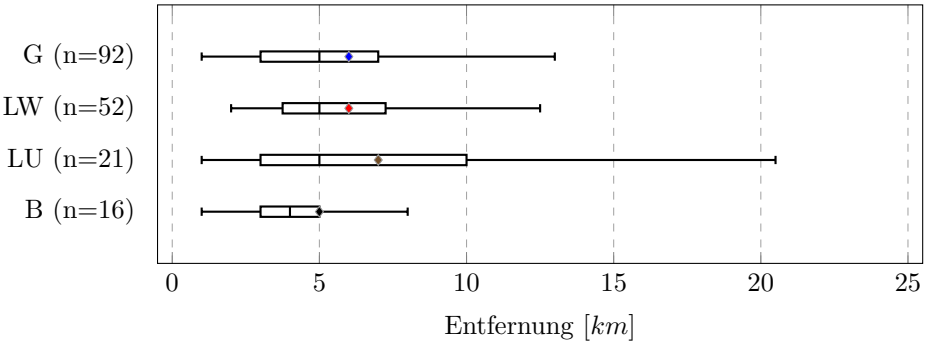
11. Ein aus Ihrer Sicht durchschnittlicher Ernteprozess sei mit 100 % bewertet. Bei welchem Wert sprechen Sie von einem schlechten, normalen oder sehr guten Prozess?

1. sehr schlechter Ernteprozess
2. schlechter Ernteprozess
3. guter Ernteprozess
4. sehr guter Ernteprozess
5. Denkbar oder wünschenswert wäre ein Ernteprozess, der im Vergleich zum heutigen Durchschnitt folgenden Wert erreicht.

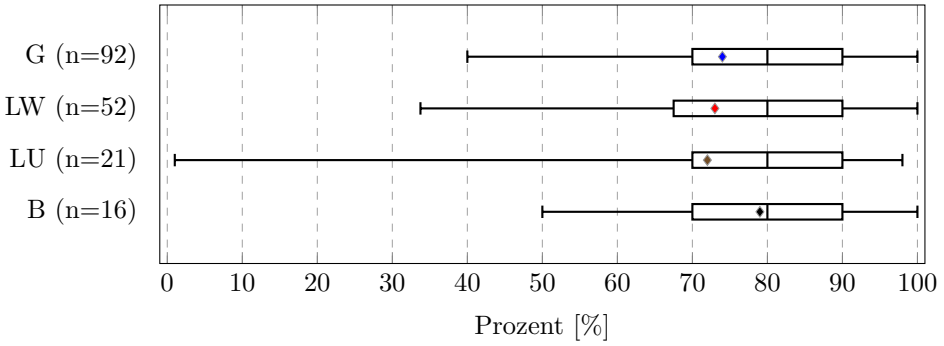


12. Allgemeine Angaben zur typischen Erntekette auf Ihrem Betrieb

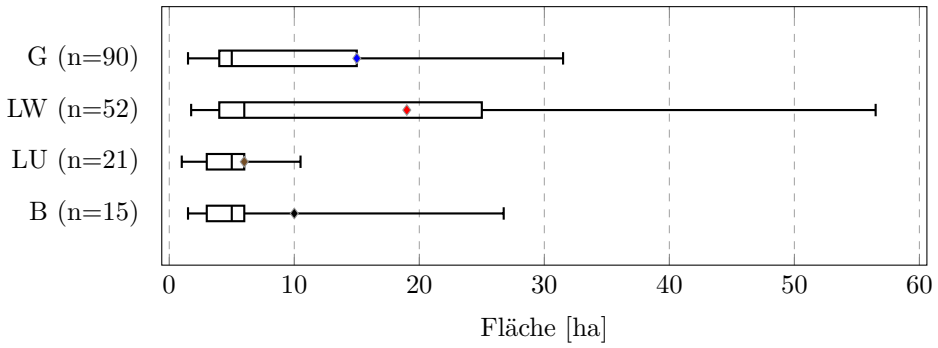
12.1 Wie groß ist die Entfernung vom Feld zum Silo?



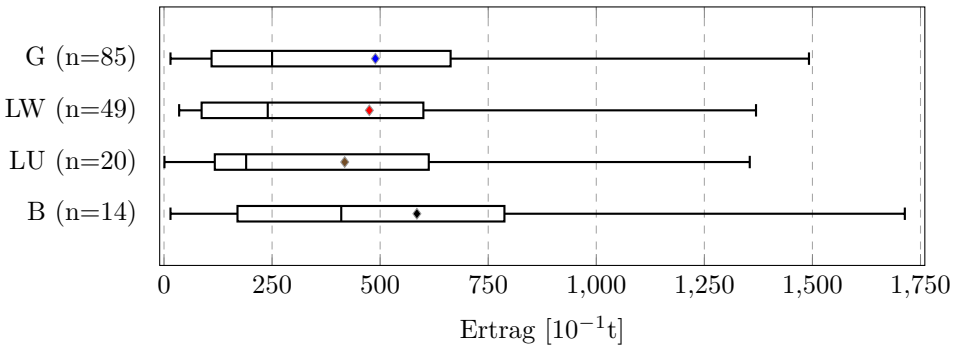
12.2 Wie groß ist der Anteil asphaltierter Fahrstrecke an der Gesamtstrecke?



