



TUM School of Life Sciences

Technologische und Verfahrenstechnische Grundlagen für die
Entwicklung eines neuartigen, elektrisch betriebenen,
selbstfahrenden automatischen Fütterungssystems

Matthias Thomas Anton Johann Reger

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Life Sciences der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Julia Steinhoff-Wagner

Prüfer*innen: 1. Prof. Dr. Heinz Bernhardt
2. Prof. Dr. Jörn Stumpfenhausen

Die Dissertation wurde am 07.10.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Life Sciences am 26.01.2023 angenommen.

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2023

Im Selbstverlag: Matthias Thomas Anton Johann Reger
Bezugsquelle: Technische Universität München
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
Dürnast 10
85354 Freising

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	I
II.	Abbildungsverzeichnis.....	V
III.	Tabellenverzeichnis.....	X
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1.	Einführung.....	1
2.	Stand des Wissens.....	3
2.1	Grundlagen der Milchviehfütterung.....	3
2.1.1	Ernährungsphysiologie.....	3
2.1.2	Futteraufnahmeverhalten.....	4
2.1.3	Häufigkeit der Futtermenge.....	5
2.2	Automatische Fütterungssysteme.....	6
2.2.1	Technologische Entwicklung.....	6
2.2.2	Klassifizierung.....	7
2.2.3	Marktüberblick.....	8
2.2.4	Stufe 1: Automatische Futtermenge.....	12
2.2.4.1	Statisch.....	12
2.2.4.2	Mobil.....	13
2.2.5	Stufe 2: Halbautomatische Fütterung.....	14
2.2.5.1	Statisch.....	14
2.2.5.2	Mobil.....	19
2.2.6	Stufe 3: Voll-automatische Fütterung.....	24
2.2.6.1	Belair AVISO.....	25
2.2.6.2	Schuitmaker INNOVADO.....	25
2.2.6.3	Strautmann Verti-Q.....	27
2.2.6.4	Wasserbauer NANOCconcept.....	30
2.2.7	Entwicklungen und Trends.....	32
2.3	Die Laser-Navigation/LiDAR.....	33
2.4	Radio Detection and Ranging (Radar).....	37

2.5	Problemstellung	42
2.6	Zielsetzung.....	43
3.	Material und Methoden.....	45
3.1	Funktionskonzept.....	45
3.2	Relevante Richtlinien/Gesetze/Normen	47
3.2.1	Richtlinie 2006/42/EG – 9. ProdSV (Produktsicherheitsgesetz).....	47
3.2.2	DIN EN ISO 12100:2011	48
3.2.3	DIN EN 61508.....	48
3.2.4	DIN EN ISO 13849.....	49
3.2.5	DIN EN 16590.....	49
3.2.6	DIN EN ISO 4254.....	50
3.2.7	CE-Kennzeichnung	50
3.3	Risikobeurteilung.....	50
3.3.1	Risikoanalyse.....	51
3.3.2	Risikoeinschätzung	51
3.3.3	Risikobewertung.....	51
3.3.4	Sicherer Zustand.....	52
3.4	Automatisierung	52
3.4.1	Spurführung	52
3.4.2	Personenschutz	53
3.5	Elektrifizierung.....	57
3.6	Versuche.....	57
3.6.1	Versuchsreihe A.....	58
3.6.1.1	Versuchsort/-aufbau.....	58
3.6.1.2	Technik	59
3.6.1.3	Versuchsdurchführung	60
3.6.2	Versuchsreihe B.....	61
3.6.2.1	Versuchsort.....	61
3.6.2.2	Versuchsaufbau	61
3.6.2.3	Technik und Software.....	63

3.6.2.4	Versuchsdurchführung	65
3.6.2.5	Datenerfassung.....	66
3.6.2.6	Kalman-Filter und Monte-Carlo-Filter	67
3.6.2.7	Datenauswertung	67
3.6.2.8	Fehlerarten.....	71
3.6.2.9	Qualitätsmerkmale	71
3.6.2.10	Statistische Auswertung: Welch-Test	72
3.6.3	Versuchsreihe C.....	74
3.6.3.1	Versuchsort.....	74
3.6.3.2	Versuchsaufbau	75
3.6.3.3	Technik und Software.....	76
3.6.3.4	Versuchsdurchführung	77
3.6.3.5	Datenerfassung.....	78
4.	Ergebnisse	80
4.1	Funktionskonzept	80
4.1.1	Futter anschieben	80
4.1.2	Futter ausdosieren	80
4.1.3	Beschickung einer Biogasanlage.....	81
4.1.4	Smart Grid Stromspeicher	81
4.1.5	Umfrage zu automatischen Fütterungssystemen.....	81
4.2	Risikobeurteilung.....	87
4.3	Elektrifizierung.....	87
4.4	Versuche	88
4.4.1	Versuchsreihe A.....	88
4.4.2	Versuchsreihe B.....	93
4.4.2.1	Monte-Carlo vs. Kalman (1).....	93
4.4.2.2	Accuracy, Precision und Kondition (2).....	95
4.4.2.3	Radar (3).....	113
4.4.3	Versuchsreihe C.....	115
4.4.4	Ableitung eines Sicherheitskonzeptes aus den Versuchen.....	117

4.4.4.1	Risikoanalyse: Funktionen der Maschine mit Festlegung der Grenzen...	117
4.4.4.2	Risikoanalyse: Identifizieren von Gefährdungssituationen und Gefährdungseignissen	118
4.4.4.3	Risikoanalyse: Risikoeinschätzung.....	119
4.4.4.4	Risikobewertung.....	119
4.4.4.5	Risikominderung	119
4.4.4.6	Verifizieren der Sicherheitsfunktion	121
5.	Diskussion.....	122
5.1	Funktionskonzept.....	122
5.2	Risikobeurteilung.....	125
5.3	Elektrifizierung.....	126
5.4	Versuche	127
5.4.1	Versuchsreihe A.....	127
5.4.2	Versuchsreihe B.....	129
5.4.3	Versuchsreihe C.....	134
5.4.4	Die gegenwärtige Rechtslage.....	136
6.	Fazit	139
7.	Abstract.....	143
8.	Ausblick.....	145
9.	Danksagung	146
10.	Literaturverzeichnis	147
V.	Publikationsliste	165
VI.	Eidesstattliche Erklärung.....	166

II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Automatisierungsstufen automatischer Fütterungssysteme (Haidn 2014a).	8
Abb. 2: Eine Übersicht über die bekannten Produkte bzw. Studien zu automatischen Fütterungssysteme der jeweiligen Hersteller. Am Markt erhältliche Systeme sind in blau, nicht am Markt erhältliche Systeme in grau geschrieben. (Reger et al. 2022b)	10
Abb. 3: Der Hiri-Selbstfahrer aus dem Forschungsprojekt mit der LfL und der TU Braunschweig. Zu sehen sind die Laser-Scanner für Kollisionschutz (grün) und Navigation (blau), sowie die Reißleinen und Not-Aus-Taster (rot). (Haidn 2014c)	14
Abb. 4: Das Lely Vector-AFS mit allen Bestandteilen (Bild links) und bei einem Befüllvorgang (Bild rechts). (Lely)	20
Abb. 5: Die wichtigsten Komponenten des Lely Vector Futtermisch- und Verteilwagens. (PitchEngine Inc. 2012)	21
Abb. 6: Das Cormall MultiFeeder-System im Schema. Die Produkte der Konkurrenten, wie z. B. Lucas G, Lely oder Jeantil funktionieren auf ähnlich Weise. (Grondahl 2018)	22
Abb. 7: Zentrale Einrichtungen beim Cormall MultiFeeder V4. (Cormall A/S 2014b).....	22
Abb. 8: Aufbau des Jeantil Automatic Feeding-Verteilwagens. (Jeantil o. J.).....	23
Abb. 9: Das Futtermittelverteilfahrzeug "I-Ron Mix" von Lucas G (Lucas G 2017).....	24
Abb. 10: Schema des Mischbehälters mit Fräsarm, angebaut an einen manuellen oder automatisierten Gabelstapler. (©BELAIR)	25
Abb. 11: Die Entnahmeeinheit des Schuitemaker Innovado. Der Detektionsbereich des 2D-Laser-Scanners erfasst in schrägem Winkel Objekte vor der Maschine (blau, schematisch). (©SCHUITEMAKER).....	26
Abb. 12: Die neueste Generation des Schuitemaker Innovado. Die drei SiS-Scanner decken die Seiten sowie die Rückseite der Maschine ab (blau, schematisch) (©SCHUITEMAKER).27	
Abb. 13: Der rotierende 2D-Laserscanner ist oben an der Fahrerkabine angebracht. Über einen Monitor wurden die live-Messdaten visualisiert (links; Eigene Aufnahme). Bis auf wenige Details ist der Selbstfahrer-Futtermischwagen nicht als AFS identifizierbar (rechts). (©STRAUTMANN)	28
Abb. 14: Dargestellt sind verarbeiteten Messdaten des Laser-Scanners, die eine Punktwolke der Umgebung erzeugen und somit die ideale Positionierung für die Futterentnahme ermöglichen. (©STRAUTMANN)	29
Abb. 15: Das Steuerungskonzept des Verti-Q der Firma Strautmann. (MELTEBRINK et al. 2018)	30
Abb. 16: Das "Shuttle Eco" und der "Lift" von Wasserbauer. (Wasserbauer GmbH o. J.b) ...	30
Abb. 17: Die Prozessschritte der Fütterung im NANOConcept von Wasserbauer. (Wasserbauer GmbH o. J.b).....	31

Abb. 18: Im Vordergrund links ist das "Shuttle Eco" zu sehen welches vom "Lift" befüllt wird. (Wasserbauer GmbH o. J.b).....	32
Abb. 19: Der rotierende Laser-Scanner ist auf dem Fahrzeug montiert und vermisst die Referenzmarken (künstliche Landmarken) an Säulen und Wänden. (Götting KG o. J.)	35
Abb. 20: Prinzipskizze der Bestimmung der Relativposition zwischen Referenzmarke und Fahrzeug (links) und der Absolutposition im Koordinatensystem (rechts). In (Reger et al. 2022a), verändert nach SICK AG in (Ullrich 2014).....	36
Abb. 21: Die Bildfolge zeigt die Rotation des 2D-Laser-Scanners (weißer Pfeil) in Fahrtrichtung mit dem Uhrzeigersinn und die Ausgabe der verarbeiteten Scannerdaten als 3D-Punktwolke auf einem Monitor. Zu erkennen sind vorbeigehende Messebesucher (gelbe Pfeile). (Reger et al. 2022a)	37
Abb. 22: Das Verhalten von Mikrowellen bei verschiedenen Materialien. (Weidmann o. J.)..	39
Abb. 23: Zeitlicher Verlauf von Sende- und Empfangsfrequenzen beim FMCW-Radar mit Dreiecksmodulation. (Weidmann o. J.)	40
Abb. 24: Eine Auswahl an Standards, die mit der IEC 61508 verbunden sind. (Orlosky und Hubsch 2018).....	49
Abb. 25: Das Verfahren der Risikobeurteilung in Form eines Ablaufdiagramms. (Richter 2014)	51
Abb. 26: Schema der Detektionsbereiche von Radar, als Navigationsscanner (blaue Fläche) und als Hindernisdetektor (rote Fläche). Während die Prüfkörper nach DIN EN 1525 nach 4 bzw. 6 m vor dem Fahrzeug aus dem Navigationskegel „verschwinden“, kann mit dem Hindernisdetektor bis weniger als einem halben Meter vor dem Fahrzeug ein Objekt erkannt werden. (Reger et al. 2022b).....	54
Abb. 27: Konzept zur Automatisierung des Futtermischwagens mit einem Laser-Scanner zur Navigation (rot eingekreist) und vier Radar-Scannern für Personen- und Kollisionsschutz (grün eingekreist). (Reger et al. 2022b)	55
Abb. 28: Der Futtermischwagen aus der Vogelperspektive mit dem angedeuteten LiDAR-Erfassungsbereich (rot gestrichelt) und den überlappenden Erfassungsbereichen der vier Radar-Scanner (grüne Bereiche). (Reger et al. 2022b)	56
Abb. 29: Querschnitt der Hallenbreite. Die Zielobjekte (rot) wurden an PP-Schnüren (Polypropylen, gelb) aufgehängt. Die Nebelwand (blau schraffiert) bildete sich aufgrund der Schwerkraft etwas anders aus, deckte das Zielobjekt jedoch mit ausreichendem Seitenabstand voll ab. (Reger et al. 2017).....	58
Abb. 30: Der kegelförmige Detektionsbereich des Radars mit dem Zielobjekt (rot) im Größenvergleich. Zu den Randbereich des Radar-Kegels hin nimmt die Sendeleistung ab, beschrieben anhand der Prozentangaben im Verhältnis zum Öffnungswinkel. (Eigene Darstellung).....	59

Abb. 31: Der schematische Aufbau der Versuchsreihe A. Zu sehen ist die Sensorik (links), ausgerichtet auf das Zielobjekt (rechts), mit bis zu neun Nebelvorhängen dazwischen. (Reger et al. 2017)	61
Abb. 32: Die Fahrstrecke des Roboterfahrzeugs veränderte sich während der Durchgänge nicht. Lediglich Tachymeter und Startpunkt wurden verlagert. Die Zahlen 1 bis 4 beschreiben Positionen, auf die im Text Bezug genommen wird. (Maßstab 1:10) (Reger et al. 2022a)	62
Abb. 33: Das Roboterfahrzeug mit Laserscanner (blau-schwarz), Radarscanner (weiß) und dem 360 Grad-Prisma (schwarz-orange) im Sichtfeld des Tachymeters. Zur Orientierung eingefügt wurden die Positionen T1 und 2. (Eigene Aufnahmen)	63
Abb. 34: Die Lage der zusätzlich positionierten Radar-Reflektoren (in Meter) an der Nord- und Ostseite des Stalles. (Eigene Darstellung).....	75
Abb. 35: Die IP-Kameras wurden im und außen am Stall angebracht und zeichneten die gesamte Fahrstrecke des Testfahrzeugs auf. Die gut sichtbare Nummerierung der Kameras half bei der Zuordnung und schnelleren Erfassung im Protokoll. (Eigene Aufnahme)	78
Abb. 36: Der Aufzeichnungsbereich der GoPro-Kamera zeichnete die Lenkbewegungen sowie die Fahrroute aus der Ich-Perspektive. (Reger et al. 2022b).....	79
Abb. 37: Anforderungen der Befragten an ein automatisches Fütterungssystem. (REGLER 2019).....	84
Abb. 38: Sicherheitsbedenken bei automatischen Fütterungssystemen. (REGLER 2019)	85
Abb. 39: Gewünschte Steuerungsmöglichkeiten für ein automatisches Fütterungssystem. (REGLER 2019).....	85
Abb. 40: Die preisliche Einstufung durch die Teilnehmer hinsichtlich der Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsstufen. (REGLER 2019)	86
Abb. 41: Zu sehen ist die Anordnung der Düsen (blau), das Zielobjekt (rot eingekreist bzw. grüner Pfeil) sowie die Messdaten-Visualisierung der Laser- (links) und Radar-Daten (rechts) auf den beiden Notebooks. (Eigene Aufnahmen)	89
Abb. 42: Die graphische Darstellung der Laser-Messdaten. Von links nach rechts sind die Varianten ohne Sprühregen, mit einem Nebelvorhang (D1), mit zwei Nebelvorhängen (D2) und mit drei Nebelvorhängen (D3) dargestellt. (Reger et al. 2017)	90
Abb. 43: Die graphische Darstellung der empfangenen Leistung [dBVrms], die vom Radar-Reflektor reflektiert wurde. Das Messrauschen beginnt bei etwa -75 dBVrms. (Eigene Darstellung).....	90
Abb. 44: Die graphische Darstellung der empfangenen Leistung [dBVrms], die von der Pressspannplatte reflektiert wurde. Das Messrauschen beginnt bei etwa -75 dBVrms.(Eigene Darstellung).....	91

Abb. 45: Die visualisierten Radardaten zeigten die räumliche Struktur im Innenraum des Hauses. Die Helligkeit der Winkelsegmente ist direkt proportional zur Stärke der reflektierten Leistung. (Reger et al. 2017)	92
Abb. 46: Im Außenbereich bildete das Radar sowohl einen Schubkarren [1], eine Person [2], einen Holzstuhl [3], sowie Gebäudestrukturen wie etwa die Außenwand [4] gut erkennbar ab. (Eigene Darstellung)	92
Abb. 47: Plot von $ \text{Fehler 1} - \text{Fehler 2} $. (Reger et al. 2018)	94
Abb. 48: Ausschnitt der gefahrenen Trajektorie von D2F10 und der Soll-Trajektorie. (Friedrich 2017)	95
Abb. 49: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus „D3 im Stall“. (Reger et al. 2022a)	97
Abb. 50: Ausgewählter 1-punktiger Zoom in Soll- und Einzelfahrttrajektorien. (Reger et al. 2022a)	98
Abb. 51: Die Boxplots zeigen die Abweichungen der nächsten Nachbarn (Accuracy) für jede Einzelfahrt aus „D3 im Stall“, ohne Fahrt 4. (Reger et al. 2018)	98
Abb. 52: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 im Stall“. (Friedrich 2017)	100
Abb. 53: Mit der 1NN-Methode konnte sich der euklidisch berechnete Abstand nur an den wahren Abstand annähern. Hier ist der berechnete Abstand eines Punktes der Trajektorie D3F10 beispielweise größer als die tatsächliche Abweichung. ((Reger et al. 2022a)	101
Abb. 54: Die Boxplots zeigen die Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus "D3 vollständig". Insgesamt bilden 171 nächste Nachbarn die Datengrundlage für die Darstellung. (Reger et al. 2022a)	102
Abb. 55: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)	103
Abb. 56: Die Boxplots zeigen die Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus "D4". Insgesamt bilden 110 nächste Nachbarn die Datengrundlage für die Darstellung. (Friedrich 2017)	104
Abb. 57: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus D4. (Friedrich 2017)	105
Abb. 58: Die mit Hilfe der 1NN-Methode berechneten Precision für die Einzelfahrten D3F6 und D3F1. Die Precision lag zwischen 0,0008 m und 0,0825 m. (Reger et al. 2022a)	106
Abb. 59: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 im Stall“. (Reger et al. 2022a)	107
Abb. 60: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)	108
Abb. 61: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)	109
Abb. 62: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus D4. (Friedrich 2017)	110

Abb. 63: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus D4. (Friedrich 2017)	111
Abb. 64: Das Diagramm zeigt die durchschnittliche Abweichung (average deviation), Standardabweichung (standard deviation), Maximum (maximum) und Minimum (minimum) der Durchgänge „D3 im Stall“ (run 3 „alley“), „D3 vollständig“ (run 3) und „D4“ (run 4), sowohl für Accuracy als auch für Precision. (Reger et al. 2022a)	112
Abb. 65: Die verarbeiteten Messungen des Radarscanners zeigen die Konturen des Milchviehstalles. Deutlich erkennbar ist der Futtertisch mit beiderseitig hoher Reflexion aufgrund der metallenen Aufstallung. Die Fahrtrichtung des Roboters war entgegen dem Uhrzeigersinn. (Eigene Darstellung)	114
Abb. 66: Die Radar-Daten (blau) wurden in die Laserkarte (grau) eingespeist. Die Übereinstimmung der Stallkonturen ist deutlich erkennbar. Ebenso sind einige fragmentierte Radar-Messungen erkennbar. (Reger et al. 2018).....	115

III. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Generalisierte Arbeitsschritte der Radar-Signalverarbeitung. (Winner et al. 2015)....	42
Tab. 2: Statistische Merkmale des Welch-Tests (Darstellung nach (Friedrich 2017) auf Basis von (Bonett und Price 2002).	74
Tab. 3: Die Anzahl der Messdaten, die nach der Kalman-Filterung und dem ersten Datenbereinigungsschritt für die jeweilige Einzelfahrt aus „D3 im Stall“ zur Verfügung standen.	99
Tab. 4: Anzahl der Messdaten der Einzelfahrten aus "D3 vollständig"	102
Tab. 5: Anzahl der Messdaten der Einzelfahrten aus D4.	105
Tab. 6: Die Kennzahlen der funktionalen Sicherheit am Beispiel des Futtermischwagens. (Reich 2019).....	121

IV. Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
1NN-Methode	1 Nearest Neighbour-Methode
2D	zweidimensional
2WD	two-wheel drive/Zweiradantrieb
3D	dreidimensional
AFS	automatisches Fütterungssystem
AgPL	Agricultural performance level
AKh	Arbeitskraftstunde
AMCL	Adaptive Monte Carlo localization algorithm
AMS	Automatisches Melksystem
ATR	Automatic Tracking
CAD	computer-aided design/rechnerunterstütztes Konstruieren
CAN	Controller Area Network
CE	Conformité Européenne
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications
cm	Zentimeter
Co. KG	Compagnie Kommanditgesellschaft
CPU	Central processing unit
CW-Radar	Continuous wave radar
dBVrms	Decibel voltage root mean square
DC	Direct current/Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
EFI	Enhanced Function Interface
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
FDR	False Discovery Rate
FMCW	Frequency modulated continuous wave
FMW	Futtermischwagen
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GHz	Gigahertz
GIL	Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V.
GmbH	Gesellschaft mit begrenzter Haftung
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GV	Großvieheinheit
GVE	Großvieheinheit
HS	Hochschule
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things, Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
kW	Kilowatt
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
Lidar	Laser detection and ranging

LTE	Long Term Evolution
m	Meter
m ³	Kubikmeter
MC	Monte-Carlo-Filter
mm	Millimeter
MVD	mittlerer volumetrischer Durchmesser
NATO	Norht Atlantic Treaty Organization
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
pH	potentia Hydrogenii/Konzentration des Wasserstoffes
PKW	Personenkraftwagen
PL	Performance Level, Performance level
PP	Polypropylen
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
Radar	Radio detection and ranging
RCS	Radar cross section
RFID	radio-frequency identification
ROS	Robot Operating System
RTK	Real Time Kinematic
SIL	Sicherheitsintegritätslevel
SiS	Schuitemaker Intelligent System
SLAM	Simultaneous localization and mapping
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
TMR	Total-Misch-Ration
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
TÜV	Technischer Überwachungsverein
USB	Universal Serial Bus
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VGA	Video Graphics Array
VSM	vertical stationary mixer/stationärer Vertikalmischer
WIC	Wireless Integrated Control
WLAN	Wireless Local Area Network

1. Einführung

Die Landwirtschaft des 21. Jahrhunderts steht vor großen Herausforderungen und Veränderungen. Der Mangel an qualifizierten Fremdarbeitskräften, höhere Arbeitsbelastungen je Betrieb und steigende bürokratische bzw. rechtliche Anforderungen zwingen landwirtschaftliche Betriebe zu Effizienzsteigerungen. Insbesondere Routinearbeiten werden und sind im Fokus zur Rationalisierung durch Automatisierung. Es verwundert nicht, dass Serviceroboter große Verbreitung in der Landwirtschaft finden – die landläufig „Melkroboter“ genannten automatischen Melksysteme (AMS) oder aber auch automatisierte Futterschieber oder Spaltenreinigungsroboter. Nach dem Arbeitszeitaufwand absteigend geordnet, nehmen das Melken und das Füttern des Milchviehs die meiste Zeit in Anspruch. Mit rund einem Viertel der täglichen Arbeitszeit schlägt die Fütterung zu Buche. Die Erstellung, das Mischen und die Vorlage der Ration sind nur in wenigen Fällen automatisiert und bieten noch großes Optimierungspotenzial.

Obwohl automatische Melksysteme deutlich bekannter und verbreiteter sind als automatische Fütterungssysteme (AFS), wurde die automatisierte Futtermischung jedoch deutlich früher in der Landwirtschaft eingesetzt. In den 1920er Jahren wurde mittels Kran- oder Förderbandsysteme den Rindern das Futter vorgelegt (Eichhorn und Götz 1985). Bis heute existieren einsatzbereite Fütterungssysteme dieses Typs aus der ehemaligen DDR und werden teils auch noch genutzt (Regler et al. 2019). Erst im Jahr 1992 lief der erste Melkroboter im Praxiseinsatz in den Niederlanden (Sieber und Groß 2008). In der Landwirtschaft wird für das Jahr 2025 ein weltweiter Umsatz mit Servicerobotern von ca. 83 Mrd. US-Dollar prognostiziert - die Topplatzierung - noch vor privaten autonomen Fahrzeugen mit ca. 66 Mrd. auf Platz zwei (Breitkopf 2019). Diese computergestützten Systeme gewinnen darüber hinaus eine riesige Menge an Daten. Beispielsweise in Herdenmanagementprogrammen werden die Daten verschiedenster Maschinen gesammelt und in wertschöpfende Informationen verarbeitet. Automatisierung, Big Data und das Internet der Dinge (IoT – Internet of Things) sind die Herausforderungen und zugleich Chancen der gegenwärtigen und zukünftigen Landwirtschaft (Griepentrog 2019).

Derzeitige Lösungsansätze für automatisch arbeitende Systeme zur Fütterung von Rindern bilden sich aus dem Zusammenspiel verschiedener Ansprüche. In absteigender Reihenfolge beeinflussen dabei die technische Umsetzbarkeit, die Anforderungen des Landwirtes, sowie die Ansprüche der Tiere derzeit das Erscheinungsbild von AFS. Die zunehmende Technisierung kann neue technische Lösungen eröffnen, die das Design von AFS nicht weiter limitieren, sondern die Ansprüche von Mensch und Tier in den Fokus rücken. Aufgrund des

erforderlichen Arbeitseinsatzes ist eine täglich mehrmalige Futtevorlage auf den meisten landwirtschaftlichen Betrieben nicht realisierbar. Dabei harmoniert eine mehrfache Futtevorlage vor allem mit einem AMS, da der Kuhverkehr angeregt wird und gleichzeitig die Ruhe im Stall durch Entzerrung von Rangkämpfen gesteigert wird. Die Verdauungsphysiologie der Kühe profitiert von mehrfachen Futtergaben, was sich positiv auf die Gesundheit auswirkt. Als Effekt daraus kann die Milchleistung der Herde gesteigert werden. Bei einer mehrmaligen, kleinportionierten Futtevorlage verbleiben geringere Mengen an Futterresten. Zum Jahr 2015 sind weltweit mehr als 1.300 automatische Fütterungssysteme (AFS) in den unterschiedlichsten Ausführungen installiert, in Deutschland über 200 (Oberschätzl 2015). In den letzten zwei Jahren hat sich die Zahl der installierten automatischen Fütterungssysteme in etwa verdoppelt.

Automatische Fütterungssysteme sind dabei zum einen Teil vergleichbar mit Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Vor mehr als sechs Jahrzehnten begann bereits die erfolgreiche Geschichte der fahrerlosen Transportsysteme in der Intralogistik (Bechar und Vigneault 2016). Die strukturierten und planbaren Umgebungsbedingungen in Industriehallen stellten ideale Bedingungen die ersten Transportfahrzeuge zu automatisieren (Ullrich 2015). Die konstante Beleuchtung, planbefestigte Fahrbahnen, keine Witterungseinflüsse und ausgewiesene Bereiche mit geschultem Personal sind Beispiele für die beherrschbaren Bedingungen. In den Anfängen der FTS in den 1950er Jahren basierte die Navigation auf der Verlegung von stromdurchflossenen Leitern im Boden, bekannt als induktive Spurführung (Ullrich 2015). Die Leiter wurden einfach in den bereits befestigten Böden eingebaut. Heutzutage werden meist LiDAR-Scanner (engl.: light detection and ranging) eingesetzt. Diese basieren auf Laser-Technologie (engl.: light amplification by stimulated emission of radiation) und ermitteln über die Laufzeit und den Winkel des austretenden Laser-Strahls Umgebungsinformationen und können die Fahrzeuge navigieren. Des Weiteren sind LiDAR-Scanner oft Teil von Sensor-Setups, da sie den Personen- und Kollisionsschutz entscheidend verbessern (Csaba 2018; Fritsche et al. 2016; Kubinger et al. 2017).

2. Stand des Wissens

In diesem Kapitel werden in vier Unterkapiteln die grundlegenden wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse zur Milchviehfütterung, zu automatischen Fütterungssystemen, zum LiDAR und zum Radar (engl.: radio detection and ranging) dargestellt. Die ideale Milchviehfütterung ist dabei ein Gleichklang zwischen der Zusammensetzung der Futtermittel, der Verdauungsphysiologie der Rinder und der Futterbereitstellung in der Praxis. In Rücksicht auf die Verdauungsphysiologie und die Zusammensetzung der Futtrationen sollen automatische Fütterungssysteme den Anforderungen der Rinder an die Futterbereitstellung bestmöglich entsprechen. Sie tragen somit dazu bei, die landwirtschaftliche Praxis weiterzuentwickeln und das Tier in den Mittelpunkt der Überlegungen zu stellen. Mit LiDAR und Radar werden zwei Schlüsseltechnologien detaillierter dargestellt, die neben dem Automotive-Bereich auch für die Landwirtschaft große Potentiale bieten, um Maschinen und somit Prozesse zu automatisieren.

2.1 Grundlagen der Milchviehfütterung

Derzeitige Lösungsansätze für automatisch arbeitende Systeme zur Fütterung von Rindern bilden sich aus dem Zusammenspiel verschiedener Ansprüche. In absteigender Reihenfolge beeinflussen dabei die technische Umsetzbarkeit, die Anforderungen des Landwirtes, sowie die Ansprüche der Tiere derzeit das Erscheinungsbild von AFS. Die zunehmende Technisierung kann neue technische Lösungen eröffnen, die das Design von AFS nicht weiter limitieren, sondern die Ansprüche von Mensch und Tier in den Fokus rücken. Die Abstimmung der Fütterung auf die Herde/das Einzeltier optimiert die Gesundheit und Leistungsfähigkeit dieser und ist somit Grundlage für betrieblichen Erfolg (Mulligan et al. 2006; Colman et al. 2011). Um die Nutztiere bestmöglich versorgen zu können, muss man die Bedürfnisse dieser kennen und bedienen (Bellof und Granz 2019).

2.1.1 Ernährungsphysiologie

Wiederkäuer besitzen einen mehrhöhligen Magen, d. h. er besteht aus drei Vormägen und einem „Hauptmagen“. Im drüsenlosen Pansen, Netz- und Blättermagen erfährt die aufgenommene Nahrung eine Vorverdauung. Der mit dem Magen der Monogastrier vergleichbare Labmagen ist ein Drüsenmagen. Das Verdauungssystem von Wiederkäuern erlaubt den Aufschluss von Cellulose durch Pansenbakterien und die Wiederkautätigkeit. Cellulose, ein Polysaccharid, ist Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Das eröffnet den Wiederkäuern die Aufnahme faserreicher Pflanzen, im Gegensatz zu den Monogastriern. Schwankungen des Pansen pH-Wertes hemmen die Pansentätigkeit. Leicht verdauliche Kohlehydrate lassen den pH-Wert sinken. Futtermittelverunreinigung, Futtermittelverderb, der Aufschluss

von Raufutter mit Laugen oder kohlenhydratarme Ernährung lassen den pH-Wert steigen. Die Wiederkautätigkeit wird durch Raufutter angeregt. Eine reine Getreidefütterung unterdrückt diese. (Wittkowski 2016)

Mit der aufgenommenen Nahrung bewältigt das Tier sowohl die Aufrechterhaltung der Lebensprozesse als auch die Erzielung tierischer Leistung, wie z. B. Milch, Eier, Zuwachs, Zugkraft. Reicht diese externe Versorgung nicht aus, kann das Tier auf gewisse Körperreserven zurückgreifen. Das Sicherstellen der Energieversorgung des Tieres ist erstes Ziel bei der Tierernährung. Die Nutzung der Körperreserven ist aus energetischer und physiologischer Sicht ineffizient und sollte nur in Ausnahmesituationen erfolgen. Ist das Tier unterversorgt, führt das zum Absinken der Leistung und kann auch Beeinträchtigungen von Gesundheit und Fruchtbarkeit mit sich führen. Eine Überversorgung ist aus ökonomischer Sicht und wegen möglicher negativer gesundheitlicher Folgen für das Tier ebenfalls abzulehnen. Mithilfe der Futteraufnahme und des Energiegehaltes des Futters ist eine ausgeglichene Energieversorgung anzustreben. (Spiekers 2016a)

2.1.2 Futteraufnahmeverhalten

Mit der Mahlzeitengröße und der Mahlzeitenfrequenz steuert ein Nutztier seine Futteraufnahme. Wird häufiger und gleichmäßiger über den Tag verteilt Futter aufgenommen, so kann das Futteraufnahmevermögen besser ausgeschöpft werden. (Spiekers 2016b)

Werden die Kühe auf der Weide gehalten, so grasen sie acht bis zwölf Stunden lang, aufgeteilt auf etwa fünf Perioden (Winckler 2009). Bei ad libitum-Fütterung in der Stallhaltung verringert sich die Gesamtzeit der täglichen Futteraufnahme auf vier bis sieben Stunden, allerdings nehmen die Fressperioden auf sechs bis zehn zu (Winckler 2009). Versuche von Shabi et al. (2005) zeigten sogar bis zu zwölf Fressperioden auf. Sowohl auf der Weide als auch im Stall zeigen die Kühe dabei ein allelomimetrisches Verhalten, d. h. die Tiere zeigen ein gleichartiges Verhalten und fressen synchron (Winckler 2009). Auch Lefcourt und Schmidtman (1989) berichten über eine herdensynchrone Nahrungsaufnahme bei Rindern. Einfluss darauf haben vermutlich die Zeitgeber „Futternähe“ und „Melken“, aber auch eine Tendenz zum synchronen Herdenverhalten trägt Anteil daran. Am beengten Fressplatz in Stallungen kann dies zu agonistischem Verhalten in der Herde führen, da die soziale Distanz zwischen den Tieren nicht eingehalten werden kann. Rangniedere Tiere können oftmals erst dann fressen, wenn die ranghöheren den Fressplatz verlassen haben.

Kühe selektieren zwischen Futtermitteln unter anderem nach Geruch, Textur und Geschmack. Bevorzugt werden energiereiche Kraffuttermittel gefressen. Grünfutter, Silage und Heu folgen dahinter. Bei der Einzelvorlage der Futtermittel kommt es daher zur Selektion durch die Tiere, die die schmackhafteren Komponenten bevorzugt aufnehmen. (Winckler 2009)

Die gängigste Art der Futtevorlage bei Milchvieh ab einem Alter von 6 Monaten ist eine Total-Misch-Ration (TMR). Dabei werden die einzelnen Futtermittelkomponenten zu einer Gesamtration vermischt. Ein Selektieren der homogenen Futtermischung durch die Tiere wird unterbunden. Nach Krause und Oetzel (2006) sowie Nocek (1997) ist die TMR-Fütterung der Fütterung von Einzelfutterkomponenten generell vorzuziehen. Die konstante Zufuhr der homogenen Futtermischung stabilisiert die Pansenfunktion und sichert eine ausreichende Zufuhr an Rohfaser. (DeVries 2010)

2.1.3 Häufigkeit der Futtevorlage

Ist das Tier-Fressplatz-Verhältnis 1:1, d. h. für jedes Tier der Herde existiert ein Fressplatz, besteht dennoch die Möglichkeit von Rankämpfen und in Folge dessen Verdrängungen von rangniederen Tieren durch ranghohe (Winckler 2009). In Folge der Verdrängung aus dem Fressbereich ändern rangniedere Kühe teilweise ihre Fresszeiten und beginnen zeitlich verzögert mit der Futteraufnahme. Der soziale Rang der Kuh wirkt sich so laut Grothmann (2015a) direkt auf die Dauer und Häufigkeit von Besuchen am Futtertisch aus. Rangniedere Tiere fressen kürzer, besuchen dafür häufiger den Futtertisch (Grothmann 2015a). Bei einer einmaligen Futtevorlage ist das Futter dann aber bereits durch viele Kühe durchwühlt, weggeschleudert und ausselektiert worden. Die rangniedere Kuh muss mit dem restlichen Futter auskommen. Wird hingegen in kürzeren Abständen mehrmals am Tag ein Teil der Ration vorgelegt, erhalten auch die Kühe aus der zweiten Reihe die Möglichkeit an frisches Futter zu gelangen. Im weiteren Tagesverlauf motiviert das Nachschieben und, nach Nikkhah et al. (2008), vor allem das erneute Vorlegen von Frischfutter die Kühe zur erneuten Futteraufnahme.

Grothmann (2015b) deckt in ihren Fütterungsversuchen zur Vorlagehäufigkeit einige auftretende Effekte bei Milchkühen auf. Mit Erhöhung der täglichen Futtevorlagehäufigkeit steigert sich auch die Futteraufnahme der Tiere, was sich mit den Erkenntnissen von Shabi et al. (1999) deckt. Das Wiederkauverhalten wie auch das Fressverhalten bleibt davon wenig beeinflusst (Grothmann 2015a). Auch die Liegedauer der Tiere wird durch die häufigere Futtevorlage nicht negativ beeinflusst (DeVries et al. 2005). Die Fresszeiten und somit die Fressplatzbelegung hingegen entzerren sich über den Tagesablauf, was zu verringerten Auseinandersetzungen zwischen den Tieren führt. In der Folge ist das Verhalten in der Herde ruhiger. Insgesamt wirkt sich somit eine mehrfache Futtevorlage tendenziell eher positiv als negativ auf das Wohlbefinden der Rinder aus (Grothmann 2015b).

Die Wissenschaft ist sich bislang uneins über die Auswirkungen einer mehrfachen Futtevorlage auf die Milchleistung der Tiere. So sprechen Smith et al. (1978), Klusmeyer et

al. (1990), Shabi et al. (1998) und Mäntysaari et al. (2006) von keinem nachweisbaren Effekt für eine erhöhte Milchleistung. Bava et al. (2016) stellt in seinen Untersuchungen jedoch signifikant erhöhte Milchleistungen fest. Bereits 1990 resümieren French und Kennelly (1990) die bis dato durchgeführten Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen Milchleistung und Vorlagehäufigkeit. Sie kamen auf ein ausgeglichenes Verhältnis von Zu- und Widerspruch: 4 Studien assistierten eine steigende Milchleistung, 24 gaben an keine Veränderung festgestellt zu haben und 7 Studien gaben sinkende Milchleistungen an. Die Faktoren, die die Milchleistung in diesen Versuchen beeinflussten, sind dabei sehr vielzählig und unterschiedlich. So spielen die konkrete Anzahl der Futtervorlagen, die Rasse, die Art der Futtervorlage, das Leistungsniveau, das Laktationsstadium, die Laktationsnummer, sowie viele weitere Effekte eine Rolle. French und Kennelly (1990) vermuten, dass die Vorlagehäufigkeit an Bedeutung gewinnt, je höher das Leistungsniveau und die Krafftuteraufnahme der Tiere sind.

Die gleichmäßigere Verteilung der Fressperioden über den Tag hat einen eindeutig positiven Effekt auf die Ernährungsphysiologie der Tiere. Die pH-Wert-Schwankungen verringern sich mit erhöhter Anzahl an Futtervorlagen (Robles et al. 2007; Shabi et al. 1998; Sutton et al. 1986). Darüber hinaus sprechen Shabi et al. (1999) von einer verbesserten Gesamtverdaulichkeit der organischen Masse und des Rohproteins. Aus seinen Versuchen mit pansenfistulierten Bullen schlussfolgert Bragg et al. (1986), dass auch bei Milchkühen durch die stabileren Pansenverhältnisse, Probleme wie Pansenazidose und geringe Milchfettgehalte vermieden werden können.

2.2 Automatische Fütterungssysteme

2.2.1 Technologische Entwicklung

Nach dem Arbeitszeitaufwand absteigend geordnet, nehmen das Melken und das Füttern des Milchviehs die meiste Zeit in Anspruch (Schön et al. 1998). Seit 1975 reifte in Großbritannien, Holland und Deutschland die Überlegung und Forschung zu automatisierten Melksystemen, im Jahr 1992 lief bereits der erste Melkroboter im Praxiseinsatz in den Niederlanden (Sieber und Groß 2008). Die automatisierte Futtervorlage wurde jedoch noch früher in der Landwirtschaft eingesetzt. In den 1920er Jahren wurde mittels Kran- oder Förderbandsysteme den Rindern das Futter vorgelegt. Bis heute existieren einsatzbereite Fütterungssysteme dieses Typs aus der ehemaligen DDR und werden teils auch noch genutzt (Regler et al. 2019). In den 1960ern begann in Süd- und Westdeutschland ein Trend weg von diesen Systemen hin zu Siloblockschnidern bzw. später Futtermischwagen (FMW). Hintergrund waren sicherheitstechnische Aspekte der Kran- und Förderanlagen. (Eichhorn und Götz 1985)

Der klassische und weit verbreitete Produktionsablauf in der Milchviehhaltung umfasst zwei Stallzeiten, morgens und abends. Dieses System ist eine Kompromisslösung aus mehreren Anforderungen. Zum einen war dieser Arbeitsaufwand für die mehrheitlich familiengeführten Betriebe und Gehöfte zu bewältigen, zum Beginn des Tages und am Ende des Tages, einschließlich der Feldarbeit in der Zwischenzeit. Auch der wirtschaftliche Aspekt in Form der Milchertragsmenge war gut und den biologischen Bedürfnissen des Rindes wurde weitestgehend entsprochen. Jeder dieser Faktoren beinhaltet weiteres Optimierungspotential. Darüber hinaus sind die Versorgung von Nutztieren und der Feldfruchtbau seit jeher körperlich anstrengende Aufgaben gewesen. Seit etwa Ende des 19. Jahrhunderts konnten Arbeiten nach und nach mechanisiert, motorisiert und automatisiert werden. Dies verhalf auch der Produktivität von Landwirten sich über die Jahrzehnte zu vervielfachen. Sprach man früher noch z. B. von einer Flächenleistung in Tagwerk, so sind nunmehr hunderte Hektar von nur einer Einzelperson zu bewältigen. Die zeitliche und körperliche Entlastung des Landwirts schafft Platz für weitere/andere wichtige Arbeiten und die Milchleistung von Rindern kann durch dreimaliges Melken gesteigert werden (Wirtz 2004; Rittershaus 2002).

In der Forschung werden seit einiger Zeit automatische Fütterungsanlagen eingesetzt, mit der Aufgabe der Erfassung der Futteraufnahme. Diese besitzen meist eine steuerbare Zugangsbeschränkung und bevorraten das Futter lediglich. Befüllt werden Sie jedoch weiterhin händisch bzw. mechanisiert. (Fröhlich et al. 2005)

2.2.2 Klassifizierung

In diesem Unterkapitel wurde eine möglichst weitreichende Recherche angelegt, um eine Vielzahl verschiedener Automatisierungslösungen für die Fütterungstechnik abbilden zu können. Lösungsansätze, die von besonderem technischem Interesse sind und dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz einer freien Navigation stark entsprechen, wurden ausführlicher beschrieben.

Die auf dem Markt erhältlichen und in der Forschung eingesetzten AFS lassen sich aufgrund einiger ihrer Eigenschaften klassifizieren und unterscheiden. Bei der automatischen Grundfütterung kann zwischen gruppenbezogener und einzeltierbezogener Vorlage unterschieden werden. Anders als bei der Kraffuttergabe, wird das Grundfutter in den meisten Fällen gruppenbezogen gefüttert. Zweites Merkmal ist die Art der Futterbereitung und -verteilung. Ein stationärer Mischer kann entweder aus stationären Vorratsbehältern automatisch beschickt oder durch ein Frontlader-Fahrzeug manuell befüllt werden. Die Verteilung bzw. Vorlage des Futters kann mit einem Futterverteilwagen, dem Mischer als mobilem Futterverteilwagen oder einem Futterband bewerkstelligt werden. Die Futterverteilwagen können sowohl schienengebunden als auch frei fahrend konzipiert sein.

Aus diesen Variationen ergeben sich somit unterschiedliche Stufen der Automatisierung (Abb. 1). Stufe 1 wird als „Automatische Futtervorlage“, Stufe 2 als „Halbautomatische Fütterung“ und Stufe 3 als „Vollautomatische Fütterung“ bezeichnet (Haidn et al. 2013). Diese Einstufung wird in der Folge verwendet um die marktverfügbaren AFS und die AFS aus der Forschung einzuteilen.

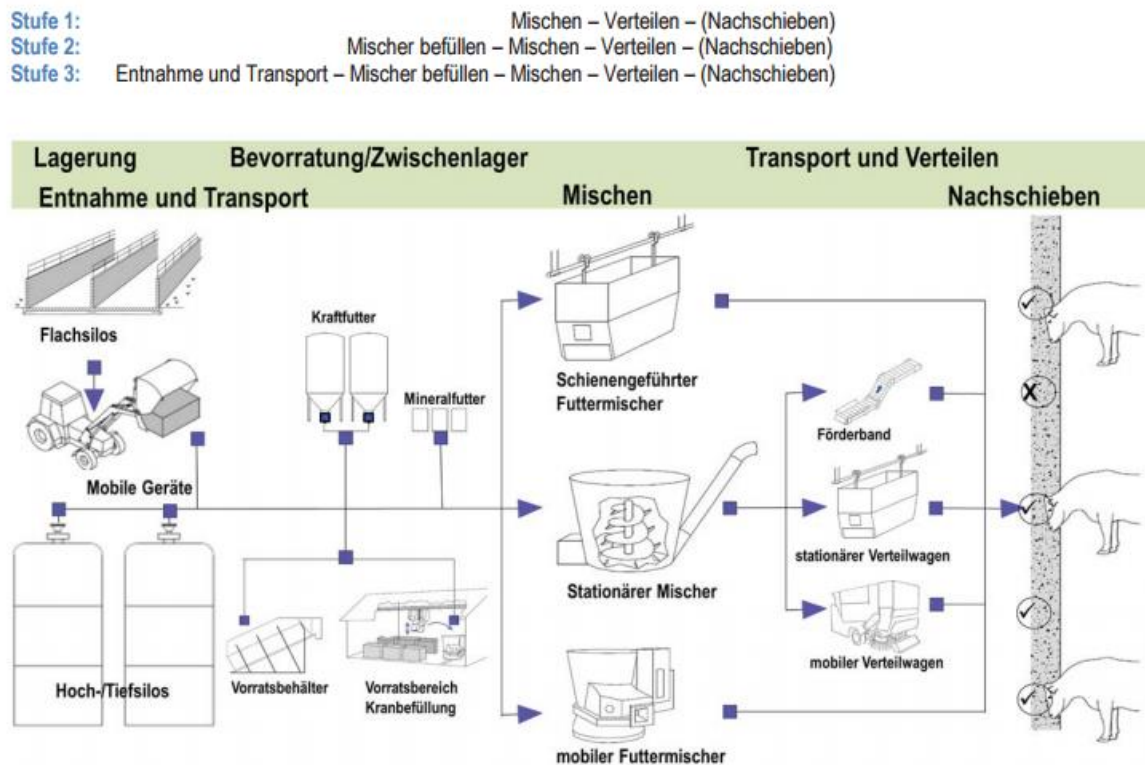


Abb. 1: Die Automatisierungsstufen automatischer Fütterungssysteme (Haidn 2014a).

2.2.3 Marktüberblick

Im Rahmen der Recherche konnten 21 Hersteller ausfindig gemacht werden, die entweder ein AFS am Markt anbieten, angeboten haben oder Projektstudien veröffentlicht haben. Eine nachfolgend erfasste Projektstudie wurde dann aufgenommen, wenn die jeweilige Firma ihre Entwicklungen in diesem Bereich selbst offenlegte und der Öffentlichkeit vorstellte. Die Marktrecherche wurde weltweit angelegt, erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Besonders in den Vereinigten Staaten von Amerika oder Südamerika, sowie in China, Indien und weiteren großen Milcherzeugungsländern ist von weiteren Systemen auszugehen. Die Marktrecherche deckt den Zeitraum von 2007 bis 2021 ab. Durch Vertriebsstrukturen sind insgesamt 24 Firmen auf dem AFS-Markt aktiv. Diese sind:

- EDER GmbH, Tunttenhausen, Deutschland
- PELLON Group OY, Ylihärmä, Finnland

- TKS/KUHN
 - TKS AS Agri, Kvernaland, Norwegen
 - KUHN S.A., Saverne, Frankreich
- GEA Group AG, Düsseldorf, Deutschland
- CORMALL A/S, Sonderborg, Dänemark
- VALMETAL, Saint-Germain-de-Grantham, Kanada
- TRIOLIET, Oldenzaal, Niederlande
- HETWIN Automation Systems GmbH, Langkampfen, Österreich
- LEMMER-FULLWOOD GmbH, Lohmar, Deutschland
- WASSERBAUER GmbH, Waldneukirchen, Österreich
- ROVIBEC AGRISOLUTIONS, Nicolet, Kanada
 - Vertrieb in Deutschland durch SCHAUER Agrotronic GmbH, Österreich
- ONE2FEED, Silkeborg, Dänemark
- DeLaval GmbH, Glinde, Deutschland
- GAMA Group Szebietowscy Sp.j., Wysokie Mazowieckie, Polen
- HIRL Misch- und Anlagentechnik e.K., Falkenberg, Deutschland
- LELY Holding S.á r.l., Maassluis, Niederlande
- JEANTIL, L'hermitage, Frankreich
- Lucas G, La Verrie, Frankreich
 - Vertrieb in Deutschland durch RABE Gregoire-Besson GmbH, Bad Essen
- BÉLAIR S.A.R.L, Parigné, Frankreich
- SCHUITEMAKER Maschinen, Rijssen, Niederlande
- B. STRAUTMANN & Söhne GmbH u. Co. KG, Bad Laer, Deutschland

Die am Markt erhältlichen AFS sind vorrangig schienengebundene Futterwagen (Abb. 2). Diese Systeme bestehen zum einen aus einem reinen Futterverteiltwagen mit stationärem Mischer, zum anderen aus einem kombinierten Misch- und Verteiltwagen ohne stationären Mischer. Eine, vor allem platzsparende Lösung, bieten Futterbänder, die teils mit stationären Mixern aber auch mobilen Futtermischwägen beschickt werden. Sowohl bei Förderbändern, schienengebundenen oder selbstfahrenden, fremd befüllten Futterwagen werden teils Futterrationsbunker angeboten. In flexibler Anzahl ermöglichen die Vorratsbunker eine automatische Futterrationserstellung, was eine Automatisierung der Stufe 2 entspricht. Besonders bei Stallneubauten können diese Systeme sehr individuell an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden, funktionell als auch baulich. Schwachstelle ist eben diese individuelle Lösung, die in großen Systemteilen nicht an andere Ställe anpassbar ist. Ebenso können viele Gebäude des Altbestandes nicht damit versorgt werden, sodass eine weitere Mechanisierung beispielsweise für das Jungvieh nötig ist.

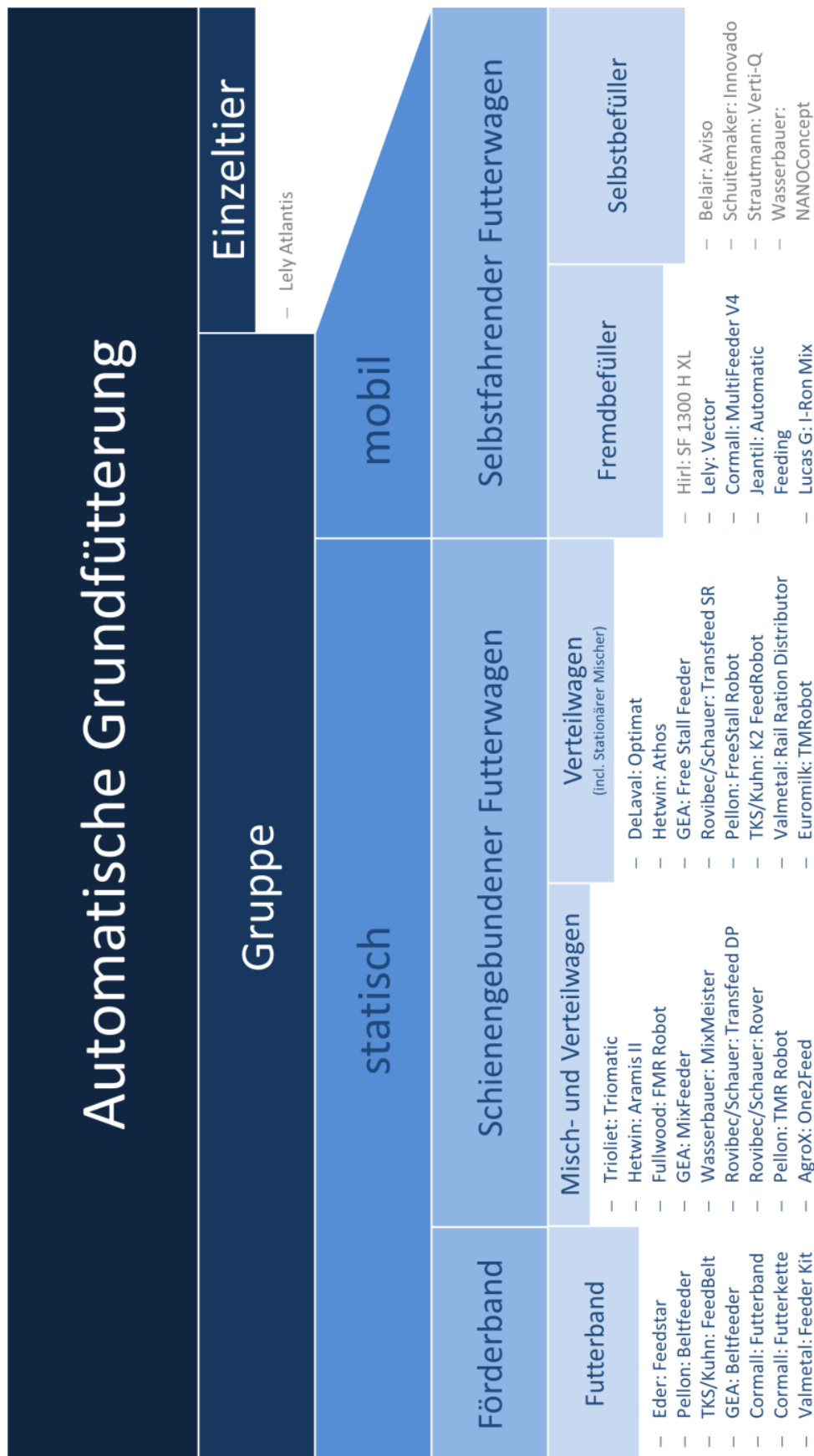


Abb. 2: Eine Übersicht über die bekannten Produkte bzw. Studien zu automatischen Fütterungssysteme der jeweiligen Hersteller. Am Markt erhältliche Systeme sind in blau, nicht am Markt erhältliche Systeme in grau geschrieben. (Reger et al. 2022b)

Die Gruppe der selbstfahrenden Futterwagen teilt sich auf in fremd befüllte Systeme, die mittels einem Ladefahrzeug oder ähnlichem beladen werden, und in sich selbst befüllende Systeme. Das Hirl-AFS wird per Ladefahrzeug beladen und ist Misch- und Verteileinheit in einem. Eine automatische Rationszusammenstellung ist nicht möglich, weshalb es der Automatisierungsstufe 1 angehört. Der Vector von Lely besitzt eine Futterküche, in die der Landwirt mit einem Ladefahrzeug beschickt. Es werden an definierten Plätzen Siloblöcke oder Ballen abgestellt, zugangsgesichert in einer Halle. Das System entspricht deshalb der Automatisierungsstufe 2. Die Systeme von Cormall, Jeantil und Lucas G besitzen jeweils stationäre Mischer, die aus Vorratsbehältern beschickt werden. Sie entsprechen ebenfalls der Automatisierungsstufe 2. Die selbstfahrenden und selbst füllenden Futterwagen (Automatisierungsstufe 3) weisen vier unterschiedliche Konzepte auf. Belair ist als Anbaulösung an einen Gabelstapler konzipiert. Der automatisierte Gabelstapler koppelt selbstständig einen Mischbehälter inklusive Fräsarm an, begibt sich automatisch an Krafftuttersilos bzw. Grundfuttersilos und stellt so vollautomatisch eine/mehrere Rationen zusammen. Schuitemaker hat einen FMW ohne manuelle Steuerungsmöglichkeiten entwickelt. Das Fahrzeug besitzt einen Mischbehälter, einen Schrägförderarm mit unten liegender Fräse und einen Blockschneider. Der Innovado fährt automatisiert zu Kraft- bzw. Grundfuttersilos und entnimmt selbstständig das Grundfutter. Mit dem Verti-Q rüstet Strautmann einen bestehenden Selbstfahrer-FMW mit Sensorik, Aktorik und Software auf, um die Fahrmanöver bzw. die Futterentnahme aus Fahrsilos zu automatisieren. Anders als beim Schuitemaker ist das Fahrzeug jedoch komplett auf Basis eines manuellen Selbstfahrers und kann dementsprechend auch weiterhin manuell genutzt werden. Wasserbauer entkoppelt den Fütterungsprozess und entwickelte zwei Maschinen. Ein Futtermisch- und Verteilwagen kümmert sich um das Mischen der Ration und um die Futtervorlage. Je Fattersilo ist eine festinstallierte Vorrichtung zur Siloentnahme pro Silo nötig. Die zweite Maschine, der sogenannte „Lift“, fräst das Futter im Silo ab und befördert es mithilfe eines Gebläses über Rohre in den Verteilwagen. Die automatisierte Versorgung von Einzeltieren mit Grundfutter entwickelte Lely mit dem Projekt „Atlantis“. Dort waren mehrere Abrufstationen, ähnlich eine Krafftutterabrufstation, vorgesehen. Vermutlich ist in einem Mischer eine Grundfutterration vorgehalten worden, die dann für jede Kuh individuell aufgewertet werden konnte.