12.3 Wie groß ist das zu erntende Feld?

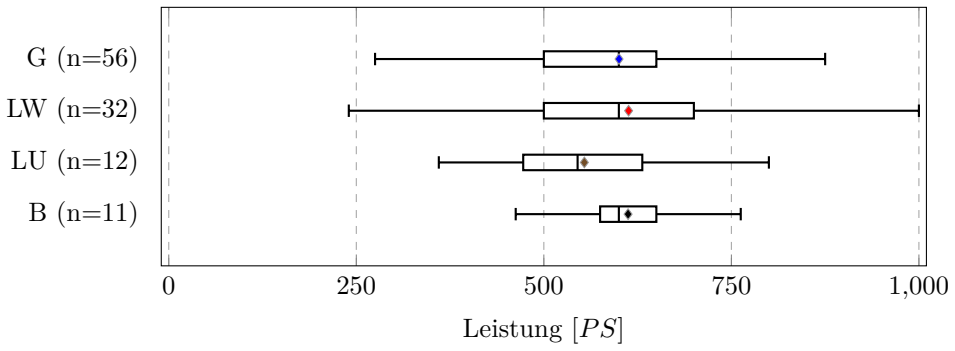


12.4 Wie hoch ist der typische Gesamtertrag auf dem Feld?

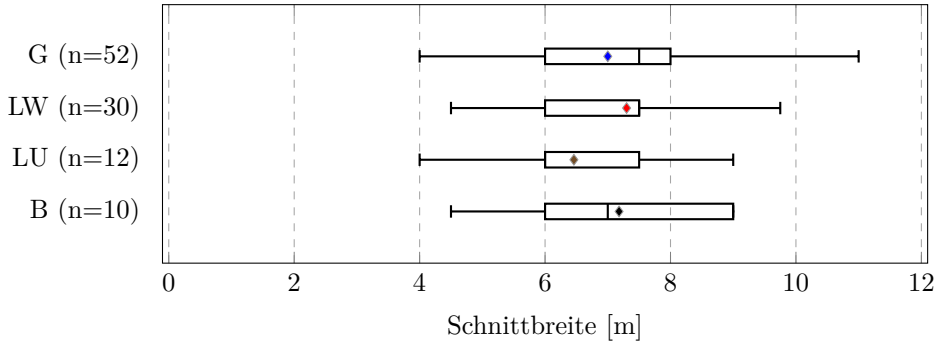


13 Angaben zum Feldhäcksler (SFH)

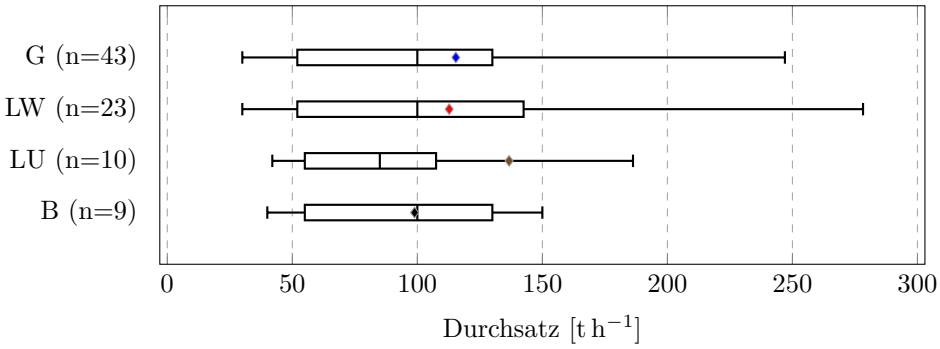
13.1 Wie hoch ist die Motorleistung des SFH (Modellkette)



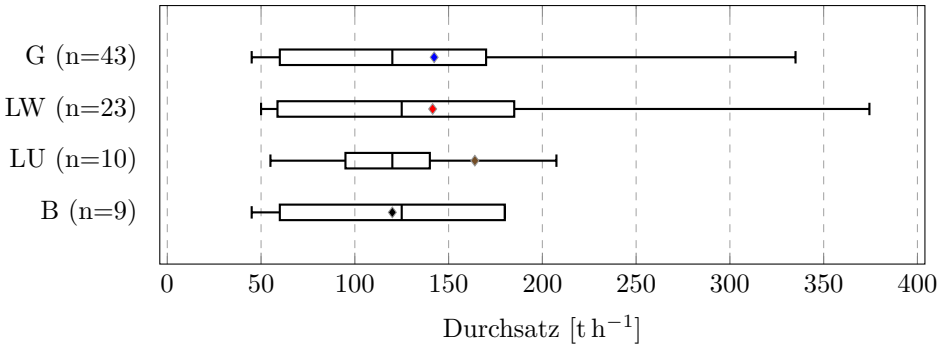
13.2 Wie groß ist die Schnittbreite Ihres SFH (Modellkette)?