Die Absatzzahlen für AFS im Bereich der Fütterungstechnik waren in den vergangenen Jahren, im Verhältnis zu den Verkaufszahlen konventioneller Fütterungstechnik, gering. Jedoch wird eine ähnliche Entwicklung wie bei den automatischen Melksystemen von vielen Seiten prognostiziert, d. h. ein starker Zuwachs der Absatzzahlen und Marktanteile (Bernhardt 2021). Viele Hersteller von Fütterungstechnik sehen sich daher dazu veranlasst, Fuß auf diesem zukünftigen Markt zu fassen. Abb. 2 lässt eine Diversität an unterschiedlichen AFS vermuten, was jedoch nicht der Fall ist. Als Beispiel sei hier das System Aramis II von Hetwin

genannt, dass dem FMR Robot von Lemmer-Fullwood entspricht. AFS werden teils zugekauft und dem jeweiligen Firmenportfolio angegliedert. Der Großteil der installierten Systeme sind daher statische AFS. Förderbänder bzw. schienengebundene Futterwagen stellen eine einfache bauliche Lösung dar. Die Stromversorgung oder die Spurführung sind technisch nicht anspruchsvoll, erfordern jedoch einiges an Infrastruktur in Form von Schienen und Halterungen. Kombiniert mit einem Mischer bzw. Futtervorratsbehältern kann schnell ein AFS der Automatisierungsstufe 2 errichtet werden. Große Nachteile dieser Lösungen sind die notwendige Infrastruktur, der Platzbedarf und die unflexible Nutzbarkeit. Eine Weiterentwicklung dieser statischen AFS stellen selbstfahrende Futterwagen dar. Diese nutzen in der Regel Punktfolgen aus Magneten oder Transpondern bzw. induktive Leitdrähte für die Navigation. Diese Technologien stammen aus der Intralogistik und werden dort seit den 1970ern eingesetzt. Diese Form der Spurführung löst sich von festen Installationen und ermöglicht im Rahmen der Installation von Punktfolgen eine gewisse Anpassungsfähigkeit.

Im Folgenden werden automatische Fütterungssysteme aller Automatisierungsstufen 1 bis 3 vorgestellt. Je Automatisierungsstufe wird eine Unterscheidung zwischen statischen und mobilen Systemen gemacht.

2.2.4 Stufe 1: Automatische Futtervorlage

Bei der automatischen Futtervorlage ist lediglich das Mischen, Ausdosieren und Anschieben des Futters am Trog automatisiert, die Befüllung muss für jede Mischung manuell erfolgen. Zumeist wird mit dieser Systemart eine Leistungsgruppe gefüttert. Das Füttern einer weiteren Leistungsgruppe erfordert das erneute manuelle Erstellen einer Mischration. Dennoch kann Arbeitszeit eingespart und vor allem flexibilisiert werden. Die Arbeitszeiterparnis fällt dabei geringer aus als im Vergleich zu halb- oder vollautomatischen Fütterungssystemen (Automatisierungsstufe 2 oder 3). Aufgrund der fehlenden Futtervorratsbehälter und anderweitigen baulichen Aufwendungen fallen aber geringere Kosten für das System an. (Haidn 2014b)

2.2.4.1 Statisch

Eder Feedstar

Das Eder Feedstar-AFS ist ein käuflich erwerbliches Produkt der Firma Eder GmbH aus Tuntenhausen. Ein gewöhnlicher Futtermischwagen speist an einem Beladepunkt ein Futterband, das das Futter den Kühen im Trog vorlegt.

Der Futtermischwagen ist hybrid betrieben, das heißt während des manuellen Befüllvorgangs wird er per Zapf- und Gelenkwelle vom Traktor betrieben. Befindet sich der FMW dann zum Ausdosieren am Beladepunkt des Futterbandes, ist er an das Starkstromnetz angeschlossen

und wird über eine elektronische Komponente angesteuert. In der Steuereinheit ist eine frei programmierbare Routine mit den individuellen Fütterungszeitpunkten hinterlegt. Beim Zurückziehen des Bandes mit Futterresten kommt ein Abstreifer zum Einsatz, der das Restfutter in einem Schacht abwirft. (EDER GmbH o. J.)

2.2.4.2 Mobil

Hirl SF 1300 H XL

Beim Hirl SF 1300 H XL handelt es sich um einen Prototyp aus einem Forschungsvorhaben. Die Firma Hirl Misch- und Anlagentechnik GmbH & Co. KG hat zusammen mit der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Bayern und dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität (TU) Braunschweig ein automatisches Futtervorlage-System entwickelt. Basis ist ein Selbstfahrer-FMW aus dem Hause Hirl. (Adeili et al. 2015b)

Der FMW wird personengebunden manuell befüllt. Einige Tiergruppen, wie z.B. Jungvieh, Trockensteher o. ä., werden wie bisher personengebunden gefüttert. Den laktierenden/hochleistenden Kühen wird mehrmals täglich das Futter autonom vorgelegt. Der Selbstfahrer-Futtermischwagen wurde um einen Laser-Scanner zur Orientierung und ein Kollisionsschutzsystem (Advanced Object Detection System (AOS), Fa. Sick) ergänzt. Durch den modularen Aufbau des Navigations- und Personenschutzsystems ist ein Nachrüsten auf allen aktuellen Selbstfahrern der Firma Hirl möglich. Der Laser-Scanner ermöglicht eine freie Navigation und Bahnplanung ohne externe Einrichtungen/künstliche Landmarken. Der Scanner für die Navigation ist zwischen Kabine und Mischbehälter leicht erhöht angebracht. Die Personenschutzscanner sind an der Unterseite des Fahrwerks angebracht, ungefähr in Höhe sowohl der Vorder- als auch der Hinterachse. Als weitere Sicherheitseinrichtungen gibt es mehrere Not-Aus-Schalter und Reißleinen an beiden Seiten des Fahrzeugs. Mithilfe des Laser-Scanners wird während sogenannten Teach-Fahrten eine 2-dimensionale Karte der Umgebung erstellt. Beim automatischen Abfahren der vorprogrammierten Route vergleicht der Rechner die aktuellen Laser-Scannerdaten mit den in der Karte hinterlegten. An bekannten Geometrien (Ecken, Kanten, etc.) bestimmt die Maschine ihren Standpunkt. (Adeili et al. 2015a)



Abb. 3: Der Hirt-Selbstfahrer aus dem Forschungsprojekt mit der LfL und der TU Braunschweig. Zu sehen sind die Laser-Scanner für Kollisionschutz (grün) und Navigation (blau), sowie die Reißleinen und Not-Aus-Taster (rot). (Haidn 2014c)

2.2.5 Stufe 2: Halbautomatische Fütterung

Die halbautomatische Fütterung kann mehrmals täglich automatisiert verschiedene Rationen für mehrere Leistungsgruppen zubereiten. Das Mischen und Verteilen des Futters kann getrennt durch einen stationären Mischer und ein Futterband bzw. einen Futterverteilwagen erfolgen oder auch durch einen Mischverteilwagen zusammengefasst werden. Die Verteilwagen sind dabei entweder schienengebunden oder selbstfahrend gestaltet oder durch ein Futterband ersetzt. Kritisch ist hierbei die längere Verweildauer des Futters in den Vorratsbehältern zu sehen, die starken Einfluss auf die Futterqualität haben kann. (Haidn 2014b)

2.2.5.1 Statisch

DeLaval Optimat

Das DeLaval System besitzt eine Futterküche mit Raufutter-Behältern, die horizontal beladen werden. Dazu eignen sich unter anderem auch Siloblocksneider. Von den Vorratsbehältern wird das Grundfutter auf ein Querförderband gefräst und zu einem zentralen, stationären Vertikalmischer (VSM) transportiert. Kraft- und Mineralfuttermittel werden direkt über Schnecken in den VSM dosiert. Die Dosierung erfolgt über die Wiegeeinrichtung des VSM. Dazu müssen die Vorratsbehälter lückenlos befüllt sein, um eine gleichmäßige Beschickung der Förderbänder durch die Auflösehaspel zu gewährleisten. Vom Mischer gelangt das Futter in den Verteilwagen, der an T-Träger-Schienen aufgehängt ist. Die Befüllung wird über den Computer programmiert und über Lichtschranken überwacht. Je nach Herdengröße können Behältervolumen des VSM sowie Anzahl der Futtervorratsbehälter variieren. Der Hersteller bietet unterschiedliche Automatisierungsstufen an, die von Optimat (VSM, Verteilwagen) über Optimat Plus (VSM, Verteilwagen, Kraffuttersilos) bis zum Optimat Master (VSM, Verteilwagen, Kraffuttersilos, Raufuttersilos) reichen. (DeLaval GmbH 2018; DeLaval 2014)

Trioliet Triomatic

In einer Grundausstattung besitzt das Modell T20 einen stationären Mischbehälter, der über einen Schrägförderer die Futtermischung in den Futterverteilmwagen lädt. Das Modell T30 ergänzt den stationären Mischer um schräg angestellte Futtervorratsbehälter, deren Anzahl je nach Zahl der Raufutterarten variabel ist. Im Topmodell T40 sind unterschiedliche Anzahlen horizontaler Futtervorratsbehälter möglich. Mineralfutter und Zusatzfuttermittel können auch automatisch über Rohranlagen zugefügt werden. Das System kann bis zu 700 Kühe täglich mit Futtermischungen versorgen. (Trioliet Mullos BV 2018)

Der Futterverteilmwagen ist in zwei Konfigurationen erhältlich, einmal mit Bodenantrieb und einmal als aufgehängte Verteileinheit. Beide Varianten besitzen ein Fassungsvermögen von drei Kubikmetern, einen beidseitigen Austrag per Förderband und sind komplett elektrisch (400 Volt Betriebsspannung) angetrieben. Die bodenangetriebene Variante besitzt vier Räder, von denen zwei als Tast- und zwei als Antriebsräder fungieren. Daraus ergibt sich ein Überlagerungslenkgetriebe, die durch Winkelsensoren am Stromaufnehmer gesteuert wird. Die Verbindung zur Stromschiene ist durchgängig. Über Pulszähler auf den Antriebsrädern wird die Position des Verteilmwagens erfasst. Referenzpunkte in der Stromschiene helfen diese Positionierung weiter zu korrigieren. Für die Sicherheit des Systems sorgt ein Stoßfänger in Vorwärtsfahrtrichtung. Dort ist in der Verkleidung auch ein Not-Aus-Schalter integriert. Das Fahrwerk ist ringsum eingehaust und wird zum Anschieben des Futters benutzt. (Trioliet Mullos BV 2018)

Hetwin Aramis II/Athos

Das System Aramis II besteht aus Fräs- oder Dosierbehältern, und einem Futtermisch- und Verteilmwagen. Der Mischwagen wird schienenengebunden, hängend in das Stallgebäude installiert. Die Futterküche kann für mehrere Tage im Voraus befüllt werden. Die Arbeitsschritte Einwiegen, Schneiden, Mischen, Dosieren und Futteranschieben werden automatisiert erledigt. (Hetwin Automation Systems GmbH o. J.a)

Der Verteilmwagen besitzt eine bogenförmige Blechkonstruktion auf beiden Längsseiten. Diese sind bodennah und seitlich am Verteilmwagen angeordnet, sodass sie mit Hilfe einer Gummierung das Futter nachschieben können. Die Mischwalzen sind horizontal angeordnet und der Wagen verfügt über beidseitige Auswurföffnungen. Das System eignet sich für schmale Futtertische. In den Bereichen, in denen das System agiert, wird als „No-Go-Area“ abgesichert, um Personen vor der Maschine zu schützen. Ansonsten würden Auflagen für Mindestabstände zwischen Maschine und festen Einrichtungen nicht eingehalten werden. Des Weiteren verfügt der Verteilmwagen über Notaus-Schalter an allen vier Seiten. (Hetzenauer 2017)

Das System Athos ist eine vereinfachte Version des Aramis II. Mit dem Athos bietet Hetwin auch kleinen und mittleren Betrieben eine Lösung für die automatische Futtervorlage. Im Gegensatz zum AFS Aramis II wird auf eine Futterküche verzichtet. Ein stationärer Mischer befüllt einen schienengebundenen, vereinfachten Verteilwagen. (Hetwin Automation Systems GmbH o. J.b)

Lemmer-Fullwood FMR Roboter

Lemmer-Fullwood vertreibt unter eigenem Namen das Produkt Aramis II von Hetwin. Das FMR Roboter-System von Fullwood besteht ebenfalls aus einer Futterküche mit Vorratsbehältern für verschiedenste Grundfutterarten/Krafffutterarten. Ein dreieinhalb Kubikmeter großer Futtermisch- und Verteilwagen wird schienengebunden, hängend installiert. Außer auf der Rückseite des Wagens befinden sich an drei Stellen Notaus-Schalter. Der Verteilwagen kann beidseitig Futter auswerfen und, durch bogenförmige Bleche mit Gummierung, nachschieben. (LemmerFullwood 2012)

GEA Automatische Fütterung

GEA hat verschiedene Lösungsansätze für die automatische Fütterung im Portfolio. Das System „Belt Feeder“ legt die Futtermittelration durch eine Kombination aus Förderband und Gleitschieber vor, welche von einem stationären Mischer gespeist wird (GEA Farm Equipment / Mullerup o. J.a). Der „Free Stall Feeder“ verteilt das Futter mittels hängend schienengeführtem, batteriebetriebenen Futterwagen und wird aus einem stationären Mischer befüllt (GEA Farm Equipment / Mullerup o. J.b). Bei „Mix & Carry“ sind Futtervorratsbehälter dem System „Free Stall Feeder“ angegliedert und ermöglichen eine Vorratsfütterung (GEA Farm Equipment / Mullerup o. J.c). Beim „MixFeeder mit WIC“ sind Mischeinheit und Verteilwagen zu einem Mischwagen zusammengefügt und werden direkt aus den Vorratsbehältern befüllt. „WIC“ (eng. Wireless Integrated Control) beschreibt dabei die Software, die eine drahtlose Kommunikation mit vielen Endgeräten (PC, Bedienpanel, Tablet oder Smartphone) ermöglicht und so das Herdenmanagement flexibler und von überall steuerbar macht. (GEA Farm Technologies GmbH o. J.)

Wasserbauer MixMeister 3000

Das halbautomatische System von Wasserbauer bevorratet in horizontalen Containern mit Kratzboden und Fräse das Futter, das in Blöcken abgestellt wird. Direkt oder über Förderbänder gelangt das abgefräste Raufutter in den drei Kubikmeter fassenden Mischbehälter des Systems, der auch die Verteileinheit bildet und eine vertikale Mischschnecke besitzt. Mineralfuttermittel etc. werden über Fallrohre an bestimmten Befüllpunkten zugefügt. Für die automatisierte Rationserstellung ist ein Wiegesystem

integriert. Die Führung des Misch- und Verteilwagens unterscheidet sich von allen anderen Systemen, da sich der Großteil des Gewichts auf zwei Rädern auf dem Boden stützt und der Wagen auf der anderen Maschinenseite an einer obenliegenden Metallschiene „anlehnt“ und geführt wird. Der Antrieb erfolgt per E-Motor an der Leit- und Führungsschiene. An Leitblechen, die das Fahrwerk einhausen, wird das Futter angeschoben und über beidseitige Rohre können Kraftfuttermittel (z. B. als Lockfutter beim Anschieben) dazu gefüttert werden. (Wasserbauer GmbH o. J.a; wasserbauer123 2014)

Schauer Transfeed DEC TMR/Rover (Rovibec Agrisolutions)

Die Schauer Agrotronic GmbH vertreibt in Deutschland die Fütterungssysteme des Herstellers Rovibec Agrisolutions aus Quebec/Kanada. Angeboten werden der „Transfeed DEC TMR“ Fütterungsroboter sowie der „Rover“ Fütterungsroboter. Die Systeme unterscheiden sich lediglich aufgrund ihrer Futterverteiler- bzw. Mischwägen. Die „Transfeed“-Modelle sind an einer zentralen Schiene (Monorail) aufgehängt und werden durch E-Motoren angetrieben. Der „Rover“ Fütterungsroboter besitzt ein Fahrwerk mit 4 hydraulisch angetriebenen Rädern und folgt einer fest installierten Führungsschiene, über die auch die Stromversorgung sichergestellt wird. Beide Systeme besitzen an Vorder- und Rückseite mechanische Stoßfänger (engl. Bumper). Das Fahrwerk des „Rover“ ist eingehaust. Ein keilförmiges Leitblech kann zum Anschieben des Futters angehoben und abgesenkt werden. Der Transfeed DEC TMR bzw. der Rover Fütterungsroboter kann als System mit stationärem Mischer und Futterverteilerwagen oder einem kombinierten Misch- und Futterverteilerwagen ausgeführt sein. Die Vorratsbehälter für Raufutter gehören zu allen Systemen von Schauer. (Rovibec Agrisolutions o. J.; Schauer Agrotronic GmbH o. J.)

Pellon TMR Feeder Robot/FreeStall Robot/Beltfeeder

Auch die Pellon Group Oy bietet ein automatisches Fütterungssystem als Bandfütterung an. Das Prinzip ist das Gleiche wie beim GEA „Belt Feeder“, ein stationärer Mischer dosiert die Ration auf ein Futterband. Das Futterband verläuft über dem Futtertisch und ein gegenläufiger Schlitten befördert die Ration auf den Futtertisch. Es kann aber auch mit einem Futtermischwagen auf das Futterband dosiert werden (siehe Eder „Feedstar“). Der „TMR Feeder Robot“ ist Misch- und Verteilerwagen in einem. Er ist an einer Metallschiene aufgehängt. Der „FreeStall Robot“ ist ein Verteilerwagen, der fertig gemischte Rationen vorlegen kann. Die Anzahl an Futtervorratsbehältern richtet sich nach der Zahl eingesetzter Futtermittel. (Pellon GmbH 2016; Pellon Group Oy 2010)

Kuhn/TKS Agri K2 FeedRobot/Feedbelt

Die norwegische Firma TKS AS Agri stellt den "K2 FeedRobot" her, ein automatisches Fütterungssystem bestehend aus einem stationären Mischer (TKS FeedMixer Kuhn), einem Förderband und einem an Schienen gehängten Verteilwagen (TKS Agri 2016b). Seit 2014 besteht eine Partnerschaft zwischen TKS und der KUHN-Gruppe (KUHN S.A. 2014). Es können auch Vorratsbehälter für Raufutter installiert werden (TKS AS o. J.). Der Verteilwagen besitzt drei vertikal rotierende Bürsten, die mit Bodenkontakt die Futterreste in Richtung Fressgitter räumen. Alternativ wird auch ein Futterband angeboten, welches dem Funktionsprinzip der Futterbänder von Pellon und GEA gleicht (TKS Agri 2016a).

One2Feed

Das dänische Unternehmen One2Feed stellt ein automatisches Fütterungssystem her, bestehend aus Vorratsbunkern und einer kombinierten Misch- und Verteileinheit. Das lose Raufutter wird per patentiertem „Moving Floor“-System in den Zweischnecken-Vertikalmischer dosiert. Bodenlamellen werden per Hydraulikzylinder vor- und zurückbewegt. Die Besonderheit der Vorratsbunker ist die wahlweise mobile Ausführung, d. h. die Vorratsbunker können durch eine Achse und Deichsel wie Anhänger zum Silo gefahren werden und anschließend wieder an ihre Position in der Futterküche gestellt werden (One2Feed 2016). Die dreieinhalb Kubikmeter große Verteileinheit ist zentriert an Metallschienen aufgehängt und wird durch eine 400 Volt-Stromschiene versorgt. Der Futteraustrag ist beidseitig möglich und ein absenkbares Schild befördert Futterreste zurück auf den Futtertisch. RFID-Tags (Radio Frequency Identification), die vom Fahrzeug an der Führungsschiene ausgelesen werden, markieren definierte Stopps und Bereiche. (One2Feed 2015, 2018)

Valmetal Autoration V+

Der kanadische Hersteller Valmetal bietet sowohl die Variante eines stationären Mixers mit Verteilwagen, als auch die Variante mit Bandfütterung an. Der Robot 210 ist ein Verteilwagen für Zusatzfuttermittel, welcher bis zu zwölf verschiedene Komponenten bei einer Kapazität von 1,07 Kubikmeter fassen kann (Valmetal 2014b). Er ist, wie auch der TMR Distributor, schienengebunden. Der Verteilwagen wird über die Schiene mit Strom versorgt, beim Robot 210 kommen vier 6V-Gelbatterien zum Einsatz. Eine automatische Ladung der Batterien erfolgt über Ladekontakte an der Schienenstrecke. Mechanische Bumper an Vorder- und Rückseite sind für den Robot 210 optional verfügbar. Der Verteilwagen besitzt Not-Stopp-Taster an Vorder- und Rückseite. Außerdem besitzt es verstärkte Stoßstangen an Vorder- und Rückseite, wovon sich eine No-Go-Area ableiten lässt, in der die Maschine betrieben werden muss. (Valmetal 2016, 2014a, o. J.)

Euromilk TMRobot

Die GAMA Group ist ein polnisches Unternehmen, das ebenfalls ein schienengeführtes Fütterungssystem unter der Marke Euomilk herstellt. Von einem fremdbefüllten, elektrischen stationären Mischer gelangt die Futtermischung über Förderbänder in den akkubetriebenen Verteilwagen. Dieser legt die programmierte Ration mehrmals am Tag vor. Ein Querförderband ermöglicht den beidseitigen Austrag. Eine rotierende Trommel kann zum Anschieben des Futters abgesenkt werden. Das System ist modular um bis zu fünf Vorratsbunker erweiterbar, die dann den Mischer automatisch befüllen. An den Verteilwagen kann zusätzlich eine Dosieranlage für Zusatzfuttermittel angebracht werden. (EUROMILK POLSKA 2016; Euomilk 2016)

2.2.5.2 Mobil

Lely Vector

Der Lely Vector besteht aus einem zwei Kubikmeter großen Futtermisch- und Verteilwagen, einem Befüllkran und einem Futtervorratsplatz (Abb. 4). Dieser Futtervorratsplatz unterscheidet sich von allen anderen Varianten, da der planbefestigte Boden unterteilt und als Zwischenlager genutzt wird. In den vordefinierten Flächen werden die Siloblöcke bzw. Heuballen etc. abgestellt. Die Siloblöcke müssen daher ein kompatibles Maß besitzen, um reibungslos aufgenommen werden zu können. In der Systemsteuerung wird eingegeben, auf welchen Parkflächen sich welche Futtermittel befinden. Der Greifer der Kranbahn detektiert dann mittels einer 3D-Kamera die Blöcke in Breite und Höhe und dosiert über die Öffnungsweite und Eindringtiefe die aufgenommene Menge Futter. Mineral- und Kraftfutter werden über Schnecken direkt in den Mischbehälter gegeben und mit der dort integrierten Waage dosiert. Aufgrund des kleinen Mischervolumens und der unpräzisen Aufnahmeeinheit kommt es derzeit beim Lely Vector noch zu großen Schwankungen in der Rationszusammensetzung (Bonsels 2016). Auch die Futterreste, die der Greifer nicht erfassen kann, sind im Vergleich zu anderen AFS deutlich erhöht. (Veauthier und Ostermann-Palz 2014)

Das System lässt sich an nahezu jedes Stalllayout anpassen und greift dabei auf eine Reihe von Techniken zurück. Der Abstand zum Fressgitter wird über einen Ultraschallsensor ermittelt. Gleichzeitig misst ein Laser-Scanner die Höhe der Futterreste, wonach entschieden wird, ob das Futter nur angeschoben oder auch nachgelegt wird. Um von der Befüllposition zum Futtertisch zu gelangen, orientiert sich der Futtermischwagen an Induktionsschleifen im Boden und für die Einteilung von Futtergruppen werden Metallstreifen auf den Boden montiert. Trotz der Einsparung von Leit- und Stromschienen benötigt der Verteilwagen eine Reihe von externen Einrichtungen, wie z. B. Metallstreifen und Induktionsschleifen, zur Erfüllung seiner automatischen Futtervorlagefahrten. (Veauthier und Ostermann-Palz 2014)



Abb. 4: Das Lely Vector-AFS mit allen Bestandteilen (Bild links) und bei einem Befüllungsvorgang (Bild rechts). (Lely)

Der Personenschutz soll beim Lely Vector mittels eines mechanischen Bumpers gewährleistet werden (Abb. 5). Dieser ist als komplettes, separates Bauteil 360° um den Futtermischwagen aufgehängt und löst bei mechanischer Betätigung aus. In Verbindung mit der niedrigen Fahrgeschwindigkeit des Systems von maximal einem Meter pro Sekunde bleibt die Krafteinwirkung bei einem Zusammenstoß sehr gering und vermeidet so Schäden an Personen, Tieren oder Gegenständen. Der rotierende, rundum geschlossene Futteranschieber befördert Objekte aus dem Fahrbereich des Vectors. Auch dadurch werden Unfälle durch Überfahren von Objekten, Menschen oder Tieren verhindert. Die Fütterküche ist komplett umzäunt und durch Kontaktschalter am Zugang gegen unbefugtes Betreten gesichert. Für die Befüllung oder bei Wartungsarbeiten im Gefahrenbereich muss das gesamte System abgeschaltet und gegen versehentliches Aktivieren gesichert sein.



Abb. 5: Die wichtigsten Komponenten des Lely Vector Futtermisch- und Verteilwagens. (PitchEngine Inc. 2012)

Cormall MultiFeeder V4

Der Cormall MultiFeeder besitzt einen automatischen, selbstfahrenden, dieselbetriebenen Futtermittelverteiler mit drei Kubikmetern Fassungsvermögen. Dieser verteilt das Futter mithilfe von Walzen und einem Förderband wahlweise nach links oder nach rechts neben das Fahrzeug. Gesteuert wird der Futtermittelverteiler über einen im Boden eingelassenen Induktionsdraht und zugehöriger Induktions-Sensorik. Auch eine manuelle Steuerung mittels Joysticks und Fahrerstand ist möglich. (van Hattum und Lehnert 2007)

Außerdem beschreiben Bisaglia et al. (2010), dass Laser-Sensoren zum Einsatz kommen. Mit zwei Radialbesen werden Futterreste angeschoben.

Des Weiteren gehören ein stationärer Mischer (zwölf Kubikmeter) sowie mehrere Futtermittelbehälter (10 bis 50 Kubikmeter) zum System (Abb. 6). Die Futterbehälter sind schräg angeordnet und werden per Frontlader mit loseem Futter befüllt. (van Hattum und Lehnert 2007)

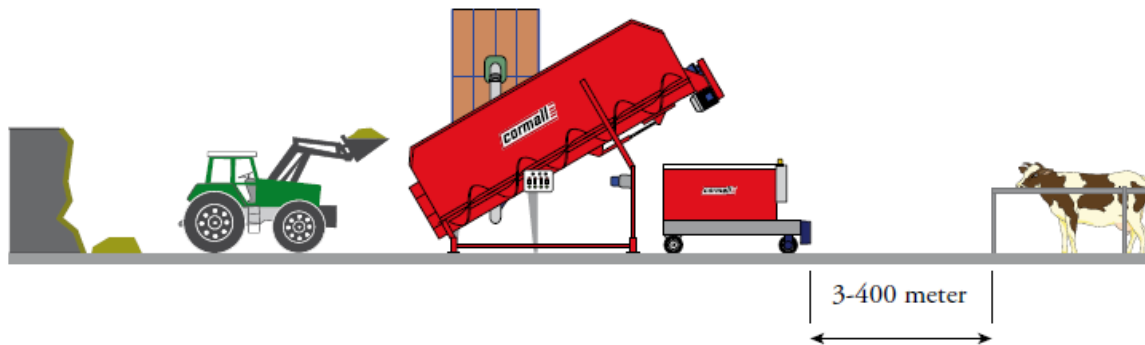


Abb. 6: Das Cormall MultiFeeder-System im Schema. Die Produkte der Konkurrenten, wie z. B. Lucas G, Lely oder Jeantil funktionieren auf ähnlich Weise. (Grondahl 2018)

Der Futterverteilerwagen ist als Dreirad ausgeführt, wobei die Frontachse angetrieben wird. Das erlaubt eine hohe Wendigkeit und aufgrund der kompakten Bauform gibt der Hersteller eine benötigte Futtertischbreite von nur zweieinhalb Metern an. Beim aktuellen Cormall Multifeeder V4 sorgen Abdeckplatten und Sicherheitsbügel in Fahrtrichtung für die nötige Sicherheit. Damit ist der Multifeeder „[...] in Übereinstimmung mit den Regeln und Vorschriften für automatische Fahrzeuge produziert.“. Es wurden unter anderem auch „[...] personenempfindliche Sensoren in die Liste der Sicherheitseinrichtungen aufgenommen [...]“, ohne dass diese genauer benannt wurden. (Grondahl 2018)

In einem Video der Firma Cormall ist außerdem an der Fahrzeugvorderseite ein Ultraschallsensor zu erkennen (Cormall A/S 2014b). Dieser ist mittig unter der Warnleuchte auf einer Höhe von ca. 40 Zentimetern angebracht. Es existieren Notaus-Reißleinen und -Schalter sowie Bumper in beiden Fahrtrichtungen. Cormall bietet das System auch mit einem Futterband an, ähnlich denen von GEA und Co (Cormall1 2011).



Abb. 7: Zentrale Einrichtungen beim Cormall MultiFeeder V4. (Cormall A/S 2014a)

Jeantil Automatic Feeding

Das Automatic Feeding-Konzept der Firma Jeantil hat auf der SIMA 2013 (Salon International du Machinisme Agricole) eine Silbermedaille bei den Innovation Awards gewonnen (Jeantil o. J.). Über das System ist wenig bekannt bzw. veröffentlicht. Informationen sind lediglich von Herstellerseite in Form von Videos und Infomappen verfügbar.

Das System umfasst eine Futterküche mit mehreren horizontalen Futtervorratsbehältern sowie einigen speziellen Zubringern, z.B. für Rundballensilage. Über Förderbänder wird das Futter in einen stationären Mischer transportiert. Dieser wiederum dosiert die Futtermischung in einen fahrerlosen, automatischen Verteilwagen. Der Verteilwagen besitzt ein dreirädriges Fahrwerk. Das Fahrwerk wird dabei komplett von der Verkleidung/Karosserie abgedeckt. Sowohl im Außen- als auch Innenbereich navigiert der batteriebetriebene Roboter entlang einer aktiv-induktiven Leitspur. Aus dem Behälter wird das Futter auf ein fahrzeugvorderseitiges Querförderband aufgebracht, das das Futter beidseitig, jedoch nicht gleichzeitig auswerfen kann. Um das Futter nachzuschieben kann das Fahrzeug einen Metallkegel mit Gummilippe quer zur Fahrspur über die Fahrzeugbreite hinausbewegen. (JEANTIL VIDEO 2017)

Für den sicheren Betrieb des automatisierten Verteilwagens sind Warnleuchten an Vorder- und Rückseite des Wagens befestigt. Insgesamt vier Not-Aus-Schalter (an beiden Fahrzeugseiten jeweils vorne und hinten) sollen das schnelle Abstellen in Notsituationen gewährleisten. In Vorwärts- und Rückwärtsfahrt ist je ein Bumper über die komplette Fahrzeugbreite installiert, der bei einer Kollision mit einem Objekt mechanisch den Stillstand des Fahrzeuges herbeiführt. (Pleinchamp 2014)



Abb. 8: Aufbau des Jeantil Automatic Feeding-Verteilwagens. (Jeantil o. J.)

Lucas G I-Ron Mix

Der französische Hersteller Lucas G plante die kommerzielle Einführung eines automatischen Fütterungssystems zur SIMA-Messe 2017 in Frankreich (Schubnel 2017). Das System ist am Markt erhältlich.

Ein vollelektrischer Futtermittelverteilwagen fährt anhand einer „wire guidance“, d. h. er navigiert mithilfe eines induktiven Leitdrahtes, der in den Boden eingelassen wird. Zur weiteren festen Infrastruktur zählt eine Futterküche, bestehend aus mehreren Vorratsbunkern sowie einem stationären Mischer. Ähnlich dem Cormall MultiFeeder V4 ist auch dieser Futtermittelverteilwagen mit einem dreirädrigen Fahrwerk ausgestattet. Sowohl Antrieb als auch die Lenkung erfolgen über das Vorderrad. Besonderheit des Verteilwagens sind zwei zusätzliche Behälter mit Dosierschnecken am Fahrzeugheck. Diese ermöglichen einen individuellen Zusatz von Futtermitteln, der sich z. B. an verschiedenen Leistungsgruppen orientiert. Für einen sicheren Betrieb des AFS sorgen Warnleuchten, Bumper, Not-Aus-Schalter bzw. -Reißleinen und Sensoren für Objekt- und Hinderniserkennung an der Vorderseite. (Lucas G 2017)



Abb. 9: Das Futtermittelverteilfahrzeug "I-Ron Mix" von Lucas G (Lucas G 2017).

2.2.6 Stufe 3: Voll-automatische Fütterung

Ein vollautomatisches Fütterungssystem übernimmt neben der Zusammensetzung der Ration, dem Mischen und Verteilen auch die Futterbereitstellung. Das heißt das Fütterungssystem bezieht die Futterkomponenten direkt aus dem Silo. Eine Zwischenlagerung fällt weg, was sich positiv auf die Futterqualität auswirkt. Silage kann in Zwischenlagern nur wenige Stunden bzw. Tage gelagert werden, da der Lufteintritt das Futter schneller verderben lässt (Adeili 2015; Grothmann 2015a). In der Zusammensetzung und Verteilung der Rationen ist das System

umfänglich flexibel und benötigt keine manuellen Arbeitsschritte. Allerdings sind derartige Systeme kostenintensive Investitionen mit teils hohen Energieverbräuchen. (Haidn 2014b)

2.2.6.1 Belair AVISO

Auf der SIMA 2013 in Paris stellte Belair ein bislang einzigartiges Konzept vor. Basis ist eine Einheit aus einem zweieinhalb Kubikmeter großen Futtermischbehälter inklusive Fräsarm, die an einen Gabelstapler angekoppelt werden kann (Paar 2013; Belair Sarl 2012b). Der Gabelstapler bewegt sich nach der Auftragserteilung automatisch zum Futtermischer, koppelt an, fährt dann zu den gewünschten Silos und fräst das Futtergut (Silage, Stroh- oder Heuballen) selbstständig ab (Belair Sarl 2012a). Stereokameras an der Frontseite am Fräsarm montiert deuten auf eine optische Erkennung der Silage hin. Die fertig dosierte und gemixte Ration wird sodann ebenfalls automatisch am Futtertisch verteilt. Im Freien wird der Gabelstapler über die Geolokalisierung gesteuert, innerhalb von Gebäuden ist er draht- oder sichtgesteuert (Esterer 2013).

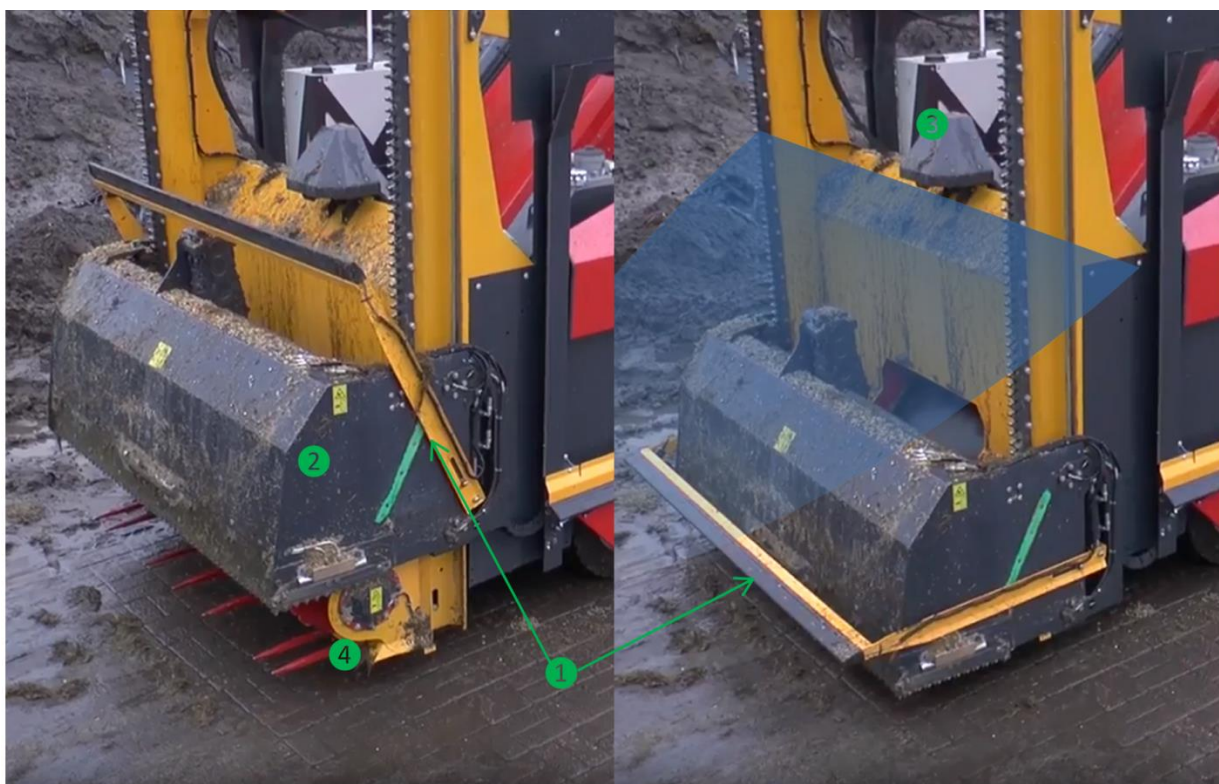


Abb. 10: Schema des Mischbehälters mit Fräsarm, angebaut an einen manuellen oder automatisierten Gabelstapler. (©BELAIR)

2.2.6.2 Schuitemaker INNOVADO

Bereits 2008 wurde Schuitemaker für sein AFS-Konzept Innovado mit der DLG-Goldmedaille ausgezeichnet. Das System soll über die Entnahme von Raufutter im Silo bis zur Vorlage am Futtertisch alles vollautomatisch durchführen können. Das Fahrzeug wurde bereits mehrmals abgeändert, z. B. die Sicherheits- oder Entnahmetechnik. Im frühen Entwicklungsstadium wurde ein Blockschneider zur Entnahme verwendet, in der Weiterentwicklung ein Fräsarm und

zuletzt eine Kombination aus Blockschneider und Förderschnecke (Abb. 11). Mit dem klappbaren Rahmen des Blockschneiders kann bis zu einer Höhe von 4,80 Meter Silage entnommen werden (Abb. 12). Der Mischbehälter hat ein Volumen von acht Kubikmetern, was laut Schuitemaker durch die wiederholte Futtevorlage für eine Versorgung von ca. 750 Milchkühen reicht. In Ställen navigiert die Maschine mithilfe von Transpondern im Boden, im Freien kommt ein RTK-GPS (engl. real time kinematic, engl. global positioning system) zum Einsatz. Über Funkverbindungen können auch Mineral- und Zusatzfuttermittel an Hochsilos automatisch geladen werden und Stalltüren automatisch geöffnet werden. Auch zwischen den Fütterungszeiten kann durch einen hydraulisch klappbaren Schieber das Futter angeräumt werden. (Schuitemaker Machines o. J.)



① Bumper ② Abdeckung/Blockschneider ③ SiS-Scanner (Schuitemaker Intelligent System) ④ Förderschnecke

Abb. 11: Die Entnahmeeinheit des Schuitemaker Innovado. Der Detektionsbereich des 2D-Laser-Scanners erfasst in schrägem Winkel Objekte vor der Maschine (blau, schematisch). (©SCHUITEMAKER)

Die Entnahme von Silage ist nur in einem abgetrennten Sicherheitsbereich („No Go Area“) möglich. Sobald sich eine Person in den geschützten und abgesperrten Bereich befindet, stoppt die Maschine jegliche Funktion. Während der Transportfahrten schirmt der abgesenkte Blockschneider die Förderschnecke ab. Zusätzlich klappt ein Sicherheitsbügel herunter. Die sogenannten SiS-Scanner (Schuitemaker Intelligent System) detektieren an vier Stellen des Fahrzeugs (Abb. 11 und Abb. 12) die Umgebung und leiten den sofortigen Stopp der Maschine

ein, sollte sich ein Objekt im Gefahrenbereich befinden. Rund um die Maschine sind als redundantes Sicherheitssystem mechanische Stoßfänger angebracht, die ebenfalls bei Betätigung einen Not-Stopp veranlassen. (C4Real 2016)

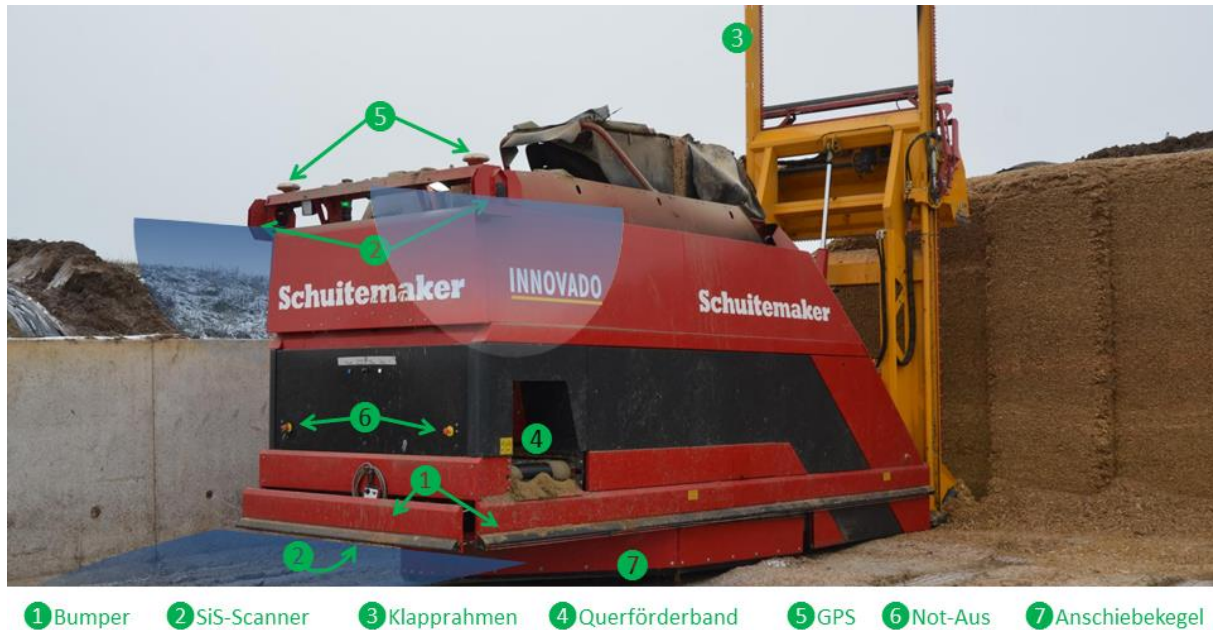


Abb. 12: Die neueste Generation des Schuitemaker Innovado. Die drei SiS-Scanner decken die Seiten sowie die Rückseite der Maschine ab (blau, schematisch) (©SCHUITEMAKER).

2.2.6.3 Strautmann Verti-Q

Zur Agritechnica 2017 stellte die Firma Strautmann ein Add-On System vor, das den selbstfahrenden Futtermischwagen Verti-Mix SF zu einem AFS aufrüstet (Abb. 13). Die Grundmaschine wird mit Hard- und Software ausgestattet und übernimmt den gesamten Fütterungsprozess, von der Entnahme von Raufutter über Transportfahrten bis zur Verteilung am Futtertisch. Es bleibt jederzeit die Möglichkeit den Futtermischwagen auch herkömmlich manuell zu steuern. Die 0-Serie auf ausgewählten mittelständischen Betrieben plante Strautmann für Mitte 2018. (B. Strautmann & Söhne GmbH u. Co. KG o. J.)



Abb. 13: Der rotierende 2D-Laserscanner ist oben an der Fahrerkabine angebracht. Über einen Monitor wurden die live-Messdaten visualisiert (links; Eigene Aufnahme). Bis auf wenige Details ist der Selbstfahrer-Futtermischwagen nicht als AFS identifizierbar (rechts). (©STRAUTMANN)

Für die Navigation im Außenbereich wird ein hochgenaues GNSS (Global Navigation Satellite System) verwendet, ergänzt durch einen um die eigene Achse rotierenden 2D-Laser-Scanner. Dieser erzeugt ein dreidimensionales Abbild der Umgebung und errechnet daraus die Position der idealen Anschnittfläche im Silo (Abb. 14). Weitere Sensorik erfasst unterschiedliche Maschinenparameter die gesammelt in einen Industrierechner eingespeist werden. Arbeitsfunktionen der Maschine, wie z. B. die Mischschnecke oder der Futteraustrag, werden zentral geplant und ausgeführt. (B. Strautmann & Söhne GmbH u. Co. KG o. J.)

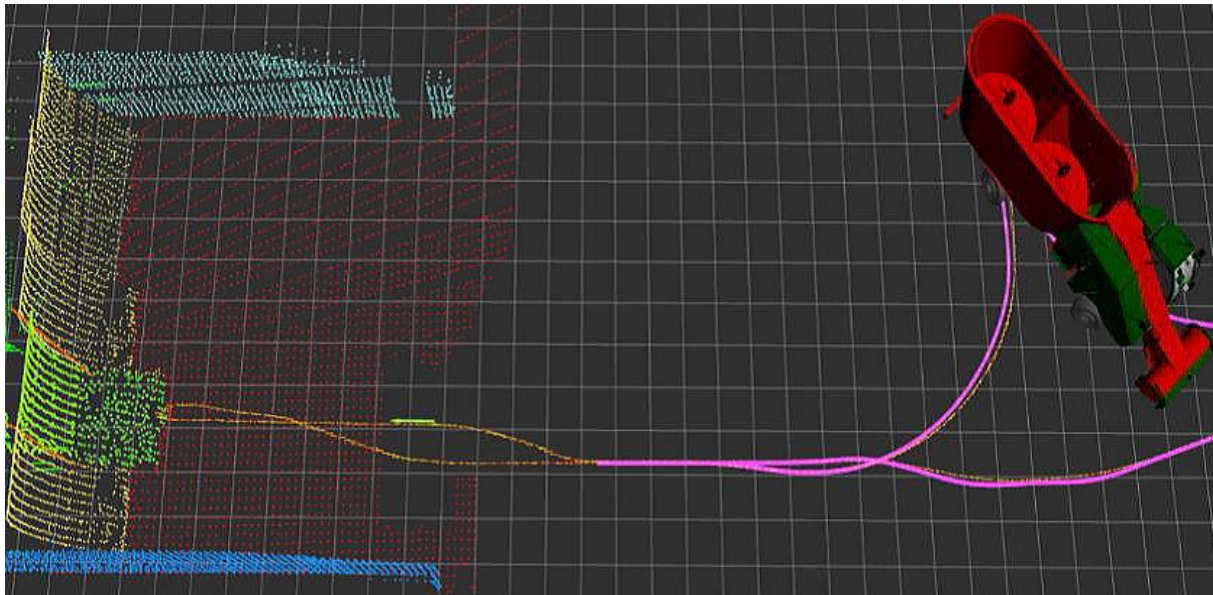


Abb. 14: Dargestellt sind verarbeiteten Messdaten des Laser-Scanners, die eine Punktwolke der Umgebung erzeugen und somit die ideale Positionierung für die Futterentnahme ermöglichen. (©STRAUTMANN)

Nach Aussage von Strautmann werden alle aktuellen Sicherheitsstandards und -normen eingehalten. Die Vernetzung der Sicherheitssysteme, wie z. B. Kameras und Sensoren, soll eine sichere Navigation zu jeder Zeit und unter jeglichen Bedingungen gewährleisten können. Auf der GIL-Tagung 2018 (Gesellschaft für Informatik in der Landtechnik) stellten (Meltebrink et al. 2018) ein Steuerungs- und Sicherheitskonzept für den Personenschutz des AFS vor. Die Strautmann GmbH arbeitet bei der Entwicklung des AFS mit der Hochschule (HS) Osnabrück zusammen. Das Steuerungskonzept umfasst das Zusammenspiel der Fahrzeugsteuerung, der Autonomiesteuerung, der Sicherheitssteuerung sowie der Sensorik und Aktorik (Abb. 15). Ein Schalter ermöglicht es dem Landwirt zwischen den Betriebsmodi „manuell“ und „autonom“ zu wählen. Im autonomen Betrieb springt die Autonomiesteuerung für den Fahrer ein und steuert die Fahrzeugsteuerung an. Zugleich arbeitet eine Sicherheitssteuerung und detektiert durch ergänzende Sensorik Gefährdungen. Bei gefahrbringender Situation kann das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt werden. Möglich macht dies das Schalten von Sicherheitsrelais zwischen der Fahrzeugsteuerung und der Fahrzeugaktorik sowie der Feststellbremse. Im manuellen Betrieb ist die Autonomiesteuerung getrennt, die Ausgänge der Sicherheitssteuerung sind spannungslos und die Relais dauerhaft geschlossen. Die Maschine darf nur in personenfremen Räumen Futter automatisiert aufnehmen. Im nicht abgesperrten Bereich müssen die Hydraulikfunktionen in einer definierten Position sein und dürfen nicht betätigt werden. Die Arbeitswege der Maschine sind vom Landwirt frei von Objekten, Eis und Schnee zu halten. (Meltebrink et al. 2018)

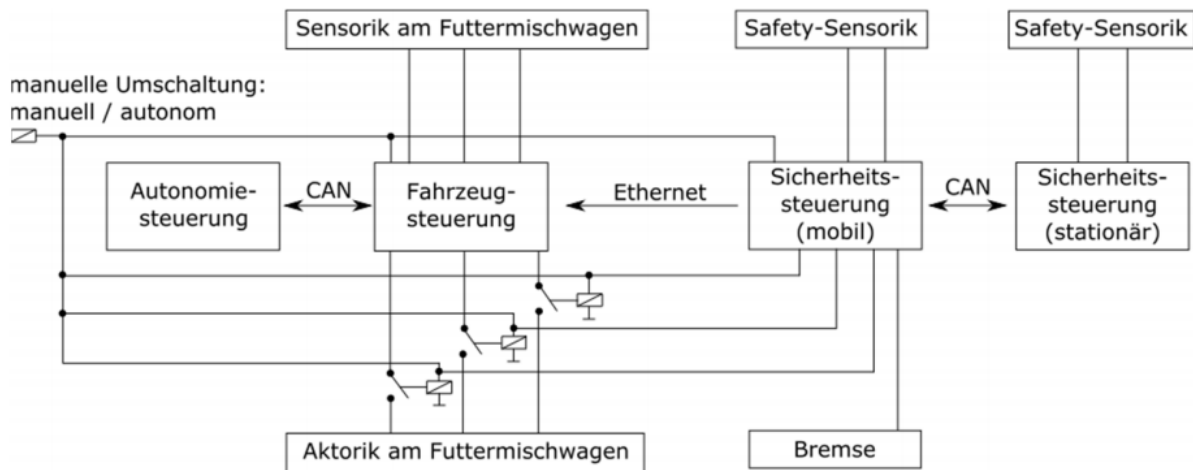


Abb. 15: Das Steuerungskonzept des Verti-Q der Firma Strautmann. (MELTEBRINK et al. 2018)

2.2.6.4 Wasserbauer NANOConcept

Im Sommer 2018 präsentierte die Wasserbauer GmbH aus Waldneukirchen, Österreich, ein neues Konzept für ein vollautomatisches Fütterungssystem mit dem Titel „NANOConcept“. Das „NANOConcept“ ist bei der EuroTier 2018 als Preisträger mit einer Silbermedaille ausgezeichnet worden.

Das System setzt sich aus mehreren Einheiten zusammen. Systemteil 1 ist ein neuer batteriebetriebener Misch- und Verteilwagen „Shuttle Eco“ (Abb. 16), der nun ohne Führungsschiene auskommt und mittels Magneten im Boden navigiert. Der Kunststoffbehälter fasst 2,2 Kubikmeter Volumen. Der Verteilwagen erinnert dabei stark an den Verteilwagen des Lely Vector-Systems, z. B. durch das eingehauste Fahrwerk. Das Gegenstück bildet die Maschine „Lift“ (Abb. 16), die sich im Fahrsilo befindet und über eine strombetriebene Fräse und Rohre das Futter aus dem Silo in den Verteilwagen befördert. Alternativ kann der „Shuttle Eco“ auch über Futtermittelsbehälter befüllt werden. (Wasserbauer GmbH o. J.b)



Abb. 16: Das "Shuttle Eco" und der "Lift" von Wasserbauer. (Wasserbauer GmbH o. J.b)

Abb. 17 zeigt die Aufteilung des Fütterungsprozesses in Befüllen und Mischen/Vorlegen. Der Verteilwagen navigiert auch über Hofflächen via Magneten im Boden und dockt an „Lift“ an. Wurde das „Shuttle Eco“ von „Lift“ befüllt, fährt es bei Bedarf zur weiteren Befüllung mit Zusatzfuttermitteln. Anschließend begibt sich das „Shuttle Eco“ zur Ladestation, mischt die Ration und legt sie anschließend im Stall vor. Das Anschieben von Futter kann auch mehrmals am Tag programmiert werden und mit einem Lockfutter ergänzt werden. Der Schieber ist höhenverstellbar und wird für die Fahrt im Außenbereich angehoben.



Abb. 17: Die Prozessschritte der Fütterung im NANO Concept von Wasserbauer. (Wasserbauer GmbH o. J.b)

Die Navigation im Außenbereich stellt gewisse Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit zwischen Stall und Fahrsilos. Fraglich sind die Sicherheitsauflagen für den „Lift“, da es sich um offenes, rotierendes Werkzeug handelt. Wie hier die „offene“ Seite vom Silo her zu bewerten ist, ist unklar. Vor dem Silostock schützen Zäune vor Eingriff (Abb. 18). Im Betrieb darf der Arbeitsbereich des „Lift“ für Mensch oder Tier nicht zugänglich sein. Der „Lift“ wird einmal im Silo installiert und kann dieses bis zur Leerung automatisch entnehmen. Pro Silo ist ein Lift notwendig. Das NANO Concept kann maximal 200 Großvieheinheiten (GV) mit Futter versorgen. Das „Shuttle Eco“ kam 2019 für ca. 60.000 Euro (Vollausstattung) in den Handel. Preise und Markteinführung des „Lift“ sind noch nicht bekannt. (top agrar 2018; wasserbauer123 2018)



Abb. 18: Im Vordergrund links ist das "Shuttle Eco" zu sehen welches vom "Lift" befüllt wird. (Wasserbauer GmbH o. J.b)

2.2.7 Entwicklungen und Trends

Die jüngeren Entwicklungen und Projektstudien der Hersteller bewegen sich weiter in Richtung flexiblerer Systeme, die losgelöst von Schienen an verschiedenste Gegebenheiten anpassbar sind und weit weniger infrastrukturelle Maßnahmen erfordern. Sowohl Schuitemaker als auch Strautmann bewegen ihre FMW anhand von GPS im Außenbereich. Dadurch können auch entfernte Siloanlagen erreicht werden. Die Entnahme direkt aus den Silos garantiert zum einen frische Futterqualität und macht Raum für die Zwischenlagerung überflüssig. Die Umfelderkennung und damit die Kollisionsvermeidung bzw. das Vermessen des Silos für eine optimale Entnahme erfordern zuverlässige Sensorik und intelligente Steuerungen. Diese Anforderungen sind es, die selbstfahrende automatische Futterwagen kostenintensiv und aufwendig in der Entwicklung machen. Bislang sind diese Systeme nicht am Markt erhältlich. Schuitemaker testet auf drei Betrieben in den Niederlanden und auf einem Betrieb in Deutschland sein System INNOVADO (Reger 2018b). Strautmann startet 2018 auf ausgewählten Betrieben den Praxiseinsatz (Reger 2018b). Zum System AVISO von Belair konnten keine Informationen über eine Markteinführung gefunden werden. Strautmann hat die Markteinführung des „Lift“ als Bestandteil des NANOConcept bislang nicht datiert. Die Bestrebungen und Entwicklungen der AFS-Hersteller zeigen jedoch, wie zukunftssträftig dieser Entwicklungsschritt ist.

Was sich über alle Hersteller hinweg zeigt, ist die Verwendung derselben Technologien. Nicht nur auf den Bereich der Agrarwirtschaft beschränkt, sondern insbesondere auch im Automotive-Bereich. Zur Zielerreichung des automatisierten Individualverkehrs im öffentlichen Straßenverkehr nutzt die Automobilbranche eine Fülle an Technologien, die in der Fusionierung ihrer Daten (Data Fusion) sich gegenseitig ergänzen, plausibilisieren und redundant absichern sollen. Es werden Kurz-, Mittel- und Langstreckenradar eingesetzt, sowie LiDAR-Sensorik, Videoauswertung und Ultraschall. Im Vergleich der physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Technologien, ist eine Technologie ganz besonders für den landwirtschaftlichen Kontext zu nennen – das Radar. Es zeigt sich als besonders robust gegenüber schwierigen Witterungsverhältnissen und detektiert großflächige Areale im Nah- und Fernbereich. Zudem ist Radar eine preislich interessante Technologie. LiDAR hingegen ist eine etablierte Technologie in der Automatisierung (Frost & Sullivan 2016; Gotzig et al. 2015), die über viele Jahre optimierte wurde, die Software ebenso wie die Hardware. LiDAR ist sowohl bestens für die Navigation (Hata und Wolf 2014; Ullrich 2014; Winner et al. 2015), als auch für Sicherheitseinrichtungen (Frost & Sullivan 2016; Gotzig et al. 2015; Hata und Wolf 2014; Wang et al. 2017) geeignet. Beide Technologien, LiDAR und Radar, erzeugen zusammen mit weiteren Technologien wie Kameras ein wahrheitsgetreues Bild des Nah- und Fernfeldes (Yamauchi 2010; Gao et al. 2018). In den folgenden beiden Kapiteln werden diese beiden Technologien näher betrachtet.

2.3 Die Laser-Navigation/LiDAR

Als prominentester Vertreter der freien Navigation gilt die Laser-Navigation (Frost & Sullivan 2016). Die Laser-Navigation bedient sich der physikalischen Charakteristik eines Laser und setzt sie in der LiDAR-Methodik (Eichler und Eichler 2010). LiDAR ist eine Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung (Geduld 2012). Sie basiert auf der Lichtlaufzeit von ausgestrahlten Laser-Impulsen und deren Reflektion, bekannt als time-of-flight (TOF) (Frost & Sullivan 2016; Gotzig et al. 2015). Damit ist die LiDAR-Methodik der Abstands- und Geschwindigkeitsmessung mit Radar sehr ähnlich, weshalb prinzipiell alle auch vom Radar bekannten Messprinzipien für LiDAR angewandt werden können (O'Mahony et al. 2019). Die Laser-Strahlen des LiDAR wie auch die Radiowellen des Radar sind elektromagnetische Wellen und unterscheiden sich aufgrund ihrer Frequenzen.

LiDAR-Sensoren lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Das erste Konstruktionsprinzip wird als LiDAR-Sensor bezeichnet, bei der keine beweglichen Teile und nur Dioden-Arrays verwendet werden. Die LiDAR-Sensoren funktionieren nach dem Mehrstrahlprinzip. Dazu sind sie mit mehreren, festmontierten, horizontal nebeneinander angeordneten Sendeein- und Empfangseinheiten versehen. Die Winkelauflösung ist von der Strahlbreite und der laterale Öffnungswinkel von der Anzahl der Strahlen abhängig. Reichweiten von bis zu 150 Meter sind

möglich. Vorteil dieser Bauweise ist der Verzicht auf bewegliche Teile. In der Automobilbranche (z. B. Volkswagen up!, Ford Focus) werden 2D-LiDAR-Systeme, beruhend auf dem Mehrstrahlprinzip, für die aktive Notbremsung verwendet. Aufgrund des begrenzten horizontalen Erfassungsbereichs ist deren Einsatzmöglichkeit auf die Längsführung beschränkt. In der FTS-Branche werden sie derzeit noch nicht eingesetzt. (Cacilo et al. 2015)

Die zweite Bauform repräsentieren die Laser-Scanner. Sie sind mit einem oder mehreren mechanisch drehenden Spiegeln ausgestattet, die die ausgestrahlten Lichtimpulse umleiten. Anhand der Drehung des Spiegels wird der Winkel zum Objekt erfasst. Mithilfe der Distanz zum Objekt und der Winkelstellung des Spiegels lässt sich die genaue Position eines Objektes ermitteln. Ihr azimuthaler Winkel beziffert sich zumeist auf 360°. (Cacilo et al. 2015)

Aufgrund seines speziellen Aufbaus ermöglicht der Laser-Scanner im Vergleich zum LiDAR-Sensor die überwiegend freie Bestimmung der Winkelauflösung und des Erfassungsbereichs. Sogar ein 3D-Scannen des direkten Umfelds ist mit einer 360 Grad-Abdeckung bei hoher Winkelauflösung und großem Erfassungsbereich möglich. (Liu 2010)

Die klassische Laser-Navigation beruht auf dem Einsatz von künstlichen Landmarken. Diese werden dabei in einer Höhe an Wänden und Säulen angebracht, dass es zu keiner Abschattung durch Menschen oder andere Objekte kommt. Ein rotierender Laser-Scanner kann diese Referenzmarken auch über größere Entfernungen genau vermessen (Abb. 19). Verfahrensabhängig müssen mindestens zwei bzw. drei künstliche Markierungen zur Positionsbestimmung sichtbar sein. Das Erstellen neuer Fahrkurse ist direkt über eine Programmierung oder Lernfahrt (Teach-In) möglich, was eine sehr hohe Flexibilität hinsichtlich des Layouts gewährleistet. Um Mehrdeutigkeiten von Marken vorzubeugen, ist es ggf. notwendig diese zu kodieren. (Ullrich 2014)

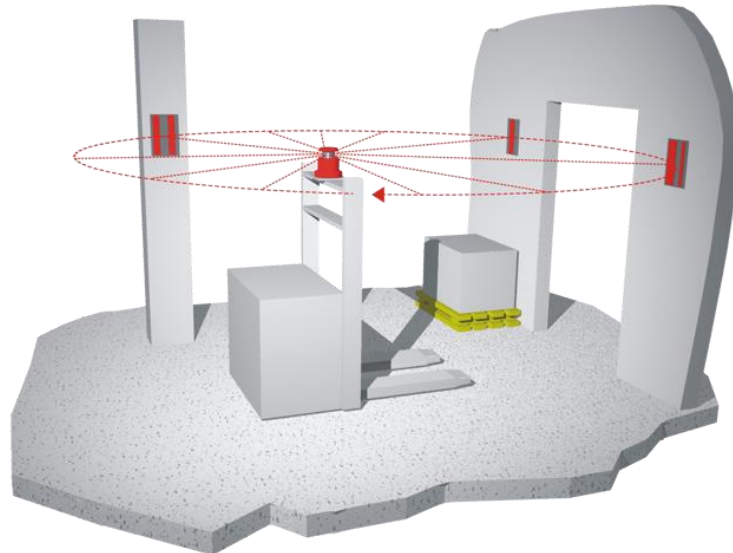


Abb. 19: Der rotierende Laser-Scanner ist auf dem Fahrzeug montiert und vermisst die Referenzmarken (künstliche Landmarken) an Säulen und Wänden. (Götting KG o. J.)

Bei der Inbetriebnahme und Konfiguration des Fahrzeugs werden die Koordinaten der Referenzmarken gespeichert. Während der Fahrt detektiert der Laser-Scanner fortlaufend die Positionen dieser ortsfesten Marken. Aus dem Abgleich der Positionsdaten kann somit die aktuelle Position und Ausrichtung des Fahrzeugs ermittelt werden. Dies kann auf zweierlei Arten geschehen: Mittels der Relativpositionen oder mittels der Absolutpositionen (Abb. 20). Beim zurücklegen des Parcours korrigiert der Fahrzeugrechner fortwährend die Kursabweichungen des Fahrzeugs, welche aufgrund unterschiedlicher Faktoren auftreten können. (Ullrich 2014)

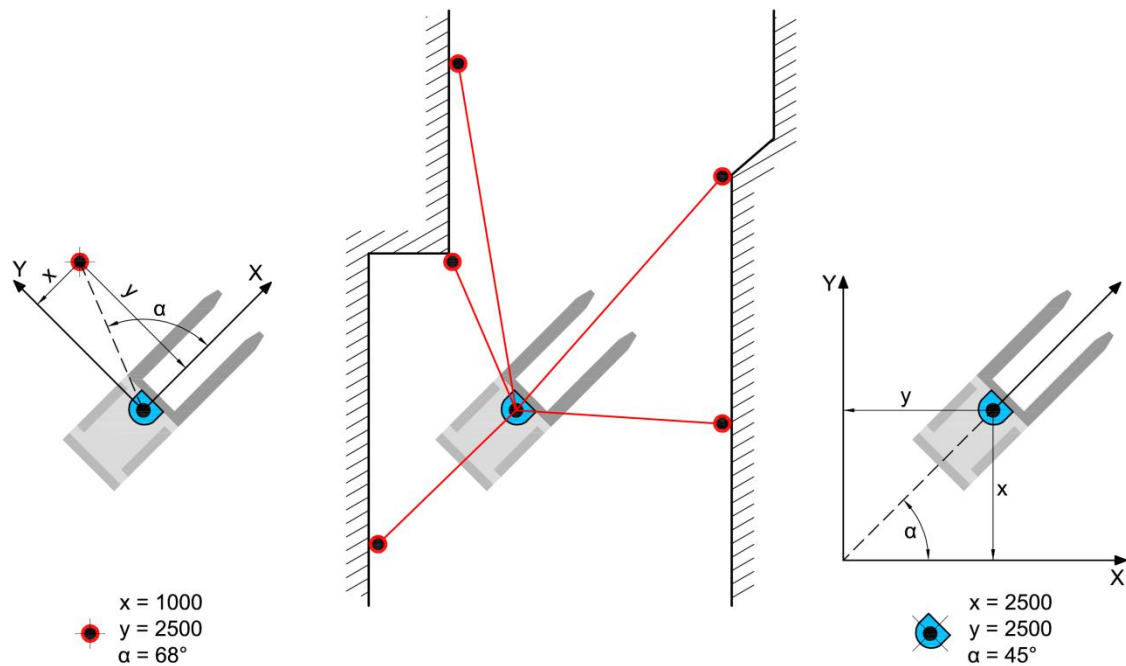


Abb. 20: Prinzipskizze der Bestimmung der Relativposition zwischen Referenzmarke und Fahrzeug (links) und der Absolutposition im Koordinatensystem (rechts). In (Reger et al. 2022a), verändert nach SICK AG in (Ullrich 2014)

Zur Reduzierung, dem Weglassen oder der Unterstützung von künstlichen Landmarken sind Informationen über die Konturen der Umgebung nötig. Die Laser-Scanner können die vermessenen Konturen ausgeben, um in einem externen Rechner durch passende Algorithmen natürliche Landmarken (z.B. Bäume, Gebäudestrukturen, etc.) zu erkennen. Die Marken müssen deutlich zu erkennen sein und ihre Position darf sich nicht verändern. Ein entfernungsmessender Laser-Scanner kann so beispielsweise genutzt werden, um an einer Wand entlangzufahren. Soll eine vollständige Positionsbestimmung/Navigation funktionieren, müssen zusätzliche Verfahren, wie z. B. Kantendetektion oder künstliche Peilmarken, hinzukommen. (Ullrich 2014)

Lässt man den Laser-Scanner zusätzlich um eine weitere Achse schwenken, wird es möglich ein 3D-Bild von der Umgebung zu erstellen. Dieser Methodik bedient sich auch die Strautmann und Söhne GmbH bei dem 2017 vorgestellten „Verti-Q“-Konzept (Abb. 21). Dies ermöglicht die recht zuverlässige Deckennavigation, da die Sicht zur Decke in der Regel frei von Hindernissen ist. Nachteilig ist der größere Rechen- und somit Zeitbedarf dieser mehrdimensionalen Aufnahme. Gegenwärtig sind nur langsam fahrende Fahrzeuge im einstelligen Kilometer pro Stunde-Bereich mit dieser Technologie praxistauglich umzusetzen. Zudem ist die Methode prinzipbedingt nur für Indoor-Anwendungen geeignet. (Ullrich 2014)



Abb. 21: Die Bildfolge zeigt die Rotation des 2D-Laser-Scanners (weißer Pfeil) in Fahrtrichtung mit dem Uhrzeigersinn und die Ausgabe der verarbeiteten Scannerdaten als 3D-Punktwolke auf einem Monitor. Zu erkennen sind vorbeigehende Messebesucher (gelbe Pfeile). (Reger et al. 2022a)

LiDAR ist ein optisches Messprinzip, was es Prinzip bedingt empfindlich gegenüber Fremdlicht und optischen Beeinträchtigungen macht. LiDAR ist daher nur bedingt für den Einsatz im Außenbereich geeignet. Schmutz, Nebel, Regen, Bodenbeschaffenheit und Licht-Schatten-Übergänge können die LiDAR-Technologie erheblich beeinträchtigen (Vargas et al. 2021). Schon alleine aufgrund von notwendigen Redundanzen in der Maschinensicherheit bedarf es einer weiteren Technologie, die diese Schwächen des LiDAR ausgleichen kann. Im Folgenden Kapitel wird daher die Radar-Technologie vorgestellt.

2.4 Radio Detection and Ranging (Radar)

Hinter dem Kunstwort Radar versteckt sich in etwa eine „Zielerfassung und –Ortung durch Funk bzw. elektromagnetische Wellen“. Es eignet sich ein Objekt zu detektieren, seine statische Position zu ermitteln oder bei dynamischen Objekten die Bewegungsrichtung und -Geschwindigkeit zu bestimmen. (Weidmann o. J.)

Die kurzen Wellenlängen von Mikrowellen ergeben ein Verhalten, das dem Licht ähnlich ist, d. h. es gibt Effekte wie Beugung, Totalreflexion, Wegspiegeln, Interferenz usw. Die Annahme lautet, dass eine ausgesendete Welle an einem Objekt derart diffus gestreut wird, dass ein gewisser Teil der Welle wieder zum Ausgangspunkt reflektiert wird. Radarstrahlen verlassen den Sensor nämlich nicht als Kugelwelle, sondern aufgrund der Antenne in gebündelter Weise (Winner et al. 2015). Folglich haben Beschaffenheit und Material des reflektierenden Objektes großen Einfluss auf die „Stärke“ der Reflexion. Die Radargleichung berechnet sich wie folgt aus der empfangenen Signalleistung nach diffuser Reflexion an einem Objekt:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{g_t * g_r * \sigma^2}{R^4} \quad (1)$$

wobei

- P_r die von einem Objekt reflektierte und am Sensor zu empfangende Leistung,
- P_t die vom Radarsensor am Sendeantennenanschluss verfügbare Leistung,
- g_t Gewinn der Sendeantenne,
- g_r Gewinn der Empfangsantenne,
- σ Wirkungsquerschnitt, engl. RCS (radar cross section),
- R Abstand Sensor/Objekt ist.

Daraus leiten sich zwei wesentliche Erkenntnisse ab:

Die Empfangsleistung ist 1) umgekehrt proportional zur 4. Potenz des Abstandes oder umgekehrt, die Reichweite eines Radars ändert sich nur mit der 4. Wurzel der Sendeleistung und 2) direkt proportional zum Rückstreuquerschnitt eines Objekts (Weidmann o. J.). Mit zunehmender Entfernung verliert das Rückstreusignal schnell an Stärke und je größer der Rückstreuquerschnitt, desto stärker das Rückstreusignal.

Eine weitere Eigenschaft der Mikrowelle ist die Durchdringung von Materie. Eine Übersicht, welche Materialien durchdrungen werden, liefert Abb. 22. Die Tatsache, dass Metall und Wasser nicht durchdrungen werden und somit voll reflektieren, kommt der Objekterkennung bei Menschen und Maschinen zu gute. Erwachsene Menschen bestehen zu ca. 70 % aus Wasser und sind deshalb sehr gut vom Radar zu erkennen. Maschinen oder bauliche Anlagen (Stalleinrichtung, Gebäude, etc.) enthalten meist Metalle in größeren Mengen und liefern dem Radar ein starkes Signal. Beispielweise bei Kartierungsarbeiten mit Radar können viele dieser metallischen Objekte als Landmarken dienen und eine detailreiche Umfelderkennung ermöglichen. Dass Kunststoffe sehr gut durchdrungen werden, ermöglicht es wiederum das Radar unsichtbar zu machen bzw. vor Umwelteinflüssen zu schützen. Hinter einer Karosserie/Verkleidung (z. B. bei PKWs oder Nutzfahrzeugen) „verschwinden“ die Sensoren. Eine gewisse Reflexion bzw. Information in den Radar-Messungen ergibt sich dennoch auch bei Kunststoff, an sogenannten „Materiesprüngen“. (Weidmann o. J.)

Metall	nicht, volle Reflexion
Holz	trocken – gut nass – Verluste bis 10 dB
Wasser	nicht, volle Reflexion
Schäume	hervorragend, nicht-meßbare Dämpfung
Kunststoffe	sehr gut - 0,5 bis 3 dB Verlust bei geeigneter Dicke und richtigem Abstand
Kleidung	trocken – gut nass - Verluste bis 20 dB
Regen	gut – bis 6 dB Dämpfung
Menschen	nicht, eher Beugung, Absorption und Reflexion
Eis	schlecht – 10 dB Dämpfung

Abb. 22: Das Verhalten von Mikrowellen bei verschiedenen Materialien. (Weidmann o. J.)

Die Mikrowellen und ihre Eigenschaften sind letztlich nur die notwendige Voraussetzung für die Funktion von Radar. Die elektromagnetischen Wellen dienen als Informationsträger, die Information an sich wird aus der Modulation und Demodulation gewonnen. Einfach erklärt wird der abgestrahlte Wellenzug mit einer Kennzeichnung für die Wiedererkennung versehen und ein Zeitbezug zur Messung der Laufzeit mitgegeben (senderseitig aufmodulieren). Die reflektierten Wellen werden dann anhand der Kennzeichnung wiedererkannt und der zeitliche Zusammenhang kann ermittelt werden (empfängerseitig demodulieren). (Winner et al. 2015)

Das Radar-Verfahren kann in zwei große Untergruppen eingeteilt werden. Zum einen das Dauerstrich-Radar oder auch CW-Radar (continuous wave radar), mit dem in erster Linie die Präsenz und Bewegung eines Objektes erfasst wird. Und zum anderen das Puls-Radar, welches vorrangig die Entfernung eines Objektes bestimmt. Im Folgenden wird auf die im getesteten Radar-Scanner verwendete Technologie eingegangen. (Weidmann o. J.)

Der verwendete Radar-Scanner verwendet die FMCW-Modulation (engl. Frequency Modulated Continuous Wave = Dauerstrich-Frequenzmodulation) im Frequenzspektrum von 57 bis 64 GHz. Es befindet sich somit im V-Band („alte“ Bezeichnung nach Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE Std 521) bzw. im L/M-Band („neue“ Bezeichnung nach NATO) (Göbel 2011). Das Radar ist bi-statisch ausgeführt und besitzt eine Tx-Antenne (engl. Transmitter = Sender) und zwei Rx-Antennen (engl. Receiver = Empfänger). Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz als Funktion der Zeit variiert, d. h. es handelt sich nicht

um eine absolute und somit konstante Frequenz, sondern um eine Momentanfrequenz. Bislang wird nur die aufsteigende Rampe (positive Rampe) genutzt, die fallende Rampe (negative Rampe) wird aufgrund einer begrenzten Datenübertragungsrate zu Gunsten einer höheren Updaterate der Messungen geopfert. Die Differenzfrequenz f_{D1} zwischen gesendetem Wellenzug (f_{Sende}) und reflektierten Wellenzug (f_{Empf}) ist umso größer, je größer der Abstand ist und je mehr sich ein Objekt entfernt (Laufzeiteffekt Δt) (Abb. 23). Die Differenzfrequenz f_{D2} der Negativen ist die Summe aus Dopplereffekt (Δf) und Laufzeiteffekt (Δt). Der Dopplereffekt tritt auf, da es bei elektromagnetischen Wellen zu einer Frequenzverschiebung kommt, wenn sich Beobachter und Sender relativ zueinander bewegen. Folglich tritt dies auch auf, wenn ein Radar-Strahl von einem relativ zum Radar bewegten Objekt reflektiert wird. (Winner et al. 2015)

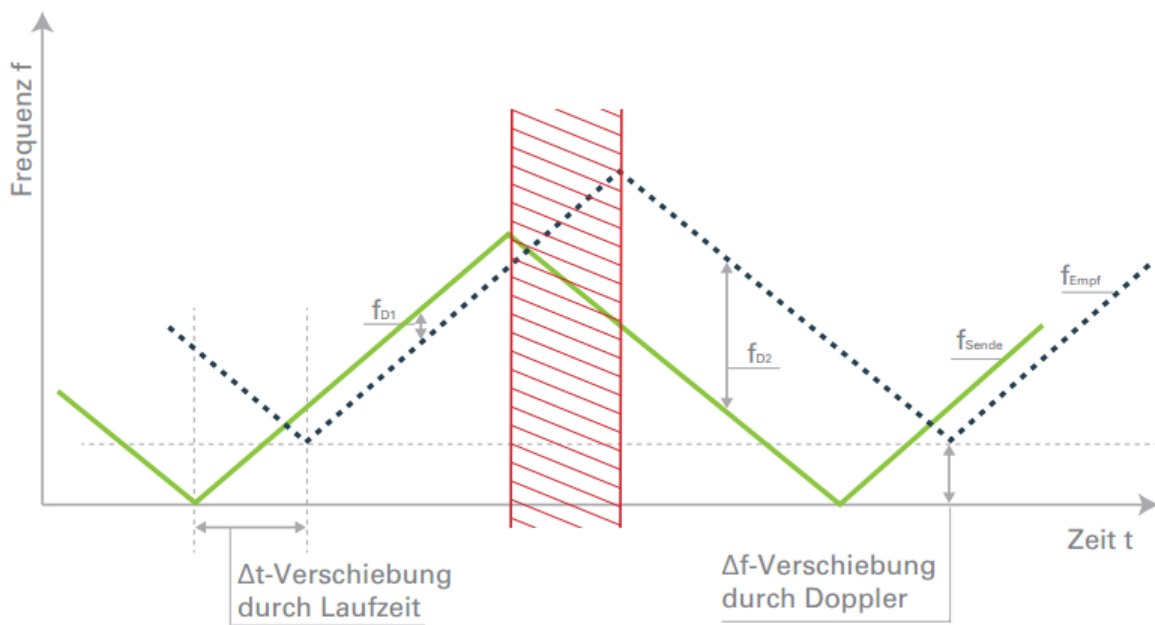


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf von Sende- und Empfangsfrequenzen beim FMCW-Radar mit Dreiecksmodulation. (Weidmann o. J.)

Die maximale Sweep-Bandbreite (Frequenzbandbreite f_{Bw}) liegt bei 7 GHz (theoretisch) bzw. 6 GHz (nutzbar). Von diesem Faktor ausgehend kann mit folgender Formel die Abstandszellengröße (Distanzauflösung) berechnet werden (Winner et al. 2015):

$$\Delta r \geq \frac{c}{2f_{Bw}} \quad (3)$$

mit

- Δr der Abstandszellengröße,
- c der Lichtgeschwindigkeit,
- f_{Bw} der Frequenzbandbreite.

Aus der Bandbreite von 6 GHz leitet sich eine Distanzauflösung Δr von ca. 2,5 Zentimeter ab. Im Vergleich dazu ist die Bandbreite bei einem 24 GHz Radar (z. B. in der Abstandmessung bei automatisiertem Fahren auf Autobahnen) mit 0,25 GHz sehr gering und somit die Auflösung, bei gleichzeitig hoher Reichweite, nur noch im Meterbereich. (Winner et al. 2015)

Der Frequenzbereich zwischen 57 und 64 GHz wurde aufgrund der freien Nutzbarkeit in der EU und der günstigen Preisentwicklung der benötigten Komponenten gewählt. Als Nachteil kann die Leistungslimitierung des Frequenzbereichs genannt werden. (Reger 2018a)

Wichtige Grundlage für die Navigation ist die Mehrzielfähigkeit, da sich im Sensorbereich mehrere Objekte befinden können. Um Ziele voneinander unterscheiden zu können, bedarf es einer Trennfähigkeit, die unter anderem von der Auflösung der Winkelmessung abhängig ist. Eine Linse, zur Fokussierung der Radar-Strahlen, stellt konstruktiv die Basis für die weiteren Verfahren dar. Bei dem verwendeten Radar-Scanner werden für die Steigerung der Winkelauflösung drei Methoden kombiniert: Scanning, Monopuls und Mehrstrahler. Für das Scanning wird keine Strahlableitung oder Planarantenne verwendet, sondern der Sensor wird um 360° gedreht. Die Energie wird induktiv, die Daten werden optisch und somit jeweils kontaktlos übertragen. Mit zwei Rx-Antennen wird das Monopuls-Verfahren durch eine überlappende Echomessung durchgeführt. Die Mehrstrahler-Methode wird durch die rotierende Ausführung des Sensors imitiert. Derzeit (Stand 25.10.2018) werden 100 Messungen pro Umdrehung gemacht, woraus eine Trennfähigkeit von 12 Grad bzw. eine Winkelauflösung von 6 Grad resultiert. Tab. 1 zeigt generalisierte Arbeitsschritte der Radar-Signalverarbeitung, wie sie prinzipiell auch bei dem verwendeten Radar-Scanner durchgeführt werden. Bislang nicht implementiert sind die Punkte Bündelung (Clustering) und Tracking. (Winner et al. 2015)

Tab. 1: Generalisierte Arbeitsschritte der Radar-Signalverarbeitung. (Winner et al. 2015)

Verarbeitungsschritt	Erläuterung
Signalformung	Modulation (Frequenztreppen oder Rampen, Pulsgenerierung), Strahlumschaltung oder -formung
Vorverarbeitung und digitale Datenerfassung	Demodulation, Verstärkung, digitale Datenerfassung
Spektralanalyse	Zumeist ein- oder zweidimensionale (Fast-) Fouriertransformation der digitalen Daten, dabei enthalten die Frequenzlage und die komplexen Amplituden die Information über Abstand, Geschwindigkeit und Azimutwinkel.
Detektion	Erkennen von Peaks im Spektrum, zumeist mittels Vergleich mit einer adaptiven Schwelle.
Matching	Zuordnung von detektierten Peaks zu einem Objekt
Azimutwinkelbestimmung	Ermittlung des Azimutwinkels über den Vergleich der Amplituden verschiedener Empfangszweige mit Antennencharakteristik
Bündelung (Clustering)	Zusammenfassung von Detektionen, die vermutlich zu einem Objekt gehören.
Tracking	Aktuelle Objektdaten zu vorher bekannten Objekten zuordnen (= Assoziation), um eine zeitliche Datenspur (Track) zu erhalten, die gefiltert und aus denen die Objektdaten für die nächste Zuordnung prädiziert werden

Das verwendete Radar befindet sich im V-Band („alte“ Bezeichnung) bzw. an der Grenze zwischen L- und M-Band („neue“ Bezeichnung). Eine Frequenz von 60 GHz ermöglicht hier nach Dämpfungsverlusten eine Reichweite von wenigen zehn Metern. Zum Vergleich seien die Abstandswarner in Automobilen (Einparkhilfen) genannt, die sich im 75-76 GHz Bereich befinden und sich gegenseitig aufgrund der starken atmosphärischen Dämpfung (Reichweite im Meterbereich) nicht beeinflussen. (Wolff o. J.)

In Deutschland regelt die Bundesnetzagentur in Bonn die Zulassung der Frequenzen, international empfiehlt unter anderem CEPT (Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications) die Verwendung des Gesamtspektrums elektromagnetischer Wellen. Der Bereich 77 GHz ist rein für automotiv Anwendungen nahezu europaweit reserviert.

2.5 Problemstellung

Landwirtschaftliche Betriebe konnten mit der Mechanisierung der Fütterung durch Futtermisch- und Verteilwagen bereits eine große Effizienzsteigerung erreichen. Nichtsdestotrotz ist eine weitere Rationalisierung für die künftige Wettbewerbsfähigkeit entscheidend. Eine Automatisierung der Fütterung reduziert die Arbeitszeit des Landwirtes und wirkt sich vielfach positiv auf das Tierwohl aus.

Die am Markt befindlichen automatischen Fütterungssysteme sind nahezu ausschließlich bauliche Lösungen, die große strukturelle bzw. bauliche Veränderungen nach sich ziehen. Sie

bestehen in der Regel aus schienengebunden Verteilwagen und Förderbändern. Diese baulichen Anlagen binden die Systeme an fixe Strukturen und machen sie unflexibel (Yang et al. 2020). Viele landwirtschaftliche Betriebe nutzen Altbestandsgebäude, in denen oft die Nachzucht untergebracht ist. Automatisiert sich ein solcher Betrieb im neu gebauten Stall mit einem marktverfügbaren System, so muss dennoch eine weitere Mechanisierung für die Altgebäude angeschafft werden.

Bisher ist keine Lösung am Markt, die die komplette Fütterung vom Silo bis zur Kuh automatisiert löst. Bislang müssen Futtevvorratsbehälter manuell befüllt werden. Eine Herausforderung sind die unterschiedlichen Strukturen auf landwirtschaftlichen Betrieben, z. B. die Entfernungen und Hindernisse zwischen Stall und Silo. Zum anderen birgt die automatisierte maschinelle Entnahme aus dem Silo ein sehr hohes Gefahrenpotential durch rotierende Werkzeuge. Dennoch bietet auch eine Teilautomatisierung (Mischen und Verteilen) arbeitswirtschaftliche Vorteile und insbesondere auch Tier- und Herden spezifische positive Effekte. Bei der Rationszusammenstellung bleibt nach wie vor der Landwirt beteiligt und überwacht unter anderem die Silagequalität.

2.6 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, die konzeptionellen und technologischen Grundlagen für ein elektrisches, selbstfahrendes und autonomes Fütterungssystem (AFS) für Rinder zu legen. Eine Marktrecherche verfügbarer AFS und AFS-Konzeptstudien, Experteninterviews und eine Meinungsumfrage analysieren die Nutzungsanforderungen der Praxis. Eine rechtliche Einordnung mit Risikobewertung von AFS beschreiben den Funktionsrahmen. Abschließend wird in einer Untersuchungsreihe, die sich aus den Analysen ergebenden Navigationstechnologien Radar und LiDAR in Testreihen erprobt und validiert und in das ganzheitliche AFS-Konzept integriert. Sowohl Radar als auch LiDAR eignen sich für die Navigation als auch als Sicherheitseinrichtungen (Fritsche et al. 2016; Kubinger et al. 2017; Csaba 2018).

Die Neuartigkeit des AFS besteht in der Lösung einer flexiblen Teilautomatisierung (Mischen und Verteilen), die auch eine manuelle Steuerung erlaubt und als Beschickungseinheit weiterer Stallungen oder an Biogasanlagen verwendet werden kann. Durch den vollelektrischen Antrieb werden Geräusch- und Schadstoffemissionen stark reduziert und ein Energiemanagement ermöglicht, z. B. zur Nutzung von selbsterzeugtem Strom oder der Pufferspeicherung (Smart Energy Grid). Die selbstfahrende Maschine ist an keine externe Infrastruktur gebunden und somit flexibel und vielseitig einsetzbar. Zugleich wird mit der freien Navigation der Grundstein für eine spätere Vollautomatisierung der Fütterung gelegt.

Die Automatisierung der Fütterung ist ein wesentlicher Teilaspekt des „Integrated Dairy Farmings“ im Forschungsbereich „Stall 4.0“ (Stumpenhausen und Bernhardt 2019). Es ist zu erwarten das auch weitere Bereiche der Landwirtschaft von dieser Entwicklung profitieren werden.

3. Material und Methoden

Ziel des Projektes ist es, die konzeptionellen und technologischen Grundlagen für ein neuartiges, elektrisches, selbstfahrendes automatisches Fütterungssystem zu legen. In fünf Schritten werden diese Grundlagen in der Folge erarbeitet.

Als erster Schritt wird der Status Quo in der Fütterungstechnik recherchiert und ausgewertet. Daraus leiten sich die Funktionsumfänge der Maschinen ab, d. h. es wird festgelegt: Was muss die Maschine wo, zu welcher Zeit, wie und unter welchen Bedingungen leisten können? Sind diese Rahmenbedingungen klar, kann man die spezifischen Anforderungen ableiten, die sich aus den Bereichen Sicherheit, Verfügbarkeit, Mobilität etc. ergeben. Die Praxistauglichkeit der Maschine wird durch eine Expertenbefragung gestützt, die die tatsächlichen Erwartungen an ein automatisches Fütterungssystem in den Fokus rückt.

Unter welchen rechtlichen Bedingungen sich das automatische Fütterungssystem bewegt, wird in Schritt Zwei beleuchtet. Nachdem die „Grenzen der Maschine“ hinsichtlich deren Nutzung gesetzt sind, finden spezielle Richtlinien, Gesetze und Normen Anwendung.

Aufbauend auf die rechtlichen Vorgaben aus der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, bzw. der entsprechenden nationalen Umsetzung im Produktsicherheitsgesetz, wird explizit die Durchführung einer Risikobeurteilung gefordert, welche hier in Schritt Drei exemplarisch durchgespielt wird.

Für die Automatisierung des Futtermischwagens sind Sensorik, Aktorik und Software nötig. Die geeigneten Technologien werden anhand von Recherchen und ersten Tests eingegrenzt und validiert.

Abschließend werden in Schritt Fünf die vorausgehenden Schritte zu einem Gesamtkonzept zusammengefasst und drei praxisnahen Versuchsanstellungen getestet und bewertet.

3.1 Funktionskonzept

Das Upgrade der manuellen Truckline zu einem System zur automatischen Futtervorlage (Stufe 1; 2.2.3) verfolgt das Ziel den Landwirt von der mehrmaligen, routinemäßigen Ausdosierung des Futters abzulösen. Dadurch kann dieser die vielfältigen Vorteile einer mehrmaligen Futtervorlage nutzen ohne steigenden Arbeitsaufwand. Das Konzept sieht eine multifunktionale Nutzung des AFS vor, welche neben der Fütterung des Tierbestandes auch die Beschickung der Biogasanlage und/oder die Stromspeicherung in einem intelligenten Stromnetz (Smart Grid) ermöglicht. Aufgrund der Dimensionierung von Mischbehälter (8 m³)

und Gesamtfahrzeug ergibt sich die Zielgruppe von klein- und mittelstrukturierten Milchviehbetrieben (meist Süddeutschland, Österreich, Schweiz) mit bis zu 150 Milchkühen + Nachzucht und Altgebäudenutzung. Es wurde ein Funktionskonzept mit detaillierter Beschreibung des Umfangs entwickelt. Ergänzend zu der Recherche nach dem Stand der Technik und Entwicklungen im Bereich der Rinderfütterung, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit eine Meinungsumfrage unter Landwirten erstellt.

Umfrage zu automatischen Fütterungssystemen

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde ein Fragebogen entwickelt, um das Wissen über und die Erwartungen an automatischen Fütterungssystemen in der deutschen Landwirtschaft zu untersuchen. Der Fragebogen basierte auf vier Experteninterviews. Die vier Interviewpartner entstammten der praktischen Landwirtschaft, einer landwirtschaftlichen Organisation, einem AFS-Hersteller und der Wissenschaft. Die Expertenmeinungen in Kombination mit der vorhandenen Literatur führten zu einem ersten Entwurf des Fragebogens. Der Entwurf wurde in einem Vortest mit drei landwirtschaftlichen Betrieben getestet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Vortests wurde ein Online-Fragebogen entwickelt. Als Plattform für die Online-Befragung wurde „SurveyMonkey“ ausgewählt, da es die gestellten Anforderungen am besten erfüllte. Strukturell wurde das Ziel verfolgt, eine Vielzahl von landwirtschaftlichen Betrieben unterschiedlicher Ausrichtung anzusprechen und anhand der Eingaben effizient durch den Fragebogen zu führen. Somit soll verhindert werden, dass Teilnehmer der Umfrage aufgrund unpassender Fragen unnötig beschäftigt werden und so möglicherweise vorzeitig die Bearbeitung abbrechen. In Summe dauerte die Bearbeitung etwa 10 bis 15 Minuten. Der Sprachstil wurde entsprechend der Zielgruppe gewählt. Die Mehrzahl der Fragen wurde als Multiple-Choice gestellt. Dieser Fragentyp ermöglicht den Transport und Gewinn vieler Informationen, mit geringem Aufwand für den Befragten. Im Fragebogen wurden Info-Blöcke zur Verfügung gestellt, die es dem Teilnehmer ermöglichten Unterstützung zum Verlauf des Fragebogens oder Informationen über den aktuellen Stand der Technik aufzurufen. (REGLER 2018)

Der Fragebogen war in mehrere Blöcke unterteilt. Mit zwei einleitenden Qualifizierungsfragen wurde zunächst die Zugehörigkeit zur Zielgruppe verifiziert und anschließend anhand einiger Kennzahlen eine betriebliche Charakterisierung durchgeführt. Danach lag der Fokus auf den üblichen Fütterungsvorgängen. Der Rest der Umfrage bezog sich auf die am Markt verfügbaren Systeme. Der Teilnehmer sollte den aktuellen Stand der Technik beurteilen, sowie Verbesserungsvorschläge abgeben. Um Unwissenheit bei den Teilnehmern vorzubeugen, wurden die aktuellen Wissensstände in stark gekürzter Form aufgezeigt, um die Befragten nicht zu überfordern und keine negativen Gefühle entstehen zu lassen. (REGLER 2018)

Der Fragebogen war in der Zeit vom 16.04. bis 06.06.2018 auf SurveyMonkey.de aktiv geschaltet. Um möglichst viele Landwirte für die Teilnahme zu gewinnen, wurden verschiedene Ansätze gewählt. Als am effektivsten stellten sich die persönliche Anschrift per E-Mail, bekannte Personen und Nachrichten in Facebook heraus. Im Veröffentlichungszeitraum wurden 112 ausgefüllte Fragebögen beantwortet. Einige der Fragebögen waren dabei nicht vollständig ausgefüllt und an unterschiedlichen Stellen unbearbeitet. Über alle Fragebogen hinweg betrug die minimale Antwortdichte jedoch immer mindestens 33. (REGLER 2018)

3.2 Relevante Richtlinien/Gesetze/Normen

Die im Folgenden beschriebenen Richtlinien, Gesetzgebungen und Normen zielen auf die Automatisierung des Truckline-Futtermischwagens ab. Zudem sind einige speziell für landwirtschaftliche Maschinen gedachte Normen genannt. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Als Wirtschafts- und Handelsraum wächst die EU (Europäische Union) immer mehr zusammen. Das macht eine zunehmende Harmonisierung auch im Maschinenbau notwendig. Zunächst formuliert die EU mittels Richtlinien allgemeine Schutzziele, welche einer genauen Spezifizierung bedürfen. EU-Richtlinien sind für die Mitgliedsstaaten verbindlich und werden in nationale Gesetze umgesetzt. Über Normen erfolgt dann die konkrete Regelung. Zunächst haben Normen jedoch keine rechtliche Relevanz. Diese erhalten sie erst durch eine Veröffentlichung im Amtsblatt der EU oder durch nationale Gesetze und Bestimmungen. Eine Norm gilt dann als eine harmonisierte Norm und löst damit die „Vermutungswirkung“ aus. Damit kehrt sich die Beweislast im Schadenfall um, da der Anwender der Norm annehmen kann sich Gesetzes- bzw. Richtlinienkonform zu verhalten. Verweist eine harmonisierte Norm auf eine nicht harmonisierte, so kann diese eine mit der Harmonisierung vergleichbaren Status erhalten. (Pilz GmbH & Co. KG o. J.)

3.2.1 Richtlinie 2006/42/EG – 9. ProdSV (Produktsicherheitsgesetz)

Die ugs. „Maschinenrichtlinie“ genannte Richtlinie des EWR regelt das Inverkehrbringen von Maschinen (und unvollständigen Maschinen) im europäischen Wirtschaftsraum (EWR) sowie der Schweiz und der Türkei. Die Richtlinie hat keine unmittelbare Wirkung, sondern wird in den Mitgliedsländern in nationales Recht transferiert. In Deutschland mündet die Richtlinie in dem Produktsicherheitsgesetz (ProdSV) und der darauf gestützten Maschinenverordnung (9. ProdSV = Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz). Die Richtlinie hat zum Ziel die Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz an Maschinen zu harmonisieren und die Maschinen am freien Verkehr in der EU teilnehmen zu lassen. (Trabold 2007)

Auch landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge wie ein Futtermischwagen fallen in den Anwendungsbereich der Richtlinie 2006/42/EG. Der Hersteller (und Inverkehrbringer) eines solchen Produktes ist dafür verantwortlich, die Anforderungen, die sich aus der Richtlinie für die Maschine ergeben, zu erfüllen. Durch die Anbringung eines EG-Konformitätskennzeichens (CE-Kennzeichen) und seiner Adresse erklärt der Hersteller, dass seine Maschine allen geltenden europäischen Anforderungen genügt und die in den EG-Richtlinien vorgestellten Konformitätsbewertungsverfahren (ISO/IEC 17000:2004) durchgeführt wurden. Es sind somit eine Konformitätserklärung und auf dessen Basis ein Konformitätskennzeichen notwendig. Die CE-Kennzeichnung umfasst auch die Anforderungen aus weiteren Richtlinien oder Vorschriften, unter die die Maschine fällt. Für eine umfassende Qualitätssicherung kann eine benannte Stelle herangezogen werden (EG-Baumusterprüfung) und mit einer Kennnummer an der CE-Kennzeichnung kenntlich gemacht werden. Eine benannte Stelle (z. B. TÜV Süd) prüft als unabhängige Instanz die tatsächliche Einhaltung der Anforderungen aus den angewandten Richtlinien und stellt gegebenenfalls eine „EG-Baumusterprüfbescheinigung“ aus. (Europäische Union 2006)

3.2.2 DIN EN ISO 12100:2011

Die in der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG explizit geforderte Risikobeurteilung und Risikominderung kann mithilfe der Grundnorm DIN (Deutsches Institut für Normung) EN (Europäische Norm) ISO (engl. International Organization for Standardization) 12100:2011 „Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung“ (Typ-A-Norm) durchgeführt werden. Die Norm gibt Konstrukteuren einen Gesamtüberblick und eine Anleitung an die Hand, um Maschinen so konstruieren zu können, dass sie für ihre bestimmungsgemäße Verwendung sicher sind. Es liefert Verfahren für die Risikobewertung und –Minderung, sowie einen Leitfaden für die Dokumentation und den Nachweis des Risikominderungsprozesses. (DIN EN ISO 12100:2011)

3.2.3 DIN EN 61508

Die IEC/DIN EN 61508 „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“ ist die zentrale Normenserie/Norm für funktionale Sicherheit. Sie resultiert aus der Vorgabe der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, dass Maschinen keine als inakzeptabel eingestuften Risiken bergen dürfen. Da in der Praxis nicht alle Gefahren vollständig beseitigt werden können, lautet das Ziel, die Risiken auf ein akzeptables Maß zu senken. Dabei werden häufig Steuerungssysteme (z. B. Drehgeber oder Sensoren) eingesetzt, deren Fehlerwahrscheinlichkeit ebenfalls auf ein ausreichend geringes Maß reduziert werden muss. Etwaige Störungen dürfen nicht zu einem Verlust der Sicherheitsfunktion führen. (Orlosky und Hubsch 2018)

Die DIN EN 61508 wird folglich herangezogen, wenn elektrische/elektronische/programmierbare elektronische (E/E/PE) Systeme zur Ausführung von Sicherheitsfunktionen eingesetzt werden. Die Norm soll als Grundlage für weitere internationale Normen in bestimmten Anwendungsgebieten dienen. Zuständig ist hier in Deutschland das GK914 der Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) im DIN und VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik, und Informationstechnik e. V.).

Aus der DIN EN 61508 haben sich eine ganze Reihe spezialisierter Standards für funktionale Sicherheit abgeleitet (Abb. 24). Unter anderem die in der Automobilbranche viel zitierte ISO 26262 oder die für das „Multi Use-AFS“-Projekt relevanten ISO 13849 und IEC 62061.

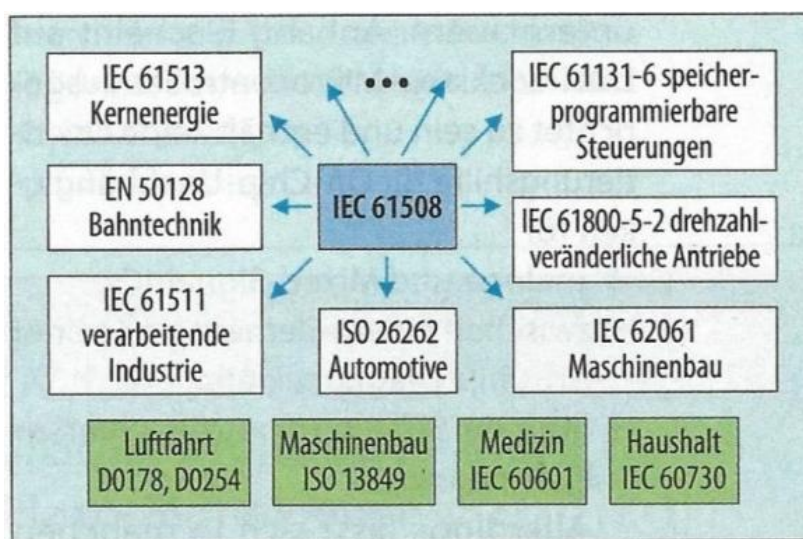


Abb. 24: Eine Auswahl an Standards, die mit der IEC 61508 verbunden sind. (Orlosky und Hubsch 2018)

3.2.4 DIN EN ISO 13849

Diese Typ-B1-Norm „Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“ (Sicherheitsfachgrundnorm – Sicherheitsaspekte) stellt Sicherheitsanforderungen und einen Leitfaden für die Prinzipien der Gestaltung und Integration sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen bereit. Es werden spezielle Eigenschaften einschließlich des performance level (PL) festgelegt, die zur Ausführung der entsprechenden Sicherheitsfunktionen erforderlich ist. Unabhängig der verwendeten Technologie und Energie (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch, mechanisch) ist sie auf sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen anzuwenden.

3.2.5 DIN EN 16590

Die DIN EN 16590 „Traktoren und Maschinen für die Land- und Forstwirtschaft - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“ ist die nationale Umsetzung der internationalen

Norm ISO 25119 „Traktoren und Maschinen für die Land- und Forstwirtschaft - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“. Es handelt sich um eine Typ-C-Norm (Maschinensicherheitsnorm), zur Spezifizierung der Anforderungen aus der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (Typ-A-Norm). Diese Norm stellt Sicherheitsanforderungen und einen Leitfaden für die Prinzipien der Gestaltung und Integration sicherheitsbezogener Teile von Steuerung bereit, die im Unterschied zur EN ISO 13849-1 speziell für Traktoren und land- und forstwirtschaftliche Maschinen gültig ist. Sie beschreibt einen Sicherheitslebenszyklus und definiert die erforderlichen AgPL (Agricultural Performance Level).

3.2.6 DIN EN ISO 4254

Diese harmonisierte Typ-C-Norm „Landmaschinen - Sicherheit“ beschäftigt sich mit der Sicherheit von Landmaschinen und konkretisiert so einschlägige Anforderungen aus Anhang 1 der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG an erstmals im Europäischen Wirtschaftsraum in Verkehr gebrachte Maschinen. Sie enthält sicherheitstechnische Anforderungen und deren Überprüfung für die Gestaltung und Konstruktion von selbstfahrenden Landmaschinen mit Fahrersitz und angebauten, aufgesattelten oder gezogenen Landmaschinen. Behandelt werden maschinentypische Gefährdungen und welche Informationen zum sicheren Betrieb (einschließlich Restgefahren) vom Hersteller zur Verfügung zu stellen sind.

3.2.7 CE-Kennzeichnung

Neben weiteren Richtlinien gilt für Maschinen im Bereich der Maschinenrichtlinie 2004/42/EG eine CE-Kennzeichnungspflicht. Ihnen muss auch eine Konformitätserklärung beiliegen. Der Hersteller bestätigt mit der Konformitätserklärung rechtsverbindlich, dass alle Anforderungen aus europäischen Richtlinien für das jeweilige Produkt eingehalten wurden. (Pilz GmbH & Co. KG o. J.)

3.3 Risikobeurteilung

Eine Maschine übernimmt Aufgaben nach einem vorab definierten Schema und in festgelegten Grenzen. Im Lebenszyklus dieser Maschine kann es zu Gefährdungen für den Bediener kommen (Risikoanalyse). Die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund der Gefährdung zu einem Schaden kommt und das damit verbundene Ausmaße, bedürfen einer Abschätzung (Risikoeinschätzung). Die Risikoanalyse und die Risikoeinschätzung bilden zusammen die Risikobewertung. Wird die Risikobewertung wiederholt durchgeführt, bis zuletzt eine hinreichende Risikominderung erreicht ist, so wird von einer Risikobeurteilung gesprochen. Die Risikobeurteilung ist ein wesentlicher Bestandteil des Konformitätsbewertungsverfahrens und Grundlage der CE-Kennzeichnung (Kring 2020a).

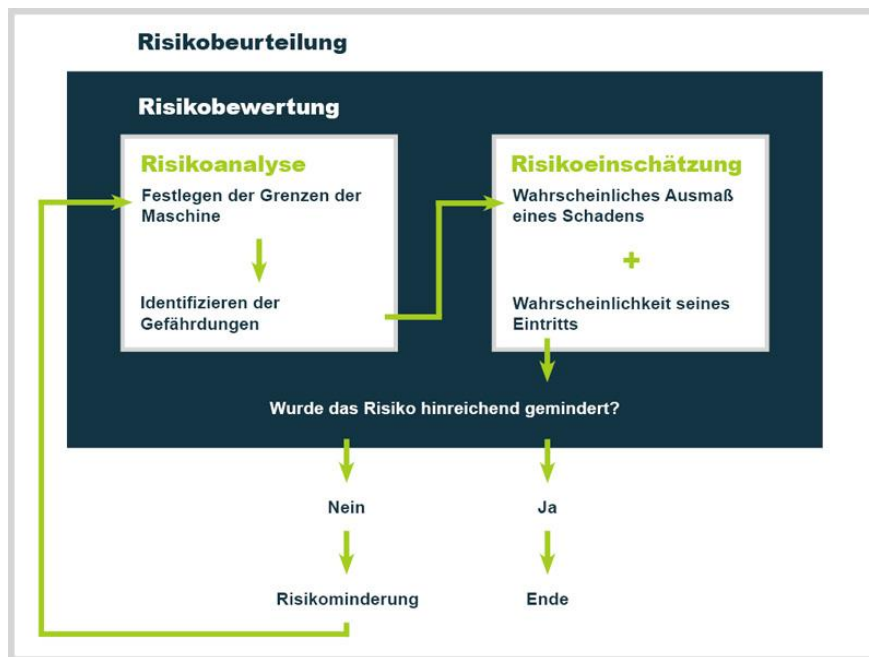


Abb. 25: Das Verfahren der Risikobeurteilung in Form eines Ablaufdiagramms. (Richter 2014)

3.3.1 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse setzt auf, auf die ermittelten Einsatzbedingungen der Maschine. Mit Festlegung des Funktionsumfangs, dem Konzept der Maschinenautomatisierung, ergeben sich die Grenzen, innerhalb derer die Maschine künftig agieren kann und darf. Sind diese Grenzen bekannt, können Überschneidungen offengelegt werden, die möglicherweise zu Gefährdungen führen können. Beispielsweise sei hier die gemeinsame Arbeit von Maschine und Mensch in einem Raum genannt. Eine Risikoanalyse zielt somit in der Folge auf die Identifizierung der Gefährdungen ab. (Agerer 2021)

3.3.2 Risikoeinschätzung

In der DIN EN ISO 12100:2011 wird definiert, dass zwei Faktoren zu Einschätzung des Risikos von zentraler Bedeutung sind. Zum einen das wahrscheinliche Ausmaß eines Schadens, der eintreten kann. Zum anderen die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines solchen Schadens, d. h. wie oft in einem Zeitraum eine Gefährdung besteht. (DIN EN ISO 12100:2011)

3.3.3 Risikobewertung

Die Risikobewertung subsummiert wiederum die Risikoanalyse und die Risikoeinschätzung und kommt zu der Frage, ob das Risiko hinreichend gemindert wurde. Wir wissen also (1) wo treten welche Gefährdungen auf, (2) wie schwer können Schäden potenziell sein und (3) mit welcher Wahrscheinlichkeit eines Eintritts ist ein Schaden daraus zu erwarten. (Agerer 2021)

3.3.4 Sicherer Zustand

Es wird bei einem System von einem sicheren Zustand gesprochen, wenn der aktuelle Betriebszustand des Systems ein tragbares Restrisiko in einer gefahrbringenden Situation darstellt. Ein sicherer Zustand kann ein vorgesehener oder ein zusätzlicher Betriebsmodus sein, der sich an der gefahrbringenden Situation orientiert. Zusätzliche Betriebsmodi können z. B. ein Back-up-Modus sein, der die Verfügbarkeit der Maschine erhöht, oder ein abgeschalteter „sicherer“ Modus, den die Maschine nur außerhalb einer gefahrbringenden Betriebssituation verlassen kann. Laut Hermes (2015) sollte der sichere Zustand bereits während der Risikobeurteilung definiert werden, da so einfacher zu sehen ist, ob dieser mit allen zugehörigen gefahrbringenden Betriebssituationen konsistent ist. (Hermes 2015)

3.4 Automatisierung

3.4.1 Spurführung

Die ersten automatisierten Fahrzeuge orientierten sich an stromleitenden Drähten, die in den Boden eingelassen waren und ein charakteristisches Magnetfeld erzeugten. Alternativ dazu konnten auch optische Leitlinien am Boden zur Orientierung verwendet werden. Diese Methoden wurden in den 1990er Jahren bis etwa 2010 von den „freien“ Navigationstechniken Magnet- und Laser-Navigation abgelöst. (Ullrich 2014)

Im Kontext der Logistik solcher automatisierten Fahrzeuge mag eine Magnetnavigation als „frei“ gelten. In wettergeschützten, strukturierten und planbefestigten Hallen sind alle Voraussetzungen für die Integration von Magneten im Boden erfüllt und problemlos umsetzbar. Im Kontext der Landwirtschaft finden sich jedoch keine definierten Betriebsstrukturen. Ob eine Hoffläche planbefestigt ist oder wie weit die Abstände zwischen den Gebäuden sind, ist auf jedem landwirtschaftlichen Betrieb individuell bzw. unter Umständen nicht anpassbar. Die Laser-Navigation ist durchaus eine „freie“ Methode der Navigation, selbst wenn Referenzmarken eingesetzt werden sollten. Im geschützten sauberen Hallenbereich, im definierten gleichbleibenden Licht einer Logistikhalle funktioniert sie ohne Einschränkung. Probleme treten jedoch im Outdoor-Bereich auf. Hier sind wechselnde Lichtbedingungen und Hell-Dunkel-Übergänge oder Schlaglichter zu erwarten. Des Weiteren wirken sich Wetterbedingungen, wie z. B. Nebel, Regen oder Schnee, negativ auf die optische Messung aus. Verschmutzungen des Lasers müssen vermieden und gegebenenfalls behoben werden.

Die Spurführung per Satellitennavigation (GNSS) ist eine gute Möglichkeit im Außenbereich definierten Routen zu folgen. Die Genauigkeit von 10 bis 15 Zentimetern bei GPS-Systemen mit Korrektursignalen (DGPS, engl. differential global positioning system) bzw. von weniger

als 2 Zentimeter bei GPS-Systemen mit Referenzstationen zur Korrektur (RTK) ist absolut ausreichend. Zudem ist die Spurführung wenig stör anfällig. Jedoch besitzt die Maschine keine aktuellen Umgebungsinformationen, weshalb keine Hinderniserkennung gegeben ist. Diese muss mit anderen Technologien bewältigt werden.

In der Recherche über geeignete Technologien und Methoden zur Navigation des „Multi Use-AFS“ zeichneten sich interessante Entwicklungen auf dem Gebiet der Radar-Technik ab. Ein Scanner, mit vergleichbarer Detailschärfe wie bei der LiDAR-Methode und einer Unempfindlichkeit gegenüber vorherrschenden Umweltbedingungen, verspricht ein wichtiger Baustein in der zukünftigen Fahrzeugautomatisierung zu werden. In einem anderen Setup verspricht die Radar-Technologie darüber hinaus einen vielversprechenden Ansatz zur Hinderniserkennung bzw. den Personenschutz.

3.4.2 Personenschutz

Am Anfang der Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen im Transportwesen standen „taktile“ Systeme, wie etwa Sicherheitsbügel oder Bumper. Bei Kollision/Berührung eines Objektes lösen diese einen Not-Halt aus und bringen die Maschine zum Stillstand. In heutiger Zeit sind diese auf Kontakt basierenden Einrichtungen meist nur mehr als Redundanz zu einem übergeordneten System vorgesehen. Schon seit längerem können berührungslose Sensoren, meist auf Basis von Laser-Scannern, für den Personenschutz verwendet werden. Diese speziellen Scanner sind von der Berufsgenossenschaft zugelassen.

In nicht abgegrenzten Außenbereichen verhält es sich aufgrund der Wetterbedingungen anders. Die Entwicklung und Zulassung eines geeigneten Laser-Scanners gestaltet sich hier als äußerst schwierig. Aufgrund dessen sind alle bisherigen Outdoor-FTF (Fahrerlose Transportfahrzeuge) mit relativ großen mechanischen Notaus-Bügeln ausgestattet. Zusätzliche angebrachte Sensoren unterstützen diesen lediglich, dürfen den Personenschutz aber nicht allein verantworten. Schon Ullrich (2014) konstatierte, dass hier ein neues Sensorsystem dringend erforderlich erscheint. Maurer et al. (2015) führen an, dass bei neueren Technologien eine Kombination aus Laser-Scanner und Kamerasystemen mit digitalen Umgebungskarten eine Navigation mittels Umgebungsmerkmalen möglich macht. (Ullrich 2014)

In der Literatur wird die Radar-Technik bislang nicht mit dem Personenschutz als solches in Verbindung gebracht. Bekannte und etablierte Einsatzszenarien sind die Objektdetektion im automobilen Nahbereich (Einparkhilfe) oder Fernbereich (Abstandstempomat). Hier kommen ausschließlich gerichtete Radar-Sensoren zum Einsatz, wenngleich mehrere davon. Erst die Rotation der Radar-Keule ermöglicht eine Umfeld Detektion ähnlich wie bei LiDAR. Im Projekt „Multi Use-AFS“ nimmt die Radar-Technologie einen zentralen Punkt bei der

Hinderniserkennung und Schadensvermeidung ein. Dabei funktioniert der Radar-Scanner prinzipiell wie auch bereits bei der Navigation. Entscheidender Unterschied in der Hardware ist eine veränderte Linse für die Bündelung der elektromagnetischen Wellen. Für Navigationsaufgaben wird versucht den Radar-Kegel stark zu bündeln, um eine möglichst detaillierte Kartierung der Umgebung zu ermöglichen. Beim der Kollisionsvermeidung bzw. dem Personenschutz würde sich diese Anforderung umkehren. Es müssen keine detaillierten Karten im Bereich bis 20 Meter erzeugt werden, sondern möglichst Objekte im Nahfeld (bis 5 Meter vor dem Fahrzeug) zuverlässig erkannt werden. In

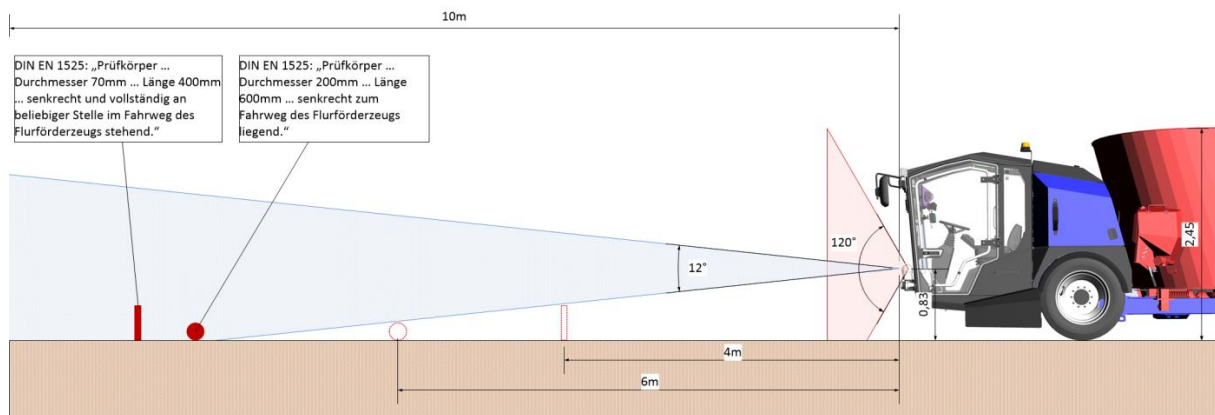


Abb. 26 ist schematisch ein Überblick über die beiden Scannersetups gegeben. Das Detektionsfeld des Navigationsscanners ist blau, das Detektionsfeld des Hindernisscanners rot eingefärbt. Ja nach Montage des Scanners kann die Fahrzeugumgebung lückenlos erfasst werden.