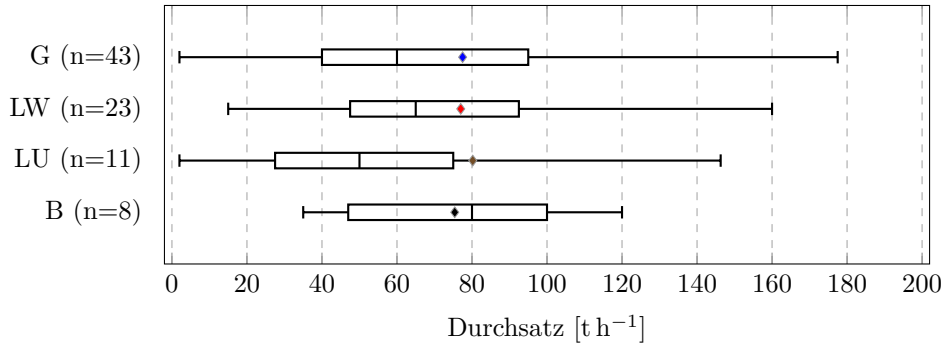
13.3 Welchen durchschnittlichen Durchsatz erzielen Sie mit diesem SFH (Modellkette)?



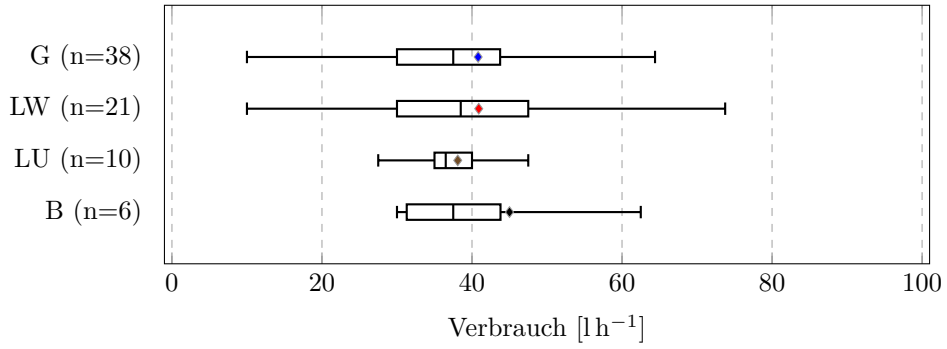
13.4 Welchen Durchsatz erzielen Sie mit dem SFH in optimalen Arbeitsbedingungen (Modellkette?)



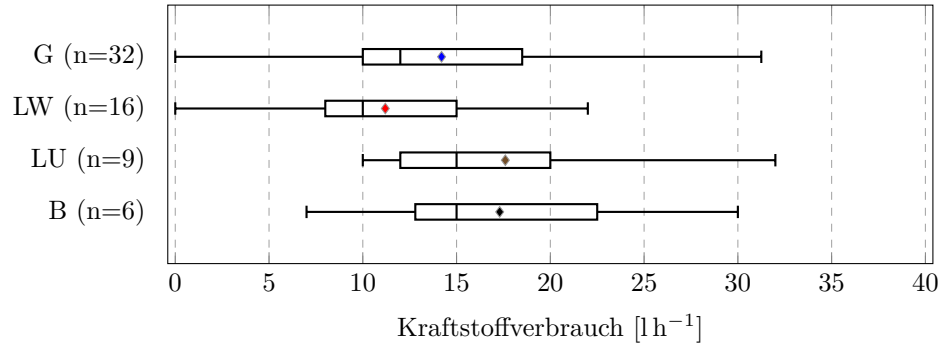
13.5 Welchen Durchsatz erzielen Sie mit diesem SFH in ungünstigen Arbeitsbedingungen?



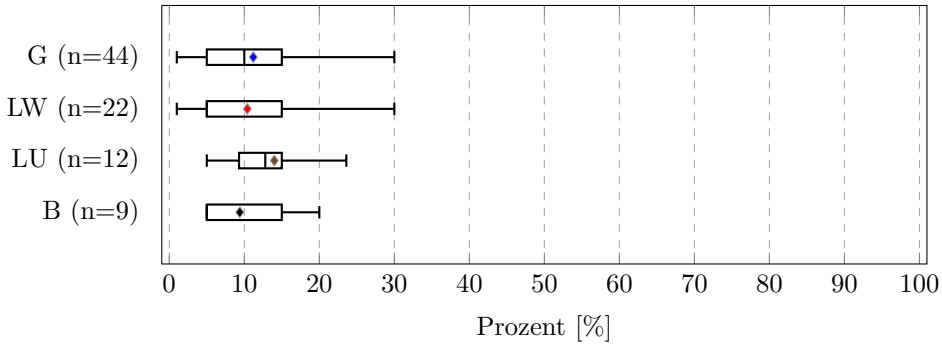
13.6 Welchen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch kalkulieren Sie, wenn der SFH arbeitet?



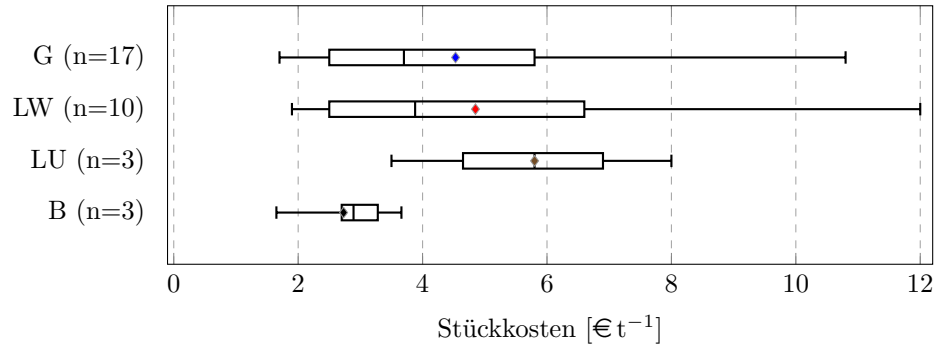
13.7 Wie hoch ist der Kraftstoffverbrauch des SFH beim Warten?



13.8 Wie hoch ist beim Häckseln der Anteil Wartezeit an der Gesamtzeit?

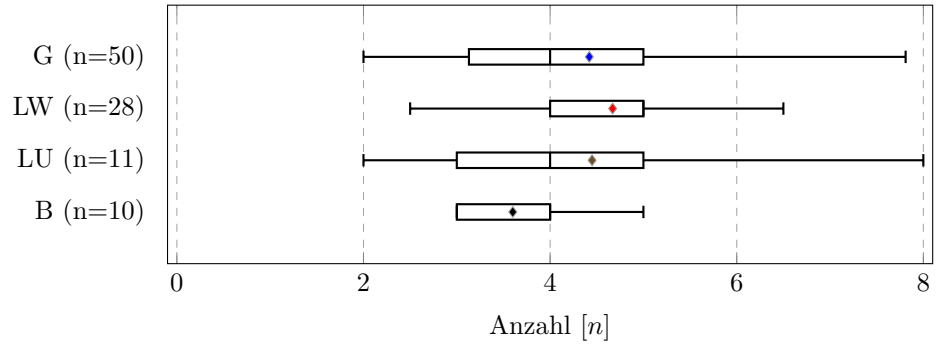


13.9 Wie hoch sind die Stückkosten für das Häckseln?

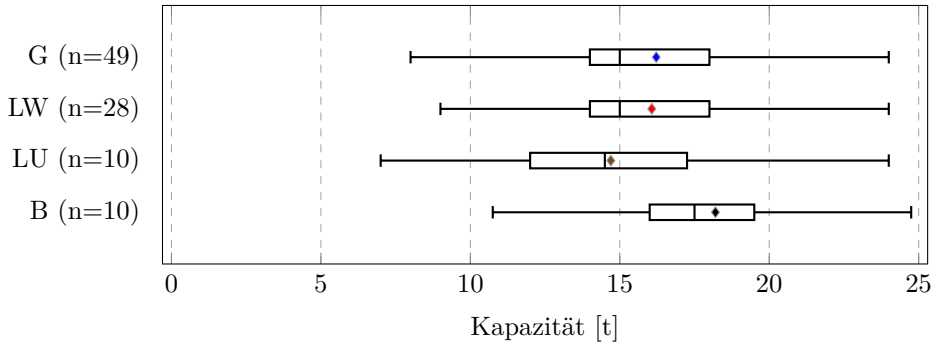


14. Angaben zu den Transportfahrzeugen (TF)

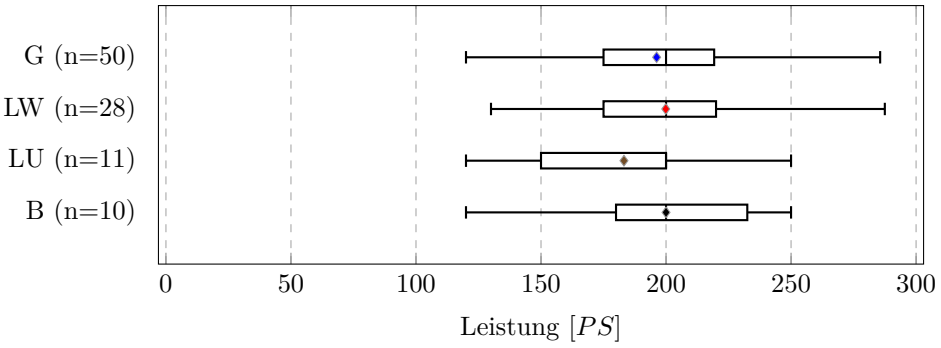
14.1 Wie viele TF nutzen Sie (Distanz 5 km)?



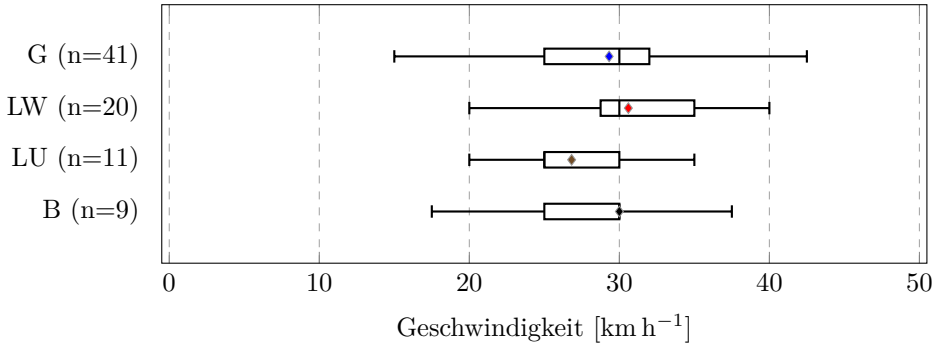
14.2 Welche durchschnittliche Transportkapazität haben die Anhänger?