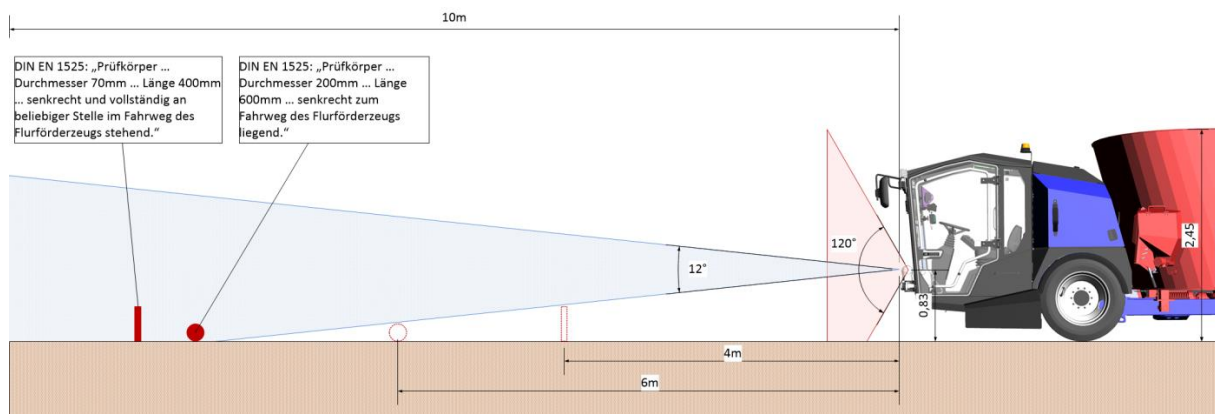


Abb. 26: Schema der Detektionsbereiche von Radar, als Navigationsscanner (blaue Fläche) und als Hindernisdetektor (rote Fläche). Während die Prüfkörper nach DIN EN 1525 nach 4 bzw. 6 m vor dem Fahrzeug aus dem Navigationskegel „verschwinden“, kann mit dem Hindernisdetektor bis weniger als einem halben Meter vor dem Fahrzeug ein Objekt erkannt werden. (Reger et al. 2022b)

Durch die Positionierung des Laser-Scanners im oberen Bereich des Futtermischwagens erfasst der Laser-Scanner eine zeitlich wenig veränderliche Umgebung (Abb. 27). Bis zu einer

Höhe von etwa zwei Metern über dem Boden herrscht aufgrund der Bewegungen von Fahrzeugen, Personen und Objekten eine wechselhaftere Umgebung. Die Platzierung oberhalb der starren Vorderachse des Mischwagens begünstigt zudem eine präzise Navigation, da der Hebel zwischen Fahrzeugdrehpunkt und Sensor nicht vorhanden oder sehr klein ist.

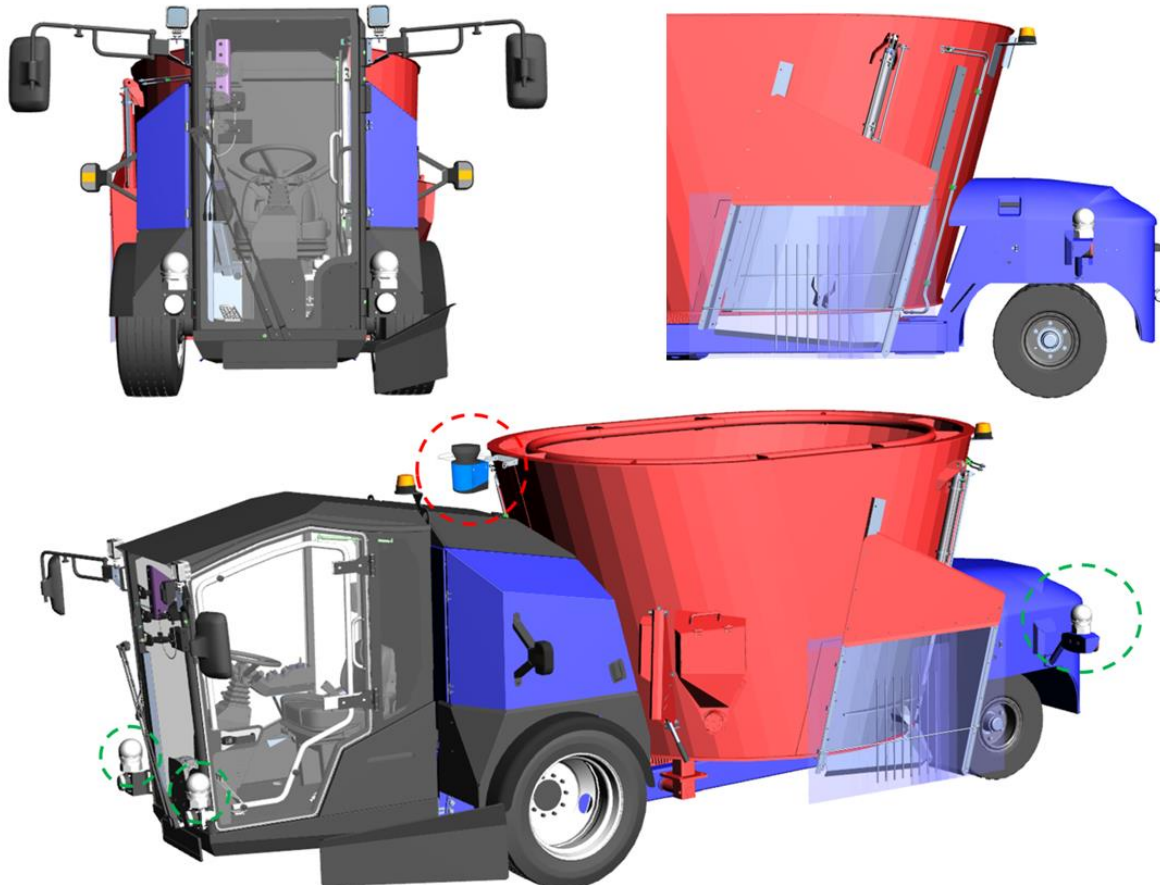


Abb. 27: Konzept zur Automatisierung des Futtermischwagens mit einem Laser-Scanner zur Navigation (rot eingekreist) und vier Radar-Scannern für Personen- und Kollisionsschutz (grün eingekreist). (Reger et al. 2022b)

Mit Hilfe von Linsen bündelt der Radar-Scanner die Radar-Strahlen unterschiedlich stark. Ein stärkerer Fokus führt zu einer detaillierteren Erfassung der Umgebung

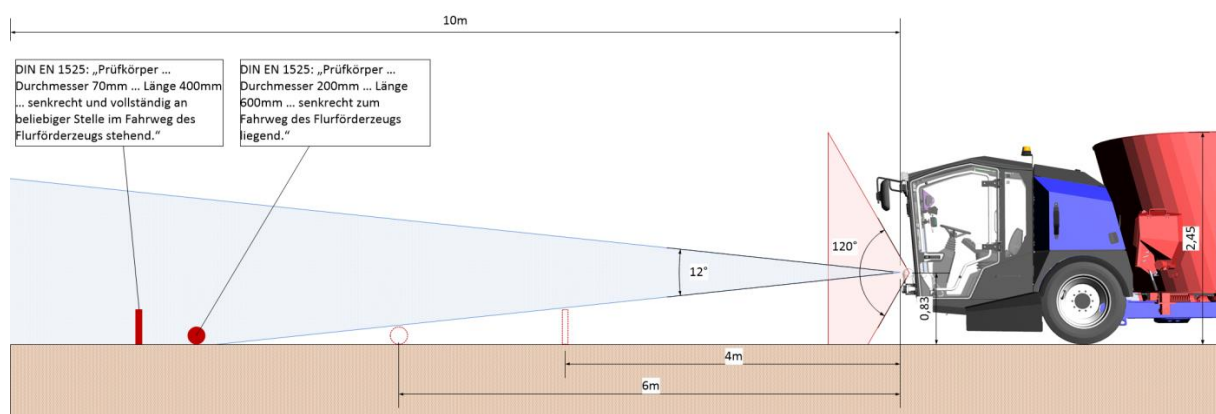


Abb. 26. Ein geringerer Fokus ermöglicht eine sowohl horizontal als auch vertikal umfassende Umfelderkennung (Abb. 28). Ein Konzept mit vier Radar-Scannern an den Eckpunkten des Fahrzeugs ergibt eine technisch vollständige Umfelderkennung zur Personen- oder Objekterkennung. Dabei werden die Bereiche der Fahrwege vor und hinter dem Fahrzeug, aber auch die Seitenbereiche überlappend abgedeckt. Dadurch verdoppelt sich die Messdatenaktualisierungsrate aus der Kombination beider Radar-Antennen. Das Beispiel einer liegenden Person zeigt den enormen Vorteil der zweidimensionalen Radar-Erfassung. Ein horizontaler Laser-Fächer oder ein stark gebündelter Radar-Fächer kann diese Person möglicherweise nicht aus nächster Nähe erkennen. Darüber hinaus ist das Durchdringen bestimmter Materialien wie Kunststoff oder trockenes Holz eine vorteilhafte Eigenschaft der Radar-Strahlung zur Objektidentifikation im Vergleich zur Absorption durch wasserhaltige Objekte oder Reflexion durch Metalle.

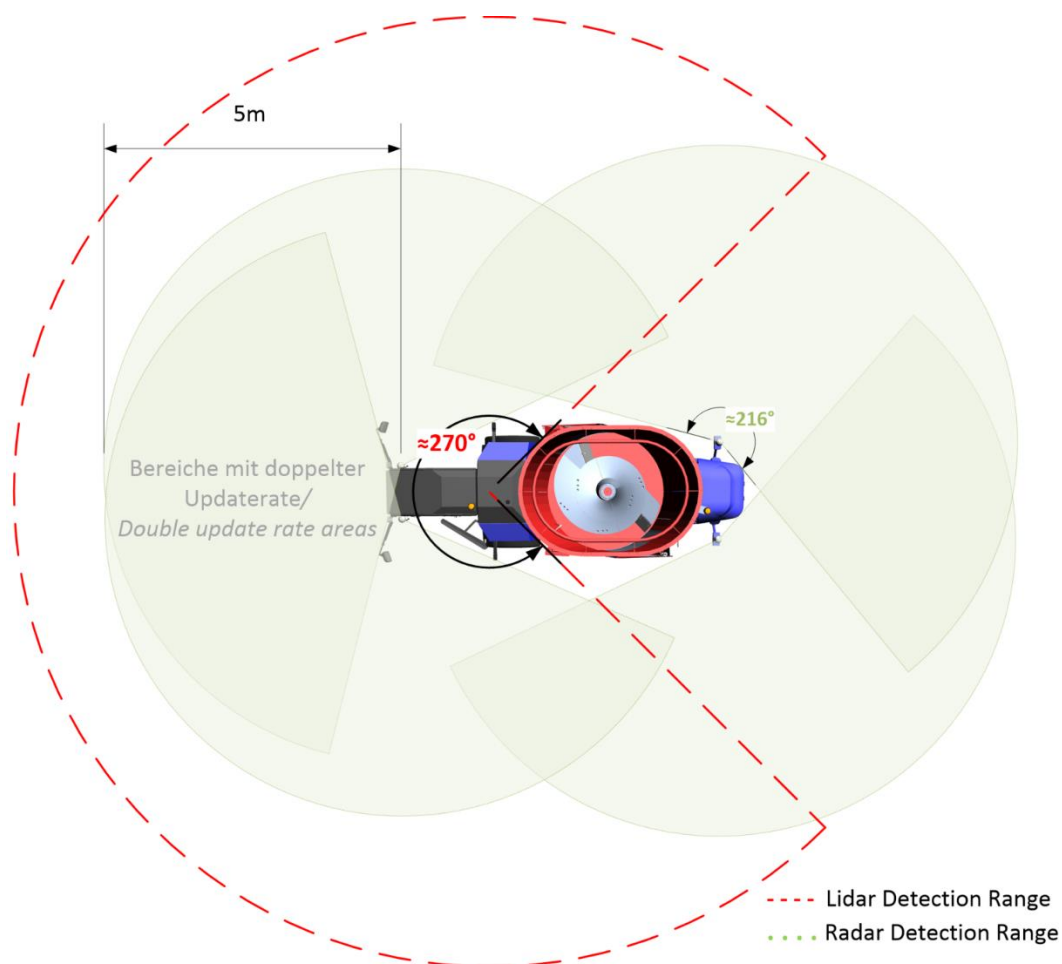


Abb. 28: Der Futtermischwagen aus der Vogelperspektive mit dem angedeuteten LiDAR-Erfassungsbereich (rot gestrichelt) und den überlappenden Erfassungsbereichen der vier Radar-Scanner (grüne Bereiche). (Reger et al. 2022b)

3.5 Elektrifizierung

Seit einigen Jahren hält die Elektrifizierung von Maschinen verstärkt Einzug in landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge. Fortschritte in der Batteriespeicherentwicklung und sinkende Preise begünstigen diesen Wandel und dynamisieren diesen zunehmend. Die gesellschaftlich und politisch getriebene Energiewende hin zu nachhaltiger, dezentraler Energieerzeugung eröffnet neue Möglichkeiten. Als Beispiel ist hier das Smart Grid zu nennen, der Erzeugungs- und Verbrauchsidealen dezentralen Speicherung von Energie. Gleichzeitig fallen in den nächsten Jahren die Einspeisevergütungen auf regenerativ erzeugten Strom, was eine Eigennutzung des Stromes zunehmend auch wirtschaftlich sinnvoll macht. Die jüngsten Ereignisse im Ukraine-Krieg beschleunigen diesen Effekt zuletzt auf sehr drastische Weise.

Besonders in der Innenwirtschaft finden sich viele Vorteile in der Nutzung strombetriebener Maschinen. Am Hof ist die notwendige Infrastruktur zum Laden der Maschinen vorhanden. Außerdem sind Maschinen am Hof meist nur für wenige Stunden am Stück im Einsatz und nur selten mit Leistungsspitzen. Beispielhaft kann hier der Hoflader, der Mistschieber oder der Futtermischwagen genannt werden. Entscheidender Vorteil gegenüber den Diesel- bzw. Ottomotoren ist die nahezu vollständige Reduzierung der Geräusch- und Schadstoffemissionen.

Anhand von Praxiserfahrungen und Recherchen wurden Spezifikationen für das elektrifizierte AFS formuliert. Anschließend wurden geeignete Lieferanten von Standardkomponenten gesucht, die die gesetzten Anforderungen erfüllen konnten.

3.6 Versuche

In drei Versuchsanstellungen wurden Voruntersuchungen zu den Themen Navigation und Personenschutz bei selbstfahrenden Maschinen gemacht. In Versuchsreihe A wurden zunächst statische Versuche mit der Radar- bzw. LiDAR-Sensorik durchgeführt. In Fortführung in Versuchsreihe B wurde die Radar- bzw. LiDAR-Sensorik auf einem Roboterfahrzeug unter praxisnahen Bedingungen getestet. Abschließend wurde in Versuchsreihe C die Radar- bzw. LiDAR-Sensorik auf einen Futtermischwagen übertragen und unter praxisnahen Bedingungen getestet. Die Ermittlung von Stand der Technik, Praxistauglichkeit sowie Leistungspotentialen von berührungslosen Technologien, wie z. B. Laser-Scanner oder Radar, stand dabei im Fokus. Ziel war es, Möglichkeiten für den zuverlässigen und sicheren Betrieb der TruckLine von Siloking in einem AFS zu ermitteln. Die gewonnen Erkenntnisse fließen dann in Funktions-, Konstruktions- und Sicherheitskonzepte ein.

3.6.1 Versuchsreihe A

Am 29.07.2016 fanden erste, statische Versuche mit Laser und Radar statt. Es sollten die Eigenschaften beider Technologien dargestellt werden. Insbesondere die Anfälligkeit des Laser-Scanners gegenüber Wasser (Regen, Nebel), sowie die Leistungsfähigkeit des prototypischen Radar-Moduls.

Unter diesem Themenpunkt wurden auch weitere Tests gefasst. Die Umsetzung des Radar-Sensors zum 360 Grad-Scanner erfolgte bereits im August/Oktober 2016, sodass bereits erste Scan-Messdaten erzeugt und visualisiert werden konnten.

3.6.1.1 Versuchsort/-aufbau

Die Versuche fanden in einer Maschinenhalle des TUM-Versuchsgutes Dürnast statt. Die Halle maß 27 mal 9,50 Meter und bot eine lichte Raumhöhe von 4,80 Meter. In einer Höhe von 2,50 Meter wurde die Sensorik senkrecht und zentriert auf unterschiedliche Zielobjekte ausgerichtet (Abb. 29). Es handelte sich bei den Zielobjekten um eine 400 mal 400 mal 2 Millimeter große Platten aus Pressspann und Metall, sowie spezielle Radar-Reflektoren. Die Metallplatte wurde an Polypropylen-Schnüren ($\varnothing \leq 3 \text{ mm}$) aufgehängt, um Störungen der Messungen zu vermeiden.

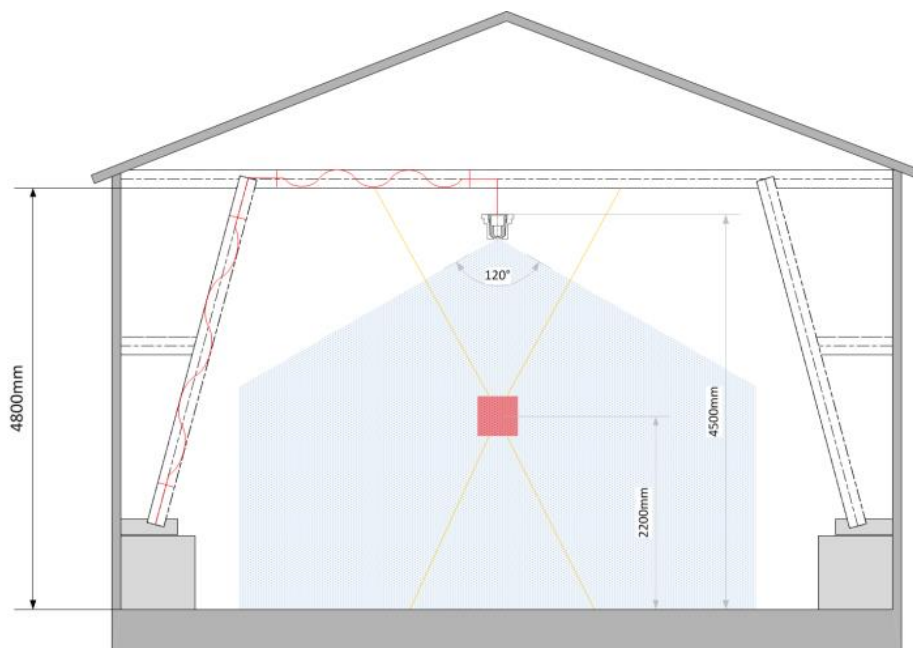


Abb. 29: Querschnitt der Hallenbreite. Die Zielobjekte (rot) wurden an PP-Schnüren (Polypropylen, gelb) aufgehängt. Die Nebelwand (blau schraffiert) bildete sich aufgrund der Schwerkraft etwas anders aus, deckte das Zielobjekt jedoch mit ausreichendem Seitenabstand voll ab. (Reger et al. 2017)

Das Radar-Modul bildet einen kegelförmigen Detektionsbereich mit einem Öffnungswinkel von 12 Grad aus (Abb. 30). Die Detektionswahrscheinlichkeit (aufgrund abnehmender

Sendungsleistung im Randbereich) nimmt vom Zentrum der elektromagnetischen Wellen aus ab und erreicht nur noch einen Wert von 10 % im Randbereich von 12 Grad. In den Versuchen konnte somit in einer Entfernung von 20 Meter zum Zielobjekt gemessen, ohne das es zu einer Beeinträchtigung des Radar-Kegels kam. In einer Höhe von 4,50 Meter und in mehreren Abständen zwischen Zielobjekt und Sensorik wurden Flachstrahldüsen montiert, die einzeln geschaltet werden konnten und so „Nebel/Sprühregen“ bildeten. Die Bereiche um das Zielobjekt und die Sensorik wurden frei von störenden Objekten gehalten. Die Halle war bis auf technisch notwendige Dinge, wie z. B. Laptops mit Tisch, ausgeräumt. Resteinflüsse aus der Decken- und Wandkonstruktion oder dem Stahl-Beton-Boden können nicht ausgeschlossen werden.

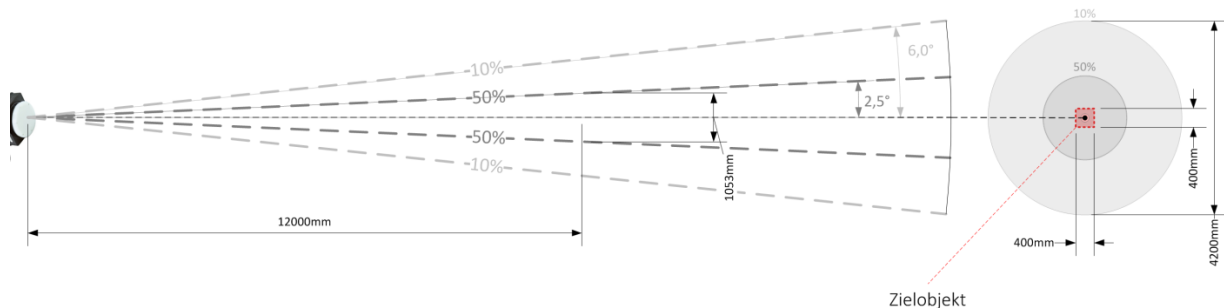


Abb. 30: Der kegelförmige Detektionsbereich des Radars mit dem Zielobjekt (rot) im Größenvergleich. Zu den Randbereich des Radar-Kegels hin nimmt die Sendeleistung ab, beschrieben anhand der Prozentangaben im Verhältnis zum Öffnungswinkel. (Eigene Darstellung)

3.6.1.2 Technik

Für die Vernebelung des Wassers wurde eine Flachstrahldüse der Firma Lechler verwendet. Es handelt sich um die Düse mit der Bezeichnung 652.187, die ein Tröpfchenspektrum von 89 bis 407 Mikrometer und einen mittleren volumetrischen Durchmesser (MVD) von 157 Mikrometer besitzt (Lechler GmbH o. J.). In der Natur wird Nebel definiert als kondensiertes Wasser mit einem Anteil zwischen 0,01 und 0,3 Gramm pro Kubikmeter Luft. In der Regel liegt hier das Tröpfchenspektrum zwischen 10 und 100 Mikrometer. Bei Sprühregen liegt das Tröpfchenspektrum zwischen 100 und 500 Mikrometer. Es wurde somit eine Mischung aus künstlichem Nebel und Sprühregen erzeugt. (Malberg 2007)

Der Laser-Scanner stammte von der Sick GmbH und trägt die Bezeichnung LMS100-10000. Es handelt sich um einen 2D-LiDAR-Scanner, der eine maximale Reichweite des Arbeitsbereiches von 20 Meter erreicht, bei 90 % Remissionsrate. Der Öffnungswinkel von 270 Grad erreicht bei einer Winkelauflösung von 0,25 Grad bzw. 0,5 Grad eine Scanfrequenz von 25 Hertz bzw. 50 Hertz. Der Scanner besitzt eine Nebelkorrektur, eine Multi-Echo-Auswertung und eine Fremdlichtunempfindlichkeit bis 40.000 Lux. Ein heller Sonntag besitzt

in etwa eine Beleuchtungsstärke von 100.000 Lux, ein bedeckter Sonnentag in etwa 20.000 Lux und im Schatten sind bis zu 10.000 Lux messbar. (SICK AG 2018)

Bei dem Radar-Sensor handelte es sich um ein Evaluation Board. Das Radar arbeitete im Frequenzband von 57 bis 64 Gigahertz und als FMCW-Radar. Auch ohne Nachverarbeitung erreichte der Sensor eine Genauigkeit der Messergebnisse von < 5 Zentimeter. Die Auflösung lag bereits bei 2 Zentimeter (gerundet) und war über die gesamte Messdistanz konstant. Es wurde noch keine Objekte automatisch erkannt und Distanzen zu diesen ermittelt, jedoch wurden die Ergebnisse der Signalverarbeitung als Graphen dargestellt. Anhand der Amplituden bzw. Signalpeaks konnten die Distanzen zu den Objekten zunächst nur manuell beurteilt werden.

Als Zielobjekt wurde unter anderem ein oktaedrischer Radar-Reflektor verwendet. Er besitzt eine Kantenlänge von 340 Millimeter, misst in der Diagonale 470 Millimeter und erreicht so eine RCS von 7 Quadratmeter. Er ist aus 1 Millimeter starkem Aluminium gefertigt und wird an den Ecken von Kunststoffteilen fixiert.

3.6.1.3 Versuchsdurchführung

Es wurden Messungen in den Abständen 1, 2, 4, 8 und 12 Meter durchgeführt. Im Nahbereich der Detektion ergab sich aufgrund der Distanzermittlung per Laufzeitmessung ein unteres Limit der möglichen Erfassung. Mit etwas Puffer wurde daher 1 Meter als Minimum gewählt. Der Hersteller gibt für den verwendeten Laser-Scanner einen Arbeitsbereich ab 0,5 bis 20 Meter an. Die maximale Detektionsreichweite des Radar-Scanners wurde während der Versuche bei etwa 12 Meter verortet, ohne aufwändige Datenanalyse, nur anhand einer optischen Messdatenprüfung. Insgesamt konnten 9 Nebelwände zwischen dem Zielobjekt und der Sensorik geschaltet werden (Abb. 31). Die erste Düse befand sich im Abstand von 1,5 Meter zum Zielobjekt, gefolgt von drei weiteren Düsen im Abstand von je 0,5 Meter und weiteren fünf Düsen im Abstand von je 1 Meter. Die Abstände sowie Nebelwände wurden für jedes der Zielobjekte, Metallplatte, Holzplatte und Radar-Reflektor, durchgeführt.

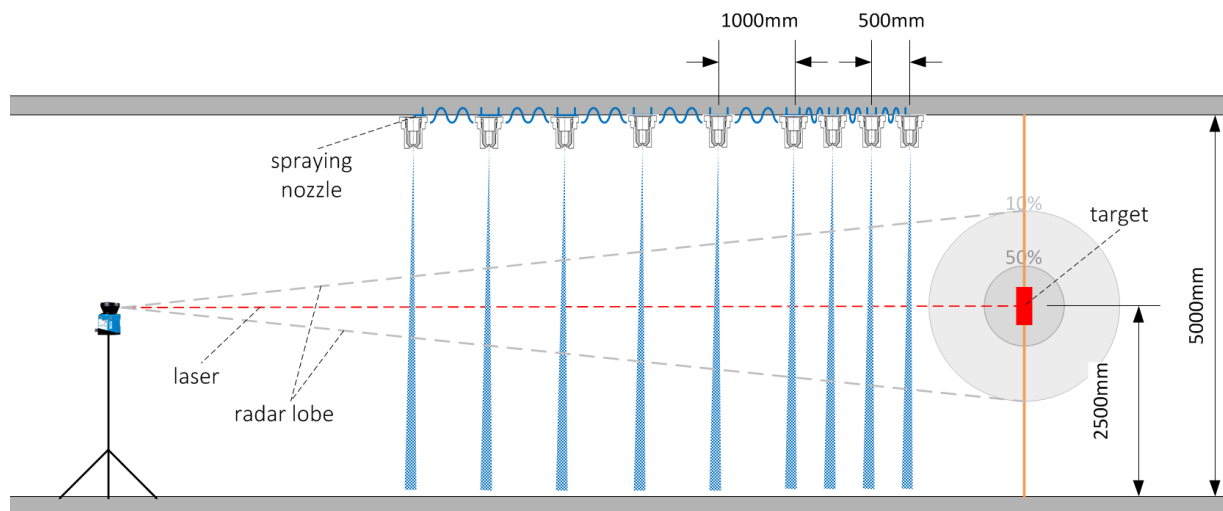


Abb. 31: Der schematische Aufbau der Versuchsreihe A. Zu sehen ist die Sensorik (links), ausgerichtet auf das Zielobjekt (rechts), mit bis zu neun Nebelvorhängen dazwischen. (Reger et al. 2017)

3.6.2 Versuchsreihe B

In dem dynamischen Fahrversuch wurde ein Roboterfahrzeug mit Laser- und Radar-Sensorik ausgestattet. In landwirtschaftlichem Umfeld musste dann eine programmierte Route vom Fahrzeug automatisch zurückgelegt werden. Die Auswertung der Sensordaten erfolgte nach den Merkmalen Accuracy (Genauigkeit), Precision (Präzision), Konsistenz und Kondition.

3.6.2.1 Versuchsort

Als Ort für möglichst praxisnahe Einsatzbedingungen während der Versuche, wurde das Versuchsgut „Veitshof“ der TUM in Freising gewählt. Ein Probelauf fand am 13.12.2016 statt, die Versuche wurden am 15.12.2016 durchgeführt.

In dem 31 mal 26 Meter großen Stallgebäude wird eine Braunviehherde zur Milchproduktion gehalten. Ein Mittelgang, der als Futtertisch dient, ist durch ein metallisches Fang-/Fressgitter vom Laufstall abgetrennt. Der Futtertisch ist durch eine metallische Zugbrücke geteilt, welche hochgezogen einen Verbindungsgang für die Kuhherde zwischen den beiden Stallseiten bereitstellt. Die Gebäudewände im Außenbereich sind aus Holz, bzw. besitzen einen Betonsockel. Im östlichen Bereich des Stalles sind Kälberiglus aufgestellt.

3.6.2.2 Versuchsaufbau

Die Fahrroute des Roboterfahrzeugs verlief im und außerhalb des Stallgebäudes. Sie wurde so gewählt, um einer Praxisanwendung eines Futtermischwagens möglichst nahe zu kommen. Der Roboter startete von Position 1, fuhr einen Bogen zu Position 2, fuhr in gleichbleibenden Abstand zum Fressgitter zu Position 3, fuhr einen Bogen zu Position 4 und gelangte nach erneuter Geradeausfahrt wieder zu Ausgangsposition 1 (Abb. 32). Die dabei zurückgelegte

Strecke wurde als eine Fahrt bezeichnet. Jede Fahrt begann erneut von Position 1 durch manuellen Start per Funkfernbedienung. Die Umgebung bot sehr wechselhafte Bedingungen: Bodenbeläge von gekiest bis zu geschliffenem Beton, Lichtverhältnisse In- und Outdoor, wechselnde Abstände zu reflektierenden Objekten, wechselnde Materialien/Oberflächenbeschaffenheit der reflektierenden Objekte, statische (bauliche) und dynamische (Kühe) Objekte und trockene als auch regnerische Bedingungen. Die Beregnung erfolgte künstlich durch Vollkegeldüsen des Typs 490.846 der Firma Lechler. Mittels eines Holzgestells sind die Düsen über der Fahrstrecke des Roboters in 2,50 Metern Höhe angebracht worden. Der Abstand zwischen den Düsen, der Wasserdruck und der düsenspezifische Öffnungswinkel gewährleistete eine Beregnung der Fahrstrecke über 20 Meter Länge.

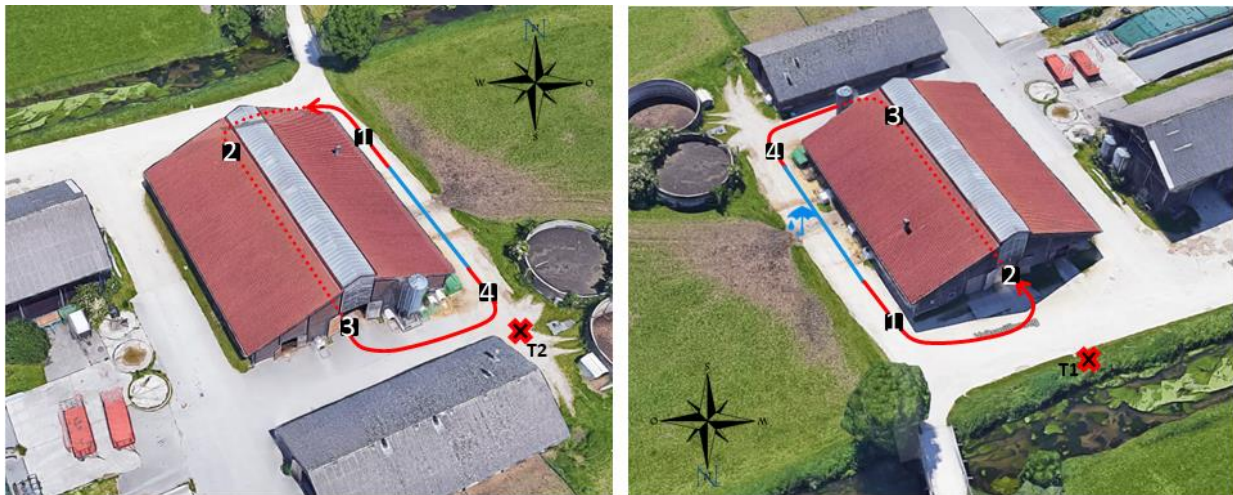


Abb. 32: Die Fahrstrecke des Roboterfahrzeugs veränderte sich während der Durchgänge nicht. Lediglich Tachymeter und Startpunkt wurden verlagert. Die Zahlen 1 bis 4 beschreiben Positionen, auf die im Text Bezug genommen wird. (Maßstab 1:10) (Reger et al. 2022a)

Das Roboterfahrzeug wurde mit einem Laser-Scanner LMS100 von Sick, einem Radar-Scanner im Prototypenstadium der Firma Innok Robotics sowie einem 360 Grad-Prisma ausgerüstet. Diese Module wurden übereinander und in der Mitte der Lenkachse montiert. Durch diese Anordnung wurde Messunterschieden zwischen den Systemen vorgebeugt, die sich aufgrund unterschiedlicher Bewegungskurven durch Lenkbewegungen sonst voneinander unterscheiden würden. Um mit dem Laser-Scanner eine digitale Karte für die Navigation zu erstellen, wurde das Roboterfahrzeug manuell entlang der gewünschten Route gefahren. Durch das fahren in Schlangenlinien erhielt der Laser-Scanner eine größere Menge an Messdaten, was das Ergebnis des Kartierungsalgorithmus verbesserte. In dieser digitalen Karte wurden anschließend Wegpunkte programmiert. Die einzelnen Wegpunkte fügten sich zu einer Soll-Trajektorie zusammen. Nach Durchgang 2 erfolgte eine Anpassung der Fahrtroutenprogrammierung bzw. eine Erhöhung der Anzahl an Wegpunkten.



Abb. 33: Das Roboterfahrzeug mit Laserscanner (blau-schwarz), Radarscanner (weiß) und dem 360 Grad-Prisma (schwarz-orange) im Sichtfeld des Tachymeters. Zur Orientierung eingefügt wurden die Positionen T1 und 2. (Eigene Aufnahmen)

Ein Leica TCRA 1101 PLUS-Tachymeter wurde an Position T1 sowie Position T2 positioniert und eingemessen. Es diente als Referenz zu den Messungen von Laser- und Radar-Scanner, in dem es die Fahrroute des Roboters anhand eines 360-Grad Prismas automatisch verfolgte und mittels Winkel- und Laufzeitmessung bemaß. Durch die unterschiedliche Positionierung des Tachymeters konnte in den Durchgängen 1, 2 und 3 von Position T1 aus die Fahrstrecke von 1 bis 3 vermessen werden. In Durchgang 4 wurde von der Tachymeter-Position T2 aus die Fahrstrecke von 3 bis 1 vermessen.

3.6.2.3 Technik und Software

Das Roboterfahrzeug war ein Heros 224 WST der Innok Robotics GmbH. Bei einer Energiemenge von 430 Wattstunden erreichte das Fahrzeug eine Maximalgeschwindigkeit von 1,8 Meter pro Sekunde und eine Betriebsdauer von ca. 4 Stunden im Normalbetrieb. Die Antriebsleistung der beiden Motoren des 2WD-Differenzialantriebs betrug 800 Watt, die über Gummi-Luftreifen und einem nominalen Raddurchmesser von 410 Millimeter auf den Boden übertragen wurde. Die Abmessungen Länge mal Breite mal Höhe lagen bei ca. 95 mal 80 mal 46 Zentimeter und einer Bodenfreiheit von 14,5 Zentimeter. Ohne Aufbau brachte es das Fahrzeug auf ca. 80 Kilogramm. Der Onboard-PC lief mit einem Ubuntu Linux-Betriebssystem,

auf dem das Robot Operating System (ROS) installiert war. Ein WLAN-Router mit 2,4 Gigahertz sowie eine LTE-Antenne gehörten zur weiteren Ausstattung. Des Weiteren befanden sich Schnittstellen für kundenspezifische Erweiterungen in der Control-/Interfacebox. Manuell wurde der Roboter per Industrie-Fernsteuerung gesteuert. Diese besaß eine Linearhebel-Steuerung sowie einen Not-Halt-Schalter und diverse Schalter/Taster für Sonderfunktionen.

Die Navigation des Roboterfahrzeugs wurde mit einem Laser-Scanner LMS 100 der SICK AG umgesetzt. Der Scanner arbeitete mit einer Lichtwellenlänge von 905 Nanometer, was sich im Bereich des Infrarot-Spektrums befand. Der Messbereich lag zwischen 0,5 und 20 Meter, bei einem Öffnungswinkel von 270 Grad. Bis 40.000 Lux war der Scanner fremdlichtunempfindlich. Der systematische Fehler lag bei 30 Millimeter. Der LMS 100 verfügt über eine Nebelkorrektur sowie eine Mehrfachecho Auswertung.

Das inertielle Messsystem MTi-30-2A5G4 von Xsens unterstützte durch seine Beschleunigungs- und Drehratensensoren die Nachverfolgung der räumlichen Bewegung des Fahrzeugs. Daraus ließ sich die jeweilige geographische Position bestimmen. Diese weitere Referenz präziserte unter Umständen die Messdaten anderer Messsysteme.

Bei der eingesetzten Radar-Sensorik handelte es sich um einen Testaufbau im Prototypen-Stadium. Die experimentelle Sensorik wurde von der Innok Robotics GmbH entwickelt. Die vorläufigen Leistungsdaten des 360 Grad-Kurzstreckenradars lagen daher niedriger als die Ziel-Spezifikationen einer möglichen folgenden Serie. Der Scanner besaß eine Messreichweite von ca. 10 Meter, abhängig von dem detektierten Objekt. Die Updaterate ist von der Winkelauflösung abhängig und umgekehrt. Die 2D-Updaterate war zwischen 1 und 2 Hertz anpassbar, wodurch die Winkelauflösung zwischen 8 und 12 Grad lag. Die Aktualisierungsrate der Prototypen war auf 1 bis 2 Hertz und 50-100 Messungen pro Umdrehung begrenzt. Die Distanzauflösung bewegte sich zwischen 10 und 50 Millimeter. Die Mehrfachecho Auswertung lag zwischen 32 – 64 (dimensionslos). Damit waren die Distanz sowie die relative Geschwindigkeit von Objekten innerhalb einer Messung messbar. Der Durchmesser des Prototyps lag bei ca. 130 Millimeter, die Höhe betrug 170 Millimeter. Das Gewicht beträgt weniger als 1 Kilogramm. (Rintelen und Boos 2016)

Im derzeitigen Setup (Stand: 25.10.2018) besitzt das Radar eine nutzbare Reichweite von ca. 12 Meter, limitiert durch die Datenübertragungsrate (Reger 2018a).

Das Tachymeter des Typs TCRA 1101 PLUS von Leica Geosystems zeichnete die stetige Positionsänderung des Roboters auf. Dabei kam die automatische Zielerfassung (ATR-Modus) des Tachymeters zum Einsatz. Der ATR-Modus ermöglicht die automatische

Zielprismen-Verfolgung während der Bewegung des Prismas. Nach ungefährem manuellem Anzielen des Prismas übernimmt dieser Modus die Feinzielung, die Winkel- und Distanzmessung und die Registrierung aller Messwerte. Dabei verspricht die Automatik eine hohe Messgeschwindigkeit bei konstanter Messgenauigkeit. (Zeiske 2000)

Für die graphische Darstellung der Radar-Daten wurde das Programm „Cartographer“ verwendet. Das Programm wurde von Google LLC 2016 als Open Source veröffentlicht und arbeitet mit dem Robot Operating System (ROS) zusammen (Menge-Sonnentag 2016).

Die graphische Darstellung der Laser-Daten wurde ebenfalls mit diesem Programm gelöst. „Cartographer“ ermöglicht das sogenannte SLAM-Verfahren (simultaneous localization and mapping) für 2D- und 3D-Anwendungen. Der Laser- bzw. Radar-Scanner lieferte die Daten, um eine digitale Karte zu erstellen mit der Möglichkeit das Fahrzeug in dieser zu verorten, sowohl Position als auch Ausrichtung. (Hess et al. 2016)

3.6.2.4 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wurde eine Checkliste abgearbeitet. Die Erkenntnisse des Probetages flossen darin ein und es wurde überprüft ob alle notwendigen Gegenstände vorhanden sind. Die objektarme Umgebung auf der Nordseite (Flussseite) des Stalles machte es nötig einen PKW (Personenkraftwagen) als Landmarke zu platzieren. Ein Tauschakkumulator stand zur Verfügung. Alle technischen Geräte wurden auf Funktion getestet und im Rahmen eines Probedurchlaufs geprüft.

Jede Versuchsfahrt eines jeden Durchgangs begann für das Roboterfahrzeug an der Startposition. Diese wurde zu Beginn mit Markierspray kenntlich gemacht. Das Tachymeter wurde auf das Prisma gerichtet und der Automatik-Modus ATR gestartet. Für die spätere Datenauswertung wurde für jede Fahrt eine Uhrzeit und Durchgangsnummer notiert. Durch Zeitstempel in den Messdatensätzen konnte so später eine exakte Zuordnung erfolgen. Die Fahrt des Roboters begann durch ein manuelles Anrollen, das unmittelbar innerhalb weniger Zentimeter in eine automatische Spurführung überging. Es wurde somit „frei gestartet“. Die Geschwindigkeit des Roboters lag dabei bei 0,6 Meter pro Sekunde. Während der gesamten Dauer einer Fahrt zeichneten sowohl Radar- als auch Laser-Scanner ohne Unterbrechungen Daten auf. Sobald das Prisma des Roboters das Sichtfeld des Tachymeters verlassen hatte, wurde die Aufzeichnung am Tachymeter gestoppt und manuell zur Startposition zurückgefahren. Pro Versuchsdurchgang wurde eine Fahrt auf Video aufgezeichnet.

- Durchgang 1 (Probedurchgang)

Drei Fahrten wurden während dieses Probedurchgangs durchgeführt. Das Tachymeter befand sich dabei an Position T1. Der Roboter fuhr die Strecke zwischen Position 1 und 4. Der Probedurchgang diente zur Überprüfung der Funktion aller Geräte sowie des Ablaufs mit allen beteiligten Elementen.

- Durchgang 2

Für den zweiten Versuchsdurchlauf wurde das Tachymeter auf Position T1 gelassen. Der Roboter fuhr von Position 1 bis Position 4. Die Regenstrecke wurde nicht durchfahren und war somit inaktiv. Es wurden zehn Fahrten durchgeführt. Am Ende dieses Durchgangs wurde die Anzahl der eingespeicherten Wegpunkte verdoppelt.

- Durchgang 3

Der dritte Versuchsdurchlauf entsprach vom Ablauf her dem ersten Versuchsdurchlauf, Durchgang 1. Lediglich die Anzahl der eingespeicherten Wegpunkte wurde verändert. Wiederrum wurden 10 Fahrten durchgeführt.

- Durchgang 4

Versuchsdurchlauf Nummer 4 verlagerte die Fahrroute auf die Südseite des Stalles. Von Position 3 aus fuhr der Roboter zu Position 1. Das Tachymeter befand sich an Position T2. Die Regenstrecke wurde vor jeder Fahrt aktiviert und nach jeder Fahrt wieder deaktiviert.

3.6.2.5 Datenerfassung

Der Probedurchgang diente lediglich der Überprüfung der Durchführbarkeit der Versuche und wurde nicht weiter ausgewertet. Durch die Protokollierung der Versuche, konnten die einzelnen Fahrten den ebenfalls chronometrisch erzeugten Datensätzen genau zugeordnet werden.

- Tachymeter

Das Tachymeter speicherte die Daten als Textdatei auf einer Speicherkarte. Nach jedem Durchgang, d. h. nach jeweils zehn erfolgreichen Fahrten, wurden die vom Tachymeter aufgezeichneten Daten auf einem USB-Stick gespeichert. Die übertragenen Daten wurden auf dem Computer in einer Excel-Datei gespeichert. Als Referenzsystem sollte das Tachymeter extern den Versuchs- und Routenablauf nachverfolgen und im Zusammenwirken mit dem Protokoll eventuelle Fehlerursachen aufdecken bzw. einschätzen zu können.

- Laser-Positionsdaten und Radar-Daten

Aus Gründen der Vergleichbarkeit (Änderung der Anzahl Wegpunkte nach Durchgang 1) wurden für die Auswertung der Laser-Messungen die Durchgänge 2 und 3 genutzt. Pro Fahrt wurden ca. 1000 Messungen getätigt. Als Datengrundlage für die Auswertung der Radar-Daten hingegen, wurden die Messungen aller Fahrten berücksichtigt. Neben der x- und y-Koordinate zu jedem Messpunkt wurde auch hier zusätzlich der Messzeitpunkt gespeichert. Dies erleichterte die Zuordnung der Daten. Laser- als auch Radar-Daten wurden bei jeder Fahrt mit ROS als „Bag“-Datei aufgezeichnet. Die Laser-Messdaten wurden anschließend als Textdatei gespeichert. Damit konnten die Messdaten für die Auswertung in Microsoft Excel und Matlab verwendet werden. Neben den Trajektorien der einzelnen Fahrten, wurden auch die Wegpunkte als Textdatei bereitgestellt.

3.6.2.6 Kalman-Filter und Monte-Carlo-Filter

Der Kalman-Filter wird zur Rekonstruktion von gestörten Messsignalen verwendet. Messfehler bei Sensormessungen können reduziert, jedoch nie vollständig vermieden werden. Auch in der Abstandsmessung beispielweise mit Laser-Scannern treten Sie auf und werden mithilfe von Filtern unterdrückt. Generell erfolgt mithilfe des Kalman Filters die optimale Schätzung für Systemzustandsgrößen. Indirekt werden damit auch Messsignale optimal geschätzt. Durch die Kalman-Rekonstruktion werden, die durch den Monte-Carlo-Filter bereits entrauschten Messsignale in ihrer Genauigkeit weiter verbessert. (KALMAN 1960)

Der Monte-Carlo-Filter produziert Rekonstruktionsmöglichkeiten für zu rekonstruierende Punkte in Echtzeit. Ausschlaggebend kann ein möglicherweise fehleranfälliges Motion- und Measurement-Update sein. Diese Rekonstruktionsmöglichkeiten werden auf Basis einer verteilungstheoretischen Betrachtung zu einem rekonstruierten Punkt verschmolzen. Die Rekonstruktion hängt dabei stets nur vom zuletzt rekonstruierten Punkt ab (Markov-Eigenschaft), was sich in der Folge nachteilig auswirken kann. Bei einem stark fehlerbehafteten vorausgegangenen Punkt verzerrt sich auch die nachfolgende Rekonstruktion der wahren Trajektorie. Zusammen mit einer ungenügenden Sampling-Rate tritt der Effekt sogar noch verstärkt auf. (DOUCET et al. 2001)

3.6.2.7 Datenauswertung

Der externe Dienstleister Innok Robotics GmbH bereitete die Laser-Rohdaten im ersten Schritt mit einem Monte-Carlo-Filter auf, mit dem Ziel das Messrauschen zu entfernen und somit die Genauigkeit der Daten zu erhöhen. Für eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit wurde ein Extended Kalman-Filter, auf Basis eines hochauflösenden physikalischen Systems mit dazugehörigem Messsystem, verwendet.

3.6.2.7.1 Physikalisches System

Um eine optimale Anwendung des Kalman-Filters für die Auswertung zu garantieren, wurde ein hochkomplexes physikalisches Messsystem entwickelt. Dieses lässt sich wie folgt beschreiben.

$$\gamma(t+h) = \gamma(t) + \dot{\gamma}(t) * h + O(h^2) \quad (2)$$

Gleichung (2) beinhaltet den mathematischen Zusammenhang zwischen dem Ortsvektor $\gamma(t)$ zur Zeit t und dem Ortsvektor $\gamma(t+h)$ zur Zeit $t+h$ und besitzt eine Approximationsgüte von $O(h^2)$.

$$\gamma_x(t+h) = \gamma_x(t) + \cos(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)| * h + O(h^2) \quad (3)$$

Gleichung (3) repräsentiert die x-Komponentendarstellung von Gleichung (1).

$$\gamma_y(t+h) = \gamma_y(t) + \sin(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)| * h + O(h^2) \quad (4)$$

Gleichung (4) repräsentiert die y-Komponentendarstellung von Gleichung (1).

$$\varphi(t+h) = \varphi(t) + \frac{|\dot{\gamma}(t)|}{\sqrt{\gamma_x^2(t) + \gamma_y^2(t)}} * h + O(h^2) \quad (5)$$

Gleichung (5) beinhaltet den mathematischen Zusammenhang zwischen dem Headingwinkel $\varphi(t)$ zur Zeit t und dem Headingwinkel $\varphi(t+h)$ zur Zeit $t+h$ und besitzt eine Approximationsgüte von $O(h^2)$.

$$|\dot{\gamma}(t+h)| = |\dot{\gamma}(t)| + |\ddot{\gamma}(t)| * h + O(h^2) \quad (6)$$

$$= |\dot{\gamma}(t)| + \left| \text{const.} * \frac{\dot{\gamma}(t)}{|\dot{\gamma}(t)|} + \frac{|\ddot{\gamma}(t)|^2}{\varphi(t)} * \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} \\ \sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} \end{pmatrix} * \frac{\dot{\gamma}(t)}{|\dot{\gamma}(t)|} \right| * h + O(h), \quad (7)$$

$$= |\dot{\gamma}(t)| + \left| \text{const.} * \begin{pmatrix} \cos(t) \\ \sin(t) \end{pmatrix} + \frac{|\ddot{\gamma}(t)|^2}{\varphi(t)} * \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} \\ \sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(t) \\ \sin(t) \end{pmatrix} \right| * h + O(h)$$

$$\text{mit } \text{const.} = 0,6 \frac{m}{s} \quad (8)$$

wobei die Größe φ gegeben ist durch

$$\varphi(t) = \left| \frac{(\cos(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)|^2 + \sin(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)|^2)^{\frac{3}{2}}}{\cos(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)| * a_y^2 - \sin(\varphi(t)) * |\dot{\gamma}(t)| * a_x^2} \right| \quad (9)$$

und die Größen a_x und a_y in der Gleichung (9) gegeben sind durch die $O(h^2)$ -Approximationen

$$a_x(t) = \frac{\cos(\varphi(t) + 10^{-5}) * (\text{const.} + 10^{-5}) - \cos(\varphi(t) - 10^{-5}) * (\text{const.} - 10^{-5})}{2 * 10^{-5}} + O(10^{-10}) \quad (10)$$

und

$$a_y(t) = \frac{\sin(\varphi(t) + 10^{-5}) * (\text{const.} + 10^{-5}) - \sin(\varphi(t) - 10^{-5}) * (\text{const.} - 10^{-5})}{2 * 10^{-5}} + O(10^{-10}). \quad (11)$$

Gleichung (6) beinhaltet den mathematischen Zusammenhang der Absolutgeschwindigkeit $|\dot{\gamma}(t)|$ zur Zeit t und der Absolutgeschwindigkeit $|\dot{\gamma}(t+h)|$ zur Zeit $t+h$. Durch Zerlegung des Beschleunigungsvektors $\ddot{\gamma}(t)$ in seine Tangential- und Normalkomponente gelangt man zunächst zu Gleichung (7) und schließlich mittels trigonometrischer Vereinfachungen zu Gleichung (8). Dabei geht in Gleichung (8) der Krümmungsradius $\varphi(t)$ zur Zeit t ein. Die durch die Gleichungen (10) und (11) gegebenen Größen sind für die Berechnung des Krümmungsradius $\varphi(t)$ erforderlich und beschreiben die x- und y-Komponente des Beschleunigungsvektors $\ddot{\gamma}(t)$ zur Zeit t .

3.6.2.7.2 Messsystem

$$z_k = H_k X_{k,k} + v_k \text{ mit } v_k \sim N(0, R_k) \quad (12)$$

Gleichung (12) beschreibt den Zusammenhang zwischen den Messdaten z_k und den tatsächlichen entauschten Positionsdaten $X_{k,k}$. Dabei wird das Rauschen der Messdaten mittels eines normalverteilten Fehlers v_k modelliert, wobei R_k die Kovarianzmatrix repräsentiert.

3.6.2.7.3 Extended Kalman Filter

Das physikalische System (2) – (11) und das Messsystem sind durch die mathematischen Gleichungen (2) – (12) verknüpft. Sie bilden den Extended Kalman Filter. Das Ergebnis des Kalman Filters sind optimale Schätzwerte für die Systemzustandsgröße z_k .

Predicted state estimate:

$$x_{k,k-1} = f(x_{k,k-1}) + w_k \text{ mit } w_k \sim N(0, Q_{k-1}) \quad (13)$$

Predicted covariance estimate:

$$P_{k,k-1} = F_{k-1} * P_{k-1, k-1} * F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (14)$$

Innovation:

$$y_k = z_k - H_k x_{k,k-1} \quad (15)$$

Innovation Covariance:

$$S_k = H_k * P_{k, k-1} * H_k^T + R_k \quad (16)$$

Near optimal kalman gain:

$$K_k = P_{k,k-1} * H_k^{-1} * S_k^{-1} \quad (17)$$

Updated state estimate:

$$x_{k,k} = x_{k,k-1} + K_k * y_k \quad (18)$$

Updated covariance estimate:

$$P_{k,k} = (I - K_m H_k) * P_{k,k-1} \quad (19)$$

Die Prädiktion (13), die in der Praxis einem normalverteilten Rauschen w_k mit Kovarianzmatrix Q_{k-1} unterliegt, dient zur Vorhersage der wahren Trajektorie $x_{k,k-1}$ und wird anschließend durch den Kalman-Gain-Updateschritt (18) noch verbessert. Zur Prädiktion der Kovarianzmatrix (14) der entrauschten Messdaten wird die Jakobimatrix F_{k-1} , die aktuelle Kovarianzmatrix $P_{k-1,k-1}$ der entrauschten Messdaten und die Kovarianzmatrix Q_{k-1} des physikalischen Systems benötigt. Dabei wird die Jakobimatrix F_{k-1} durch zentrale, finite Differenzen hinreichend genau bis auf eine $O(h^2)$ -Genauigkeit approximiert. Die Matrix H_k in (15) beschreibt die Jakobi-Observiermatrix des Messsystems und stellt die Messdaten in

Beziehung mit dem Produkt aus Observiermatrix und vorhergesagten Ortsvektoren $x_{k,k-1}$. Gleichung (17) repräsentiert den optimalen Kalman-Gain und wird für die Innovationsgleichung (18) zur Berechnung des tatsächlichen Ortsvektors $x_{k,k}$ benötigt. Gleichung (19) beschreibt das Update der Kovarianzmatrix der entauschten Messdaten. Dabei wird für Gleichung (17) die sogenannte Innovationskovarianzmatrix (16) benötigt.

3.6.2.8 Fehlerarten

Fehler in den erzeugten Messdaten sind unterschiedlicher Art. Um die Qualität einer Messung beurteilen zu können, ist die Kategorisierung dieser Fehler notwendig. Es werden systematische, zufällige und chaotische Fehler unterschieden.

- Systematischer Fehler

Bei systematischen Fehlern handelt es sich um vermeidbare Systemfehler, die a priori beseitigt werden können (DIN 1319-1).

- Zufälliger Fehler

Bei zufälligen Fehlern handelt es sich um zufallsbedingte Systemfehler, deren Ursache zum größten Teil unbekannt ist (DIN 1319-1).

- Chaotischer Fehler

Bei chaotischen Fehlern handelt es sich um mathematisch nicht erklärbare Systemfehler, deren Ursache unbekannt ist (DIN 1319-1).

3.6.2.9 Qualitätsmerkmale

Bestimmte Merkmale geben Auskunft über die Qualität von Messergebnissen. In der Sensordatenauswertung wurden die Kriterien Accuracy, Precision, Messauflösung, Konsistenz, und Kondition herangezogen.

- Accuracy

Die Genauigkeit eines Messsystems ist der Grad der Abweichung von Messdaten zu einem wahren Wert. Die Accuracy wurde durch Bestimmung der nächsten Nachbarn der Fahrt-Trajektorien zu der Soll-Trajektorie per 1-Nearest Neighbour Methode (1NN-Methode) und euklidischer Distanzbildung ermittelt. (Wörz et al. 2017)

- Precision

Die Reproduzierbarkeit eines Messsystems beschreibt, inwiefern Stichproben unter gleichen Bedingungen bei mehreren Wiederholungen streuen. Die Precision wurde durch Ermittlung der nächsten Nachbarn der Fahrt-Trajektorien untereinander per 1NN-Methode und euklidischer Distanzbildung bestimmt. (Wörz et al. 2017)

In dieser Arbeit wird für Precision und Accuracy eine Toleranzgrenze von 0,05 Meter festgelegt. Diese Toleranzgrenze kann vom Anwender gewählt werden und damit für andere Szenarien einen anderen Wert annehmen.

- Konsistenz

Sind die Messergebnisse eines ausgewerteten Versuches akkurat und präzise, so sind sie konsistent (DIN 1319-1).

- Messauflösung

Die Messauflösung des Messsystems beschreibt die gerade noch messbare physikalische Größe (DIN 1319-1).

Die Accuracy und Precision bzw. Konsistenz und Messauflösung bestimmen die Güte der Navigation.

- Kondition

Falls geringfügige Änderungen in den Eingangsdaten der Messdaten nach der Ausführung des Algorithmus geringfügige Änderungen in den Ausgangsdaten zur Folge haben, sind die Messdaten gut konditioniert. Andernfalls sind sie schlecht konditioniert. Die Kondition des Algorithmus beeinflusst die Navigation. Die Kondition dominiert die Robustheit eines Algorithmus. Schlechte Kondition des Algorithmus kann eine Fehlnavigation implizieren (DIN 1319-1).

3.6.2.10 Statistische Auswertung: Welch-Test

Die Abweichungen der einzelnen Trajektorien wurden statistisch durch multiples Testen unter Beachtung der False-Discovery-Rate ausgewertet. Auch Abhängigkeiten in den Messdaten wurden betrachtet.