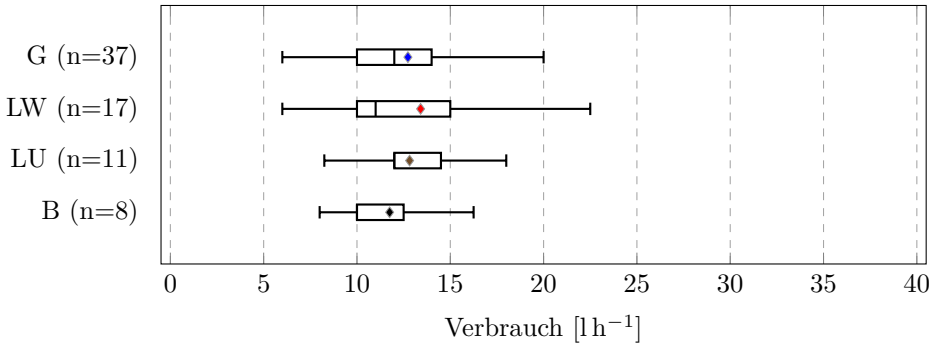
14.3 Über welche durchschnittliche Motorleistung verfügen die eingesetzten Traktoren?



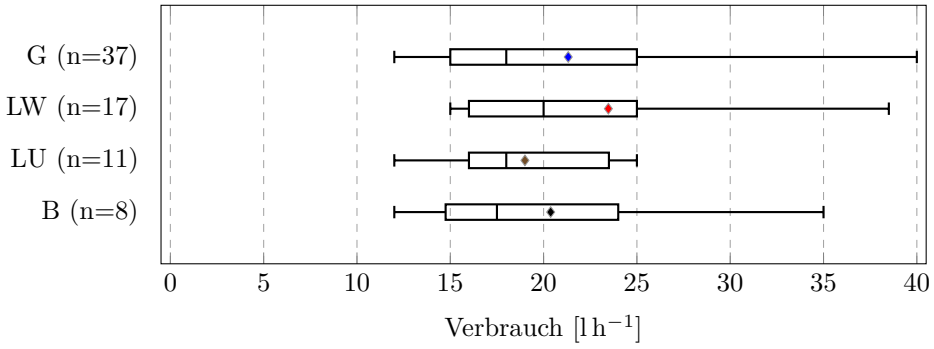
14.4 Welche durchschnittliche Transportgeschwindigkeit kalkulieren Sie für TF im Transportprozess?



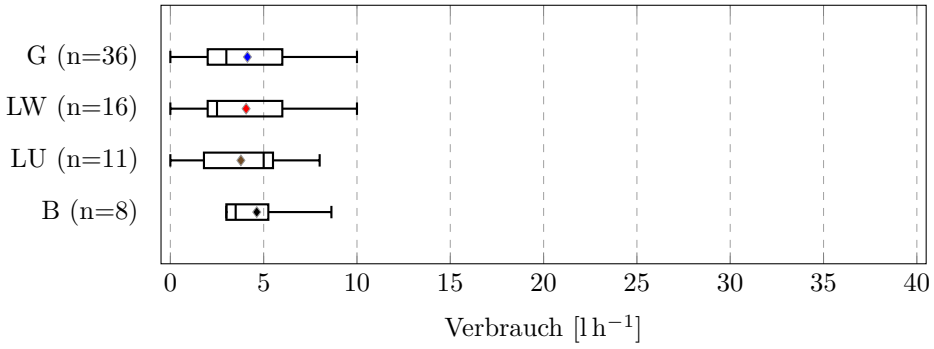
14.5 Welchen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch kalkulieren Sie für TF bei unbeladener Fahrt?



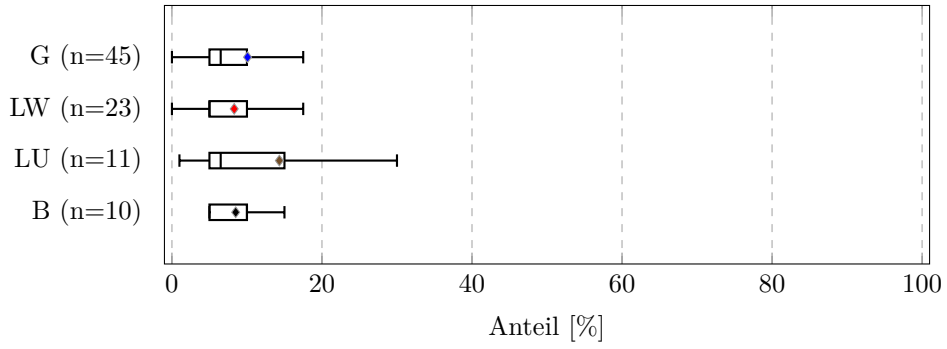
14.6 Welchen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch kalkulieren Sie für TF bei beladener Fahrt?



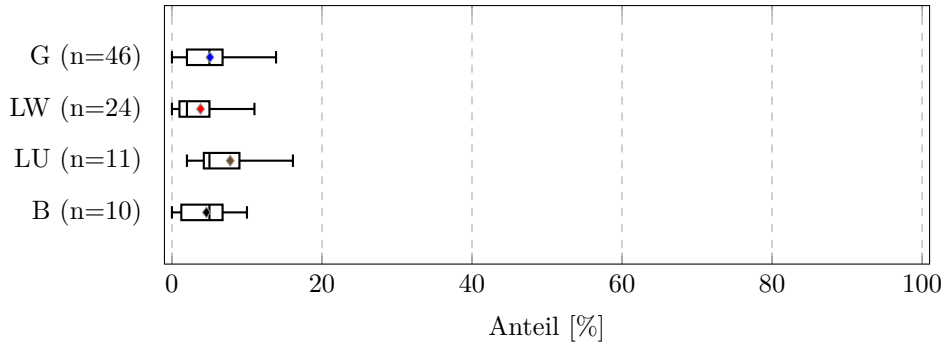
14.7 Wie hoch ist der Kraftstoffverbrauch der TF beim Warten?



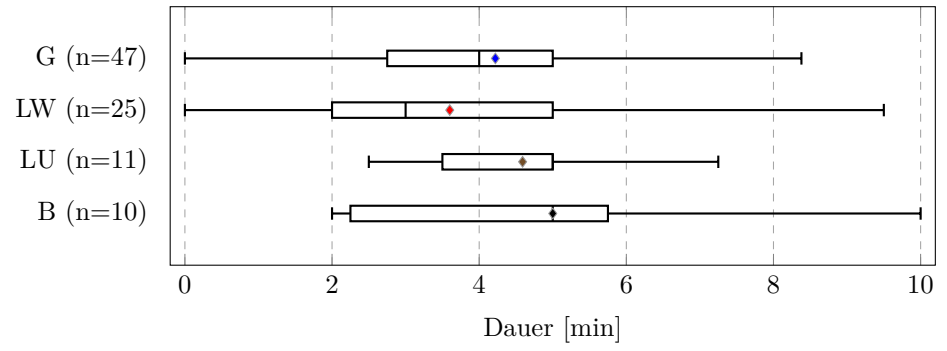
14.8 Wie hoch ist der Anteil Wartezeit der TF an der Gesamtzeit beim Warten auf dem Feld?



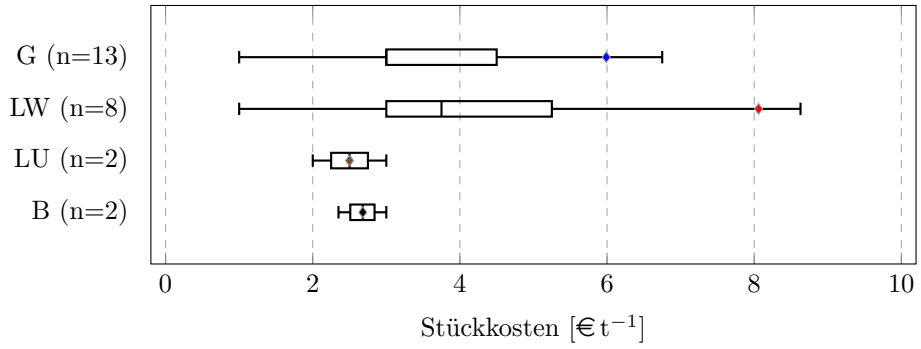
14.9 Wie hoch ist der Anteil Wartezeit der TF an der Gesamtzeit beim Warten am Fahrsilo?