Von jedem Durchgang wurden die drei präzisesten und die drei unpräzisesten Ergebnisse der 1NN-Methode statistisch ausgewertet. Die Kombinationen der sechs Ergebnisse der 1NN-Methode wurden mittels multipler Testprozeduren auf Signifikanz überprüft. Die Vorgehensweise zum multiplen Testen wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Zunächst wurden je zwei Ergebnisse der 1NN-Methode zum Signifikanzniveau $q = 0.05$ mittels einer relevanten Differenz ω_0 über einen Welch-Test verglichen. Die Umsetzung auf dem Computer erfolgte mit der freizugänglichen Statistiksoftware R und den Befehlen, wobei ω_0 in der Computerprozedur μ entspricht:

```
t.test(x, y, alternative = c("less"), mu = 0, paired = FALSE, var.equal = FALSE, conf.level = 0.95)
```

```
t.test(x, y, alternative = c("greater"), mu = 0, paired = FALSE, var.equal = FALSE, conf.level = 0.95)
```

Als Nächstes wurde $i = 1$ gesetzt. Daraufhin wurde geprüft, ob die Testbedingung $0.05 \leq i / m * q$ erfüllt ist. Dabei kann von einem bi-modularen Entscheidungsszenario gesprochen werden, was bedeutet, dass entweder alle Alternativhypothesen angenommen werden oder keine der Nullhypothesen abgelehnt wird.

Falls ein solches i existiert, werden alle Alternativhypothesen $1, \dots, i$ angenommen.

Falls kein solches i existiert, wird keine Nullhypothese abgelehnt. Dann gilt nach dem Theorem 1.3 von Gavrilov et al. (2009), dass die obige Vorgehensweise die False Discovery Rate (FDR) zum Niveau kleiner oder gleich $0.05 \cdot \frac{m_0}{m}$ kontrolliert. Dabei beschreibt m die Anzahl der Hypothesentests $T_1 \dots T_m$ und m_0 die Anzahl der Nullhypothesen zum Signifikanzniveau $q = 0.05$, die nicht abgelehnt werden. Dabei wird als FDR diejenige Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass eine richtige Nullhypothese (unter allen Nullhypothesen) abgelehnt wird.

Mit der obigen Vorgehensweise wird der Alphafehler-Kumulierung entgegengewirkt. Der Hintergrund dafür ist, dass beim Testen multipler Hypothesen die Wahrscheinlichkeit einer Alphafehler-Kumulierung zunimmt, d. h. eine wahre Nullhypothese wird beim multiplen Testen hin und wieder zurückgewiesen.

Tab. 2 stellt die statistischen Details zum Welch-Test inklusive Stichprobenumfänge n und m dar. Aus Signifikanzniveaugründen wurde ausschließlich der rechts- und linksseitige Welch-Test verwendet. Dabei wurde der Wert ω_0 derart bestimmt, dass der Test zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ gerade noch signifikant war, um die Daten entsprechend quantifizieren und sich Konfidenzintervalle sparen zu können.

Tab. 2: Statistische Merkmale des Welch-Tests (Darstellung nach (Friedrich 2017) auf Basis von (Bonett und Price 2002).

Welch-Test			
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • X_1, \dots, X_n und Y_1, \dots, Y_m unabhängig voneinander • $X_i \sim N(\mu_X; \sigma_X)$ oder $X_i \sim (\mu_X; \sigma_X)$ mit $n > 30$ • $Y_j \sim N(\mu_Y; \sigma_Y)$ oder $Y_j \sim (\mu_Y; \sigma_Y)$ mit $m > 30$ • $\sigma_X \neq \sigma_Y$ unbekannt 		
Hypothesen	$H_0 : \mu_X - \mu_Y \leq \omega_0$ $H_1 : \mu_X - \mu_Y > \omega_0$ (rechtsseitig)	$H_0 : \mu_X - \mu_Y = \omega_0$ $H_1 : \mu_X - \mu_Y \neq \omega_0$ (zweiseitig)	$H_0 : \mu_X - \mu_Y \geq \omega_0$ $H_1 : \mu_X - \mu_Y < \omega_0$ (linksseitig)
Teststatistik	$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - \omega_0}{S} \approx t_\nu$		
Prüfwert	$t = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \omega_0}{s}$ <p>mit $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$,</p> $s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$ $s_y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2.$ $s = \sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}} \text{ und}$ $\nu = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_x^2}{n}\right)^2}{n-1} + \frac{\left(\frac{s_y^2}{m}\right)^2}{m-1}}$		
Ablehnungsbereich H_0	$\{t t > t_{1-\alpha; \nu}\}$	$\{t t < -t_{1-\alpha/2; \nu}\}$ oder $\{t t > t_{1-\alpha/2; \nu}\}$	$\{t t < -t_{1-\alpha; \nu}\}$

3.6.3 Versuchsreihe C

In dem dynamischen Fahrversuch wurde ein FMW der Reihe Truckline Compact 8 des Projektpartners Siloking mit Laser- und Radar-Sensorik ausgestattet. In landwirtschaftlichem Umfeld musste dann eine programmierte Route vom Fahrzeug automatisch zurückgelegt werden. Während der automatisierten Fahrt sammelte die Radar-Sensorik Daten zur Erstellung einer digitalen Karte.

3.6.3.1 Versuchsort

Wie auch schon in der Versuchsreihe B wurde das Versuchsgut „Veitshof“ der TUM in Freising als Ort für möglichst praxisnahe Einsatzbedingungen gewählt. Des Weiteren lassen sich durch dasselbe Testumfeld auch Vergleiche zwischen den beiden Entwicklungsstufen der Radar-

Sensorik ziehen, die 1. Generation 2016 und die 2. Generation 2018. Die Versuche fanden am 04. und 06.12.2018 statt.

3.6.3.2 Versuchsaufbau

Die Fahrroute der Truckline verlief im und außerhalb des Stallgebäudes. Sie folgte im Wesentlichen der Fahrroute des Roboters in Versuchsreihe B (3.6.2.2). Spurgetreu sind die Routen jedoch nicht, da allein aufgrund der Hecklenkung und der größeren Fahrzeugabmessungen ein anderer Fahrweg erforderlich war.

Die Umgebung bot sehr wechselhafte Bedingungen: Bodenbeläge von gekiest bis zu geschliffenem Beton, Lichtverhältnisse In- und Outdoor, wechselnde Abstände zu reflektierenden Objekten, wechselnde Materialien/Oberflächenbeschaffenheit der reflektierenden Objekte, statische (bauliche) und dynamische (Kühe) Objekte. Zur Orientierung im Außenbereich wurden zusätzlich Radar-Reflektoren als Wegmarken aufgestellt. Die Objekte wurden an Stellen positioniert, die ansonsten wenig reflektierende Oberfläche boten, wie z.B. am Flusslauf im Norden oder der Viehweide im Osten (Abb. 34).

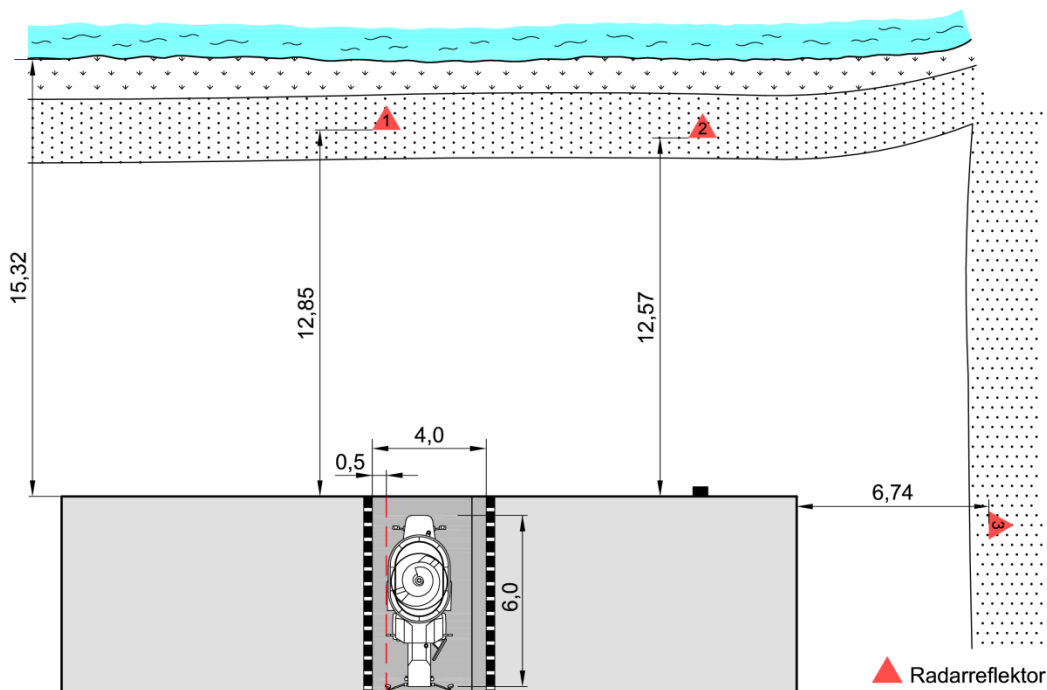


Abb. 34: Die Lage der zusätzlich positionierten Radar-Reflektoren (in Meter) an der Nord- und Ostseite des Stalles. (Eigene Darstellung)

Das Roboterfahrzeug wurde mit einem Laser-Scanner LMS100 von Sick und einem Radar-Scanner im Evaluation-Stadium der Firma Innok Robotics GmbH ausgerüstet. Diese Module wurden übereinander an der Fahrzeugfront montiert. Um mit dem Laser-Scanner eine digitale Karte für die Navigation zu erstellen, wurde das Roboterfahrzeug manuell entlang der

gewünschten Route gefahren. Durch das fahren in Schlangenlinien erhielt der Laser-Scanner eine größere Menge an Messdaten, was das Ergebnis des Kartierungsalgorithmus verbesserte. In dieser digitalen Karte wurden anschließend Wegpunkte programmiert. Die einzelnen Wegpunkte fügten sich zu einer Soll-Trajektorie zusammen.

Um eine umfangreiche Dokumentation der Versuche sicherzustellen, wurde die gesamte Fahrstrecke des Fahrzeugs mit insgesamt 6 VGA-Kameras aufgezeichnet. Zusätzlich wurde in der Fahrzeugkabine eine GoPro Hero 4 angebracht, die das Lenkrad und einen Blick auf die Fahrstrecke gewährt. Die automatisierten Lenkbewegungen konnten so gut erkennbar dokumentiert werden.

3.6.3.3 Technik und Software

Der FMW war vom Typ Truckline eTruck 1408-8 der Firma Siloking. Bei dem Fahrzeug handelte es sich um eines der beiden ersten Prototypen des FMW vom Typ Truckline. Die Akkukapazität beträgt 465 Amperestunden, was im Praxiseinsatz für die Erstellung von min. drei Mischungen ausreichend ist. Im reinen Fahrbetrieb bis zur maximalen Geschwindigkeit von 20 Kilometer pro Stunde können mehrere Stunden erreicht werden. Der Fahrtrieb ist in die Vorderachse integriert und wird durch einen 18 kW-E-Motor angetrieben. Der Mischantrieb wird durch einen 15 kW-E-Motor angetrieben. Die Fahrzeugabmessungen Länge mal Breite mal Höhe lagen bei 5980 x 2230 x 2250 mm.

Für die Automatisierung der Truckline waren folgende Systembausteine erforderlich: Messsensorik, Lenkaktorik und eine Steuerungseinheit. Die Daten für die Erstellung der Karte sowie der Lokalisierung in dieser, lieferte ein Laser-Scanner vom Typ LMS 100 der Firma SICK AG (3.6.2.3). Außerdem war für die Navigation ein Lenkwinkelsensor nötig, der auf der Lenkachse im Fahrzeugheck montiert wurde. Als Lenkaktor diente ein E-Motor mit Reibrad der Marke EZ-STEER® von Trimble Ltd., was ursprünglich aus einem GNSS-Lenksystem stammt. Als Bindeglied zwischen Reibrad, Lenkwinkelsensor und Computer diente ein Motorcontroller. Dieser gab den Wert für den Lenkradeinschlag vor, indem er den Ist-Wert des Lenkwinkelsensors an den vorgegebenen Soll-Wert angepasst hat. Die Energieversorgung des 12 V DC-Reibrades sowie der Messsensorik wurde durch einen Akku gelöst, da die Bordspannung der Truckline nicht genutzt werden konnte.

Der eingesetzte Radar-Scanner war ein Prototyp im Evaluation-Stadium. Die experimentelle Sensorik wurde von der Innok Robotics GmbH entwickelt. Die Leistungsdaten des 360 Grad-Kurzstreckenradars konnten seit der Versuchsreihe B aus 2016 weiter verbessert werden. Die Messreichweite wurde von ca. 10 Meter auf 16 Meter erhöht, abhängig von dem detektierten Objekt. Die Updaterate ist von der Winkelauflösung abhängig und umgekehrt. Die 2D-Updaterate war zwischen 1 Hertz und 2 Hertz anpassbar, wodurch die Winkelauflösung

zwischen 8 und 12 Grad lag. Die Aktualisierungsrate der Prototypen war auf 1 Hertz bis 2 Hertz und 50 bis 100 Messungen pro Umdrehung begrenzt. Die Distanzauflösung bewegte sich zwischen 10 und 50 Millimeter. Die Mehrfachecho Auswertung lag zwischen 32 und 64. Damit waren die Distanz sowie die relative Geschwindigkeit von Objekten innerhalb einer Messung messbar. Der Durchmesser des Prototyps lag bei ca. 130 Millimeter, die Höhe betrug 170 Millimeter. Das Gewicht beträgt weniger als 1 Kilogramm. (Rintelen und Boos 2016)

Ein Laptop diente in diesem Setup als Steuerungseinheit. Via eines CAN-Motorcontrollers kommunizierte dieser mit der Fahrzeugelektronik des FMW. Die Kommunikation mit dem Laser-Scanner erfolgte via Ethernet, die Kommunikation mit dem Radar über USB (Universal Serial Bus) und die Software wurde mithilfe eines eigens programmierten Backends gesteuert.

Mithilfe der Software „Cartographer“ wurde der Kartieralgorithmus erstellt, ein sogenannter Slam-GMapping-Algorithmus. Mit allen Daten der Messfahrten und einer aufwändigen Nachbearbeitung wurde daraus die digitale Karte erstellt. Zur Lokalisierung kam ein AMCL-Algorithmus (Adaptive Monte Carlo Localization Algorithm) zum Einsatz. Die „Cartographer“-Software ermöglicht, über verschiedene Plattformen und Sensorkonfigurationen hinweg, „simultaneous localization and mapping“ (SLAM) in 2D und 3D in Echtzeit. Es handelt sich dabei um ein Open-Source Programm der Google LLC, das auch ROS unterstützt. Der Algorithmus musste für den FMW adaptiert werden, da sich herausstellte, dass der FMW zu groß und zu träge für den ursprünglichen Algorithmus war. Eine angepasste Lenkkinematik war erforderlich.

3.6.3.4 Versuchsdurchführung

Eine vorbereitende Maßnahme zu den Versuchsdurchgängen war die manuelle Abfahrt der Fahrstrecke. Während dieser Fahrten zeichneten die Laser- und die Radar-Einheit simultan Daten auf, die zur Kartierung ihrer Umgebung dienten. Aus Reflexionszeit und dem Richtwinkel der Sensorik ließ sich die statische Umgebung wahrnehmen und aufzeichnen. Durch die manuelle Fahrt wurde auch sichergestellt, dass das Fahrzeug eine kollisionsfreie Route zurücklegen kann – sowohl hinsichtlich Breiten- wie auch Höhenabstände.

Es wurden insgesamt elf Fahrten im Zeitraum von 14:00 bis 16:30 Uhr durchgeführt.

Zur Absicherung der Versuche saß während der autonomen Fahrten jederzeit ein Mitarbeiter auf dem Versuchsfahrzeug. Der Mitarbeiter überwachte dabei die Elektronik und hätte im Falle einer Fehlfunktion eingreifen können. Diese Sicherheitsmaßnahme wurde zusätzlich zur optischen Absperrung des Versuchsbereichs getroffen.

Die Datenaufzeichnung erfolgte kontinuierlich und die Anzahl der Durchgänge wurde in einem Protokoll aufgezeichnet. Darin wurden des Weiteren auch besondere Vorkommnisse, Anpassungen etc. protokolliert.

3.6.3.5 Datenerfassung

Die Versuchsreihe C wurde mittels eines Protokolls handschriftlich dokumentiert. Das Protokoll diente zum einen als eine Checkliste für den korrekten Ablauf und als ein Logbuch für Vorkommnisse jeglicher Art. So konnte in der Folge die Datenqualität anhand der dokumentierten Gegebenheiten abgeglichen werden und eventuelle Zusammenhänge nachvollzogen werden.

Zur Stützung der beobachteten Ereignisse im Protokoll wurden sechs IP-Kameras installiert. Sie wurden so platziert, dass das Testfahrzeug stets von mindestens einer Kamera aufgezeichnet wurde während einer Versuchsfahrt. Kameras 3.1 und 3.2 überblickten den gesamten Futtertisch von den gegenüberliegenden Nord- bzw. Südseite des Stalles, die Kameras 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 waren jeweils im Außenbereich am Stall angebracht (Abb. 35). Zur Überprüfung der Datensätze und dem Abgleich mit dem Versuchsprotokoll kommt somit auch die wiederholte Überprüfung durch das Videomaterial hinzu. Dies ermöglicht es, gesicherte und nachvollziehbare Herleitungen zu treffen.



Abb. 35: Die IP-Kameras wurden im und außen am Stall angebracht und zeichneten die gesamte Fahrstrecke des Testfahrzeugs auf. Die gut sichtbare Nummerierung der Kameras half bei der Zuordnung und schnelleren Erfassung im Protokoll. (Eigene Aufnahme)

Um die Vorgänge und das automatisierte Fahren festzuhalten, wurde in der Fahrzeugkabine des FMW eine Aktion-Kamera der Marke GoPro installiert. Sie zeichnete den Fahrtweg sowie die Lenkbewegungen des Fahrzeugs auf (Abb. 36).

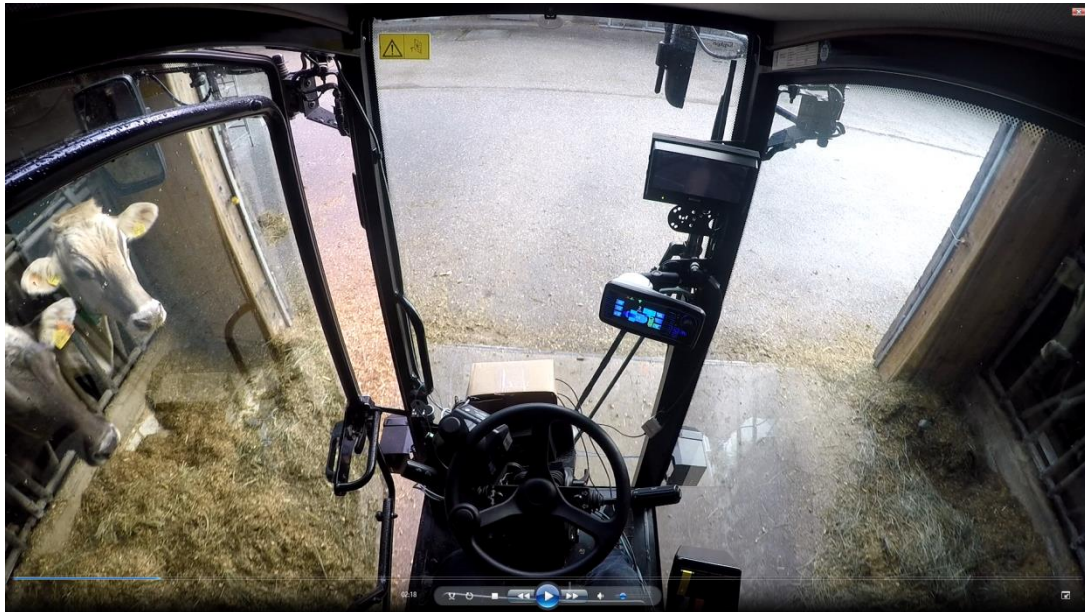


Abb. 36: Der Aufzeichnungsbereich der GoPro-Kamera zeichnete die Lenkbewegungen sowie die Fahrroute aus der Ich-Perspektive. (Reger et al. 2022b)

4. Ergebnisse

4.1 Funktionskonzept

4.1.1 Futter anschieben

Das „Anschieben“ erfolgt mehrmals täglich. Es ist erforderlich, da Kühe bei der Futteraufnahme das Futter selektieren, durchwühlen und aufwerfen. Aufgrund der starren Aufstallung (Fressgitter) ist ein gewisser Teil des Futters dann nicht mehr für die Kühe erreichbar. Der FMW nutzt Streichbleche, die mechanisch das Futter vor den Vorderreifen am Fahrzeug nach außen hin zum Futtertisch wegbewegen. Daher ist es erforderlich die automatische Fahrt des Fütterungsroboters von der Parkposition zum Futtertisch, das richtige Positionieren dort und das Fahren entlang der Aufstallung (Fressgitter) in gleichbleibendem Abstand durchzuführen. Anschließend kehrt die Maschine automatisch zurück zur Ladestation und dockt an die Stromquelle an. Der Nachschiebe-Zyklus hängt dabei im Wesentlichen von der gefütterten Menge ab. In konventionellen Milchviehbetrieben wird beispielsweise morgens und abends eine jeweils große Menge Futter vorgesetzt, um ausreichend Futter für den gesamten Tag bzw. Nacht vorzuhalten. Die Kühe haben eine große Menge Futter vor sich, das sie bis zum Bodensatz durchsuchen. Folglich werden andere Futterteile vom Fressgitter weg auf dem Futtertisch verteilt. Da mit einem AFS eine mehrmalige Futtervorlage angestrebt wird, sind die Portionen bei gleicher Futtergesamtmenge kleiner. Dadurch wird weniger Futter von den Kühen verteilt und der Anschiebe-Aufwand ist aufgrund einer geringeren Restfuttermenge weniger. Neben der physiologischen Erklärung spielen auch die Verhaltensmuster der Tiere eine Rolle. Das „Anschieben“ suggeriert den Tieren, dass „neues“ Futter verfügbar wird, das noch von keiner anderen Kuh angerührt wurde. Dieser Effekt kann verstärkt werden durch den Zusatz von etwas Krafffutter als Lockmittel. Da mit jedem „Ausdosieren“ auch zugleich ein „Anschieben“ erfolgt ist, ist im Abgleich mit der Literatur und eigenen Erfahrungen ein geeigneter Anschiebe-Zyklus herauszufinden. Da das AFS mithilfe einer Bedieneinheit programmierbar sein soll, sind Anpassungen der Anschiebe- und Ausdosier Routinen ohnehin vorgesehen.

4.1.2 Futter ausdosieren

Das „Ausdosieren“ ist Kernelement des AFS. Es ermöglicht dem Landwirt die vielseitigen, positiven Effekte einer mehrmaligen Futtervorlage zu nutzen, ohne zusätzliche Arbeitskraft und –zeit aufbringen zu müssen. Beim morgendlichen als auch abendlichen Fütterungsvorgang wird der FMW vom Landwirt zunächst manuell bedient. Der Landwirt befüllt das AFS durch eine weitere Maschine, z. B. einem Lader, und mischt die erste Ration. Dann verteilt er diese manuell an den Futtertisch der jeweiligen Fütterungsgruppen, z. B. Jungvieh,

Trockensteher, Laktierende). Ein weiteres Mal befüllt der Landwirt den FMW und stellt ihn in der Park- und Ladestation ab. Die tägliche Routine des Fütterungsroboters ist bereits im Rechensystem hinterlegt und wird vom Landwirt nur noch aktiviert. Von nun an erledigt das AFS automatisch die Anfahrt zum Futtertisch, das richtige Positionieren dort und das Fahren entlang der Aufstallung (Fressgitter) in gleichbleibendem Abstand aus. Ist die gewünschte Futtermenge gleichmäßig auf die Länge des Futtertisches verteilt worden, kehrt die Maschine automatisch zur Ladestation zurück und dockt an die Stromquelle an. Dort lädt die Maschine bis der Ausdosier-/Anschlebe-Zyklus erneut beginnt.

4.1.3 Beschickung einer Biogasanlage

Das Konzept einer selbstfahrenden Maschine ermöglicht eine vielseitige Nutzung. Bei Biogasanlagen kann die Maschine als Zuführeinheit verwendet werden. Voraussetzung ist ein Punkt an dem das AFS ausdosiert, z. B. auf eine Förderschnecke oder ein Förderband. Die Beschickung kann automatisch nach der Fütterung der Kühe/Nachzucht erfolgen, um z. B. die Futterreste einzubringen. In der Fütterungsfreien Zeit kann das AFS als stationäre Misch- und Dosiereinheit genutzt werden. Der tägliche Ablauf des AFS lässt sich am PC programmieren und bei Bedarf anpassen.

4.1.4 Smart Grid Stromspeicher

Smart Grid ist ein Begriff für ein intelligentes Stromnetz. Unter anderem die Erzeugung, die Speicherung und der Verbrauch von (erneuerbarer) Energie soll damit effizient koordiniert und geplant werden (Höwer et al. 2019; VDI Richtlinie 4602). Der Stromverbrauch wie auch die Stromproduktion durch erneuerbare Energien unterliegen teils starken Schwankungen (Spiecker und Weber 2014). Am Beispiel eines landwirtschaftlichen Betriebs seien die tagsüber hohe Stromerzeugung aus den Photovoltaikmodulen und der erhöhte Stromverbrauch während der Stallarbeitszeiten genannt. Während der Arbeitspausen des AFS befindet sich dieses ohnehin in der Parkposition, bzw. am Dosierpunkt der Biogasanlage. An beiden Punkten ist das AFS am Stromnetz angeschlossen. Das bi-direktionale Laden ermöglicht es, den großen Stromspeicher des Futtermischwagens von einer externen Steuerung aus als Pufferkapazität zu nutzen (VDI Richtlinie 4602). Zu beachten ist, dass sich Lithium-Ionen-Akkus aufgrund ihrer Ladeigenschaften besser eignen als herkömmliche Säure-Blei-Akkus.

4.1.5 Umfrage zu automatischen Fütterungssystemen

Zunächst wird die Aussagekraft der Umfrage bewertet. Die Überlegungen zur Populationsgröße sind, dass die Gesamtzahl der Personen, deren Meinung bzw. Einschätzung mit dieser Umfrage wiedergegeben werden sollen, der Anzahl an Rinderhaltern in Deutschland entspricht, welche im Mai 2019 bei 136.100 lag (Pascher et al. 2019). Zu

berücksichtigen ist, dass die Teilnehmer der Umfrage sowohl Betriebsleiter als auch Betriebsnachfolger sein konnten, was die Populationsgröße tendenziell vergrößert. Dem stehen Rinderhalter entgegen, die durch die Haltungform (z. B. Anbindehaltung) oder die Betriebsgröße bzw. Zahl der gehaltenen Rinder nicht mehr zur Zielgruppe für automatische Fütterungssysteme gezählt werden. Die Populationsgröße wird folglich auf 136.100 festgelegt. Das Konfidenzniveau wird auf 95 % festgelegt. Die Stichprobengröße umfasst n=49 verwertbare Fragebögen. Aus den gegebenen Größen berechnet sich eine Fehlerspanne von 14 %. Für die Berechnung der Fehlerspanne wurde die Berechnungsmethode von Survey Monkey genutzt (SurveyMonkey 2020).

Die Auswertung der Fragebögen zeigte, dass vornehmlich Hofbesitzer oder junge Betriebsleiter daran teilnahmen. 86 % der Befragten waren jünger als 35 Jahre und Hofbesitzer (39 %), Betriebsleiter (25 %) oder Mitunternehmer (9 %). Mit 75 % hatte der Großteil der Teilnehmer einen Milchviehbetrieb. 77 % der Betriebe wirtschafteten konventionell, 23 % waren ökologische Landwirte. Die durchschnittliche Betriebsgröße betrug 130 Milchkühe, die meist in zwei Leistungsgruppen unterteilt sind. Für süddeutsche Verhältnisse sind diese Betriebe tendenziell den größeren Betrieben zuzuordnen. Im Schnitt sind 2,5 Arbeitskräfte auf dem Betrieb tätig, die meisten davon sind Familienmitglieder. Die typische Haltungform ist im Laufstall. Darüber hinaus haben 50 % der Kühe saisonalen Weidezugang. Diese Charakterisierung der Betriebe spiegelt die Zielgruppe nachhaltiger Familienbetriebe in Süddeutschland sehr genau wieder. (REGLER 2018)

Die Frage nach der gegenwärtigen Fütterungsroutine auf den Betrieben der Teilnehmer zeigte, dass mit 43 % die Mehrheit zweimal täglich füttert, 29 % jedoch nur einmal täglich. Anschließend wurden die Teilnehmer gefragt, welche Anzahl der Fütterungen als sinnvoll erachtet werden. 34 % der Teilnehmer sind der Meinung, dass viermal am Tag gefüttert werden sollte, 31 % erachten eine dreimalige Fütterung als ideal. Es zeigte sich eine Diskrepanz zwischen dem momentanen Zustand auf den Betrieben und einem gewünschten Zustand. In der Regel ist die bisherige Hürde zur Umsetzung der mehrmaligen Fütterung die Arbeitskraftzeit, die zum einen nicht verfügbar ist und zum anderen mit anderen Tätigkeiten konkurriert. Dieses Problem der Fütterung und der damit verbundenen Arbeitsbelastung zeigte sich auch in der Frage nach den täglichen Arbeitszeiten für die Fütterung. Hier variieren die Angaben extrem, d. h. um den Faktor 6 und höher. Viele der Angaben erscheinen selbst nach nur überschlägiger Berechnung unmöglich und unrealistisch zu sein, tendenziell werden die Arbeitsaufwände eher als geringer geschätzt. Während 11 % angeben 15 bis 30 Minuten Arbeitszeit mit der Fütterung zu verbringen, geben 17 % eine Dauer von mehr als 90 Minuten an. Zum Vergleich gibt Schick (2019) einen Arbeitszeitbedarf von 43 AKh je Kuh und Jahr an, davon fallen 27 % an die Fütterung, was einem Zeitbedarf von 11,61 AKh je Kuh und Jahr

entspricht (n=120). Umgerechnet auf den Tag ergibt das bei einer mittleren Herdengröße von 50 Kühen einen täglichen Arbeitszeitbedarf von 1,9 AKh, was in etwa 115 Minuten entspricht. Die mittlere Herdengröße der Umfrageteilnehmer lag bei 47 bis 49 GVE (Großvieheinheit), was mit dem Faktor 1,2 (1 GVE = 500 kg; Kuh = 650 kg) eine theoretische Kuhherdengröße von ca. 58 Tieren ergibt. Dies zeigt, dass in vielen Fällen die Betriebs- und Leistungsdaten den Landwirten nicht bekannt sind und oftmals nur grob geschätzt werden. Die gängigste Mechanisierungsform ist der angehängte Futtermischwagen mit 47 %. Weiterhin werden selbstfahrende Futtermischwagen und Siloblockschnaider eingesetzt. Im zweiten Teil wurde Daten zur Automatisierung auf den Betrieben erhoben. Auf 45 % der Betriebe kommt keine Automatisierung zum Einsatz. Auf 25 % der Betriebe kommen ein automatisches Melksystem, ein automatische Mistschieber und/oder ein automatischer Futteranschieber zum Einsatz. (Regler 2018)

Im ersten Schritt wurden die Anforderungen der Betriebe an ein automatisches Fütterungssystem abgefragt. Anhand der Verteilung in Abb. 37 kann festgestellt werden, dass vor allem die „Zuverlässigkeit des Systems“ unter den Befragten „absolute Priorität“ hat oder „sehr wichtig“ ist. Ebenfalls als „sehr wichtig“ wurde die „Sicherheit für Mensch und Tier“ sowie die „Zeitersparnis“ eingestuft. Weniger wichtig war aus Sicht der Befragten der „technische Fortschritt“ oder die „Modernisierung des Geschäfts“. Als wichtig werden die Faktoren

„Tierkontrolle“ und „Qualität der Futtermittel“ eingestuft. Im Vergleich dazu lag die Bedeutung von „niedrigen Anschaffungskosten- oder Wartungskosten“ nur im Mittelfeld.

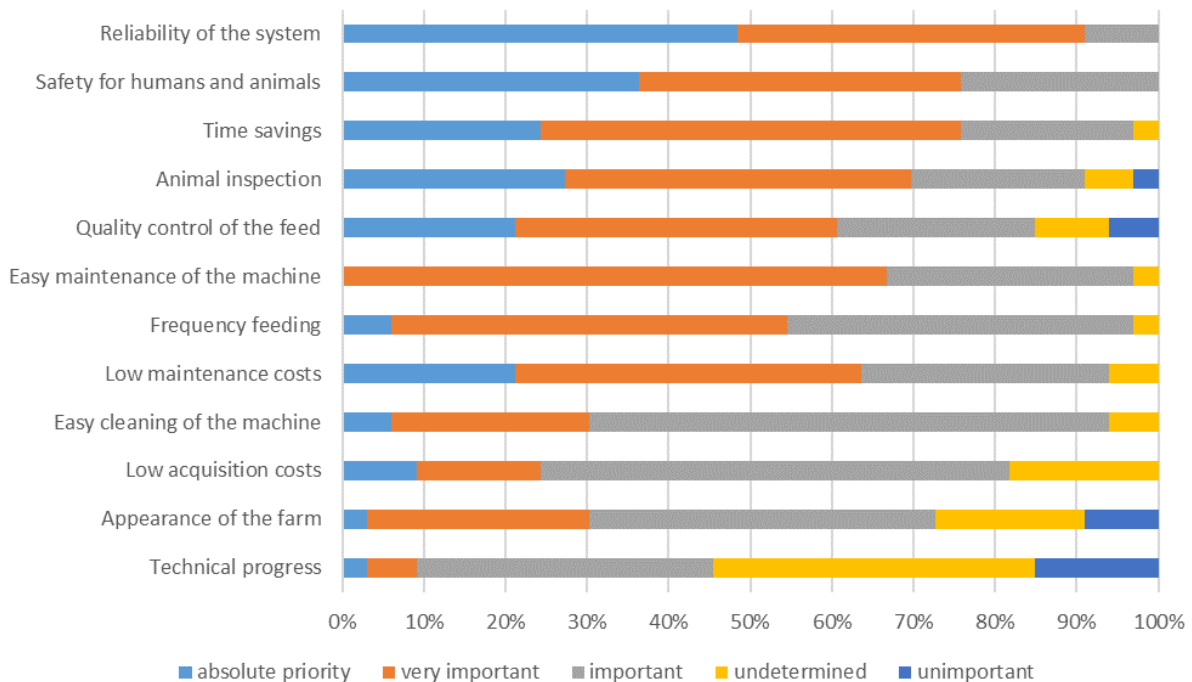


Abb. 37: Anforderungen der Befragten an ein automatisches Fütterungssystem. (REGLER 2019)

Zentraler Punkt für die Befragten ist die Zuverlässigkeit des Systems. Dies umfasst die Ausfallsicherheit der Anlage. Je nach dem Typ eines automatischen Fütterungssystems kann es aufgrund der baulichen Strukturierung unmöglich werden mit konventioneller Technik und Mechanisierung zu füttern. Die Fütterung müsste in einem solchen Fall wieder von Hand erledigt werden, was bei den vorherrschenden Kuhzahlen eine enorme Arbeitsbelastung bedeuten würde. Da kein technisches System zur Gänze von Ausfällen ausgenommen ist, kommt es entscheidend auf den jederzeit verfügbaren Support und Service für das System an. Für die Mehrheit der Betriebe ist diese Service-Problematik ein wesentlicher Faktor für die Kaufentscheidung zwischen verschiedenen Herstellern. In diesem Fragenkomplex berichteten Teilnehmer der Umfrage häufig über Erfahrungen mit alten automatischen Fütterungssystemen aus den 1960er Jahren, wenn es auch nicht persönliche Erfahrungen des Teilnehmers waren.

Ebenfalls mit hoher Priorität wurde die Sicherheit für Mensch und Tier erwähnt (Abb. 38). Trotz der hohen Priorität sehen 56 % der Befragten in allen Betrieben keine direkte Gefahr. Das Hauptanliegen war den Befragten dabei die Sicherheit von Tieren und Dritten (je 28 %), insbesondere bei vollständig autonomen Systemen mit eigener Futteraufnahme im Silo. (Regler 2018)

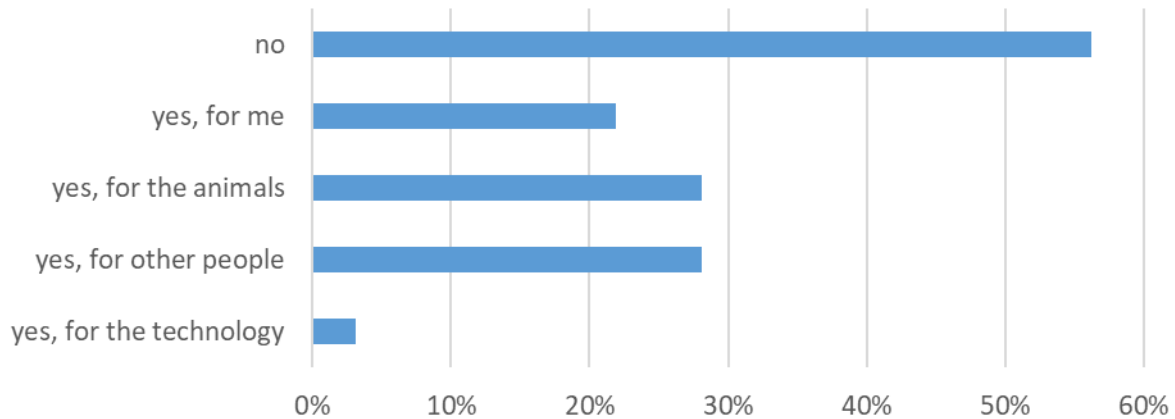


Abb. 38: Sicherheitsbedenken bei automatischen Fütterungssystemen. (REGLER 2019)

Bei der Futterqualität tendieren 58 % der Teilnehmer zu einer Silageentnahme ohne Zwischenlagerung. Grund ist ein befürchteter Qualitätsverlust durch nachträglichen Futtermittelverderb. Eine kurzfristige, vorübergehende Lagerung von bis zu maximal einem Tag wäre für 39 % noch akzeptabel. (REGLER 2018)

Die Antworten zu den Steuerungsmöglichkeiten eines automatischen Fütterungssystems waren gleichmäßig auf alle vorgegebenen Antworten verteilt (Abb. 39). Lediglich die Steuerung des Systems per Fernbedienung wurde nur von 27 % als sinnvoll angesehen. Am beliebtesten war die Antwortmöglichkeit mit der Steuerung über eine App für das Smartphone (63 %). (REGLER 2018)

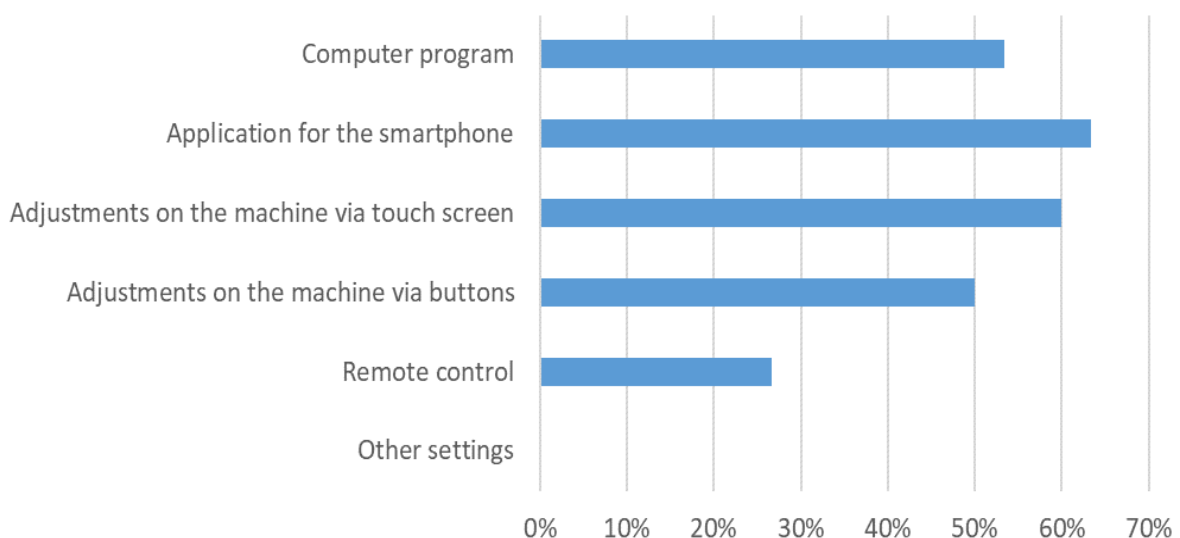


Abb. 39: Gewünschte Steuerungsmöglichkeiten für ein automatisches Fütterungssystem. (REGLER 2019)

Der Trend in der Automobilindustrie hin zu elektrischen Fahrzeugen lässt sich auch in der Landwirtschaft erkennen. Mehr als die Hälfte der Befragten (52 %) ziehen ein akkubetriebenes

System vor, gefolgt von einer externen Energieversorgung (27 %) und den klassischen Verbrennungsmotoren. Passend dazu scheint der Anteil von 45 % der Befragten, die Strom am Hof selbst erzeugen und nutzen, zu sein.

Klar beantwortet wurde die Frage, ob das AFS manuell gesteuert werden soll, z. B. um in Altgebäuden eingesetzt zu werden. Die Befragten stimmten zu 100 % mit „Ja“ ab.

Bei der Zahlungsbereitschaft gaben die Teilnehmer an, mit zunehmendem Automatisierungsgrad auch einen höheren Preis zu akzeptieren. Ein einfacher Futterschieber war den meisten Teilnehmern maximal 10.000 € wert (71 %). Für einen angehängten, fremdbefüllten Futtermischwagen, der den Stand der Technik widerspiegelt, würden 10 % bis zu 10.000 €, 35 % bis zu 25.000 €, 38 % bis zu 50.000 € und 17 % auf bis zu 75.000 € ausgeben. Für ein halbautomatisches System mit selbstfahrendem, fremdbefüllten Mischwagen würden 44 % bis zu 50.000 €, 36 % bis zu 75.000 € und 10 % bis zu 100.000 € ausgeben. Lediglich 10 % sehen einen Maximalpreis von 10.000 € bzw. 25.000 € als gerechtfertigt an. Für ein vollautomatisches AFS mit selbstfahrendem und selbstbefüllendem Mischwagen würden 19 % mehr als 100.000 € ausgeben bzw. 3 % sogar mehr als 200.000 €.

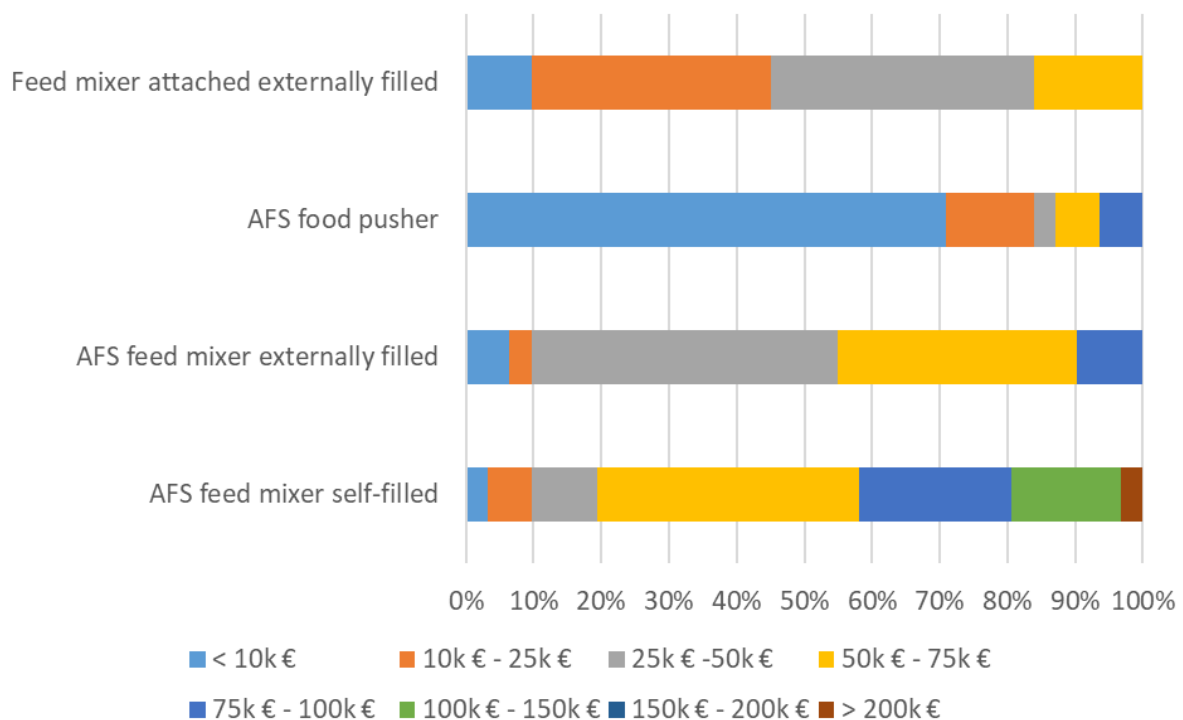


Abb. 40: Die preisliche Einstufung durch die Teilnehmer hinsichtlich der Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsstufen. (REGLER 2019)

4.2 Risikobeurteilung

Eine Maschine übernimmt Aufgaben nach einem vorab definierten Schema und in festgelegten Grenzen. Im Lebenszyklus dieser Maschine kann es zu Gefährdungen für den Bediener kommen (Risikoanalyse). Die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund der Gefährdung zu einem Schaden kommt und das damit verbundene Ausmaß bedürfen einer Abschätzung (Risikoeinschätzung). Die Risikoanalyse und die Risikoeinschätzung bilden zusammen die Risikobewertung. Wird die Risikobewertung wiederholt durchgeführt, bis zuletzt eine hinreichende Risikominderung erreicht ist, so von einer Risikobeurteilung gesprochen.

Sicherer Zustand

Von einem sicheren Zustand bei einem System wird gesprochen, wenn der aktuelle Betriebszustand des Systems ein tragbares Restrisiko in einer gefahrbringenden Situation darstellt. Ein sicherer Zustand kann ein vorgesehener oder ein zusätzlicher Betriebsmodus sein, der sich an der gefahrbringenden Situation orientiert. Zusätzliche Betriebsmodi können z. B. ein Back-up-Modus sein, der die Verfügbarkeit der Maschine erhöht, oder ein abgeschalteter „sicherer“ Modus, den die Maschine nur außerhalb einer gefahrbringenden Betriebssituation verlassen kann. Laut (Hermes 2015) sollte der sichere Zustand bereits während der Risikobeurteilung definiert werden, da so einfacher zu sehen ist, ob dieser mit allen zugehörigen gefahrbringenden Betriebssituationen konsistent ist. (Hermes 2015)

Im Falle des Truckline FMW ist eine Federspeicherbremse verbaut. Diese Bremse ist im Normalzustand gebremst. Per Federkraft werden die Bremsen mechanisch gedrückt. Um die Bremse zu lösen ist demnach eine Kraftaufwendung nötig. Diese Kraft kann nur durch ein aktives Aggregat (Stromgenerator, Hydraulik- oder Druckluftpumpe) im Betriebszustand bereitgestellt werden. Wird mittels Notaus-Schalter die Krafterzeugung bzw. -zufuhr unterbrochen, wird die Bremse wieder mechanisch festgehalten.

4.3 Elektrifizierung

Zusammen mit der Mayer Maschinenbaugesellschaft wurde ein vollelektrischer Futtermischwagen entwickelt. Der Futtermischwagen besitzt einen Säure-Blei-Akku, der einen elektrischen Mischantrieb und einen elektrischen Fahrtrieb an der Vorderachse versorgt. Im Hinblick auf die spätere Konkurrenzfähigkeit wurden möglichst viele Standardbauteile aus der Produktion von Siloking verwendet. Die elektrischen Komponenten wurden von der Firma Jungheinrich AG zugekauft. Jungheinrich ist ein Unternehmen aus der Intralogistik, das vorrangig elektrische Gabelstapler, Hochregalstapler und Schlepper herstellt. Die 12 Tonnen-Antriebsachse in der Truckline wird ursprünglich in einem Stapler verbaut und liefert eine Leistung von 18 Kilowatt. Damit sind 20 Kilometer pro Stunde Höchstgeschwindigkeit möglich.

Der Mischantrieb besitzt eine Leistung von 15 Kilowatt und kommt in allen Mischbehältergrößen von 8 bis 14 Kubikmeter vor.

Zunächst wurde die Truckline in einem CAD-Programm konstruiert. Zeitgleich wurden die Lastzyklen spezifiziert, die der Futtermischwagen in dem vorgesehenen Einsatzszenario durchläuft. Die Vorgabe war eine Standard-Akkukapazität für 90 Minuten durchgehender Mischzeit. In der Praxis ist damit in etwa das Mischen und Ausdosieren von drei Futterrationen zusammenhängend möglich. Das installierte Akkupaket besitzt eine Kapazität von 465 Amperestunden (optional 620 Amperestunden) und ist 1.200 Kilogramm schwer. Der Lebenszyklus des Akkupaketes liegt bei etwa 1600 Ladezyklen, was ca. 4,5 Jahren Nutzung entspricht. Die Systemspannung liegt bei 80 Volt. Daher dürfen auch nicht speziell geschulte Monteure das Fahrzeug reparieren.

Der erste Prototyp der Truckline wurde während einer dreimonatigen Testphase im Winter 2016/2017 auf einem landwirtschaftlichen Betrieb getestet. Die Belastungen wurden praxisnah gestaltet und mit Belastungsspitzen ergänzt. Es wurde langgeschnittene, nasse Grassilage oder ganze Rundballen befüllt. Die Maschine schafft mit den drei Übersetzungen der Mischschnecke (17, 33 und 50 Umdrehungen pro Minute) einen voll befüllten Behälter zu mischen, auch mit stehender Schnecke im Anlauf. Die Einsatzbedingungen reichten bis zu einer Tiefsttemperatur von -15 Grad Celsius, was auf die Fütterungsroutine keine Auswirkung hatte. Eine leichte negative Beeinflussung der Akkuleistung hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Kapazität konnte nicht ausgeschlossen werden.

4.4 Versuche

4.4.1 Versuchsreihe A

Die Bildserie in Abb. 41 zeigt die Wirkung der künstlichen Nebel-/Regenwände auf den Laser-Scanner bzw. das Radar-Modul. Laser-Scanner und Radar-Modul waren übereinander positioniert, auf gleicher Höhe mit dem Radar-Reflektor und zentral auf den Radar-Reflektor (rot rund eingekreist) ausgerichtet (rot gestrichelter Pfeil). Nacheinander wurden die Düsen D1, D2 und D3 geschaltet. Ohne Nebelwand ist das Zielobjekt aus den Laser-Daten eindeutig identifizierbar (rot oval eingekreist). Die Radar-Daten zeigten eine deutliche Reflexion, die aus dem Messrauschen hervorsticht (grüner Pfeil). Nach aktivieren der Düse D1 erreichen die Laser-Strahlen des Scanners das Zielobjekt nicht mehr. Stattdessen bildet sich auch in den Laser-Daten eine fluktuierende Wand. Das liegt an der Reflexion der Laser-Strahlen an unterschiedlichen Wassertröpfchen. Mit Aktivierung der Düsen D2 und D3 verschiebt sich dieser Vorhang weiter in Richtung Laser-Scanner. Die starke Radar-Reflexion zeigte sich hingegen völlig unverändert und lag bei -50 dBVrms.

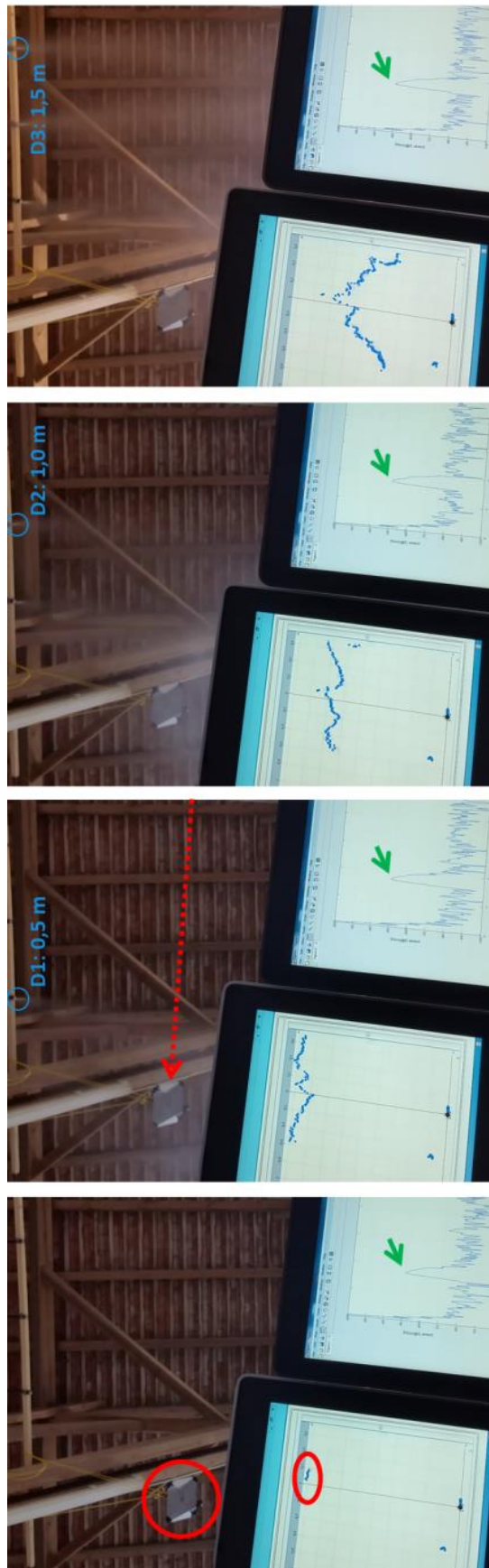


Abb. 41: Zu sehen ist die Anordnung der Düsen (blau), das Zielobjekt (rot eingekreist bzw. grüner Pfeil) sowie die Messdaten-Visualisierung der Laser- (links) und Radar-Daten (rechts) auf den beiden Notebooks. (Eigene Aufnahmen)

In Abb. 42 sind die Messdaten des Laser-Scanners dargestellt. Die Nebelwände machten es den Laser-Strahlen unmöglich das Zielobjekt zu erreichen.

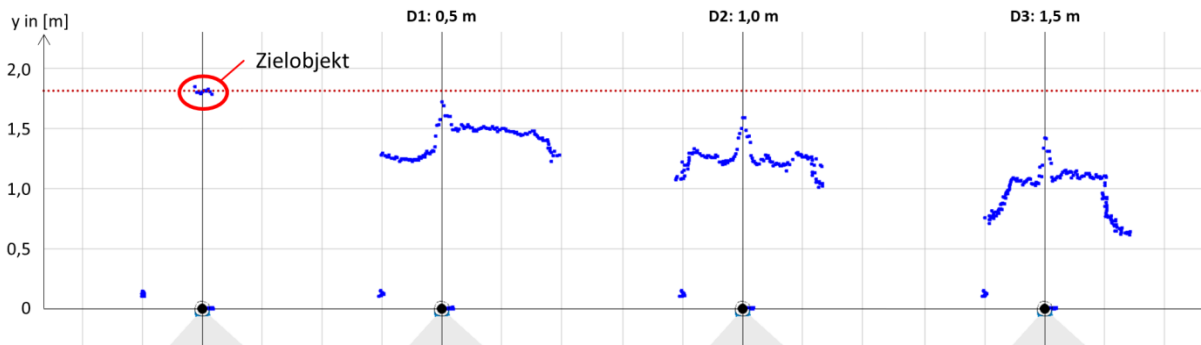


Abb. 42: Die graphische Darstellung der Laser-Messdaten. Von links nach rechts sind die Varianten ohne Sprühregen, mit einem Nebelvorhang (D1), mit zwei Nebelvorhängen (D2) und mit drei Nebelvorhängen (D3) dargestellt. (Reger et al. 2017)

Das Radar Evaluation Board konnte in den Versuchen eine optisch validierbare Reichweite von 12 Meter erreichen. Erreicht wurde diese Entfernung jedoch nur mit dem Radar-Reflektor, der speziell dafür konstruiert ist. Ab einer Entfernung von etwa 10 Meter musste die Ausrichtung zum Radar-Reflektor sehr exakt sein, um das Signal vom Messrauschen optisch unterscheiden zu können (Abb. 43). Die empfangene Leistung lag zwischen 69 und 75 dBVrms. Die Pressspanplatte wurde in bis zu 7 Meter Entfernung erkannt (Abb. 44). Hier lag die reflektierte Leistung bei 72 bis 76 dBVrms.

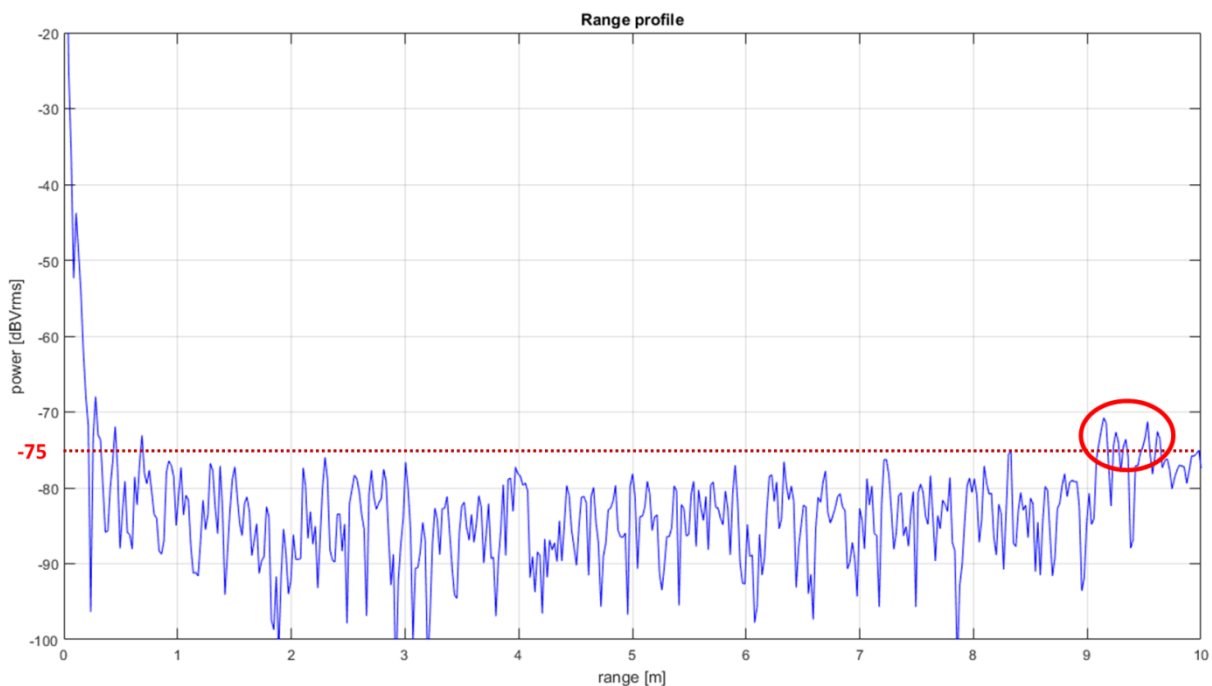


Abb. 43: Die graphische Darstellung der empfangenen Leistung [dBVrms], die vom Radar-Reflektor reflektiert wurde. Das Messrauschen beginnt bei etwa -75 dBVrms. (Eigene Darstellung)

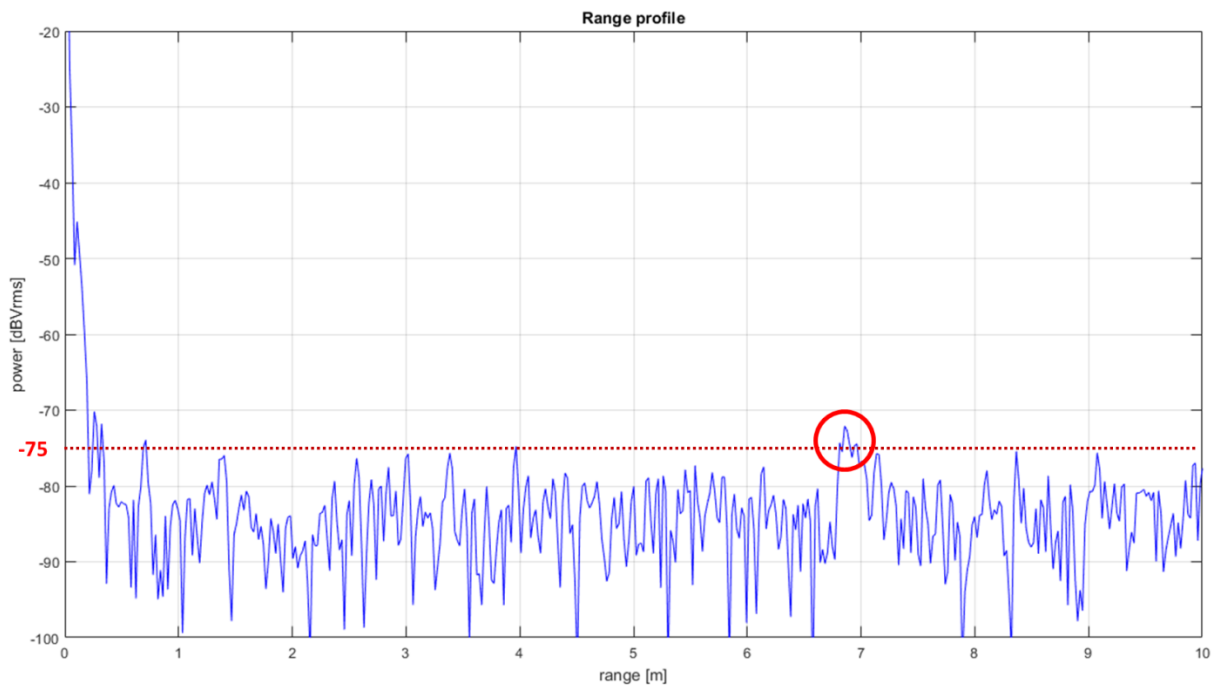


Abb. 44: Die graphische Darstellung der empfangenen Leistung [dBVrms], die von der Pressspannplatte reflektiert wurde. Das Messrauschen beginnt bei etwa -75 dBVrms. (Eigene Darstellung)

Nach der Umsetzung eines rotierenden Radar-Sensors, mit einem Schleifring zur Energieübertragung und einem optischen System zur Datenübertragung, konnten im Oktober 2016 erste Messdaten generiert und visualisiert werden. Eine Aufnahme im Innenraum eines Hauses und eine Aufnahme vor dem Haus zeigten erste gute Ergebnisse. Abb. 45 zeigt deutlich, wie drei Seitenwände, ein Tisch und eine Person klar vom Scanner detektiert wurden. Die Winkelauflösung wurde in den ersten Messungen auf 50 Messungen pro Umdrehung (\cong 360 Grad) festgelegt, bei einer Updaterate der Messdaten von 1 Hertz. Ein Segment entspricht einem Winkel von 7,2 Grad. Je heller ein Segment ist, desto stärker ist hier die Reflexion und somit die vom Sensor empfangene Leistung. Treffen die elektromagnetischen Wellen im 90 Grad-Winkel auf eine Fläche, ist die Rückstreuung besonders gut. Dies ist an den direkten Verbindungen (Loten) vom Scanner ausgehend in Richtung der Wände gut sichtbar. Auch Fragmentierungen geringerer Intensität sind zu erkennen, denen kein unmittelbarer Gegenstand zugeordnet werden konnte. Dies kann zu Teilen sowohl in der Hard- als auch Software begründet liegen, bzw. an den Reflexionen und den Umgebungsbedingungen.

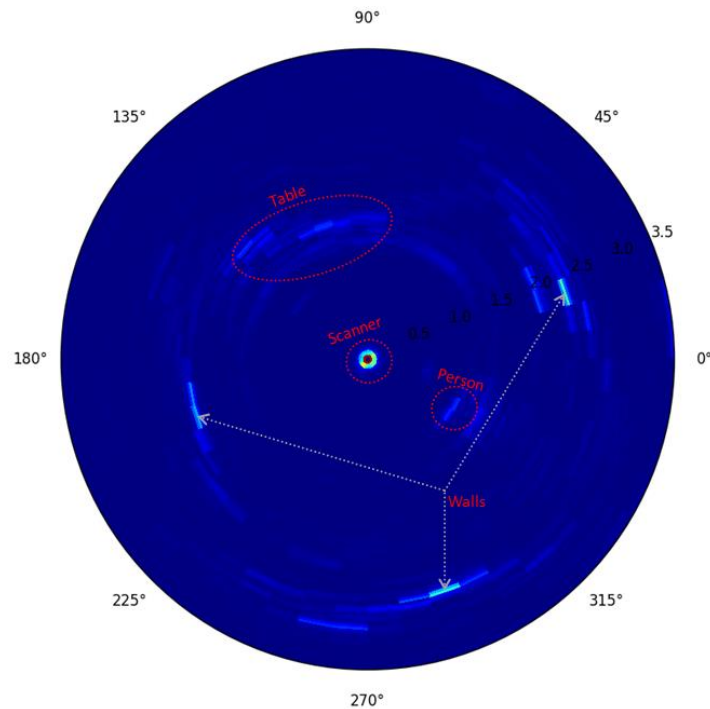


Abb. 45: Die visualisierten Radardaten zeigten die räumliche Struktur im Innenraum des Hauses. Die Helligkeit der Winkelsegmente ist direkt proportional zur Stärke der reflektierten Leistung. (Reger et al. 2017)

Im Außenbereich konnte der Radar-Scanner ebenfalls klare Umgebungsinformationen erzeugen (Abb. 46). Die Detektion unterschiedlichster Materialien, Formen und Oberflächen ist hervorzuheben. So wurden eine Schubkarre [1], eine Person [2], ein Holzstuhl [3], sowie die Außenwand des Gebäudes [4] nachvollziehbar abgebildet. Durch Fenster und Türen am Gebäude konnten auch Objekte im Gebäude bzw. weitere bauliche Strukturen wie beispielsweise der Windfang rechts im Bild detektiert werden. Die elektromagnetischen Wellen durchdringen hier Fenster oder auch dünnere Holzstrukturen und können so verdeckte Objekte erfassen.

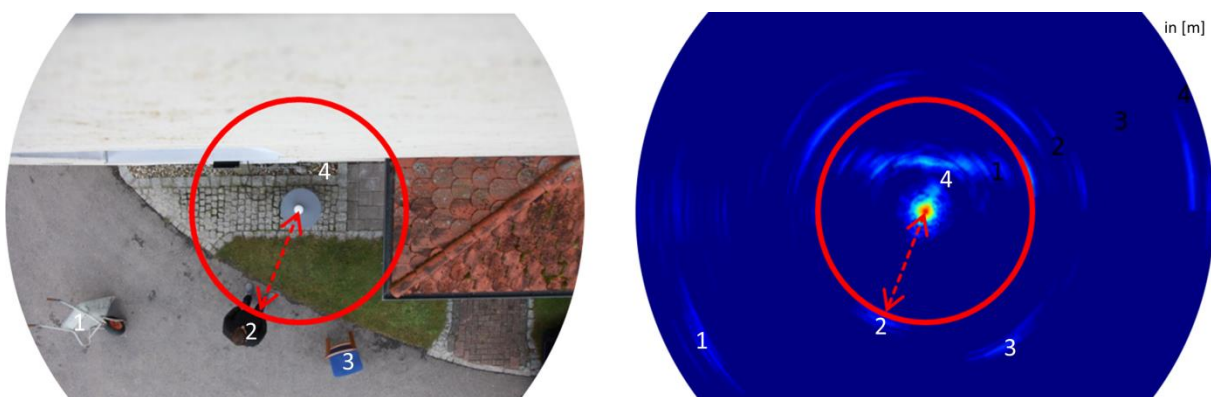


Abb. 46: Im Außenbereich bildete das Radar sowohl einen Schubkarren [1], eine Person [2], einen Holzstuhl [3], sowie Gebäudestrukturen wie etwa die Außenwand [4] gut erkennbar ab. (Eigene Darstellung)

4.4.2 Versuchsreihe B

Die Ergebnisse aus der Versuchsreihe B zeigen (1) ob das physikalische System die Rekonstruktion der Laser-Daten gegenüber dem Monte-Carlo-Partikelfilter weiter verbessern konnte, (2) die Bewertung der Laser-Messdaten der Durchgänge 2, 3 und 4 anhand der Merkmale Accuracy, Precision und Kondition und (3) die Bewertung des Entwicklungsstandes des Radar-Scanners.

Für eine detaillierte qualitative Bewertung der Laser-Scandaten wurde Durchgang 3 sowohl vollständig als auch ein Teilstück daraus – im Stall – anhand der Qualitätsmerkmale bewertet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden ein Versuchsdurchgang mit „D“, eine Fahrt mit „F“ und die X-Soll-Trajektorie mit „XS“ abgekürzt. Die Kombination „XSD3F2“ entspricht somit der X-Soll-Trajektorie aus Durchgang 3 in Fahrt 2. Je Versuchsdurchgang „D“ wurden 10 Fahrten „F“ durchgeführt. Im Folgenden können die Aussagen ohne Beschränkung der Allgemeinheit auf die Messdaten bezogen werden, da diese von einem Messsystem innerhalb eines Navigationssystems erhalten wurden.

4.4.2.1 Monte-Carlo vs. Kalman (1)

Aufgrund der größeren Anzahl Messdaten, die im Innenbereich des Stalles erzeugt werden konnten, wurde der Vergleich der beiden Filter anhand der Fahrt über den Futtertisch durchgeführt. Voraussetzung dafür war eine Least Squares Best-Approximation an die korrigierten Y-Mittelwerte des Monte-Carlo-Filters (MC) mittels einer Konstante, die gerade dem Mittelwert der korrigierten Y-Mittelwerte des Monte-Carlo-Filters entspricht. Dieser Mittelwert kann ohne Beschränkung der Allgemeinheit als Y-Wert der wahren Trajektorie angenommen werden. Der folgende Vergleich zeigt exemplarisch das Ergebnis der Rekonstruktionsfilter in „D3F8 im Stall“.

Für den Vergleich der beiden Rekonstruktionsfilter wurde zunächst der Mittelwert der Y-Koordinaten der Ausgangsdaten bestimmt. Es wurde definiert:

Fehler 1 := Monte-Carlo-Partikelfilter Y-Messdaten

- Monte-Carlo-Partikelfilter Y-Mittelwert der Messdaten (20)

Fehler 2 := Kalman-Filter Y-Messdaten

- Monte-Carlo-Partikelfilter Y-Mittelwert der Messdaten (21)

Nachdem die absoluten „Fehler 1“ (20) und „Fehler 2“ (21) berechnet wurden, erfolgte die Berechnung der Differenz zu jedem Messpunkt i des „D3 Stall“. In diesem Kontext „verbessern“ sich die Daten, wenn sie sich an den wahren Wert annähern. Als Ergebnis wurde erhalten:

1. Falls die Ungleichung $(\text{abs}(\text{Fehler 1}) - \text{abs}(\text{Fehler 2})) > 0$ für einen Messpunkt i , $i \in \mathbb{N}$, $0 \leq i \leq |\text{Z38}|$ bzw. $|\text{X38}|$, erfüllt ist, wobei Z38 die Monte-Carlo-Filter-Trajektorie und X38 die Kalman-Filter-Trajektorie beschreibt, dann rekonstruierte der Kalman-Partikelfilter besser für diesen Messpunkt i .
2. Falls die Ungleichung $(\text{abs}(\text{Fehler 1}) - \text{abs}(\text{Fehler 2})) < 0$ für einen Messpunkt i , $i \in \mathbb{N}$, $0 \leq i \leq |\text{Z38}|$ bzw. $|\text{X38}|$, erfüllt ist, dann rekonstruierte der Monte-Carlo-Partikelfilter besser für diesen Messpunkt i .

In der Folge sind in *Abb. 47* die berechneten Werte $|\text{Fehler 1}| - |\text{Fehler 2}|$ aus „D3F8 im Stall“ abgebildet. Die durch den Kalman-Filter verbesserten Messwerte sind positiv (von 0 – ca. $+7 \cdot 10^{-4}$), die durch den Monte-Carlo-Filter rekonstruierten Messwerte negativ (von 0 – ca. $-3 \cdot 10^{-4}$). In 231 von 448 Fällen ($\cong 51,6\%$) wurden somit die Messdaten durch die Kalman-Filter-Rekonstruktion verbessert. In den 217 weiteren Fällen ($\cong 48,4\%$) haben sich die Messdaten durch die Kalman-Filter-Rekonstruktion verschlechtert. Der Grad der Verbesserung durch die Kalman-Filter-Rekonstruktion ist gravierender/höher als die Verschlechterung durch diese. Dies kann der Amplitude der positiven Werte entnommen werden, die größer ist als die Amplitude der negativen Werte.

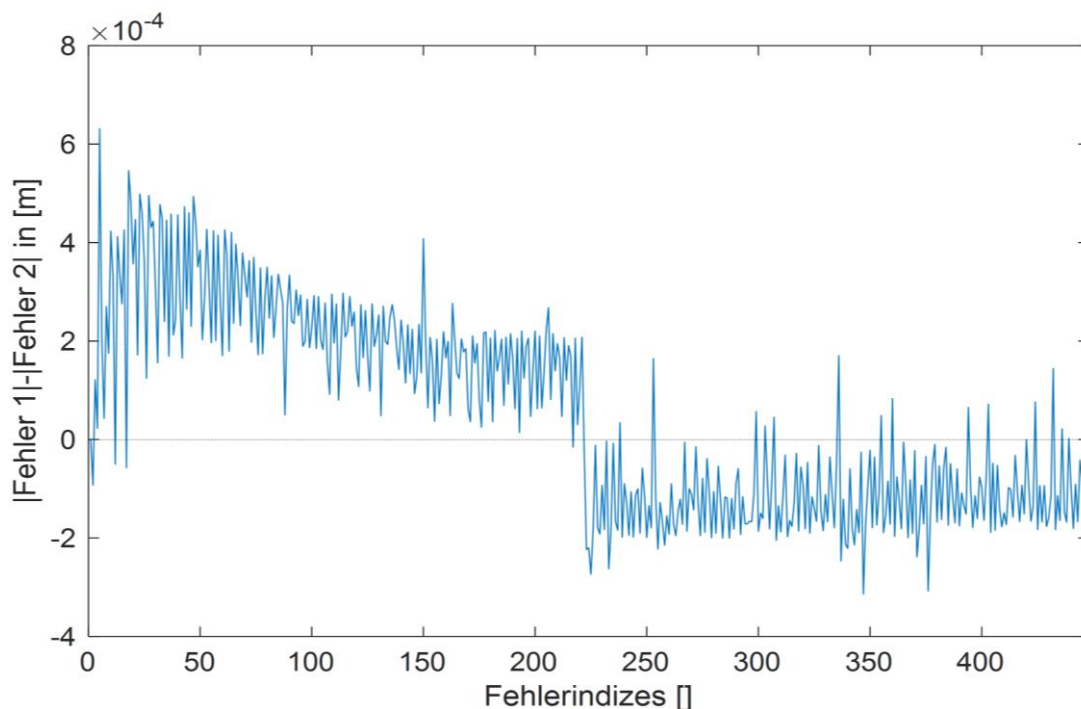


Abb. 47: Plot von $|\text{Fehler 1}| - |\text{Fehler 2}|$. (Reger et al. 2018)

Im Folgenden wird ein Teilstück der Trajektorie von D2F10 und der Soll-Trajektorie betrachtet (Abb. 48). Die gefahrene Trajektorie D2F10 wich um bis zu 0,3 m (für $x \approx 19$ m) von der Soll-Trajektorie ab. Anhand der Beobachtungen während der Versuchsdurchführung und den Notizen im Versuchsprotokoll, konnte ein Zusammenhang zu Fahrauffälligkeiten beim Roboter festgestellt werden. Der Roboter zeigte während des gesamten D2 bei jeder Fahrt ein unregelmäßiges Fahrtbild. Eine Auswertung lieferte keine bewertbaren Ergebnisse, weshalb diese Messdaten nicht weiter für eine qualitative Datenanalyse berücksichtigt wurden. Als Ursache für die gestörte Fahrweise des Roboters wurde die Anzahl an Wegpunkten der programmierten Route vermutet. Zwischen D2 und D3 wurde die Anzahl an Wegpunkten der Route erhöht. Die Fahrauffälligkeiten konnten in D3 und D4 nicht mehr beobachtet werden.

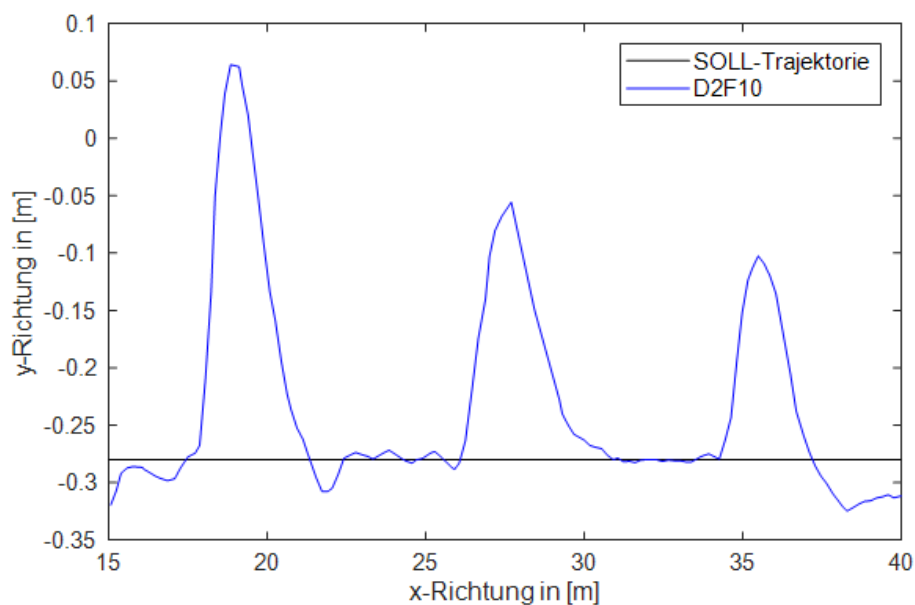


Abb. 48: Ausschnitt der gefahrenen Trajektorie von D2F10 und der Soll-Trajektorie. (Friedrich 2017)

4.4.2.2 Accuracy, Precision und Kondition (2)

Accuracy

Im Vorfeld der Berechnung der Accuracy wurden die Laser-Messdaten in zwei Schritten vorbereitet.

Die erste Aufbereitung der Daten aus „D3 im Stall“ erfolgte vor der Berechnung mittels der 1NN-Methode. Zu beachten war, dass der erste und letzte Punkt der Datensätze für alle Fahrten annähernd übereinstimmen. Unregelmäßigkeiten, z. B. Datenlücken, in den Daten wurden überprüft und bereinigt, um den systematischen Fehler zu verringern. Als

Bezugstrajektorie diente die Trajektorie, die die geringere Anzahl an Messdaten aufwies. D3F4 erwies sich als unbrauchbar und wurde in der folgenden Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Es fehlte ein erheblicher Teil der Daten, die Ursache blieb ungeklärt. Die Wegpunkte für die Navigation stellten die Soll-Trajektorie dar, die wiederum die wahre Trajektorie bildete. Dann wurde mit Hilfe der 1NN-Methode die Accuracy für jeden Punkt der Soll-Trajektorie bestimmt. Für jeden Punkt der Soll-Trajektorie wurde der nächste Nachbar (nearest neighbour) aller 9 berücksichtigten Trajektorien aus „D3 im Stall“ mittels der euklidischen Distanz bestimmt.

Anschließend an die Berechnung der euklidischen Distanzen folgte die zweite Aufbereitung. Beim Vergleich der Trajektorien zeigte sich, dass Messlücken in den Trajektorien an unterschiedlichen Stellen auftraten. Diese Messdaten wurden bereinigt. Ebenfalls ist eine stärkere Abweichung der Trajektorien zu Beginn der Fahrroute „D3 im Stall“ sichtbar (Abb. 49), welche aus der vorhergehenden Kurvenfahrt resultierte. Der „Lenkeinschlag“ aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Räder der Triebachse, sprich Hinterachse, begünstigte diese Abweichungen in Kurvenfahrten. Die Fahrgenauigkeit an sich kann trotz den Ausschlägen in den Daten sehr hoch sein, da bereits kleine Lenkbefehle an den über der Vorderachse platzierten Scannern verstärkt auftreten. Diese Messdaten wurden ebenfalls bereinigt, vorausgesetzt sie waren von der vorhergehenden Kurvenfahrt beeinflusst. Nächste Nachbarn (nearest neighbors), die möglicherweise falsch zugeordnet wurden, wurden bereinigt, um den systematischen Fehler zu reduzieren. Diese zweistufige Vorbearbeitung und Bereinigung der Messdaten führte zu einer verlässlichen Datengrundlage, um robuste Auswertungsergebnisse zu ermöglichen.

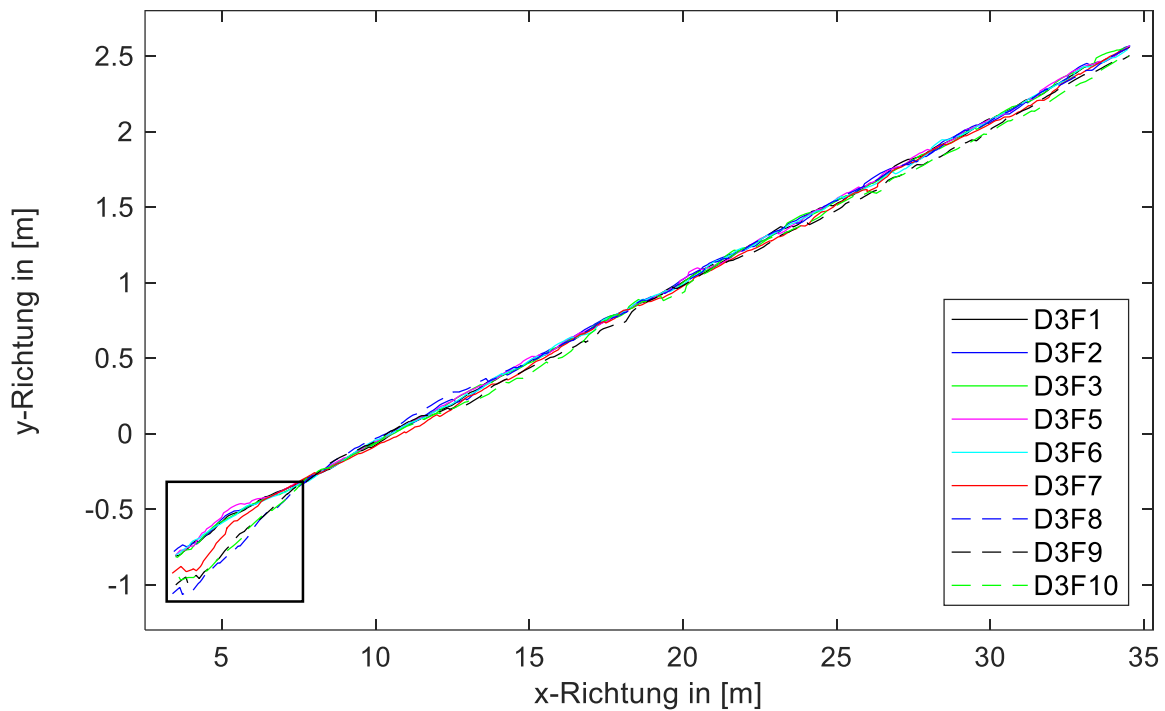


Abb. 49: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus „D3 im Stall“. (Reger et al. 2022a)

Abb. 50 zeigt exemplarisch wie sich die Accuracy der Fahrten aus „D3 im Stall“ zum einem Referenzpunkt der XSoll-Trajektorie ergaben. Die XSoll-Trajektorie verläuft angedeutet in etwa horizontal durch den Punkt XSoll. In der Streuung der Messpunkte der Fahrttrajektorien um die XSoll-Trajektorie war keine Regelmäßigkeit erkennbar. Die Abweichung der nächsten Nachbarn zu diesem Punkt XSoll variierten von 0,0058 Meter (D3F2) bis 0,0572 Meter (D3F7). Die Messwerte der Einzelfahrttrajektorien sind, bezogen auf diesen Messpunkt, somit als akkurat einzustufen.

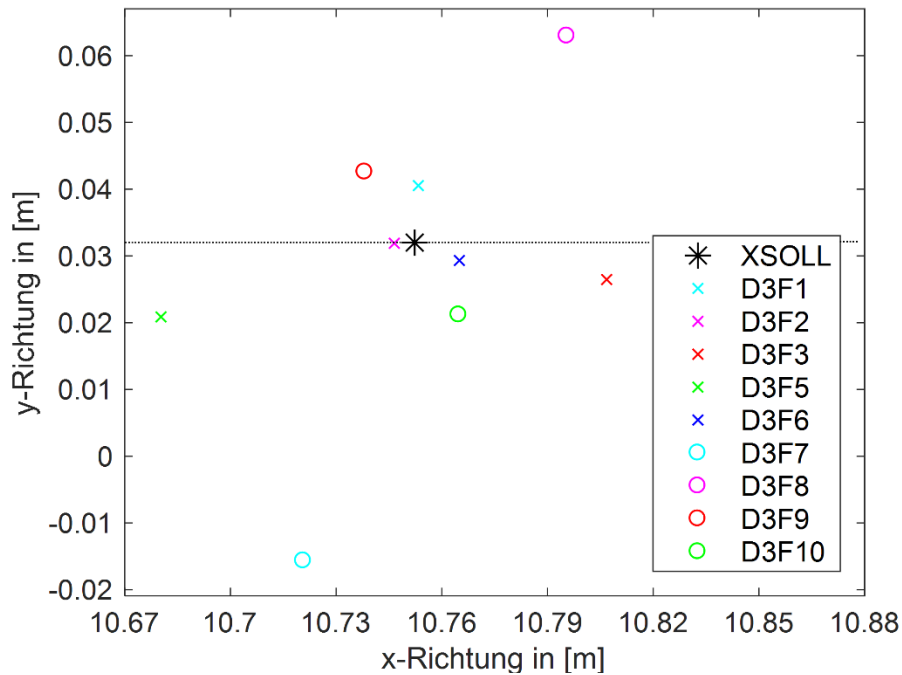


Abb. 50: Ausgewählter 1-punktiger Zoom in Soll- und Einzelfahrtstrajektorien. (Reger et al. 2022a)

Die Ergebnisse der Accuracy-Bewertung aller Einzelfahrten aus „D3 im Stall“ sind in Abb. 51 dargestellt. In Summe wurden 72 nächste Nachbarn für die 9 Trajektorien von D3 ausgewertet. Einzig die bereinigten Ergebnisse aus den oben beschriebenen Prozessen wurden berücksichtigt. Im Durchschnitt lag die Accuracy bei 0,0487 m. Die Standardabweichung lag bei 0,0286 m. Der Maximalwert der Accuracy lag bei 0,1406 m (D3F10), der niedrigste Wert bei 0,0047 m (D3F1). Maximal- und Minimalwert lagen somit 0,1359 m auseinander. Die Messdaten wurden daher als akkurat eingestuft.

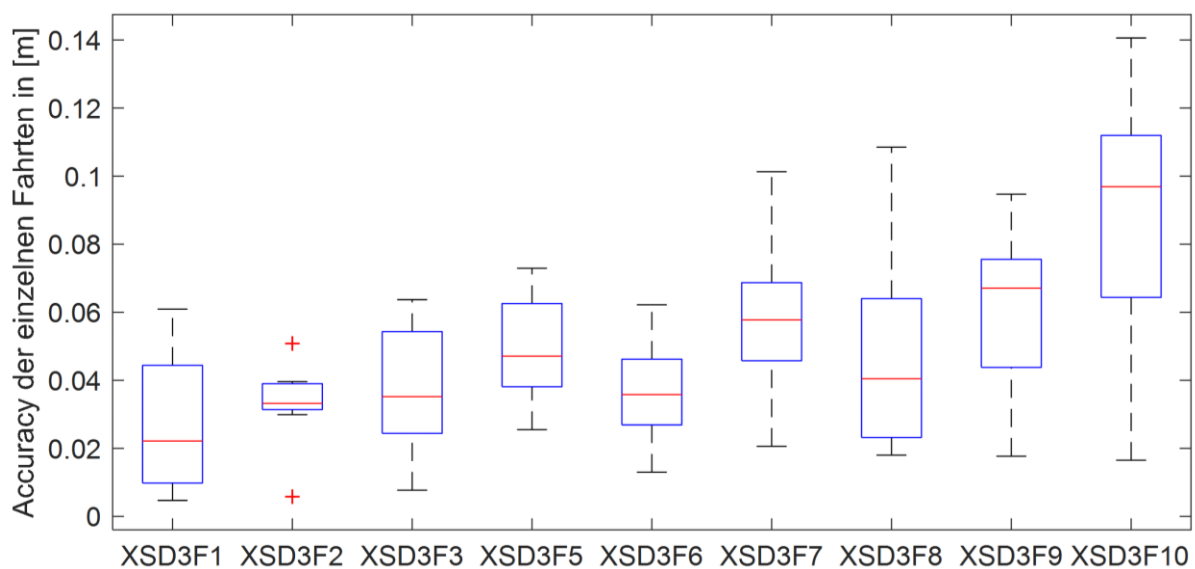


Abb. 51: Die Boxplots zeigen die Abweichungen der nächsten Nachbarn (Accuracy) für jede Einzelfahrt aus „D3 im Stall“, ohne Fahrt 4. (Reger et al. 2018)

Tab. 3 gibt einen Überblick über die Anzahl an Messdaten, die für jede der 9 Fahrten aus „D3 im Stall“ verwertet werden konnten. Die Anzahl bezieht sich auf die durch den Kalman-Filter entrauschten und mit dem ersten Datenbereinigungsschritt verarbeiteten Rohdaten. Vergleicht man die Messdaten aus Tab. 3 mit den Boxplots aus Abb. 51, zeigt sich, dass die Fahrten mit umfangreicherer Messdatengrundlage in Folge der 1NN-Mehtode als akkurater zu bewerten sind als die Fahrten mit geringerer Messdatengrundlage.

Tab. 3: Die Anzahl der Messdaten, die nach der Kalman-Filterung und dem ersten Datenbereinigungsschritt für die jeweilige Einzelfahrt aus „D3 im Stall“ zur Verfügung standen.

	D3F1	D3F2	D3F3	D3F5	D3F6	D3F7	D3F8	D3F9	D3F10
Anzahl der Messdaten	524	529	506	525	514	522	448	449	378

Der statistische Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Trajektorien wird in Form eines Histogramms deutlich (Abb. 52). Insgesamt wurden 72 nächste Nachbarn für die 9 Trajektorien des „D3 im Stall“ berücksichtigt. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 13,9 % der Werte waren kleiner als 0,02 m, 30,6 % lagen zwischen 0,02 und 0,04 m, 26,4 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 m, 18,1 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 m, 2,8 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 und 0,12 m und 1,4 % der Werte lagen zwischen 0,14 und 0,16 m. Daraus folgt ein Anteil von 8,3 % der Werte über 0,1 m. Der Maximalwert sowie drei der fünf Werte zwischen 0,1 und 0,12 m entstammten D3F10.

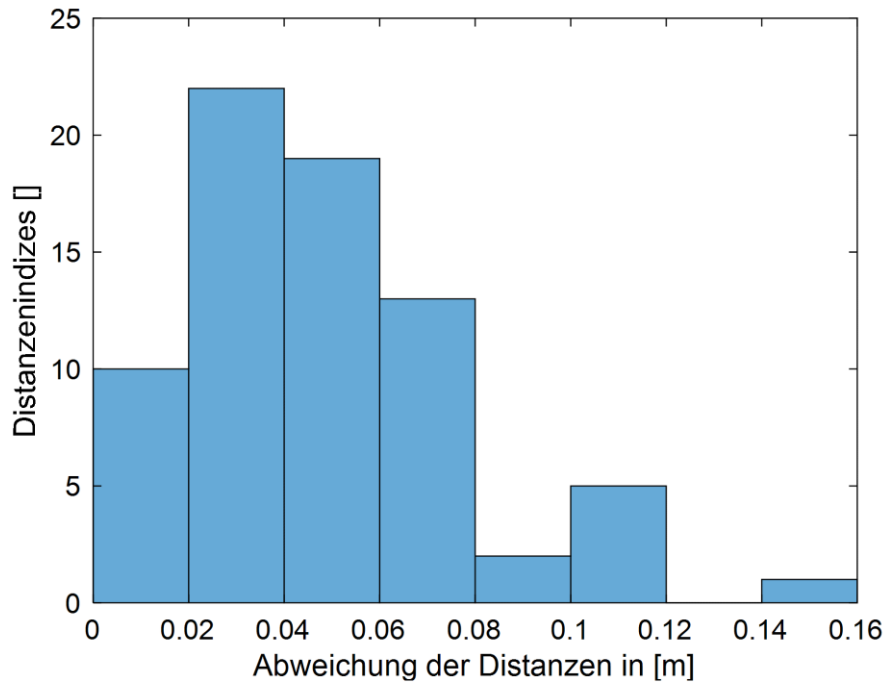


Abb. 52: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 im Stall“. (Friedrich 2017)

Der Abstand zwischen der XSoll-Trajektorie und den Trajektorien der Einzelfahrten wurde anhand der euklidischen Distanz bestimmt. In Abb. 53 ist beispielhaft in einem 1-punktigen Szenario diese sogenannte 1NN-Methode dargestellt. Wie man aus der Abbildung ableiten kann, ist der berechnete Abstand größer als die tatsächliche Abweichung. Daraus kann man folgern, dass die Abweichung in Wirklichkeit geringer ist, als es die Auswertung der Daten ergab. Eine gewisse Unsicherheit hinter dieser Feststellung ist, dass nicht bekannt ist, wie sich der Roboter zwischen zwei Messpunkten bewegt hat. Es ist anzunehmen, dass er auf direktem Weg gefahren ist. Es ist jedoch ebenso möglich, dass er sich in dem Bereich unregelmäßig bewegt hat. Grundsätzlich ist ein positiver Trend anzunehmen, d. h. die Abweichungen von der XSoll-Trajektorie sind in Wirklichkeit geringer als in den Auswertungen ermittelt.

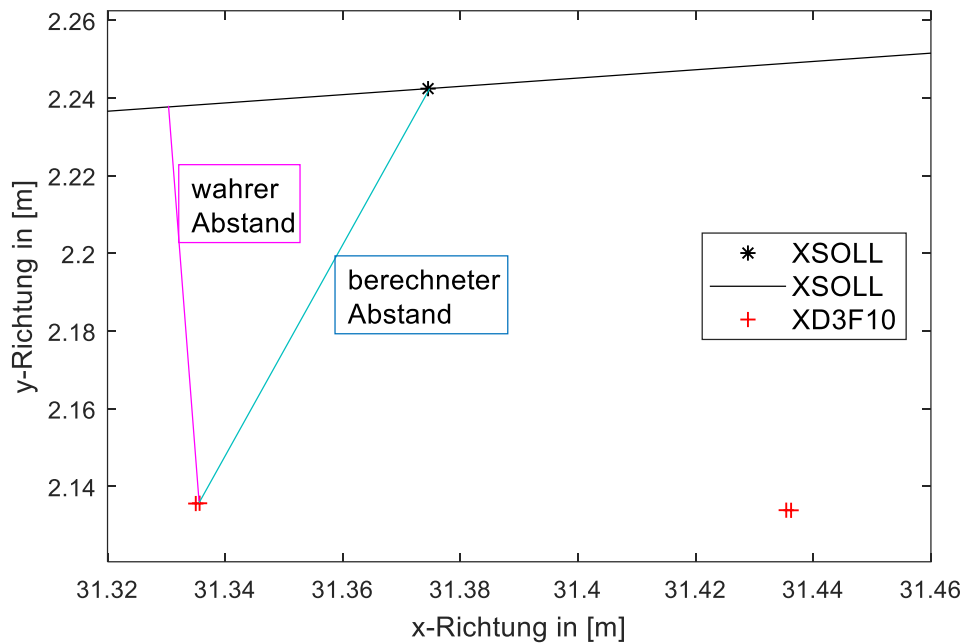


Abb. 53: Mit der 1NN-Methode konnte sich der euklidisch berechnete Abstand nur an den wahren Abstand annähern. Hier ist der berechnete Abstand eines Punktes der Trajektorie D3F10 beispielweise größer als die tatsächliche Abweichung. ((Reger et al. 2022a))

Die Ermittlung der Accuracy für „D3 vollständig“ entspricht im Wesentlichen der Ermittlung für den „D3 im Stall“, wie oben angeführt. Die Unterscheidungen werden im Folgenden herausgestellt.

Der Start der Trajektorien der Einzelfahrten entspricht nicht der Roboterstartposition 1, weil eine Datenbereinigung erforderlich war. Der Roboter fuhr in dieser Kurve nicht direkt nach der Soll-Trajektorie, sondern er fuhr die Kurve geglättet ab. In Abb. 54 ist die Accuracy der berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 vollständig“ dargestellt. Für die 9 Trajektorien wurden insgesamt 171 nächste Nachbarn ermittelt. Es wurden nur zweistufig bereinigte Messdaten verwendet. Im Durchschnitt lag die Accuracy bei 0,0608 Meter. Die Standardabweichung lag bei 0,0450 Meter. Der Maximalwert lag bei 0,3337 Meter (D3F8). Der Minimalwert lag bei 0,0047 Meter (D3F1). Daraus folgte eine maximale Differenz von 0,3290 Meter.

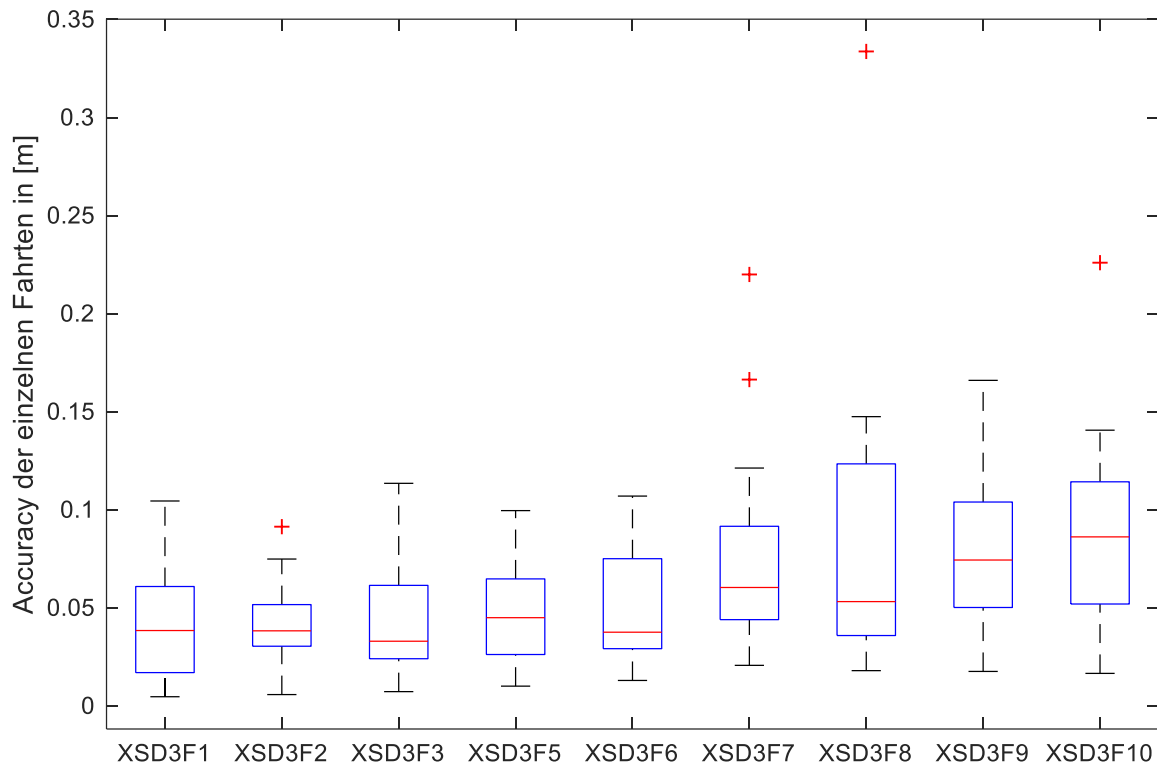


Abb. 54: Die Boxplots zeigen die Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus "D3 vollständig". Insgesamt bilden 171 nächste Nachbarn die Datengrundlage für die Darstellung. (Reger et al. 2022a)

Tab. 4 zeigt die Anzahl an Messdaten der Einzelfahrten aus „D3 vollständig“. Die Anzahl bezieht sich auf die Messdaten, die durch den Kalman-Filter entrauscht und nach dem ersten Datenbereinigungsschritt vorliegen. Vergleicht man die Messdaten aus Tab. 4 mit den Accuracy-Boxplots aus Abb. 54 stellt sich heraus, dass in Folge der 1NN-Methode Fahrten mit größerer Messdatengrundlage als akkurater zu bewerten sind als Fahrten mit kleinerem Messdatenumfang. Dieser Effekt zwischen Accuracies und Messdatengrundlage trat bereits bei „D3 im Stall“ auf.

Tab. 4: Anzahl der Messdaten der Einzelfahrten aus "D3 vollständig".

	D3F1	D3F2	D3F3	D3F5	D3F6	D3F7	D3F8	D3F9	D3F10
Anzahl der Messdaten	1148	1146	1115	1149	1122	1122	968	981	866

Der statistische Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Trajektorien wird in Form eines Histogramms deutlich (Abb. 55). Insgesamt wurden 171 nächste Nachbarn für die 9 Trajektorien des D3 berücksichtigt. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 10,8 % der Werte waren kleiner als 0,02 Meter, 28,7 % lagen zwischen 0,02 und

0,04 Meter, 21,6 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 Meter, 12,6 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 Meter, 11,2 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 Meter, 6 % der Werte lagen zwischen 0,10 und 0,12 Meter, 3 % lagen zwischen 0,12 und 0,14 Meter, 2,4 % lagen zwischen 0,14 und 0,16 Meter und 1,2 % lagen zwischen 0,16 und 0,18 Meter. Daraus folgt ein Anteil von 14,4 % der Werte über 0,1 Meter. Der Maximalwert entstammte D3F10, der zweit- und dritthöchste Wert trat bei D3F10 und D3F7 auf. Die Messdaten aus „D3 vollständig“ wurden folglich als inakkurat beurteilt.

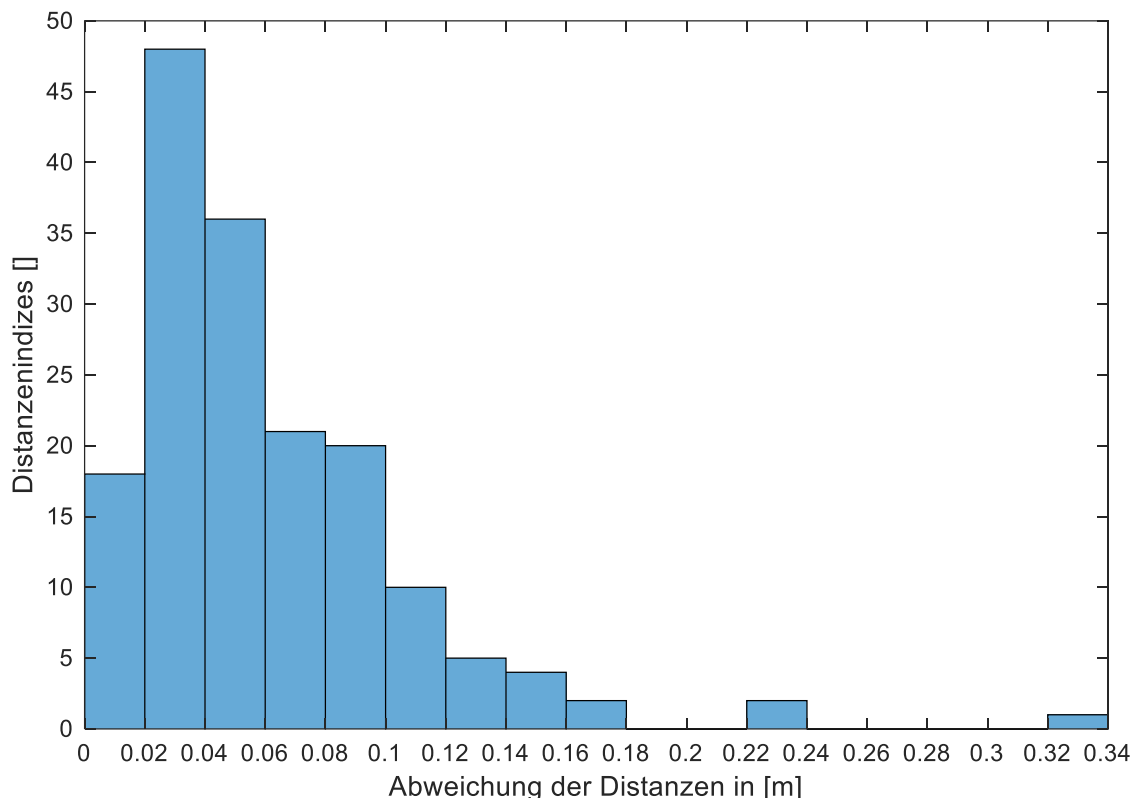


Abb. 55: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)

Die Ermittlung der Accuracy für „D4“ entspricht im Wesentlichen der Ermittlung für den „D3 im Stall“, wie oben angeführt. Die Unterscheidungen werden im Folgenden herausgestellt.

Als Startpunkt in D4 wurde die Position 2 gewählt und als Endpunkt die Position 4. Aufgrund der Datenbereinigung stimmte der gewählte Startpunkt nicht mit dem eigentlichen Beginn überein (Abb. 32).

Nach der Bestimmung der nächsten Nachbarn bezüglich der euklidischen Distanz mittels 1NN-Methode, wurde für D4F6, D4F1 und XSoll jeweils ein nächster Nachbar gelöscht. Außerdem wurde je der erste und letzte nächste Nachbar für D4F4, D4F3 und XSoll bereinigt. Diese Datenbereinigung führte zu einer Reduktion des systematischen Fehlers.

In Abb. 56 sind die Accuracies der 9 berücksichtigten Fahrten dargestellt. F5 wurde für diese und die folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt, da ein erheblicher Teil der Messdaten fehlte. In Summe wurden 110 nächste Nachbarn für die 9 Trajektorien von D4 ausgewertet. Einzig die bereinigten Ergebnisse, aus den oben beschriebenen Prozessen, wurden berücksichtigt. Im Durchschnitt lag die Accuracy bei 0,0878 Meter. Die Standardabweichung lag bei 0,0657 Meter. Der Maximalwert der Accuracy lag bei 0,3510 Meter, der niedrigste Wert bei 0,0099 Meter. Maximal- und Minimalwert lagen somit 0,3411 Meter auseinander. Die Messdaten wurden daher als inakkurat eingestuft.

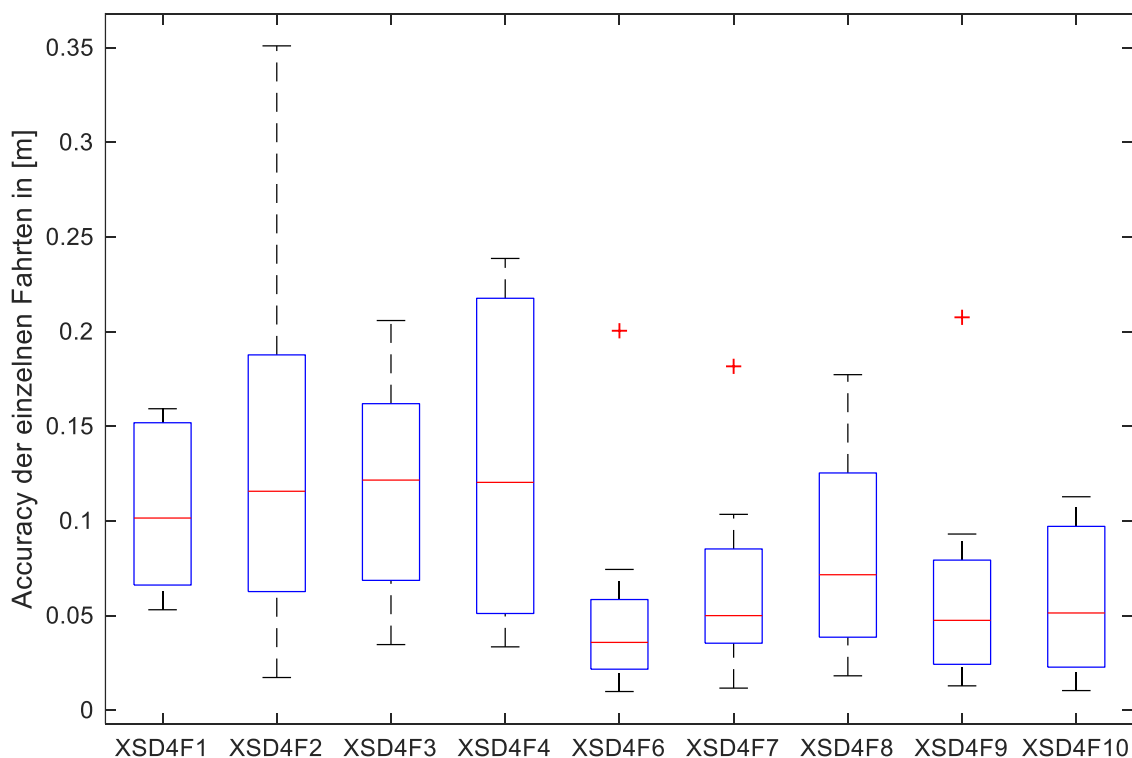


Abb. 56: Die Boxplots zeigen die Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus "D4". Insgesamt bilden 110 nächste Nachbarn die Datengrundlage für die Darstellung. (Friedrich 2017)

Tab. 5 zeigt die Anzahl an Messdaten der Einzelfahrten aus D4. Die Anzahl bezieht sich auf die Messdaten, die durch den Kalman-Filter entauscht und nach dem ersten Datenbereinigungsschritt vorliegen. Vergleicht man die Messdaten aus Tab. 5 mit den Accuracy-Boxplots aus Abb. 56 stellt sich heraus, dass in Folge der 1NN-Methode Fahrten mit größerer Messdatengrundlage als akkurater zu bewerten sind als Fahrten mit kleinerem Messdatenumfang. Dieser Effekt zwischen Accuracies und Messdatengrundlage trat bereits bei „D3 im Stall“ und „D3 vollständig“ auf.

Tab. 5: Anzahl der Messdaten der Einzelfahrten aus D4.

	D3F1	D3F2	D3F3	D3F5	D3F6	D3F7	D3F8	D3F9	D3F10
Anzahl der Messdaten	583	628	646	541	886	880	881	894	903

Der statistische Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Trajektorien wird in Form eines Histogramms deutlich (Abb. 57). Insgesamt wurden 110 nächste Nachbarn für die 9 Trajektorien des D4 berücksichtigt. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 9,1 % der Werte waren kleiner als 0,02 Meter, 18,2 % lagen zwischen 0,02 und 0,04 Meter, 16,4 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 Meter, 14,6 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 Meter, 8,2 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 Meter, 5,5 % der Werte lagen zwischen 0,10 und 0,12 Meter, 9,1 % lagen zwischen 0,12 und 0,14 Meter, 5,5 % lagen zwischen 0,14 und 0,16 Meter, 2,7 % lagen zwischen 0,16 und 0,18 Meter und 9,1 % der Werte lagen über 0,20 Meter. Daraus folgt ein Anteil von 33,6 % der Werte über 0,1 Meter. Die Messdaten aus D4 wurden folglich als inakkurat beurteilt.

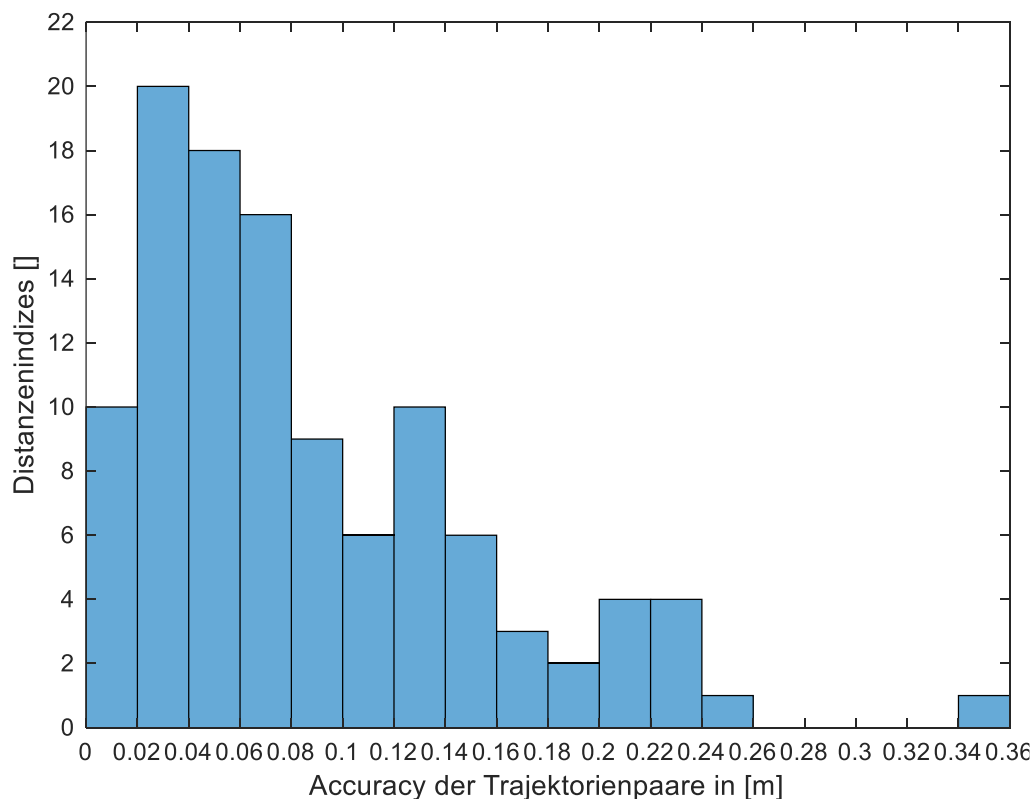


Abb. 57: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Accuracies der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus D4. (Friedrich 2017)

Precision

Die Precision wurde in ähnlichen Schritten wie die Accuracy ermittelt. Die wesentlichen Unterschiede werden im Folgenden nähergebracht.

Nach einer ersten Datenbereinigung wurde die 1NN-Methode angewandt. Für die Messdaten der 9 ausgewählten Einzelfahrten aus dem Durchgang wurden untereinander die nächsten Nachbarn (nearest neighbors) anhand der euklidischen Distanz berechnet. Bei der Ermittlung der Accuracy bezog sich diese Berechnung der Abstände zwischen der Soll-Trajektorie und den Einzelfahrten. Als Beispiel ist in Abb. 58 dargestellt, wie sich die Precision zwischen den Einzelfahrten D3F6 und D3F1 berechnete. Insgesamt wurden für 514 nächste Nachbarn zwischen D3F6 und D3F1 bestimmt. Nur die Messdaten aus der zweistufigen Bereinigung wurden dargestellt. Die Trajektorien der Einzelfahrten D3F6 und D3F1 lagen zwischen 0,0008 Meter und 0,0825 Meter voneinander entfernt. Im Durchschnitt lag die Precision für dieses Trajektorienpaar somit bei 0,0327 Meter. Das Trajektorienpaar war somit präzise.