14.10 Wie hoch ist die typische Verweildauer von TF im Bereich des Abladeplatzes?

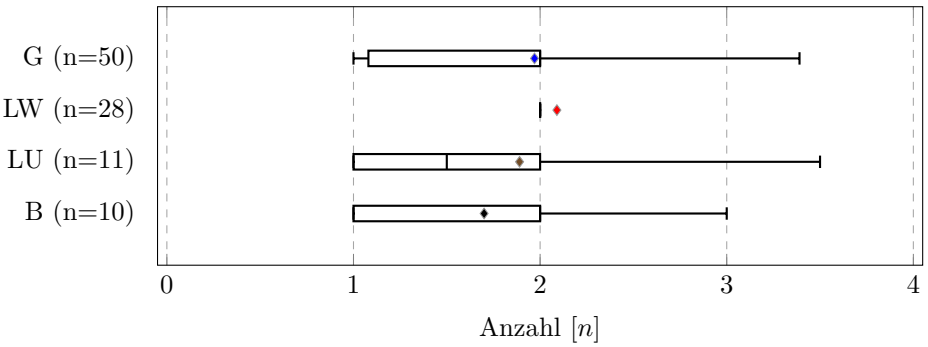


14.11 Wie hoch sind die typischen Stückkosten für das Transportieren?

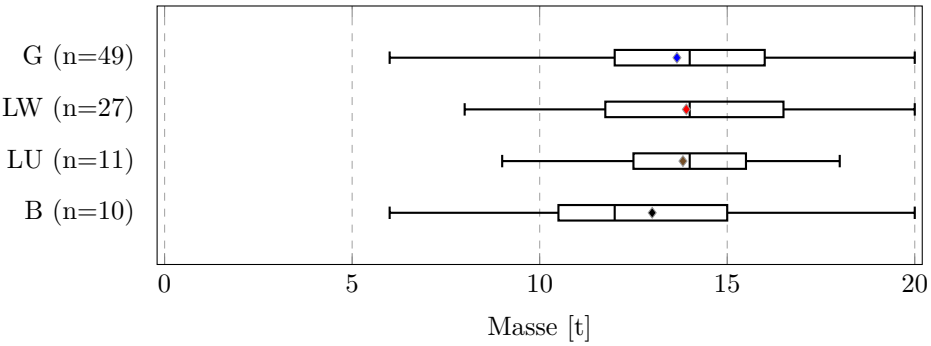


15 Angaben zum den Verdichtungsfahrzeugen (VF)

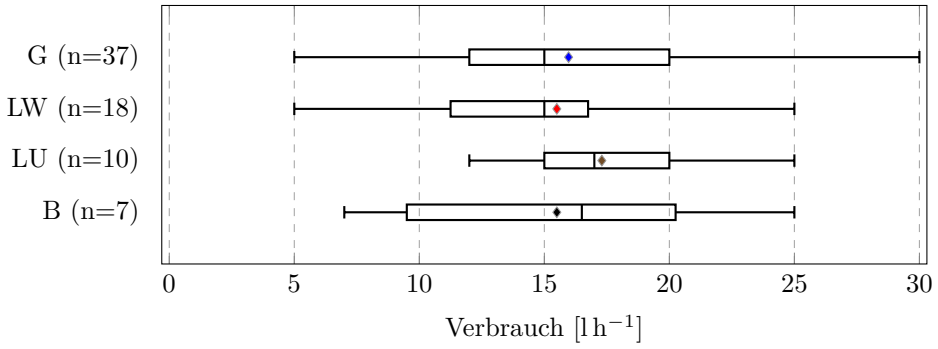
15.1 Wie viele VF setzen Sie für das Schieben und Verdichten am Silo ein?



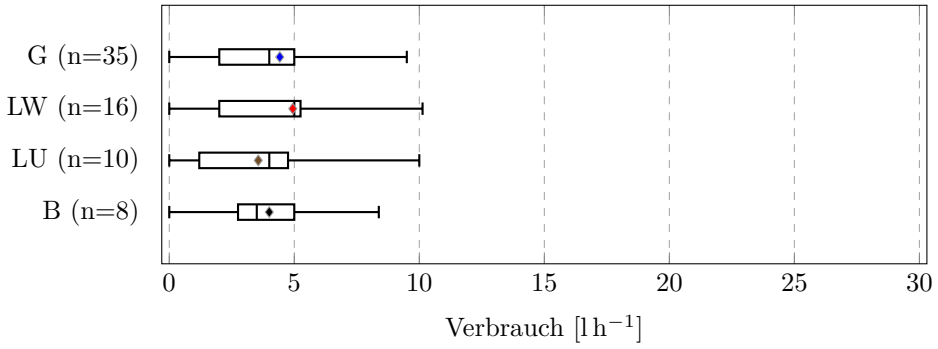
15.2 Wie hoch ist das durchschnittliche Gewicht der VF?



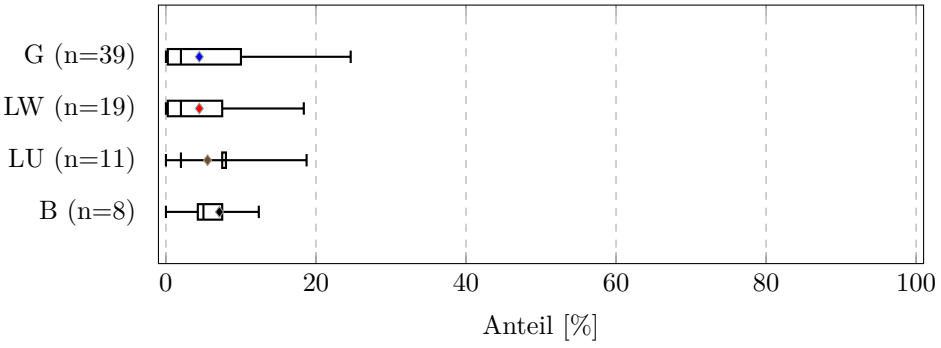
15.3 Wie hoch ist der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch der VF beim Schieben/Verdichten?



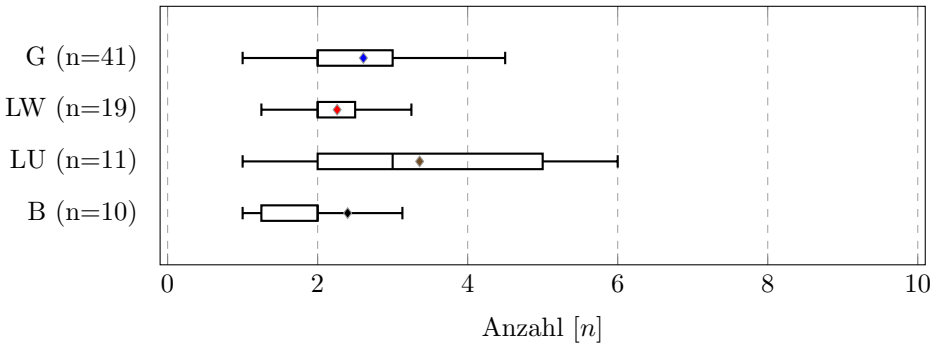
15.4 Wie hoch ist der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch der VF beim Warten?