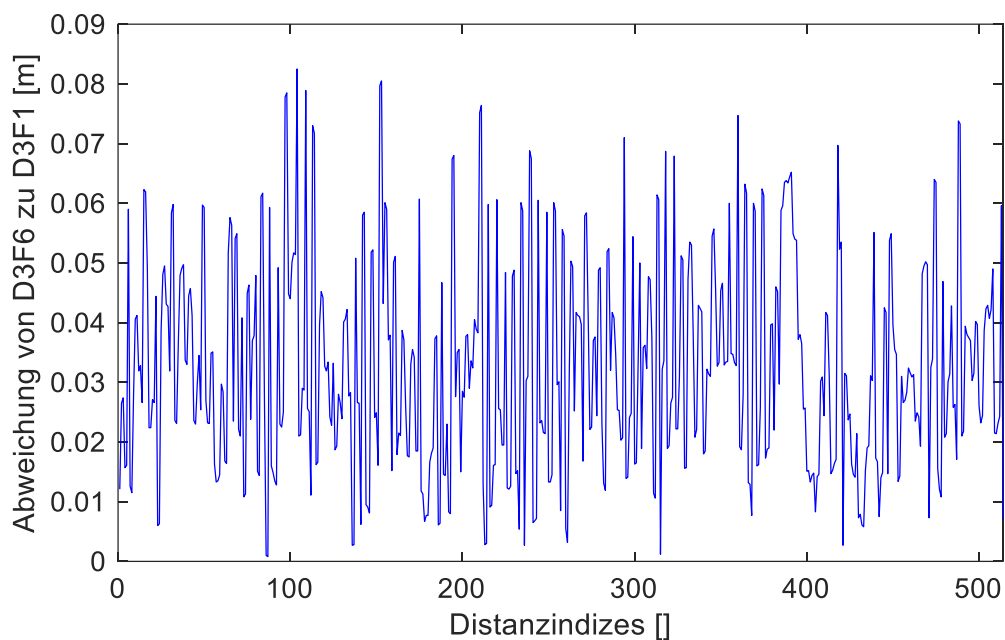


Abb. 58: Die mit Hilfe der 1NN-Methode berechneten Precision für die Einzelfahrten D3F6 und D3F1. Die Precision lag zwischen 0,0008 m und 0,0825 m. (Reger et al. 2022a)

Aus Abb. 59 geht der statistische Zusammenhang zwischen den Precisions der 9 berücksichtigten Trajektorien hervor. Insgesamt 15.584 nächste Nachbarn bildeten die Datengrundlage für das Histogramm. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 16,5 % der Werte lagen unter 0,02 Meter, 32,3 % lagen zwischen 0,02 und 0,04 Meter, 25,3 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 Meter, 17,5 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 Meter, 6,7 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 Meter, 1,3 % lagen zwischen 0,10 und 0,12 Meter, 0,0008 % lagen zwischen 0,12 und 0,14 Meter und 0,00006 % der Werte lagen zwischen 0,14 und 0,16 Meter.

Damit lagen 1,4 % aller Werte über 0,1 Meter. Im Durchschnitt lag die Precision bei 0,0439 Meter. Die Standardabweichung lag bei 0,0238 Meter. Der Maximalwert der Precision lag bei 0,1511 Meter. Der Minimalwert lag bei 0,00001 Meter. Daraus folgt eine maximale Differenz von 0,1510 Meter. Die Messdaten galten damit als präzise.

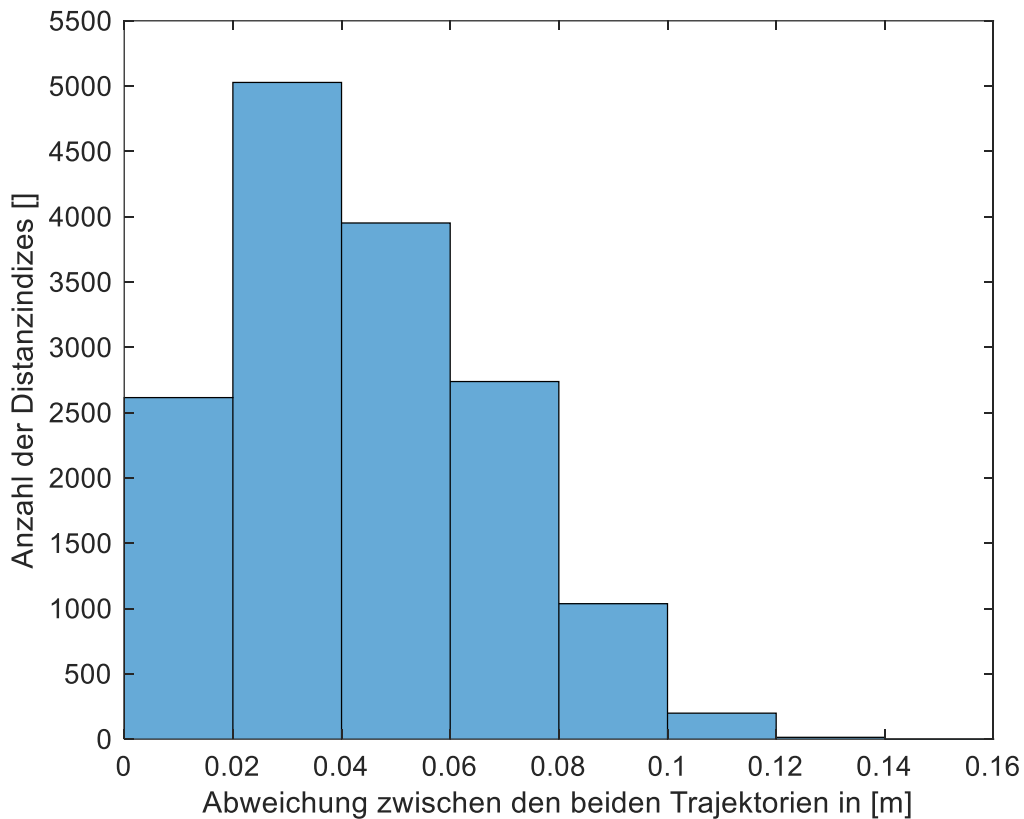


Abb. 59: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 im Stall“. (Reger et al. 2022a)

Die Messdaten der Trajektorien aus „D3 im Stall“ wurden als präzise und akkurat beurteilt, was in der Folge auch eine Konsistenz belegte.

Die Precision für „D3 vollständig“ wurde analog zu „D3 im Stall“ ermittelt. Die Unterscheidungen werden im Folgenden verdeutlicht.

Um den systematischen Fehler zu reduzieren, wurden für die Trajektorienpaare F2F1, F3F1, F6F1, F7F1, F8F1, F9F1, F10F1, F3F2, F2F5, F6F2, F7F2, F8F2, F10F2, F3F5, F3F6, F3F7, F8F3, F9F3, F10F3, F6F5, F7F5, F8F5, F9F5, F10F5, F6F7, F8F6, F9F6, F10F6, F8F7, F9F7, F10F7, F8F9, F10F8, F10F9 zu Beginn Daten bereinigt. Darüber hinaus traten Messlücken für die Trajektorienpaare F8F6, F9F6, F10F6, F3F6, F10F3, F9F3, F8F3, F3F6, F3F1 auf, die beseitigt wurden, um den systematischen Fehler zu vermindern.

Wie bereits beim Vergleich der Trajektorien in „D3 im Stall“ zeigten sich auch in „D3 vollständig“ in den Trajektorien an unterschiedlichen Stellen (Abb. 60). Diese Messdaten

wurden bereinigt. Der „Lenkeinschlag“ aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Räder der Triebachse begünstigte diese Abweichungen in Kurvenfahrten. Die Fahrgenauigkeit an sich kann trotz den Ausschlägen in den Daten sehr hoch sein, da bereits kleine Lenkbefehle an den über der Vorderachse platzierten Scannern verstärkt auftreten. Diese Messdaten wurden ebenfalls bereinigt, vorausgesetzt sie waren von der vorhergehenden Kurvenfahrt beeinflusst. Nächste Nachbarn (nearest neighbors), die möglicherweise falsch zugeordnet wurden, wurden bereinigt, um den systematischen Fehler zu reduzieren. Diese zweistufige Vorbearbeitung und Bereinigung der Messdaten führte zu einer verlässlichen Datengrundlage, um robuste Auswertungsergebnisse zu ermöglichen.

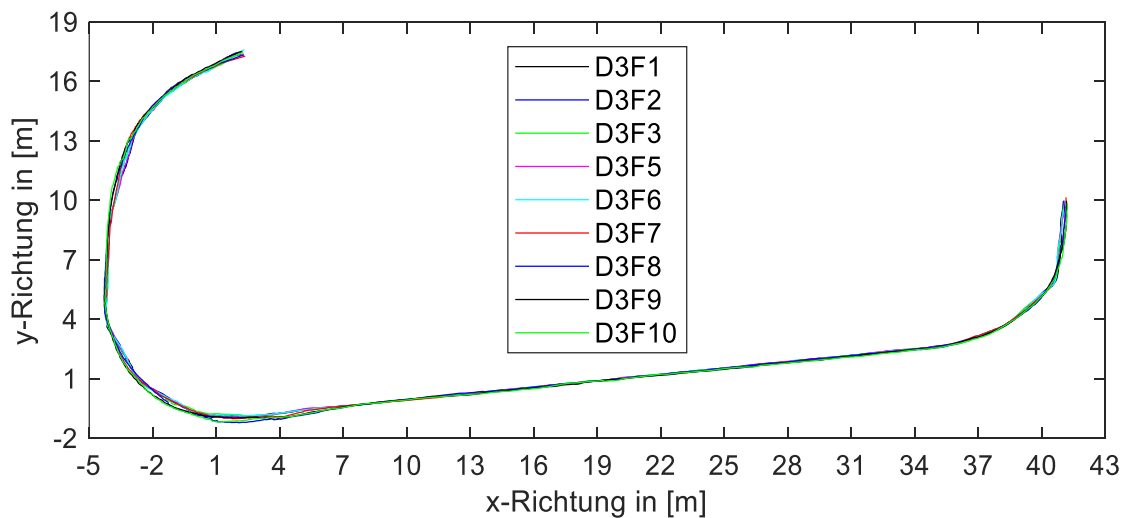


Abb. 60: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)

Aus Abb. 61 geht der statistische Zusammenhang zwischen den Precisions der 9 berücksichtigten Trajektorien hervor. Insgesamt 35.192 nächste Nachbarn bildeten die Datengrundlage für das Histogramm. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 11,1 % der Werte lagen unter 0,02 Meter, 23,1 % lagen zwischen 0,02 und 0,04 Meter, 21 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 Meter, 16,8 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 Meter, 9,1 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 Meter, 4,9 % lagen zwischen 0,10 und 0,12 Meter, 3,1 % lagen zwischen 0,12 und 0,14 Meter, 2,2 % lagen zwischen 0,14 und 0,16 Meter, 1,7 % lagen zwischen 0,16 und 0,18 Meter, 1,6 % lagen zwischen 0,18 und 0,20 Meter, 1,3 % lagen zwischen 0,20 und 0,22 Meter und 4,1 % der Werte über 0,22 Meter. Damit lagen 18,9 % aller Werte über 0,1 Meter. Im Durchschnitt lag die Precision bei 0,0707 Meter. Die Standardabweichung lag bei 0,0588 Meter. Der Maximalwert der Precision lag bei 0,4162 Meter. Der Minimalwert lag bei 0,0001 Meter. Daraus folgte eine maximale Differenz von 0,4161 Meter. Die Messdaten aus „D3 vollständig“ galten damit als unpräzise.

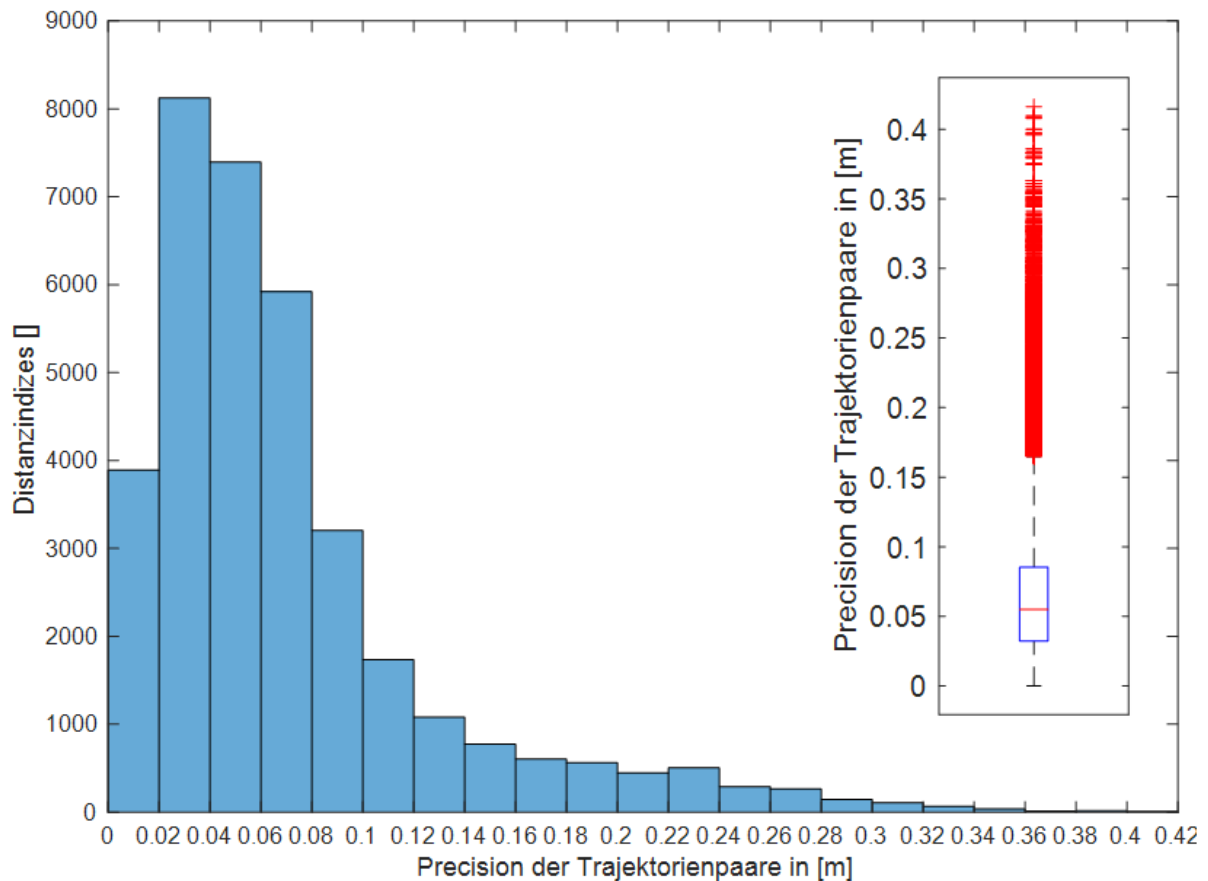


Abb. 61: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus „D3 vollständig“. (Friedrich 2017)

Die Messdaten des „Durchgangs 3 vollständig“ sind als unpräzise und inakkurat somit auch als inkonsistent zu beurteilen.

Die Precision für „D4“ wurde analog zu „D3 im Stall“ ermittelt. Die Unterscheidungen werden im Folgenden verdeutlicht.

Um den systematischen Fehler zu reduzieren, wurden für die Trajektorienpaare F1F3, F1F4, F1F8, F2F3, F4F2, F2F8, F3F6, F3F7, F3F8, F3F9, F3F10, F4F6, F4F7, F4F8, F4F9, F4F10, F8F6, F6F10, F7F8, F8F9, F8F10 und F9F10 zu Beginn Daten bereinigt. Darüber hinaus traten Messlücken für die Trajektorienpaare D4F1, D4F2, D4F3, D4F4, D4F6 und D4F8 auf, die beseitigt wurden, um den systematischen Fehler zu vermindern. Des Weiteren wurden möglicherweise nicht richtig zugeordnete nächsten Nachbarn für die Trajektorienpaare F1F2, F4F1, F2F6, F3F6, F4F6, F8F6, F6F10 und F7F8 aufgrund festgestellter Messlücken bereinigt.

Im Protokoll wurde für einen Teil der Fahrstrecke in D4F9 ein unregelmäßiges Fahrbild beobachtet. Aufgrund dessen wurden im zweiten Datenbereinigungsschritt für die

Trajektorienpaare F1F9, F2F9, F3F9, F4F9, F6F9, F7F9, F8F9 und F9F10 die Messdaten dieses Abschnitts entfernt, um den systematischen Fehler zu reduzieren.

Für einen Teil der Fahrstrecke aus D4F6 und aus D4F9 wurden im Protokoll je zwei Stopps vermerkt. Die Unregelmäßigkeiten wurden als zufällige Fehler eingestuft und konnten daher nicht reduziert werden. Diese Beobachtung zeigte sich in D4 auch bei den Trajektorienpaaren F1F8, F2F8, F3F8, F4F8, F8F6, F7F8, F8F9, F8F10, F1F6, F2F6, F3F6, F4F6, F7F6, F8F6, F6F9 und F6F10 und wurde nicht bereinigt.

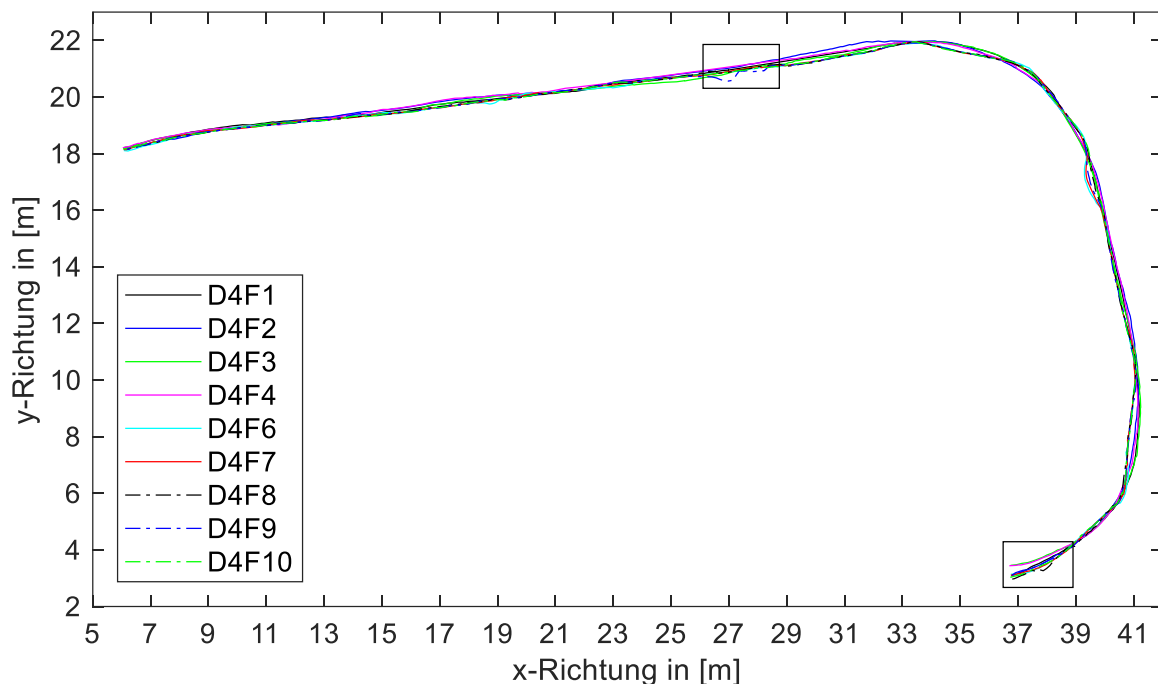


Abb. 62: Plot der 9 berücksichtigten Trajektorien aus D4. (Friedrich 2017)

Aus Abb. 63 geht der statistische Zusammenhang zwischen den Precisions der 9 berücksichtigten Trajektorien hervor. Insgesamt 23.437 nächste Nachbarn bildeten die Datengrundlage für das Histogramm. Es wurden nur zweistufig bereinigte Daten verwendet. 8,3 % der Werte lagen unter 0,02 Meter, 20,0 % lagen zwischen 0,02 und 0,04 Meter, 18,2 % lagen zwischen 0,04 und 0,06 Meter, 15,1 % lagen zwischen 0,06 und 0,08 Meter, 11,1 % lagen zwischen 0,08 und 0,10 Meter, 7,3 % lagen zwischen 0,10 und 0,12 Meter, 5 % lagen zwischen 0,12 und 0,14 Meter, 3,6 % lagen zwischen 0,14 und 0,16 Meter, 2,9 % lagen zwischen 0,16 und 0,18 Meter und 2,2 % der Werte lagen zwischen 0,18 und 0,20 Meter. Insgesamt lagen 27,3 % der Werte über 0,10 Meter, 6,4 % lagen über 0,20 Meter und 1,5 % lagen über 0,3 Meter. Im Durchschnitt lag die Precision bei 0,0820 Meter. Die Standardabweichung lag bei 0,0645 Meter. Der Maximalwert der Precision lag bei 0,4276 Meter. Der Minimalwert lag bei 0,0002 Meter. Daraus folgte eine maximale Differenz von 0,4272 Meter. Die Messdaten aus D4 galten damit als unpräzise.

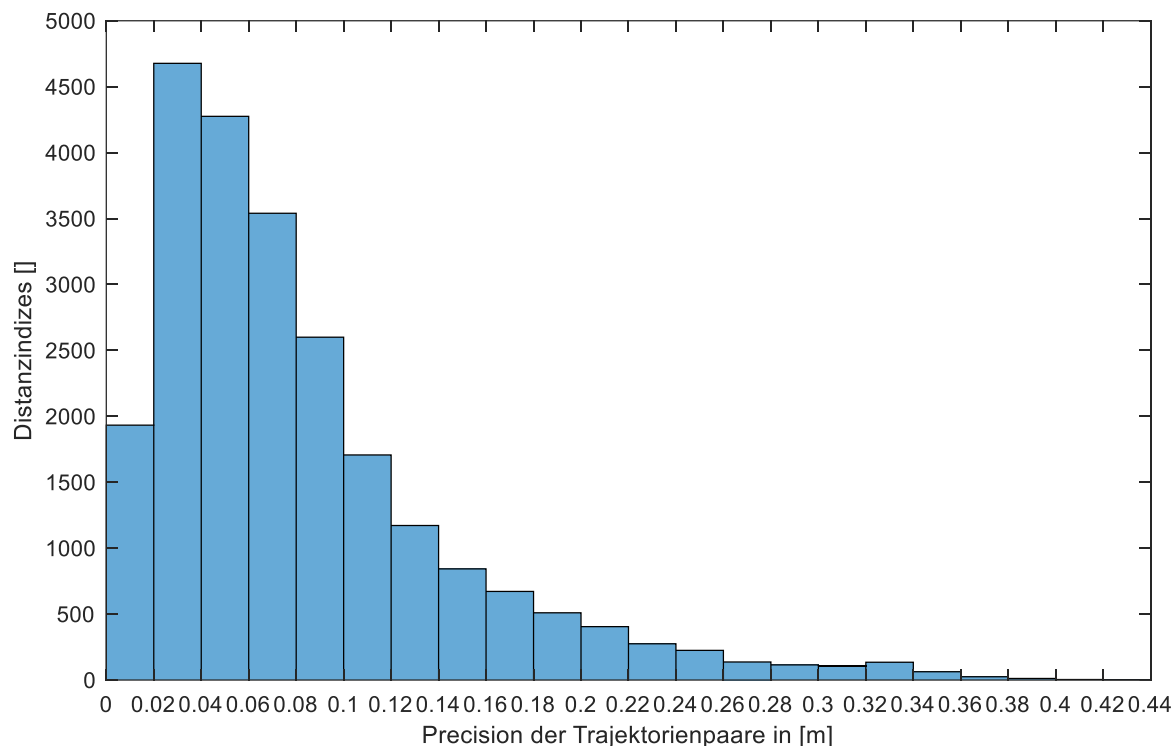


Abb. 63: Das Histogramm zeigt den statistischen Zusammenhang zwischen den Precision der 9 berücksichtigten Einzelfahrten aus D4. (Friedrich 2017)

Die Messdaten des D4 sind als unpräzise und inakkurat somit auch als inkonsistent zu beurteilen.

Zusammenfassung Accuracy, Precision und Konsistenz

In dieser Arbeit wird für Precision und Accuracy eine Toleranzgrenze von 0,05 m angegeben. Diese Toleranzgrenze kann vom Benutzer gewählt werden, sodass für andere Szenarien ein anderer Wert angenommen werden kann. Gemessen an diesem Schwellenwert lässt sich die Navigationsleistung des Fahrzeugs mit einem LiDAR-Scanner wie folgt bewerten:

Im Streckenabschnitt „D3 im Stall“ wird die Navigation als akkurat und präzise und damit konsistent bewertet. Es wurde eine durchschnittliche Abweichung von 0,0487 m (Accuracy) bzw. 0,0439 m (Precision) ermittelt (Abb. 64). Die Standardabweichung betrug 0,0286 m (Accuracy) und 0,0238 m (Precision). Der Maximalwert war 0,1406 m (Accuracy) und 0,1511 m (Precision), der Minimalwert war 0,0047 m (Accuracy) und 0,00001 m (Precision). In „D3 vollständig“ wird die Navigation als ungenau und unpräzise und anschließend als inkonsistent bewertet. Es wurde eine durchschnittliche Abweichung von 0,0608 m (Accuracy) bzw. 0,0707 m (Precision) ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,0450 m (Accuracy) und 0,0588 m (Precision). Der Maximalwert war 0,3337 m (Accuracy) und 0,4162 m (Precision), der Minimalwert war 0,0047 m (Accuracy) und 0,0001 m (Precision). In „D4“ wird die Navigation als ungenau und unpräzise und anschließend als inkonsistent bewertet. Es wurde eine

durchschnittliche Abweichung von 0,0878 m (Accuracy) bzw. 0,0820 m (Precision) ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,0657 m (Accuracy) und 0,0645 m (Precision). Der Maximalwert war 0,3510 m (Accuracy) und 0,4276 m (Precision), der Minimalwert war 0,0099 m (Accuracy) und 0,0002 m (Precision). Die Daten zeigten einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Messdaten und der Accuracy bzw. Precision der Navigation. Es ist zu beobachten, dass die Fahrten mit umfangreicherer Messdatenbasis durch das 1NN-Verfahren als genauer bewertet werden als die Antriebe mit geringerer Messdatenbasis. Diese Beobachtung ist in allen Durchgängen zu machen.

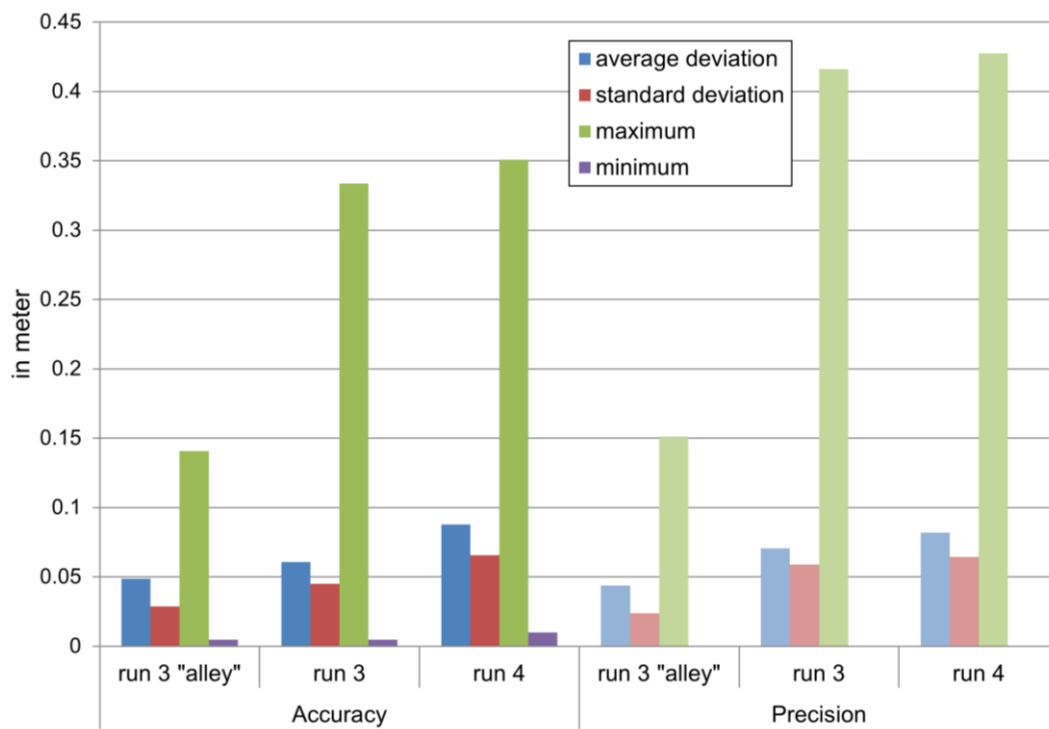


Abb. 64: Das Diagramm zeigt die durchschnittliche Abweichung (average deviation), Standardabweichung (standard deviation), Maximum (maximum) und Minimum (minimum) der Durchgänge „D3 im Stall“ (run 3 „alley“), „D3 vollständig“ (run 3) und „D4“ (run 4), sowohl für Accuracy als auch für Precision. (Reger et al. 2022a)

Messauflösung

Sowohl für „D3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ galt: Die Messauflösung der Tachymeterdaten lag im Zehntel-Millimeterbereich und die der Laser-Positionsdaten im Mikrometerbereich. Die Tachymeterdaten spiegelten die gleiche Situation wieder, wie die Laser-Positionsdaten. Im Vergleich zu den Laser-Positionsdaten leiden die Tachymeterdaten an unzureichender Messauflösung (zu wenige Messdaten). Die Laser-Positionsdaten konnten somit nicht qualitativ anhand der Tachymeterdaten bewertet werden.

Kondition

Sowohl für „D3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ galt: Das Ergebnis des Kalman-Filters für nahe beieinanderliegende Inputs sind nahe beieinanderliegende Outputs. Daraus lässt sich ableiten, dass der Kalman-Filter sehr gut konditioniert war, weil die Ausgangsdaten (Output) stetig von den Eingangsdaten (Input) abhingen.

4.4.2.3 Radar (3)

Die Radar-Messungen verliefen nicht störungsfrei. Die generierte Datengrundlage war daher nicht optimal. Bei einigen Sektoren des Radar-Sensors traten Störungen auf, weshalb bei einigen Fahrten keine Daten aufgezeichnet wurden.

Die Radar-Rohdaten wurden zunächst durch eine Grenzwertfilterung vom Grundrauschen des Radars bereinigt. Alle Messwerte, die unter einem gewissen Schwellwert lagen, wurden weggeschnitten. Zudem kam es aufgrund von Hintergrundabläufen der Software zu weiterem Datenverlust. Die übrigen Messungen waren von guter Qualität.

Die Hardware des Radar-Scanners befand sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Die Mechanik und die Datenübertragung waren jedoch vorläufige Lösungsansätze und begrenzten daher die Aktualisierungsrate der Messungen.

Der Radar-Kartierungsalgorithmus befand sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Die vom Laser live ermittelten Positionsdaten wurden als Referenz genutzt, um die Karte durch Akkumulierung der Sensordaten zu erstellen (Abb. 65). Eine Ermittlung der Position war zu dem Zeitpunkt der Versuche nicht möglich.

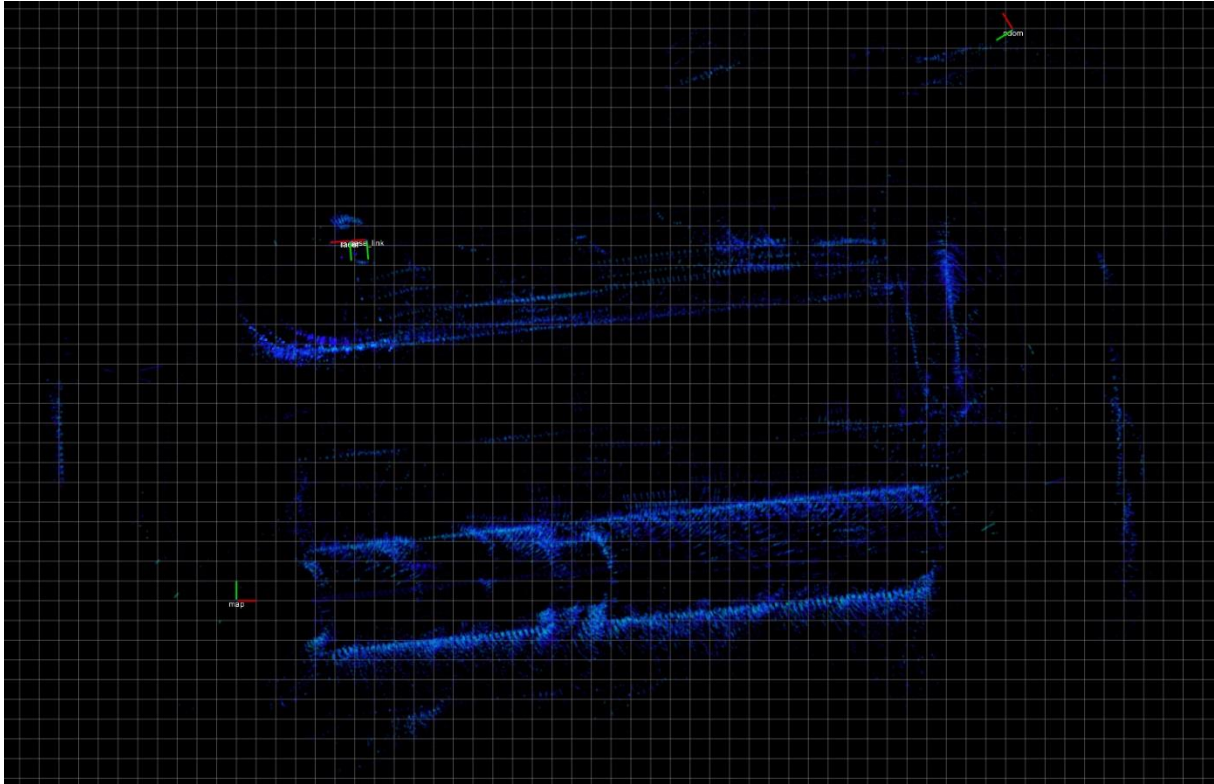


Abb. 65: Die verarbeiteten Messungen des Radarscanners zeigen die Konturen des Milchviehstalles. Deutlich erkennbar ist der Futtertisch mit beiderseitig hoher Reflexion aufgrund der metallenen Aufstellung. Die Fahrrichtung des Roboters war entgegen dem Uhrzeigersinn. (Eigene Darstellung)

Im Gegensatz zur Kartierung auf Basis von Radar-Messdaten, ist die Kartierung anhand von Laser-Scandaten über Jahrzehnte weiterentwickelt worden. Ein „qualitativer Vergleich“ der Radar-Karte mit der Laser-Karte ist an dieser Stelle daher unpassend. Die Radar-Daten wurden nach einem einfachen Bearbeitungsschritt als quasi Rohdaten in die Laser-Karte übernommen (Abb. 66). Hier steht die Entwicklung noch am Anfang.

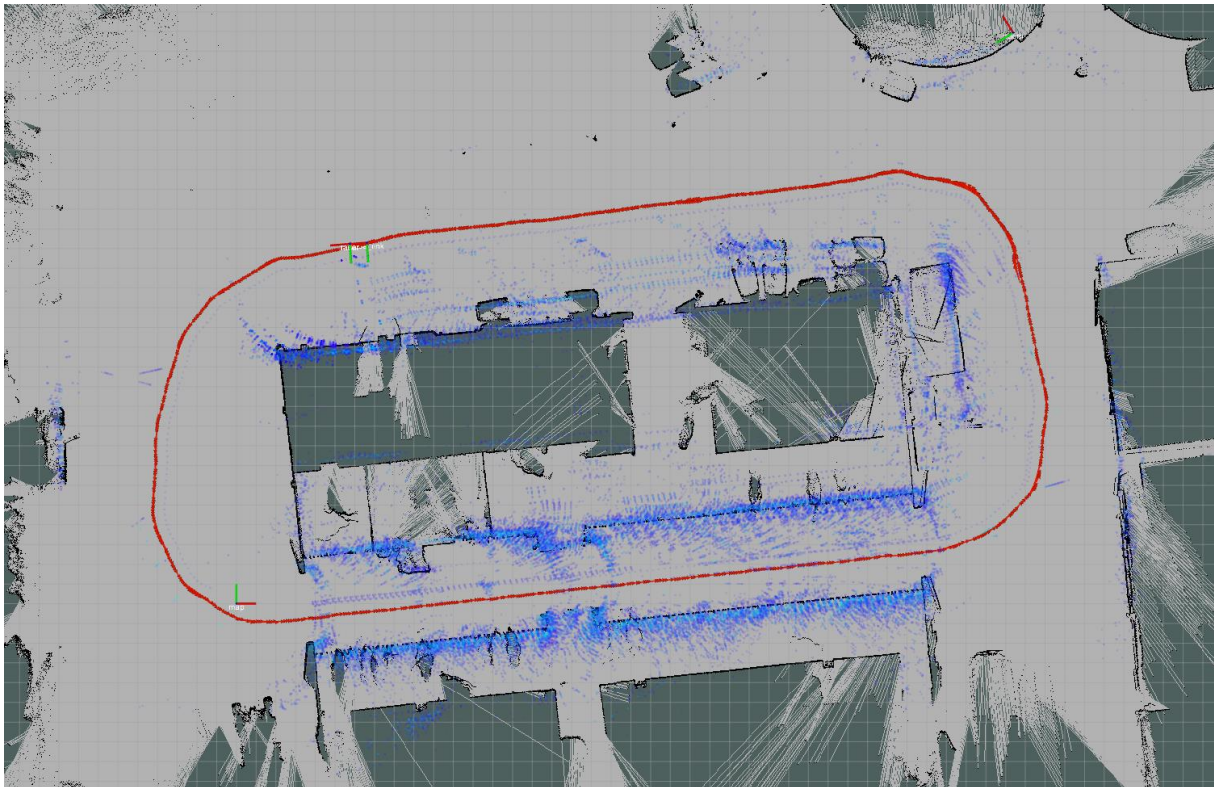


Abb. 66: Die Radar-Daten (blau) wurden in die Laserkarte (grau) eingespeist. Die Übereinstimmung der Stallkonturen ist deutlich erkennbar. Ebenso sind einige fragmentierte Radar-Messungen erkennbar. (Reger et al. 2018)

Die autarke Navigation auf Basis eines Radar-Scanners wird erst in Zukunft funktionieren. Die Kartendaten werden unterschiedliche Eigenschaften im Vergleich zu Laser-Karten aufweisen und in vielen Situationen besser Ergebnisse liefern können. Bestehende SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) -Algorithmen können allerdings nicht ohne Anpassungen verwendet werden.

4.4.3 Versuchsreihe C

In Versuchsreihe C konnten die Erkenntnisse und Entwicklungen aus den vorhergehenden Versuchsreihen so umgesetzt werden, dass der Futtermischwagen erstmals automatisiert gefahren ist.

Das Testfahrzeug absolvierte von elf Versuchsfahrten vier ohne Eingreifen der überwachenden Person in der Fahrzeugkabine.

Als Herausforderung zeigte sich die Größe des FMW im Hinblick auf die baulichen Gegebenheiten im und um den Stall herum. Der Futtertisch bot lediglich wenige Zentimeter seitlichen Freiraum vom Fahrzeug, was die Präzision der Fahrautomatik auf die Probe stellte. Außerdem wirkte sich die Länge des Fahrzeugs in Kombination mit der Hecklenkung stark auf die Wendigkeit aus, was vor allem die Ausfahrt aus dem Stalltor Süd erschwerte. Dort befindet

sich zum Nachbargebäude, dem Jungviehstall, lediglich neun Meter Platz. Bei einer Gesamtlänge des Fahrzeugs von ca. sechs Metern waren die Routenvorgaben genauestens einzuhalten.

Der gesamte Fahrzeugaufbau inklusive des Anbaus der Sensorik war indes ebenfalls nicht ideal gelöst. Die Fahrzeuglänge zusammen mit der Hecklenkung ohne Federung der Karosserie bzw. Niveaueausgleich führte bei Unebenheiten zu teils heftigen Erschütterungen und zu schrägen Fahrzeug- bzw. Sensorausrichtungen. Beide Faktoren beeinträchtigen die Systemleistung der Automatisierung. Die feinteilige Sensorik verkraftet zwar kleiner Einflüsse und Stöße, könnte bei heftigeren Einwirkungen allerdings eine erhöhte Fehlerhaftigkeit mit sich gebracht haben. Da die Navigation mithilfe des 2D-Laser-Scanners umgesetzt wurde, wirkten sich auch Schrägstellungen des Fahrzeugs auf die Navigationsleistung aus. So konnte es sein, dass der zweidimensionale „Messteller“ des Lasers nach oben hin ins Leere bzw. nach unten in den Boden hinein maß und somit mit eingeschränkter Präzision die Lokalisierung bzw. Navigation durchführte. Eine Verbesserung könnte hier durch eine horizontal drehgelagerte Anbringung der Sensorik geschaffen werden.

Bei Kurvenfahrten zeigte sich, dass anstatt einer fließenden Lenkbewegung eher schnelle kleine und abgehakte Lenkbewegungen von der Automatik durchgeführt wurden. Hierfür war wohl ein Zusammentreffen mehrerer Faktoren verantwortlich. Zum einen waren die verwendeten Algorithmen nicht auf das großdimensionierte Versuchsfahrzeug optimiert. Hier müssten langwierige Abstimmungen stattfinden. Außerdem konnte eine gewisse Temperaturempfindlichkeit des Potentiometers und des Winkelgebers nicht ausgeschlossen werden. Während in der Vorbereitungs- und Installationsphase die Temperaturen mit etwa 15 Grad Celsius noch etwas höher waren, waren die Verhältnisse am Versuchstag mit 5 bis 10 Grad Celsius deutlich kühler. Ein weiterer Punkt ist die unpräzise Lenkung per Reibrad. Dieses besitzt ein Schlepptomment sowie Verformungs- und Reibverluste zwischen den Bauteilen. Zudem wurde damit die herkömmliche hydraulische Lenkung betätigt, die im Vergleich zu einer elektrischen Lenkung deutlich unpräziser ist. Die hohen Ansprüche einer hochpräzisen Lenkautomatik waren somit eventuell zu fordernd für die einfache, zähe hydraulische Lenkung mit Reibrad. Da der Lenkbefehl nicht schnell und präzise umgesetzt wurde, regelte die Lenkautomatik viele schnelle Korrekturen ein. Zuletzt spielte auch die bereits angesprochene Montage der Sensorik und die Konstruktion des FMW eine Rolle, da die Messungen Erschütterungen und eventuell nachteiligen Ausrichtungen unterlagen.

Eine weitere Verbesserung brächte eine zunehmende Fusion an Sensorarten mit sich. Das Radar zeigte sich angesichts des keulenförmigen Detektionsbereichs als weniger störanfällig für schiefe Lagen und Erschütterungen im Fahrzeug. Außerdem würde die Verwendung von

Kameratechnik und Bildverarbeitung die Objekterkennung und die allgemeine Wahrnehmung und Klassifizierung der Umwelt erheblich verbessern.

Ebenfalls noch nicht optimal gelöst war die Energieversorgung der beteiligten Komponenten. Der Bordnetz des Testfahrzeugs hat eine Spannung von 80 Volt. Ohne weiteren erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand war die Sensorik, Mikrocontroller und Steuerungseinheit nicht ans Bordnetz anzuschließen. Es wurde für alle 12 Volt Geräte eine separate Energieversorgung durch einen Akku bereitgestellt, sowie für das Reibrad eine extra Batterie verwendet. Die Stromversorgung speziell für den Reibrad-E-Motor war somit nicht ideal, da sich die Leistungsausgabe wesentlich schwächer zeigt als durch eine Netzverbindung bzw. der Speisung aus einem Generatorbetriebenen Bordnetz.

4.4.4 Ableitung eines Sicherheitskonzeptes aus den Versuchen

In diesem Unterkapitel wird ein Sicherheitskonzept exemplarisch dargelegt und die Vorgehensweise erläutert. Einem Sicherheitskonzept muss eine Risikoanalyse vorhergehen, um den erkannten Gefährdungen angemessen begegnen zu können. (Reich 2019)

4.4.4.1 Risikoanalyse: Funktionen der Maschine mit Festlegung der Grenzen

Funktionen:

- Nachschieben des Futters auf dem Futtertisch
- Mischen und Verteilen der Ration auf dem Futtertisch
- Automatische Fahrt von Hofstrecken (zw. Stall, Siloanlagen etc.)

Räumliche Grenzen und Einsatzdauer:

- Einsatz auf dem Betriebsgelände (Hof) im automatischen Betrieb
- Keine Teilnahme an Verkehrsbereichen der StVO (Straßenverkehrs-Ordnung) im automatischen Betrieb
- Einsatzdauer über 10-15 Jahre mit einer täglichen Verfügbarkeit von ca. fünf Stunden

Erwartete Fehlfunktionen und Störungen:

- Geringe Abstände zwischen Fahrzeug und festen Installationen bzw. baulichen Anlagen
- Abstürze der Steuerungseinheit bzw. des CAN-Bus
- Ausfall der Messsensorik aufgrund zahlreicher verschiedener Einflüsse
- Versagen der Bremse
- Objekte außerhalb des Detektionsbereich der Sensorik

- Systemstop aufgrund veränderter Fahrumgebung
- Verschmutzung der Sensorik

Beteiligte Personen und Tiere:

- Betriebsleiter inkl. Familienangehörige
- Mitarbeiter
- Wirtschaftsverkehr (Lieferanten, Tierarzt, Viehhändler, etc.)
- Publikumsverkehr (Wanderer, Sportler, Radfahrer, etc.)
- Haus- und Nutztiere

Besonders von Gefahren durch ein automatisches Fahrzeug betroffen sind, deren Gefahrenbewusstsein beeinträchtigt bzw. nur eingeschränkt ausgeprägt ist. Ältere Personen sind möglicherweise in ihren sensorischen und motorischen Fähigkeiten eingeschränkt, dass Gefahren nicht mehr erkannt werden oder nicht mehr ausreichend darauf reagiert werden kann. Fahrzeuge werden übersehen, nicht gehört oder evtl. nicht mehr rechtzeitig ausgewichen. Dasselbe kann auch auf Kinder übertragen werden, die sich der Gefahren noch nicht umfänglich bewusst sind bzw. diese falsch einschätzen. Solch menschliches, teils unvorhergesehenes Verhalten fordert die Sicherheit eines Fahrzeugs ganz besonders stark. Die Fahrstrecke des Fahrzeugs muss folglich lückenlos erfasst werden können, um Objekte im Wirkungsbereich zuverlässig und rechtzeitig zu erkennen. Die Arbeits- und Transportgeschwindigkeiten sind so zu wählen, dass die Überführung der Maschine in einen sicheren Zustand innerhalb kürzester Zeit zu bewältigen ist.

Vorhersehbare Fehlanwendung:

- Nutzung im Geltungsbereich der StVO
- Blockieren von Fahrstrecken durch Objekte
- Reaktionäres Handeln/Reflexe im unmittelbaren Wirkungsbereich der Maschine

4.4.4.2 Risikoanalyse: Identifizieren von Gefährdungssituationen und Gefährdungseignissen

- Überrollen von Menschen
- Überrollen von Tieren
- Überrollen von Objekten
- Beschädigungen an baulichen Einrichtungen aufgrund unvollständiger Umfeldüberwachung

4.4.4.3 Risikoanalyse: Risikoeinschätzung

Die Risikoeinschätzung ist eine persönliche, subjektive Bestimmung des möglichen Ausmaßes eines Schadens und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit. Dadurch kommt eine individuelle, nicht standardisierte Größe in die Betrachtung, die sich unter Umständen stützen aber selten belegen lässt. Die Methodik zur Risikoeinschätzung ist dabei nicht vorgeschrieben. Sie wird weder in der Maschinenrichtlinie noch in weiteren CE-Richtlinien oder sonstigen Gesetzen und Regelwerken konkret bestimmt. Teils trägt dies zur Verunsicherung bei, teils aber ermöglicht es bei der Konstruktion auf individuelle Fragestellungen einzugehen und die damit verbundenen Sicherheitsanforderungen anzupassen. Es sollten Risikoelemente und Parameter gewählt werden, die der Aufgabenstellung gerecht werden und auf dessen Grundlage effektive Maßnahmen getroffen werden können. (Kring 2020b)

4.4.4.4 Risikobewertung

Die Risikobewertung orientiert sich an der Beurteilung aus der Risikoanalyse und soll beschreiben, ob die vorhandenen Risiken akzeptabel sind bzw. ob die Ziele der Risikominderung erreicht wurden. (Kring 2020b)

4.4.4.5 Risikominderung

Die Risikominderung versucht die Bewertung des Risikos aus den vorhergehenden Schritten aufzugreifen und diese auf verschiedenen Ebenen zu mindern. So werden zunächst konstruktive Lösungen erarbeitet, um die erkannten Gefährdungen zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, werden im Weiteren technische Schutzmaßnahmen ergänzt. Auf das darüber hinaus verbliebene Restrisiko wird der Nutzer mit Hilfe von Kennzeichnungen, wie Warnsymbole und –hinweise, aufmerksam gemacht.

Konstruktive Lösungen:

Konstruktive Lösungen sind das präferierte Mittel, um das Risiko zu mindern. Bereits die Konstruktion der Maschine soll eine größtmögliche Sicherheit bieten. Je besser die Konstruktion, desto gering sind die technischen und somit finanziellen Aufwendungen in der Folge des Projektes.

Im genannten Beispiel wäre eine konstruktive Maßnahme die vollständige Einhausung des Fahrwerks inklusive mechanischem Bumper, um so der Gefahr des Überrollens entgegen zu wirken.

Technische Schutzmaßnahmen:

Alle Risiken, die nicht durch die Auslegung der Maschine beseitigt werden konnten, können in der Folge durch weitere technische Maßnahmen vermindert werden. Dabei wird zunächst die Sicherheitsfunktion festgelegt, beispielweise das Auslösen eines Fahrstopps. Das Sicherheitsniveau aus der Risikomatrix findet des Weiteren Beachtung und hat Einfluss auf die Wahl der geforderten Sicherheitsbauteile. Das anschließende Sicherheitskonzept führt diese Ansprüche zusammen. Welche Schutzeinrichtungen gewählt werden hängt von gewissen Entscheidungsmerkmalen ab. Diese Merkmale treffen die Maschine, z. B. Maschine selbst hat keine Möglichkeit die Bewegung jederzeit zu stoppen, die Umgebung, z. B. Verschmutzung durch Silage oder Staub, und menschliche Eigenschaften, z. B. voraussichtliche Qualifikation des Bedieners.

Die Struktur, Zuverlässigkeit der Komponenten bzw. des Gerätes, die Diagnose zur Fehlererkennung und die Resistenz vor Ausfällen spielen eine große Rolle bei technischen Schutzmaßnahmen. Am Beispiel des Sick Sicherheits-Laser-Scanners OS3 (OutdoorScan3) sei die mehrkanalige Absicherung (Redundanz) genannt, die bei dem Ausfall eines Kanales umgehend einen anderen wählt. Jede Redundanzebene reduziert die Ausfallwahrscheinlichkeit erheblich. Im Falle des OS3 liegt die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit bei $PFH_D = 8 * 10^{-8}$, was den Eintritt eines gefahrbringenden Ausfalls je Stunde beschreibt. Auf eine Nutzungsdauer des Scanners von 20 Jahren umgerechnet liegt die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ausfalls bei ca. 0,14 %. Im November 2018 wurde der OS3 von SICK als weltweit erster nach IEC62998 zertifizierter Sicherheits-Laser-Scanner für den Einsatz in Außenanwendungen präsentiert (Jendro 2018). Eine weitere technische Schutzmaßnahme ist eine selbsttätige Bremse, die der Maschine ermöglicht auch bei einem Systemausfall zu Stoppen und in einen sicheren Zustand überzugehen.

Zum Konzept der technischen Schutzmaßnahmen gehört auch eine Logik bzw. Steuer-Regel-Einheit. Am Beispiel des Futtermischwagens kann dies eine Flexi Soft-Steuerung von SICK sein, inklusive des Enhanced Function Interface (EFI). Diese Logikeinheit ist via Software programmierbar und nach EN 62061 zertifiziert und nach EN ISO 13849. Die Ausfallwahrscheinlichkeit liegt hier bei $PFH_D = 1,6 * 10^{-9}$ (Modell: FX3-CPV1), ebenfalls auf eine angegebene Lebensdauer von 20 Jahren. Mithilfe des EFI wird die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten gewährleistet.

Nach dem Erfassen der Gefahr (Sensorik) und der Wahl der idealen Handlungsoption (Logik), setzt die Aktorik die notwendigen Maßnahmen um. Ein Frequenzumrichter mit Fail Safe-Option beispielsweise kann einen sicheren Eingang zum Auslösen des Safe-Torque-Off sein, der sofortigen Unterbrechung der Energieversorgung des Antriebs.

Benutzerinformation

Die Risikominderung durch Benutzerinformation ist eine Schutzmaßnahme, „[...] die aus Kommunikationselementen besteht (z.B. Texte, Wörter, Zeichen, Signale, Symbole, Diagramme), die einzeln oder gemeinsam verwendet werden, um Informationen an den Benutzer weiterzugeben“. Die Benutzerinformation ist ein letztes Mittel, um das verbliebene Risiko zu mindern und dem Anwender zu ermöglichen sich vorweg optimal zu organisieren und zu qualifizieren. Jedes Risiko, das durch eine inhärent sichere Konstruktion oder durch technische Schutzmaßnahmen nicht gelöst werden konnte, findet Eingang in die Benutzerinformation. Die Restrisiken werden dabei in abgestufter Weise nach der Höhe der verbliebenden Gefahr dargestellt. (N.N. 2020)

4.4.4.6 Verifizieren der Sicherheitsfunktion

Funktionale Sicherheit:

Sind Maschinen derartig komplex, dass deren Sicherheit nicht mehr auf einfachem Wege ausreichend getestet werden kann, dann kommt die funktionale Sicherheit zum Einsatz. Wenn nicht alle Funktionen und Eventualitäten des Produktes getestet und deren Folgen nachvollzogen werden können, so sind alle Prinzipien der funktionalen Sicherheit zu befolgen, um trotzdem ein sicheres Produkt zu erhalten. (Lange 2020)

In die Beurteilung der funktionalen Sicherheit gehen die mittlere Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls pro Stunde (PFH_D), das Performance Level (PL) und das Sicherheitsintegritätslevel (SIL) ein. In Tab. 6 sind die Komponenten der funktionalen Sicherheit am Beispiel des Futtermischwagens dargestellt.

Tab. 6: Die Kennzahlen der funktionalen Sicherheit am Beispiel des Futtermischwagens. (Reich 2019)

	outdoorScan 3	Flexi Soft
PHD _D	$8 * 10^{-8}$ (ISO 23849)	$1,69 * 10^{-9}$ (EN ISO 13849)
PL	PLd (ISO 13849)	PLe (EN ISO 13849)
SIL	SIL 2 (IEC 61508)	SIL 3 (IEC 61508)
	SILCL 2 (EN 62061)	SILCL 3 (EN 62061)

5. Diskussion

5.1 Funktionskonzept

Die Arbeitszeiteinsparung durch die automatisierte Futtevorlage ist vorhanden, fällt im Vergleich zu einer Vollautomatisierung jedoch geringer aus. Bei markterhältlichen AFS ist die Anbindung von Futtevorrratsbehältern über Förderbänder möglich, die eine automatisierte Rationserstellung ermöglichen. Das schafft zusätzliche Zeitersparnisse. Nachteil ist dabei jedoch eine mehr oder weniger schnelle Nacherwärmung der Silage und damit eine Verschlechterung der Futterqualität. Durch die Einbindung des Landwirtes bei der Rationszusammenstellung bei der automatisierten Futtevorlage, kann dieser die Futterqualität überwachen und sicherstellen. Andere Hersteller versuchen zunehmend die ganze Fütterungskette zu automatisieren und so das Problem der Nacherwärmung zu vermeiden und gleichzeitig den Landwirt nahezu vollständig von den Arbeiten in der Fütterung zu entlasten. Bislang konnten die Hersteller ihre Systeme nicht im Markt einführen. Lediglich auf wenigen speziellen Testbetrieben laufen derartige AFS, beispielsweise von der Firma Strautmann oder Schuitemaker. Als Hemmnis kann die automatisierte Futterentnahme identifiziert werden, da die Sicherheitsanforderungen dazu sehr hoch sind. So ist in der Regel ein zugangsgesicherter abgeschirmter Bereich um die Silos erforderlich, was das AFS zu keinem Produkt sondern einem Projekt werden lässt und so die Kosten dafür in die Höhe treibt. Darüber hinaus liegt die Prüfung der Futterqualität weiterhin beim Landwirt. Bisher ist eine umfassende automatisierte Beprobung der Silage technisch nicht gelöst, auf Basis derer das System selbstständig Entnahmestellen im Silo definieren könnte. Der Landwirt muss so weiterhin vorsorglich das Silo von schlechten Futternestern befreien, bevor das AFS die Silage entnimmt. Das AFS von Siloking geht einen Schritt nach dem anderen und versucht zunächst eine freie Navigation umzusetzen und im Markt zu etablieren.

Die automatisierte Futtevorlage ermöglicht die Erschließung neuer Potentiale in der Tierhaltung. Das mehrmalige Ausdosieren des Futters wirkt sich positiv auf die Verdauung der Kühe, das Herden- und Rangfolgeverhalten, die Menge an Futterresten und die Futteraufnahme der Kühe aus. Bei der verbreiteten konventionellen Fütterung wird zu den Melkzeiten morgens und abends eine jeweils große Menge Futter vorgelegt, um die Futteraufnahme in den Zwischenzeiten von acht bis zwölf Stunden abzudecken. Da bereits vielfach automatische Melksysteme zum Einsatz kommen, löst sich der Tagesablauf der Tiere mehr und mehr von den Vorgaben durch den Menschen. Der logische nächste Schritt ist das freie tierindividuelle Futteraufnahmeverhalten. Die mehrmalige Vorlage des Futters macht es allen Tieren, unabhängig vom Rang, möglich frisches Futter aufzunehmen. Das wirkt sich

positiv auf die Futtermenge und in der Folge auf die Milchleistung aus. Alle Tiere finden so ideale Bedingungen für eine hohe Leistung und Gesundheit vor.