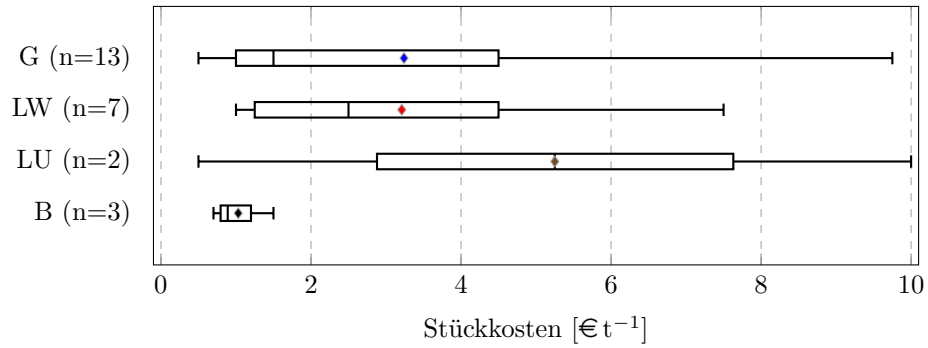
15.5 Wie hoch ist der Anteil Wartezeit der VF beim Verdichten an der Gesamtzeit?



15.6 Wie viele Transportladungen dürfen abgeladen werden, damit die VF die angelieferte Menge Erntegut noch bewältigen können?



15.7 Wie hoch sind die typischen Stückkosten für das Verdichten?



Ergänzende Formeln

Erläuterung der verwendeten Symbole siehe Seite **??**.

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Häckseln → Kraftstoff Subprozess Warten

$$CPU_{fuel(waiting)} = \frac{\mu_t \cdot \dot{V}_{fuel(waiting)} \cdot CPU_{fuel/liter}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.1}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Häckseln → Kraftstoff Subprozess Häckseln

$$CPU_{fuel(harvesting)} = \frac{(1-\mu_t) \cdot (a \cdot (\mu_H \cdot \dot{m}_{nenn})^2 + b \cdot \mu_H \cdot \dot{m}_{nenn} + c)}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.2}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Häckseln → Fahrer

$$CPU_{Driver} = \frac{CPU_{Driver/hour}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.3}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Häckseln → SFH (aus Fixkosten)

$$CPU_{SFH} = \frac{CPU_{SFH/hour}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.4}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Kraftstoff Subprozess Warten

$$CPU_{fuel(waiting)} = \frac{\mu_t \cdot \dot{V}_{fuel(waiting)} \cdot CPU_{fuel/liter}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.5}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Kraftstoff Subprozess Beladen

$$CPU_{fuel(loading)} = \frac{\dot{V}_{fuel(loading)} \cdot CPU_{fuel/liter}}{\dot{m}_{loading}} \tag{6.6}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Kraftstoff Subprozess Entladen

$$CPU_{fuel(unloading)} = \frac{\dot{V}_{fuel(unloading)} \cdot CPU_{fuel/liter}}{\dot{m}_{unoading}} \tag{6.7}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Kraftstoff Subprozess Beladene Fahrt

$$CPU_{fuel(driving\ full)} = \frac{\frac{\Delta s}{v} \cdot (a_{full} \cdot v^2 + b_{full} \cdot v + c_{full}) \cdot CPU_{fuel/liter}}{m_{Load}} \tag{6.8}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Kraftstoff Subprozess Unbeladene Fahrt

$$CPU_{fuel(driving\ empty)} = \frac{\frac{\delta s}{v} \cdot (a_{empty} \cdot v^2 + b_{empty} \cdot v + c_{empty}) \cdot CPU_{fuel/liter}}{m_{load}} \tag{6.9}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → Fahrer

$$CPU_{Driver} = \frac{CPU_{Driver/hour}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.10}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Transport → TF (aus Fixkosten)

$$CPU_{TF} = \frac{CPU_{TF/hour}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.11}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Verdichten → Kraftstoff Subprozess Warten (masseabhängig)

$$CPU_{fuel(waiting)} = \frac{\mu_t \cdot \dot{V}_{fuel(waiting)} \cdot CPU_{fuel/liter}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.12}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Verdichten → Kraftstoff Subprozess Verdichten (masseabhängig)

$$CPU_{fuel(compacting)} = \eta_v \cdot CPU_{fuel/liter} \tag{6.13}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Verdichten → Fahrer

$$CPU_{Driver} = \frac{CPU_{Driver(hour)}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.14}$$

Formel zur Ermittlung der Stückkosten im Teilprozess Verdichten → TF (masseabhängig aus Fixkosten)

$$CPU_{TF} = \frac{CPU_{TF(hour)}}{\dot{m}_{eff}} \tag{6.15}$$