Am Markt erhältliche AFS sind an Leitlinien/-schienen gebunden und meist an Schienen befestigt. Wenige der AFS sind auf einem eigenen Fahrwerk mobil und eine freie Navigation wird derzeit von keinem Hersteller angeboten. Diese erforderliche Infrastruktur bedeutet zunächst hohe Investitionen und in der Folge die Limitierung auf ein spezifisches Layout. Bestandsgebäude können nicht einfach mit dieser Technik mitversorgt werden, da oftmals die Infrastruktur fehlt, die Wege zu lang sind, die Wege durch kritische Bereiche (öffentliche Straßen) limitiert werden und keine manuelle Steuerung der Maschine möglich ist. Die freie Navigation des AFS von Siloking ermöglicht die Adaptierung des Systems an unterschiedliche Stalllayouts und das beliebig oft. So behält das System einen Wiederverkaufswert, da sich gebrauchte Systeme wiederholt anlernen lassen. Weiterhin deckt die Maschine auch eine rein manuelle Mechanisierung ab, da sie sich manuell, wie ein Standard-Futtermischwagen, bedienen lässt und so nicht automatisierte Betriebsflächen mit bewirtschaften kann.

Viele landwirtschaftliche Betriebe erzeugen mittlerweile Strom aus Bioenergie bzw. Sonnen- und Windenergie. Die erneuerbaren Energien sind dabei auf die Subventionierung der Vergütungen am Energiemarkt angewiesen, um wirtschaftlich rentabel zu sein. Reduzieren sich oder fallen Subventionen weg, ist meist die Eigennutzung des Stromes sinnvoll. Die jüngsten Weltpolitischen Veränderungen (Energie-Krise, Ukraine-Krieg) verstärken die Entwicklungen und die Nutzung von erneuerbaren Energien und der Eigenverbrauch selbsterzeugten Stroms wird wirtschaftlich immer sinnvoller. In diesem Fall überwiegen die Vorteile elektrischer Maschinen noch deutlicher gegenüber Dieselbetrieben. Mehr noch bieten solche „fahrenden Stromspeicher“ auch Potentiale zur intelligenten Energiespeicherung bzw. -verteilung (Smart Grid).

Umfrage zu automatischen Fütterungssystemen

Um automatische Fütterungssysteme ganzheitlich beleuchten und bewerten zu können, wurden Experten aus verschiedenen Bereichen interviewt und zur Entwicklung des Fragebogens herangezogen. Die Experten waren in den Bereichen der praktischen Landwirtschaft, der landwirtschaftlichen Organisationen und Verbände, der AFS-Hersteller und der Wissenschaft tätig. Die unterschiedlichen Sichtweisen und Hintergründe der Experten führten aber nicht dazu, dass sich die Aussagen stark voneinander unterschieden. Als die drei Hauptthemen, die sich die Experten inhaltlich teilten, kristallisierten sich die Arbeitszeit, die Sicherheit und die Wartung heraus.

Die Aussagekraft einer Umfrage bestimmt sich aus der Populationsgröße einer Zielgruppe, dem angestrebten Konfidenzniveau, der tatsächlichen Stichprobengröße und daraus folgend der Fehlerspanne. So konnte eine Fehlerspanne von 15 % erreicht werden, bei einer Stichprobengröße von $n=49$, einem Konfidenzniveau von 95 % und einer Populationsgröße von 136.100. Das Konfidenzniveau entspricht einem guten Standard. Die Fehlerspanne liegt jedoch in einem erhöhten Level und mindert somit die Aussagekraft der Umfrageergebnisse.

Zur korrekten Beurteilung der Antworten aus dem Fragebogen ist die Analyse der Teilnehmer wichtig. Durch die Verbreitungskanäle konnten vorrangig junge Teilnehmer unter 35 Jahren gewonnen werden, die zum Großteil Betriebsleiter, Hofnachfolger und Mitunternehmer waren. Auf den überwiegend konventionell wirtschaftenden Milchviehbetrieben waren im Schnitt zwei Familienmitglieder plus zwei Angestellte tätig. Die Zielgruppe entsprach daher im Wesentlichen Entscheidungsträgern auf süddeutschen Familienbetrieben, einer potentiellen Zielgruppe für automatische Fütterungssysteme. In Deutschland wirtschaftet im Schnitt jeder zehnte Betrieb ökologisch. Mit ca. 25 % war die ökologische Landwirtschaft in der Umfrage stark vertreten. Ein automatisches Fütterungssystem ist somit auch im ökologischen Landbau ein interessantes Thema. Eine geographische Unterteilung auf Landkreis- oder Bezirksebene war leider nicht möglich, da keine Fragestellung dazu vorgesehen wurde. In einer künftigen Befragung wäre dies eine sinnvolle Ergänzung.

Die Auswertung der Fragebögen legte einige Präferenzen der Befragten offen. Die eindeutigste Aussage war, dass das automatische Fütterungssystem auch die Möglichkeit bieten soll, manuell bedient zu werden. Diese Aussage lässt eine Einschätzung der Technik durch die Anwender erkennen, die eine gewisse Skepsis über die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Maschine beinhaltet. Das zeigte sich auch in der hohen Priorisierung der Zuverlässigkeit eines automatischen Fütterungssystems. Bzw. existiert eine Ungewissheit darüber, was der Notfall-Plan beim Ausfall des Systems ist und wie der Landwirt reagieren kann. Vergleichbar ist die Problematik bei automatischen Melksystemen. Auch hier sind eine hohe Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit der Maschine Voraussetzung, tendenziell noch höher als bei einer automatischen Fütterung. Der Landwirt kann hier keine „Notfallausrüstung“ in Form eines Melkstandes vorhalten, sondern ist darauf angewiesen, dass Störungen schnell behoben werden. Das automatische Melksysteme sich nun schon seit Jahren etabliert haben liegt allen voran daran, dass früh die Wichtigkeit eines schnellen und zuverlässigen Service erkannt wurde. Melksysteme werden in der Regel nur mit Wartungsverträgen verkauft, da diese essenziell für den Erfolg sind. Ähnlich wird es sich bei den automatischen Fütterungssystemen verhalten müssen. Um die ersten, möglicherweise fehleranfälligeren Systemgenerationen am Laufen zu halten und das Vertrauen in der Praxis aufzubauen, ist ein guter Service durch den Hersteller essenziell. Nichtsdestotrotz bittet sich im Falle des AFS von

Siloking eine Rückfallebene bzw. Sicherheit durch die Möglichkeit der manuellen Bedienbarkeit. Solange nur das System für den Automatikmodus ausfällt, kann das Fahrzeug weiterhin als konventioneller Futtermischwagen verwendet werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Befragten war die Wahrung der hohen Futterqualität im Fütterungsprozess. Eine Zwischenlagerung des Futters wurde daher überwiegend abgelehnt, bzw. auf ein maximales sinnvolles Maß von einem Tag beschränkt. Als weiterer Vorteil wurde die Kombination von Misch- und Transportwagen gesehen, d. h. eine Abweichung von stationären Mischern. Bei der Energieversorgung der Maschine sind mehr als die Hälfte der Teilnehmer von einer akkubetriebenen Variante überzeugt. Der Nutzen automatischer Fütterungssysteme ist den Teilnehmern offensichtlich klar bewusst. Das zeigte die zunehmende Zahlungsbereitschaft abhängig von der zunehmenden Automatisierungsstufe eines Systems. Der Tausch „höherer Kaufpreis“ gegen „reduzierter Arbeitsaufwand“ wird klar als Verbesserung gesehen.

Die technische Zuverlässigkeit des Fütterungssystems stand deutlich im Vordergrund. Zwar wurden auch Sicherheitsbedenken für Mensch und Tier geäußert, diese waren jedoch eher als unerschwerlich zu bewerten. Eine automatisierte Maschine scheint auf den ersten Blick selbstbestimmt Entscheidungen zu treffen und unberechenbar zu sein. Gegenteiliges ist jedoch der Fall. Die Automatisierung derartiger Prozess gelingt eben nur dann, wenn geplante und wiederkehrende Routinen möglich sind. Es ist somit auch oft der fehlende Umgang bzw. die fehlende Erfahrung mit automatisierten Fahrzeugen. Die „Verhaltensweise“ eines solchen automatisierten Fahrzeugs kennen zu lernen und sich daran zu gewöhnen, ist eine essenziell Komponente für den Erfolg und die menschliche Akzeptanz dieser Maschinen.

5.2 Risikobeurteilung

Zentraler Punkt für die Sicherheit einer Maschine ist eine durchgeführte Risikobeurteilung. Damit belegt der Hersteller bzw. Inverkehrbringer einer Maschine, dass er alle möglichen Maßnahmen ergriffen hat, um die von der Maschine ausgehenden Gefährdungen auf ein akzeptables Minimum zu reduzieren. Je nach Anwendung oder Branche können sich die Gefährdungen stark voneinander unterscheiden. Folglich sind spezifische Standards entstanden, wie z. B. die ISO 26262 für die Automobilbranche. Darin werden typische Anwendungsfälle abgedeckt, wie das automatisierte bzw. autonome Fahren. In Teilen kann diese Norm auch für ein automatisches Fütterungssystem adaptiert werden. Jedoch sind erheblich Unterschiede der Einsatzszenarien vorhanden, weshalb eine alleinige Betrachtung der ISO 26262 nicht ausreicht. So sollte bedacht sein, dass sich ein autonomes KFZ an den Regeln der Straßenverkehrsordnung orientiert und diese einhalten soll. Ein landwirtschaftlicher Betrieb kann sowohl Flächen des öffentlichen Straßenverkehrs beinhalten als auch Privatflächen die nicht immer klar voneinander zu unterscheiden sind. In der Lagerlogistik arbeiten automatisierte Transportfahrzeuge ausschließlich auf gut sichtbar

markierten, definierten Wegen mit geschultem Personal in einem zutrittsbeschränkten Bereich. Auf einem landwirtschaftlichen Hof können möglicherweise aufgrund der Bodenbeschaffenheit keine Markierungen vorgenommen werden und ohne geschlossenes Hoftor mit Umzäunung können auch betriebsfremde Personen auf die Hofflächen gelangen. Für das Szenario eines automatisierten selbstfahrenden Fütterungssystems gibt es bislang keine spezifizierten Anforderungen bzw. Normen. Für eine spätere Markteinführung ist die Zusammenarbeit mit unabhängigen Prüfeinrichtungen (wie z. B. Zertifizierungsstellen) sowie mit der landwirtschaftlichen Sozialversicherung dringend zu empfehlen.

5.3 Elektrifizierung

Mit der Truckline stellte Siloking auf der EuroTier 2016 erstmals einen vollelektrischen Futtermischwagen vor und ist damit der erste Hersteller am Markt. Der Einsatz der Maschine in der Innenwirtschaft bietet dabei viele Vorteile. Zunächst ist eine Ladeinfrastruktur auf den Höfen vorhanden bzw. kann leicht nachgerüstet werden. Darüber hinaus sind die Fütterungszeiten auf landwirtschaftlichen Betrieben regelmäßig und planbar, was das Lade- und Entlademanagement stark vereinfacht und überhaupt möglich macht. Das gewählte Akkupaket ermöglicht eine zusammenhängende Belastungsphase von mindestens 90 Minuten. Damit lassen sich die Fütterungsroutinen auf kleinen und mittleren Betrieben in der Regel bewältigen. Ist eine höhere Verfügbarkeit der Maschine erforderlich kann eine größere Batterieeinheit gewählt werden. Die Wartung der Maschine beschränkt sich auf das Anschließen des Stromes und dem Anstecken eines Schlauches zum automatischen Nachfüllen von destilliertem Wasser in die Batteriekammern.

Bislang kritisch gesehen werden die Witterungsbeständigkeit und die Lebensdauer der Akkueinheit. Vielfach existieren die Befürchtungen, dass sich tiefe Temperaturen negativ auf die Leistungsfähigkeit des Akkupaketes auswirken. In eigenen Testreihen konnte Siloking die Robustheit gegenüber der Kälte darstellen. Die Fütterungsroutine war zu keiner Zeit beeinträchtigt, andererseits kann ein gewisser Einfluss nicht ausgeschlossen werden. Eine Minutengenaue Laufzeit kann das System nicht bieten. Die Lebensdauer der Akkueinheit kann anhand der Ladezyklen hingegen recht genau bestimmt werden. Die Lebensdauer der Akkueinheit wird mit 1600 vollen Ladezyklen angegeben. Nach diesen 1600 Ladezyklen ist die Batterie jedoch nicht defekt. Die Lebensdauer richtet sich dabei nach der nutzbaren Kapazität des Akkus. Ist zu Beginn die Kapazität eines Akkus zu nahezu 100 % nutzbar, so verliert er in Folge von Ladungen ein Stück seiner nutzbaren Kapazität. Nach 1600 Ladezyklen stehen somit nur noch knapp 60 % der maximalen ursprünglichen Kapazität zur Verfügung. Es empfiehlt sich daher nicht, die Akkulaufzeit der Maschine nur knapp über den erforderlichen Dauern der Fütterungsroutine zu bemessen. Andernfalls kann nach einiger Zeit die nutzbare Kapazität nicht mehr zur Arbeitserledigung reichen. Ausgehend von einer Ladung pro Tag, bei

täglicher Nutzung 365 Tage im Jahr reicht das Akkupaket ca. 4,5 Jahre. Danach ist ein Tausch nötig, der gegenwärtig (Stand 2021) bis ca. 5.000 € kostet. Bei vielen Anbietern, auch aus dem Bereich der Automobilität, werden Batterieleihen angeboten. Das verringert die Kosten beim Nutzer und die gebrauchten Batterien finden eine weitere Nutzung in anderer Verwendung oder werden aufbereitet.

5.4 Versuche

Die fahrerlose Mobilität verspricht in vielerlei Hinsicht großes Potenzial. Vom individuellen Wunsch der komfortablen Mobilität des Einzelnen über die Wirtschaft hin zur Umwelt. Bereits in den 1970ern wurden fahrerlose Fahrzeuge in der Kommissionierung und Lagerlogistik eingesetzt. Diese Systeme waren aus Sicherheitsgründen in abgeriegelten Bereichen oder nur unter geschultem Personal unterwegs. Mit dem Schritt zum autonomen Fahren im Automobilbereich nimmt die Technik künftig im öffentlichen Straßenverkehr teil. Ähnlich verhält es sich auf landwirtschaftlichen Betrieben, die sehr heterogen in ihrer Struktur sind. Auf manchen Hofflächen gilt die StVO, andere Teile sind ohne Zutrittsbeschränkung und deshalb auch von betriebsfremden Personen betretbar. Dass Landmaschinenhersteller trotz dieser weitreichenden Gefahrenpotentiale dennoch vielfach an frei navigierenden, fahrerlosen Fütterungssystemen arbeiten, unterstreicht das Potential automatisierter/autonomer Maschinen.

Die Entwicklung robuster Spurführungssysteme und eines ausgeklügelten Sicherheitskonzeptes bildet die essenzielle Grundlage für automatische Fütterungssysteme, nicht beschränkt auf den landwirtschaftlichen Bereich. Der anwendungsorientierte Ansatz des Projektes wurde mit Erstellung des Lasten- und Pflichtenheftes umgesetzt. Aus dem Anforderungsprofil des Systems konnten potenzielle Technologien abgeleitet werden, die anschließend in qualitativen Versuchsreihen auf ihre Eignung hin geprüft wurden. Die Ergebnisse dazu wurden dokumentiert und kritisch aufgearbeitet.

5.4.1 Versuchsreihe A

In dem Vorversuch wurden die recherchierten Technologien auf ihre Eignung für den Einsatz zur Navigation im Indoor- und Outdoor-Bereich geprüft. Auf dem statischen Prüfstand mussten der Laser-Scanner und der Radar-Sensor Objekte unter wechselnden Bedingungen detektieren.

Die drei Objekte Metallplatte, Holzplatte und Radar-Reflektor wurden vom Laser-Scanner in allen geprüften Distanzen von einem bis Zwölf Meter ohne Probleme detektiert. Der Einfluss von Fremdlicht konnte nahezu ausgeschlossen werden, da der Scanner eine Lichtunempfindlichkeit von bis zu 40.000 Lux besitzt und die Versuche in einer geschlossenen

Halle durchgeführt wurden. Für die spätere Anwendung wäre jedoch entscheidend, dass der Laser-Scanner auch unter sonnigen Bedingungen oder bei starken Schlaglichtern, z. B. an Ein- und Ausfahrten, funktioniert. Bei künftigen Tests sollten diese Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Die Beschaffenheit der Objekte konnte ebenfalls nahezu vernachlässigt werden, da keine absorbierenden Oberflächen, Materialien, Strukturen oder komplizierte Formen vorlagen. Der künstlich erzeugte Sprühnebel indes wirkte sich massiv auf die Detektion aus, trotz eines integrierten Partikel- und Regenfilter beim Laser-Scanner. Bei einem Nebelvorhang drangen vereinzelt Laser-Strahlen hindurch und detektierten das dahinterliegende Objekt. Ab zwei künstlichen Nebelvorhängen wurde nur noch eine fluktuierende Wand aus Messpunkten dargestellt.

Der künstlich erzeugte Sprühnebel wies einen sehr geringen volumetrischen Durchmesser der Wassertropfen auf. Die feine Zerstäubung durch die Pflanzenschutzdüsen ist daher nicht eins zu eins auf die Praxis übertragbar. Das künstliche Tröpfchen Spektrum ist in der Natur nur unter äußerst speziellen Umständen möglich und deshalb wohl kaum in der Realität anzutreffen. Es ist davon auszugehen, dass eine solche Extremsituation die integrierten Partikel- und Nebelfilter überfordert hat. In den folgenden Versuchen wurden andere Düsen verwendet, die Starkregen simulierten und damit der Realität sehr nahekamen.

Das getestete Radar-Modul war ein Evaluation Board und weniger hochentwickelt als der Laser-Scanner. Die Holzplatte wurde bis sieben Meter, die Metallplatte bis zehn Meter und der Radar-Reflektor bis zwölf Meter detektiert. Anders als der Laser-Scanner breitete sich der Detektionsbereich keulenförmig aus und war gerichtet statt rotierend. Da der Sensor eingehaust war, war die Schwierigkeit die Ausrichtung der nicht sichtbaren Radar-Keule. Dies ist als kritisch anzusehen, da sich die Reflexionsrate zum Randbereich des Detektionsbereichs zunehmend verringert. Eine optimale Einrichtung auf das Ziel konnte so hier wahrscheinlich nur näherungsweise erreicht werden. Tendenziell könnte somit noch ungenutztes Potenzial in der Technik stecken, die die Signalstärke und somit auch die Reichweite positiv beeinflussen würde. Der künstliche Sprühnebel blieb ohne erkennbaren Effekt, selbst bei hoher Distanz und dem gleichzeitigen Betrieb aller Düsen. Somit ist von einer vernachlässigbaren Dämpfung der elektromagnetischen Wellen durch den Sprühnebel auszugehen.

Der Vergleich der beiden Technologien fand auf Basis der optischen Bewertung statt. Eine genauere Auswertung würde vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Physik der Messtechnik sowie der unterschiedlichen Entwicklungsstadien keine aussagekräftigeren Ergebnisse liefern. Zudem ist festzuhalten, dass der Laser-Scanner mit seinen bestehenden Leistungsdaten die geforderten Spezifikationen für ein späteres Navigieren des Futtermischwagens sogar noch übertrifft. So ist es als ausreichend zu bewerten, wenn sich die Leistungsfähigkeit des späteren Radar-Scanners dem des Laser-Scanners nur annähert.

Wenn die Anforderungen der Navigation erfüllt werden können, überwiegen in der Folge die messtechnischen Vorteile der Radar-Technologie im Außenbereich.

Einen großen Fortschritt bedeutete die erstmalige Umsetzung eines rotierenden Radar-Sensors. Limitiert waren die Winkelauflösung und Updaterate des Scanners aufgrund der Hardware-Komponenten und der optischen Datenübertragung. Bei der Mess- und Distanzauflösung hingegen wurde bereits ein sehr hohes Niveau erreicht, welches bereits für die spätere Navigationsanwendung ausgereicht hätte. Objekte verschiedenster Formen, Materialien und Oberflächen wurde bereits gut und deutlich dargestellt.

5.4.2 Versuchsreihe B

Versuchsmethodik

Ziel der Versuchsreihe B war es die Laser-Navigation als auch eine möglich Radar-Navigation für einen Futtermischwagen zu simulieren. Für die technologische Untersuchung wurde ein Roboterfahrzeug mit der Sensorik ausgestattet und unter Praxisbedingungen auf einem landwirtschaftlichen Betrieb getestet.

Eine praxisnahe, realistische Umgebung zeichnet sich durch eine undefinierte Dynamik aus. Auf dem Versuchsgut „Veitshof“ der TUM, auf dem der Versuch stattfand, waren in der direkten Versuchsumgebung Tiere (Kühe und Kälber), Menschen (Angestellte, Versuchsmitarbeiter, Spaziergänger) und Maschinen (Hoflader, Futtermischwagen etc.) involviert. Kälber in ihren Iglus konnten Ihre Position verändern, eine Regenstrecke simulierte widrige Bedingungen und die Kühe bewegten sich und ihr Futter im Bereich des Futtertisches beliebig. Zugleich wurde versucht mit der Routenauswahl eine möglichst differenzierte Umgebung abzudecken, um einen Querschnitt durch die Praxisbedingungen zu erhalten. Diese Umgebung stellte hohe Anforderungen an die Technik, weshalb die erfolgreiche Umsetzung der Navigation im Stall als aussagekräftiger Erfolg verbucht werden konnte.

Die Erkenntnisse aus der künstlich berechneten Fahrstrecke erwiesen sich als nur bedingt brauchbar. Die erzeugte Datenmenge stellte sich als zu gering heraus, um eine eindeutige Unterscheidung bzw. Zuordnung von Fehlerquellen durchzuführen. Gerade in diesem Bereich der Fahrroute waren viele starke Einflussfaktoren vorzufinden. Zum einen die Erschütterungen auf der lediglich gekiesten Fahrbahn, eine nicht ausreichend reflektierende Umgebung für die Sensorik und die starke künstliche Beregnung. Ein konsistenter Vergleich war aufgrund der Unregelmäßigkeiten aus der Kurvenfahrt vor der Regenstrecke nicht möglich. In Folgeversuchen müsste der Einfluss des Regens auf die Sensorik univariant getestet werden, d. h. eine Beeinflussung des Sensors durch weitere Umwelteinflüsse müsste ausgeschlossen werden. Denkbar wäre hier die Durchführung in einer Halle mit planbefestigter Oberfläche, rein

künstlicher Beleuchtung und eine ausreichend definierte Umgebung. Die Fahrtwiederholungen pro Durchgang sind unabhängig von dem Szenario zu steigern, um eine gute Datengrundlage für die Auswertungen zu erzeugen. Ebenfalls zu berücksichtigen sind dabei etwaige Aufzeichnungsprobleme, in dessen Folge ganze Datenreihen ausgeschlossen werden müssen.

Auswertungsmethodik

Kritisch zu sehen ist der Messdatenumfang bei der Ermittlung der Accuracy. Pro Durchgangsfahrt wurden 7 bis 20 Messpunkte berücksichtigt. Unter Einbezug weiterer Messpunkte ließe sich die Aussagekraft und Sicherheit des Parameters steigern. Vor Versuchsbeginn müssten dazu mehr Wegpunkte bzw. XSoll-Trajektorienpositionen eingespeichert werden. Ausgehend von weniger Messlücken in der Folge, könnte der Datenbereinigungsaufwand vermindert werden. Darüber hinaus dürfte eine erhöhte Anzahl an XSoll-Punkten und eine Verringerung des Abstandes zwischen zwei XSoll-Punkten die Messdaten akkurater machen. Es gibt jedoch auch eine Limitierung der Messdaten, da zu viele eingespeicherte Wegpunkte eine Überkompensation durch die Software bewirken könnte und die Daten somit inakkurater werden. Zudem könnten, aufgrund der Interpolation zwischen zwei Wegpunkten, mehrere Wegpunkte nicht mehr genau angefahren werden. Anzunehmen ist, dass der Einfluss der Diskretisierung in Kurven generell höher ist als auf Geraden.

Im Gegensatz zur Ermittlung der „Accuracy“ konnte bei der Ermittlung der „Precision“ auf eine ausreichend große Datengrundlage zurückgegriffen werden. Die Aussagekraft der Precision war als hoch zu bewerten, wenngleich sie mit einer Erhöhung der Wegpunkte weiter gesteigert werden könnte. Es stellte sich heraus, dass es richtig war, die Trajektorie als Bezugstrajektorie zu verwenden, die den geringeren Messdatenumfang hatte. Im Vergleich zur Ermittlung der Accuracy wurden bei der Ermittlung der Precision die nächsten Nachbarn für jeden Messpunkt, somit auf für jeden Messpunkt vor und nach den Messlücken einbezogen. Messdaten, die vor und nach Messlücken auftraten und fälschlicherweise nicht bereinigt wurden, könnten das Ergebnis beeinflusst haben. Für diese Messpunkte konnte nicht festgestellt werden, ob die Messaufzeichnung und die Lokalisierung gestört waren oder nur die Messaufzeichnung beeinträchtigt war. Wie auch bei der Accuracy erfährt die Anzahl an möglichen Wegpunkten eine Limitierung, um nicht unpräziser zu werden.

Die Auswertung ergab, dass eine genaue Einmessung der Tachymeterposition sowie der Startposition des Roboters in Relation zum Gebäude sinnvoll gewesen wäre. Mithilfe der Tachymeterdaten konnten bei der Datenbereinigung Fehler eliminiert werden. Jedoch nur solche Fehler, deren Ursache im Protokoll dokumentiert wurde. Unabhängig vom verwendeten Messgerät sollte in zukünftigen Versuchsanstellungen die Relativposition zwischen den

Geräten ermittelt und dokumentiert werden. Die Anwendung des Tachymeters war problemlos. Dennoch ergaben sich bei der Betrachtung der Daten abschnittsweise Messlücken. Diese konnten eindeutig auf Interferenzen bzw. Abschirmung durch den Protokollanten zurückgeführt werden. Die Wege zur Beobachtung des Roboters kreuzten an wenigen Stellen unvermeidbar die Line-of-Sight des Tachymeters mit dem Reflektorprisma.

Für eine bessere Nachvollziehbarkeit der Daten bzw. deren Bereinigung wäre außerdem eine dauerhafte Videoaufzeichnung hilfreich gewesen. Sowohl die Aufzeichnung der Fahrstrecke als auch die Aufzeichnung auf dem Roboter könnte hier bei Unklarheiten Abhilfe verschaffen. Die hier gewonnen Erkenntnisse flossen in der Folge in die Versuchsreihe C mit ein.

Ergebnisse Versuchsreihe B

Im Vergleich zwischen Monte-Carlo-Filter und Kalman-Filter zeigte sich, dass mit der Anwendung des Kalman-Filters eine weitere Verbesserung der Laser-Daten erreicht werden konnte. Die stufenförmige Absenkung beim Monte-Carlo-Filter könnte Ausreißer produziert haben. Ferner gerät der Monte-Carlo-Filter in Turbulenzen, wenn die Messdaten mit größeren Abweichungen behaftet sind und nicht hinreichend gesampled wurde. Dies ist oft bei Echtzeitapplikationen der Fall. Möglicherweise war auch das Motion- und Measurement-Update fehleranfällig, welches geeignete Rekonstruktionsmöglichkeiten für einen zu rekonstruierenden Punkt produziert, die dann mittels einer verteilungstheoretischen Betrachtung zu einem rekonstruierten Punkt verschmolzen wurden. Der große Nachteil daran ist, dass die Rekonstruktion nur vom zuletzt rekonstruierten Punkt abhängt. Ist dieser bereits fehlerbehaftet führt sich dieser fort und führt zu einer verzerrten Rekonstruktion der wahren Trajektorie. Bleibt das Sampling aus verstärkt sich dieser Effekt. Zusammengefasst ist der Monte-Carlo-Filter zu wahrscheinlichkeitsbasiert.

Noch vor Beginn der qualitativen Bewertung der Messdaten anhand der gewählten Parameter Accuracy, Precision, Konsistenz und Kondition, wurden die Messdaten aus Durchgang 2 ausgeschlossen. Die Diskretisierung war zu grob und wurde erst in den Folgedurchgängen behoben. Der systematische Fehler verhinderte aussagekräftige Ergebnisse.

In den Durchgängen „D3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ wurden zunächst die Messdaten aufbereitet, um den systematischen Fehler zu verringern. Systematische Fehler stehen entgegen der Rekonstruktion und sollten daher vermieden werden. Ohne diese Standardisierung der Datensätze, wären keine konsistenten Ergebnisse aus der 1NN-Methode möglich gewesen. Anschließend wurden die Daten bereinigt. In „D3 im Stall“ wurde Fahrt 4 nicht berücksichtigt, da, aufgrund von Messstörungen, ein erheblicher Abschnitt der Fahrt fehlte. Für zwei der acht Wegpunkte der Soll-Trajektorie gab es daher keine Äquivalente der

Trajektorie 4. Die Störungen der Messung sind wahrscheinlich auf instabile Hard- und Software oder die Stillstandzeiten der Software des Prototyps zurückzuführen. Ebenso können Hintergrundabläufe die CPU ausgelastet haben und so geriet die Messdatenaufzeichnung ins Stocken. Anzumerken ist, dass in diesem Fall die Lokalisierung funktionierte, jedoch nicht die Speicherung der Laser-Positionsdaten. Es handelte sich um ein normales Betriebssystem, welches für Versuchszwecke ausreichend war. Für eine künftige Anwendung in der Praxis muss die Software für Echtzeitanwendungen spezialisiert sein, d. h. spezielle Echtzeitbetriebssysteme verwendet werden. Der zweite Schritt der Datenaufbereitung krankte an zwei Fehlern, die bereits in diesem Absatz benannt wurden. An den Messlücken entstanden durch die Zuordnung von nächsten Nachbarn erhöhte Distanzwerte, eine negative Folge der Messlücken. Nur eine Änderung der Versuchsstandardisierung trägt hier zu einer Besserung bei.

Kurvenfahrten und der Untergrund stellten in dem Versuch besonders kritische Stellen dar. Bereits ein geringer oder starker Lenkeinschlag bei Kurveneintritt konnte zu einer deutlich von der Soll-Trajektorie abweichenden Position am Ende der Kurve führen. In der Folge ergeben sich größere Distanzen zwischen den zugeordneten nächsten Nachbarn, da die Software einige Zeit benötigt, um sich wieder zu platzieren und der Soll-Trajektorie anzunähern. Eine Stufe zwischen dem betonierten Futtertisch im Stall und dem Außenbereich dürfte, ebenso die Unebenheiten aus dem gekiesten Hofbereich, zu Erschütterungen geführt und so die Messungen des Laser-Scanners beeinflusst haben. Die Datenbereinigung ermöglichte in der Folge einen konsistenten Vergleich der Fahrten.

Mit der Laser-Navigation wurde in „D3 im Stall“ eine gute Genauigkeit erzielt, in „D3 vollständig“ und „D4“ eine mäßige. Die Genauigkeit bzw. Accuracy kann unter bestimmten Voraussetzungen weiter optimiert werden. Starken Einfluss übte, wie bereits im vorhergehenden Absatz geschildert, die Fahrbahnoberfläche bzw. der Untergrund aus. Ebene, befestigte Untergründe minderten Erschütterungen auf ein geringeres Maß. Des Weiteren spielt die zu „ertastende“ Umgebung eine wesentliche Rolle, sodass man als Faustregel sagen kann: „Je mehr Objekte sich in der sichtbaren Umgebung befinden, desto genauer die Navigation.“ Sollten keine natürlichen Merkmale und Objekte vorhanden sein, kann auf künstliche Landmarken zurückgegriffen werden sowie zusätzliche Sensoren (z. B. Lagesensor) in Form einer Sensorfusion. Diese beiden Aspekte liegen der größeren Ungenauigkeiten in „D3 vollständig“ und „D4“ zu Grunde. Die Umgebung um den Stall war undefinierter (weniger ertastbare Objekte) und die Fahrbahnbeschaffenheit schlechter (Kies), als im Stall (Fressgitter und planbefestigter Boden). Als dritter Punkte konnte aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Größe der Messdatengrundlage ein entscheidender Faktor ist. Die Anzahl der verfügbaren Messdaten steht im Zusammenhang mit der

Performance des SLAM-Algorithmus. Je mehr Messdaten vorhanden sind, desto genauer kann die Umgebung abgebildet werden. In Folge lassen sich Objekte besser unterscheiden und die Messdaten sind akkurater und präziser. In „D4“ könnte sich auf diese Art der protokollierte Akku-Wechsel nach Fahrt 4 kenntlich gemacht haben. Mit dem Akkutausch erfolgte auch der Neustart des Computers und eine Neuinitialisierung der Navigation. Ein geringer Akkuladezustand könnte evtl. die Signale des Navigationssystems unpräziser umgesetzt worden sein und so zu einer verminderten Messdatengrundlage geführt haben. Zwei weitere Aspekte könnten die Accuracy von „D4“ zusätzlich verschlechtert haben. Zum einen setzte während des Durchgangs die Dämmerung ein. Zwar ist der Scanner lichtempfindlich, jedoch sollte Fremdlicht bis zu 40.000 Lux kompensiert werden können. Ein Einfluss des Tageslichtes kann nicht ausgeschlossen werden. Zum anderen wurde in „D4“ die Regenstrecke an der Ost-Seite des Stallgebäudes vor jeder Fahrt aktiviert. Es wurde Starkregen simuliert, der den Laser-Scanner trotz Regenkompensierung beeinflusst haben könnte.

Die Bewertung der Precision fiel analog zur Accuracy aus. Das heißt „D3 im Stall“ wurde als präzise, die beiden anderen Durchgänge als unpräzise eingestuft. Die statistische Auswertung der jeweils drei Trajektorienpaare mit dem größten bzw. kleinsten Distanzwert ergab für „D3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Trajektorienpaare. Die Nullhypothesen sind nicht unbedingt richtig, jedoch kann in der Praxis davon ausgegangen werden, dass gegen die Richtigkeit der Nullhypothesen nichts einzuwenden ist. Da eine sehr kleine FDR (False Discovery Rate) ermittelt wurde, können „D3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ als hochgenau eingestuft werden.

Eine robuste Versuchsauswertung bedarf immer einer Konsistenz der Auswertungsalgorithmen. Für die Konsistenz der Auswertungsalgorithmen muss eine entsprechende Messauflösung erfüllt sein. Für „D3 im Stall“ war die Messauflösung der Laser-Positionsdaten hinreichend klein. Der verwendete Rekonstruktionsalgorithmus (Kalman-Filter) erwies sich daher als konsistent und es kann von äußerst verlässlichen Auswertungsergebnissen gesprochen werden. Für „D3 vollständig“ und „D4“ wurden zu grobe Messauflösungen festgestellt und somit die Messdaten als nicht konsistent bewertet. Jedoch kann von äußerst verlässlichen Auswertungsergebnissen gesprochen werden, da der Schwellenwert für Accuracy und Precision der Messdaten vom Verfasser streng ausgelegt wurde. Für die Beurteilung eines Kalkulationsergebnisses muss beachtet werden, wie es auf Störungen der Ausgangsdaten reagiert. Um akkurate und präzise Ergebnisse zu erhalten, muss der Auswertungsalgorithmus gut konditioniert sein. Dies lässt sich für „Durchgang 3 im Stall“, „D3 vollständig“ und „D4“ bestätigen.

Die Ergebnisse aus den Radar-Messungen waren sehr vielversprechend. Das Potential der Technologie geht klar daraus hervor. Jedoch handelte es sich um einen Scanner im Prototypenstadium, was in Soft- und Hardwareproblemen resultierte. Primär waren die Datenübertragung und die Aufzeichnung der Messdaten betroffen. Die Übertragung der Daten wurde in diesem Stadium noch über eine Infrarotschnittstelle gelöst, welche einen Flaschenhals darstellte und die Aufzeichnungsrate stark limitierte. Bislang war der Scanner mit einem Radar-Sensor bestückt, kann in Zukunft aber mit einem gespiegelten zweiten Sensor aufgerüstet werden und so die Leistung verdoppeln. Die Software für Kartierungen mit Radar-Sensoren ist ein sehr neues Feld und bietet daher nicht die ausgereiften Lösungen, wie sie im Laser-Scanning-Bereich vorhanden sind. Künftig soll ein neuer Navigations- bzw. Kartierungsalgorithmus auf Basis eines vorhandenen Algorithmus entwickelt werden. Bislang haben die Radar-Sensormessdaten eine Auflösung von ca. zwei Zentimeter. Mit Nachverarbeitung wird eine Genauigkeit von ca. einem Millimeter innerhalb einer Auflösungszelle möglich. Daher werden in der Zukunft Positionierungsgenauigkeiten zwischen einem und Zehn Zentimeter, ähnlich zum Laser-Scanner, erreicht werden. Der Radar-Scanner sollte aufgrund seiner Eigenschaften eine stabilere Lokalisierung im Außenbereich erlauben. Sobald die Software weiterentwickelt und stabilisiert ist, müssen die Versuche nochmal in ähnlicher Weise mit dem Ziel konsistentere Ergebnisse zu erhalten wiederholt werden. Die weiteren Versuche werden sich zunächst primär mit der Auflösung, der Zielerkennung und der Reichweite beschäftigen, erst danach wird an der Kartierung weitergearbeitet. Weiterhin wird die Hardware verbessert, was wiederum weitere Versuche nach sich ziehen wird.

5.4.3 Versuchsreihe C

Ziel der Versuchsreihe C war es die Laser-Navigation als auch eine möglich Radar-Navigation unter realen Bedingungen an einem aufgerüsteten Futtermischwagen zu testen. Die Erkenntnisse aus der Versuchsreihe B waren derart fundiert, dass im weiteren Schritt ein Futtermischwagen mit der Laser- bzw. Radar-Sensorik ausgestattet und unter Praxisbedingungen auf einem landwirtschaftlichen Betrieb getestet wurde.

Der Versuch umfasste realistische Szenen eines landwirtschaftlichen Betriebs. Es wurde die Geradeausfahrt, Kurvenfahrt, Engstellen, Stall Ein- und Ausfahrt, sonnige und bedeckte Wetterverhältnisse, Steigungen, Neigungen und wechselnde Bodenbeschaffenheiten abgedeckt. Damit wurde ein umfassender und realistischer Eindruck gewonnen, wie sich der automatisierte Futtermischwagen in wesentlichen Situationen des bäuerlichen Alltags verhält. Einige wesentliche Situation konnten jedoch aus limitieren zeitlichen und finanziellen Aspekten des Projektes nicht dargestellt werden. In nachfolgenden Versuchen sollten auch Rückwärtsfahrten, Parallelfahrten mit Futteraustrag und Fahrten unterschiedlicher

Geschwindigkeiten getestet werden. Außerdem ist die Verteilung des Futters auf dem Futtertisch hinsichtlich Verteilgenauigkeit in der Folge zu testen und zu bewerten.

Wie bereits in Versuchsreihe B wurde in Versuchsreihe C der Futtermischwagen mit einem Laser-Scanner und einem Radar-Scanner ausgerüstet. Der Laser-Scanner erstellte eine digitale Karte, führte die Lokalisierung und letztlich die Navigation durch. Der Radar-Scanner wurde ebenfalls für die Kartierung verwendet, aufgrund des frühen Prototypenstadium jedoch noch nicht für die Lokalisierung bzw. Navigation. Die Anbringung der Scanner wurde so gewählt, dass aus Gründen der einfacheren Installation und Handhabung während der Versuchsdurchführung nicht das gesamte Potential der Umfelderkennung genutzt werden konnte. Die Anbringung vorne, bodennah an der Kabine ist gut geeignet für sicherheitstechnische Anforderungen, nicht jedoch für die Navigation des Fahrzeugs. In diesem Horizont befinden sich viele teils dynamische, teils wechselnde Umgebungen, die die Erstellung der digitalen Karte erschweren und die Navigation beeinträchtigen können. Als bessere Option bietet sich hier die Montage des Laser-Scanners hoch oben am Fahrzeug an, sodass der maximale Scanradius genutzt werden kann. Diese Änderung birgt Potential für eine gesteigerte Genauigkeit in der Spurführung. Für den Radar-Scanner gilt prinzipiell dasselbe, allerdings ist dessen Kartierung und Navigation aufgrund des breiten Erfassungskegels etwas robuster gegenüber einem dynamischen Umfeld. Im Hinblick auf die Nutzung des Radar-Scanners für die Sicherheit und den Personenschutz, bietet sich die Anbringung der Sensoren auf mittlerer bis niedriger Höhe des Fahrzeugs an. Ebenso könnte ergänzend oder ersetzend ein Sicherheits-Laser-Scanner verbaut werden. Die jüngsten Entwicklungen im Laser-Scanbereich zeigen, dass auch diese Technologie künftig ihre Daseinsberechtigung im Outdoor-Bereich haben wird. In den Versuchen führte die Navigation per Laser-Scanner dazu, dass die hochgenaue Steuerung in enger Umgebung und dynamischen Bedingungen eine sehr aggressive Ansteuerung der Lenkung bezweckte. Die schnellen, kurzen Lenkbewegungen konnten allerdings von der verwendeten Aktorik nicht verzögerungsfrei umgesetzt werden. Deshalb blieb es bei eher als unruhig zu bezeichnenden Lenkbewegungen.

Durch das frühe Entwicklungsstadium des Radar-Scanners wurde lediglich einer davon am Versuchsfahrzeug montiert. In einer Umsetzung in einem tatsächlichen Sicherheitskonzept ist dieses Setup nicht ausreichend. Für eine komplette Umfelderkennung im Fern- wie im Nahbereich, inklusive dem Rückraum für Rückwärtsfahrten, wären nach derzeitiger Abschätzung mindestens vier Radar-Scanner notwendig. Zudem sind die Leistungsdaten des verwendeten Radar-Scanners noch hinter den geplanten Resultaten in einer Vorserie etwas zurück.

Die verwendete Technik war den Ansprüchen des Versuches gerecht, in Rücksichtnahme auf zeitliche und finanzielle Limitierungen. Es bleibt festzuhalten, dass alle Bestandteile zur Automatisierung für künftige Versuche erneut bewertet werden müssen. So wurde für die Lenkungsaktorik ein Reibrad installiert, das eigentlich aus einem GPS-Fahrassistenzsystem für Traktoren stammte. Die wesentlichen Punkte, die sich auf die Lenkgenauigkeit ausgewirkt haben, waren der separate 12 Volt Akku und das Spiel zwischen den beteiligten Komponenten. Der Akku wurde im Laufe des Versuchs schwächer und die Schwankungen bzw. die Leistungsbereitstellung ist ebenfalls limitierter als bei einem Netzanschluss, bzw. einem Anschluss an das Bordnetz. Außerdem war die Leistungsfähigkeit des Akkus komplett ausgereizt und hätte noch mehr Leistungsreserven erfordert. In einer seriennahen Umsetzung würden diese Bestandteile z. B. durch einen direkten elektronischen Lenkantrieb ersetzt werden.

Mit dem Versuchssetup konnte eine beachtliche Fahrgenauigkeit im einstelligen Zentimeterbereich erreicht werden. Trotz aller technischen Einschränkungen der gewählten Komponenten legte die verwendete Software eine hochpräzise Grundlage, auf Basis des eigens erstellten Pfadfolgealgorithmus. Der verwendete CAN-Bus kam in den Versuchen jedoch mehrmals an seine Leistungsgrenze und stürzte ab. In gut aufeinander abgestimmten Komponenten ist dieses Risiko in Zukunft jedoch gut einschätzbar und zu verhindern. Im Falle eines solchen Ausfalls war die finale Rückfallebene der Versuchsteilnehmer, der in der Fahrerkabine das System überwachte. In einer professionellen Umsetzung ersetzt dieses Überführen in einen sicheren Zustand die redundant abgesicherte Fahrzeugautomatisierung.

5.4.4 Die gegenwärtige Rechtslage

In der derzeitigen Rechtslage (Jahr 2022) sind fahrerlose Maschinen in Bereich der StVO nicht vorgesehen. Hier beginnt die Grenze auf landwirtschaftlichen Betrieben zu verschwimmen, da sich die Umgebungsbedingungen von Landwirtschaft zu Landwirtschaft unterscheiden. Die Höfe unterscheiden sich teils stark voneinander, in deren Aufteilung, Zugänglichkeit etc. ebenso wie die Verkehrsflächen. Dieser „Graubereich“ erfordert eine Fallentscheidung, die für jeden Betrieb getroffen werden muss. So kann eine klar erkennbare optische Trennung der Hofverkehrsflächen vom StVO-Geltungsbereich ausreichend sein. Eine einheitliche Definition gibt es dafür allerdings nicht, so liegt es im Ermessen der zuständigen Juristen diese Grenze fallspezifisch zu ziehen. Eine komplett physische Abgrenzung der Verkehrsfläche des automatisierten Futtermischwagens, mit einer zuverlässigen Zutrittssicherung für Unbefugte, wäre die ideale Lösung. Allerdings ist dies in den meisten Fällen auf landwirtschaftlichen Betrieben weit an der vorherrschenden Praxis und Umsetzbarkeit vorbei.

Die Straßenverkehrsordnung fußt unter anderem auf dem „Wiener Übereinkommen“ bzw. „Wiener Straßenverkehrskonvention“ aus dem Jahr 1968 (Presse- und Informationsdienst der Bundesregierung 2016). Dieses sieht vor, dass stets ein Fahrer vonnöten ist, der die Pflicht zur Fahrzeugbeherrschung und die Pflicht zur beidhändigen Lenkung zu leisten hat. Paragraph 8, Absatz 5 des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr gibt vor: *„Jeder Fahrer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.“* In Paragraph 13, Absatz 1 wird weiter konkretisiert: *„Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen.“* (Greis 2016). Durch einen Gesetzentwurf zur Änderung des Wiener Übereinkommens, ist es seit dem in Kraft treten am 23. März 2016 möglich „[...]“, dass nun erstmals Fahrzeugsysteme erlaubt sind, die einen Einfluss auf das Führen eines Fahrzeugs haben.“ (Presse- und Informationsdienst der Bundesregierung 2016). Dies umfasst beispielsweise Fahrerassistenzsystem oder automatisierte Fahrfunktionen. Weiterhin vorgesehen ist jedoch ein Fahrzeugführer, der das Fahrzeugsystem jederzeit übersteuern oder abschalten kann. Damit sind gegenwärtig Fahrzeuge bis zur Automatisierungsstufe 4 rechtlich tragbar. Die Klassifizierung folgt den Automatisierungsstufen, die im BASt-Projekt (Bundesanstalt für Straßenwesen) definiert wurden (Gasser et al.). Die letzte Automatisierungsstufe 5 sieht vor, dass ein Fahrzeug vollkommen ohne unmittelbaren menschlichen Einfluss, ohne Fahrzeugführer, agiert und sämtliche Fahrfunktionen autonom übernimmt (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) 2018). Diese Ausbaustufe ist aus rechtlicher Sicht auch im Jahr 2022 weiterhin nicht vorgesehen, sowie nicht weiterführend definiert, da sie aus heutiger Sicht als unrealistisch eingestuft ist (Gasser et al.). Vor dem Hintergrund des sinnvollen Einsatzes eines automatischen Futtermischwagens, zur Einsparung von Arbeitszeit, wäre ausschließlich die Automatisierungsstufe 5 von Relevanz für die Praxis. Neben der rechtlichen Betrachtung kommt auch die Betrachtung von Haftungs- und Versicherungsfragen ins Spiel. Die Verkehrsbeobachtung ist nicht mehr fortlaufende Verpflichtung des Fahrers, sondern nur während der Phasen, an denen das Fahrzeugsystem die Steuerung inklusive Übergabezeitraum an den Fahrzeugführer übergibt. Die technischen Systeme des Fahrzeugs müssen entsprechend der Beweislast durch ausreichend genaue und schlüssige Dokumentation der Situation tragen können, um sowohl ein technisches Versagen, menschliches Versagen oder das Versagen Dritter eindeutig klären zu können. Eine nur teilweise Klarheit dieser Haftungsfragen wird den Einzug von automatisierten Fahrzeugen verhindern, da im Zweifel sehr hohe Kosten auf den Nutzer zukommen könnten.

Produktfehler sind durch eine Herstellerhaftung abgedeckt und stets nachweislich. Das gleiche gilt für Konstruktionsfehler. Im Rahmen der kohärent sicheren Konstruktion des Fahrzeugs müssen diese durch den Hersteller komplett ausgeschlossen werden. Ist ein

Ausschluss nicht möglich, muss explizit auf verbleibende Risiken und Gefahren hingewiesen werden. Eine Annahme kann sein, dass autonome Fahrzeuge Probleme immer selbst abwickeln können müssen. Infolgedessen kann angenommen werden, dass anderweitige Probleme immer auf Produktfehler zurückzuführen sind.

Unter den diskutierten Voraussetzungen ist es gegenwärtig sehr unwahrscheinlich, dass sich Landwirte ein derartiges System beschaffen werden bzw. sie es von einem Hersteller beziehen können. Die Umsetzung auf einem landwirtschaftlichen Betrieb würde derzeit eher der Umsetzung eines fahrerlosen Transportsystems in der Industrie entsprechen, in der derartige Systeme als eigenständiges Projekt betrachtet werden. Von der Planung der Wirtschaftswege, über Sicherheitseinrichtungen am und neben dem Fahrzeug und aller weiterer notwendigen Betrachtungen. Ein physisch abgetrennter und zutrittsgesicherter Bereich wäre derzeit die eine Alternative, die Fahrzeugüberwachung durch einen Fahrer die andere.

6. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die technologischen und verfahrenstechnischen Grundlagen für die Entwicklung eines neuartigen, elektrisch betriebenen, selbstfahrenden automatischen Fütterungssystems zu legen. Dafür wurden zunächst die grundlegenden Kompetenzen durch Recherchen und Voruntersuchungen erarbeiteten. Darauf aufbauend wurden Anforderungen an das System formuliert, welche in einem Funktionskonzept und einem Lasten- bzw. Pflichtenheft festgehalten wurden. Parallel zur Konstruktion und dem Bau erster Prototypen beim Kooperationspartner Mayer Maschinenbaugesellschaft mbH, wurden Technologien zur Navigation und der Kollisionsvermeidung getestet und validiert. Die bis dato gewonnenen Erkenntnisse wurden in eine finale Versuchsanstellung zusammengeführt, in der zum ersten Mal ein mit Sensorik ausgerüsteter Truckline-Futtermischwagen automatisiert durch einen Milchviehstall fuhr.

Das neuartige Konzept des AFS eröffnet eine Multifunktionalität, die bislang von keinem bestehenden Wettbewerber geboten wird. Die automatische Funktion des Fütterungssystems eröffnet die Vorteile einer mehrmaligen Futtervorlage. Gleichzeitig kann das Fahrzeug in einem Smart Grid als flexibler Speicher, als Beschicker für eine Biogasanlage oder manuell als Futtermischwagen verwendet werden. Am Markt erhältliche automatische Fütterungssysteme sind ihrer Funktionsweise entsprechend an externe Infrastruktur gebunden und besitzen keine Möglichkeit manuell gesteuert zu werden. Gerade diese manuelle Nutzungsmöglichkeit des automatischen Fütterungssystems wurde in der Umfrage unter deutschen Landwirten zu den Anforderungen an ein automatisches Fütterungssystem mit 100 % Zustimmung gefordert. Auch der Trend einer zunehmenden Elektrifizierung der Maschinen ist in der Landwirtschaft angekommen und die Auswahlmöglichkeit wird zunehmenden vom Markt eingefordert werden. Dies zeigte sich ebenfalls in der Umfrage, in der zum einen bereits die Hälfte der Befragten eigenerzeugten Strom nutzen und zum anderen der Antrieb per Akku von mehr als der Hälfte der Befragten bevorzugt wird, im klaren Abstand zum Antrieb mit Verbrennungsmotoren von ca. $\frac{1}{4}$ der Befragten.

Als eine der wichtigsten Eigenschaften von automatischen Fütterungssystemen stellte sich in einer Umfrage die Arbeitszeiterparnis heraus. Dies steht klar im Zusammenhang mit der großen Arbeitszeitbelastung, die die Fütterung auf Platz 2 hinter dem Melken belegt. Es wird davon ausgegangen, dass deshalb vor allem Betriebe, die bereits ein automatisches Melksystem einsetzen die neuen Fütterungssysteme zügiger adaptieren werden als Betriebe, die bislang wenig bis keine Automatisierung verwendeten. Gleichermaßen wird es als sinnvoll erachtet, eine Maschine sowohl für die automatisierte Fütterung als auch die manuelle

Fütterung in Altgebäuden zu realisieren. Hier stehen für viele Landwirte der Kostenvorteil und die Sicherheit bei einem Ausfall der Automatisierung im Vordergrund. Gleichzeitig zeigt diese Anforderung, dass viele marktverfügbare Fütterungssysteme diesen Wunsch nicht erfüllen können. Die hohen Ansprüche an die Futterqualität sprechen für die befragten Landwirte für eine vollautomatische Fütterung vom Silo bis zum Trog. Obwohl als sinnvoll erachtet, schätzt dies die Mehrheit derzeit als noch nicht praxistauglich ein. Trotz vieler positiver Aspekte eines automatischen Fütterungssystems zeigte die Umfrage eine gewisse Skepsis gegenüber der Verlässlichkeit dieser, trotz oder gerade, weil viele junge Landwirte daran teilgenommen haben. Zudem nimmt die Anzahl der Stimmen zu, die den Nutzen aus dem Übertrag von körperlicher Arbeit (Fütterung) zu geistiger Arbeit (Tiermanagement) kritisch betrachten und gar eine Mehrbelastung befürchten. Dem gilt es mit klaren Anwendungsbeispielen, einem einzigartigen Nutzen und einer nachvollziehbaren Refinanzierung entgegenzutreten, die durchdachte Produkte unbestritten liefern können.

Die Mayer Maschinenbaugesellschaft mbH ist der erste Hersteller von Fütterungstechnik der die Antriebs- und Mischeinheit elektrifiziert hat. Damit geht das Unternehmen, als bislang Einziges am Markt, konsequent den Weg zur Schonung der Ressourcen, Vermeidung fossiler Treibstoffe und Minderung der Schadstoff- und Geräuschemissionen. Das Akkupaket ist für eine Dauerbelastung von 90 Minuten dimensioniert und somit für die Fütterungsroutinen auf kleinen und mittlern Betrieben absolut ausreichend. Die elektrischen Antriebe sind auch bei maximaler Belastung mit hohem Befüllgrad und schwerem Futter leistungsstark genug. Der Energieverbrauch sowie der Emissionsausstoß sind im Vergleich zu dieselbetriebenen Pendanten um ein Vielfaches geringer. Als positiver Nebeneffekt stellt sich das Gewicht des Akkupaketes heraus, welches über der Triebachse positioniert ist und so für hervorragende Traktion selbst bei Schnee und Eis sorgt. Die Leistungsfähigkeit wurde im Rahmen von Praxistests während der Wintermonate getestet und ausgewertet.

Einzigartig ist bislang die Verwendung eines Radar-Scanners und eines Laser-Scanners in Kombination, zur Navigation und für das Sicherheitssystem einer selbstfahrenden Maschine. In mehreren Versuchsreihen konnte das große Potenzial der Radar-Technologie dokumentiert werden. Insbesondere unter den widrigen Bedingungen im Außenbereich bzw. landwirtschaftlichen Betrieben kommen die Vorteile der Technik klar zum Tragen (Starr und Lattimer 2014; Yamauchi 2010). Auch der Einsatz eines Laser-Scanners ist im landwirtschaftlichen Umfeld geeignet. Unter den Praxisbedingungen konnten keine Einbußen hinsichtlich der Navigationsleistung festgestellt werden. Darüber hinaus konnte ein eigenentwickeltes physikalisches System die Navigationsleistung mit dem Laser-Scanner durch eine verbesserte Messdatenverarbeitung weiter erhöhen. Für eine marktfähige Lösung müssen beide Technologien in weiteren Tests erneut geprüft werden. Insbesondere ist darauf

zu achten, dass die Messdatengrundlage der Laser-Messdaten gegenüber den aktuellen Versuchsreihen zu vergrößern ist. Bei dem Radar-Scanner ist der fortschreitenden Optimierung von Hard- und Software Rechnung zu tragen und durch fortlaufende Tests die Leistungsfähigkeit weiterhin zu überprüfen. Es bleibt festzuhalten, dass die Laser- als auch die Radar-Technologie das Potential besitzen, künftig für Navigations- und Sicherheitszwecke im Außenbereich eingesetzt zu werden.

Die Navigation mittels eines Radar-Scanners befindet sich noch in den Anfängen. Abgesehen von Messdatenverlusten aufgrund der Hard- und Software, wurde das große Potential des Radar-Scanners sichtbar. Mit den Laser-Scandaten als Referenz konnte eine Radar-Karte der Stallfahrstrecke erzeugt werden. Die Eigenschaften des Radars verspricht künftig eine stabilere Lokalisierung/Navigation im Außenbereich. Weiterentwicklungen von Hard- und Software sollten zunächst hinsichtlich Auflösung, Zielerkennung und Reichweite und später hinsichtlich der Kartierung getestet werden.

Mithilfe des entworfenen physikalischen Systems konnten qualitativ gute Messdaten aufbereitet werden, die die praxistaugliche Anwendung der Laser-Navigation belegten. Die Kriterien umfassten die Accuracy, Precision, Kondition und Konsistenz. Mit einer höheren Anzahl programmierter Wegpunkte könnte die Aussagekraft der Accuracy weiter gesteigert werden. Als optimales Szenario stellte sich die Geradeausfahrt auf einem planbefestigten Boden mit viel reflektierenden Objekten in der sichtbaren Umgebung heraus. Kritisch wirkten sich unebene und unbefestigte Böden, reflexionsarme Umgebungen und Kurvenfahrten aus. Darüber hinaus muss die Software des Systems auf den Echtzeit-Einsatz hin optimiert sein. In schwierigem, undefiniertem Gelände kann durch Sensorfusion oder externe Referenzpunkte eine deutliche Verbesserung erzielt werden.

Eine weitere Zielstellung, ein funktionierendes Sicherheitskonzept für einen autonomen Futtermischwagen zu skizzieren, konnte erfüllt werden. Angesichts der geltenden rechtlichen Bestimmungen und der unklaren Haftungsfragen ist dieses allerdings mit einigen Einschränkungen verbunden. Die physische Abgrenzung des Wirkungsbereichs des automatischen Fütterungssystems führte zwar zu einer Übereinstimmung mit geltenden Auflagen, ist für die praktische Landwirtschaft derzeit wohl aber zu umständlich bzw. kostenintensiv und nicht praktikabel. Der Weg hin zu einem sicheren Miteinander zwischen autonomen Maschinen und Menschen ist aufgrund des großen Schadenspotentials weiterhin noch lange.

Doch auch der technische Fortschritt ist gefordert immer leistungsfähigere Lösungen zu bieten, die die geringe Reaktionszeit und den wenigen Schutzraum der sich bietet erreichen zu können. Technologien, die schneller, in größerer Entfernung, unter dem effektiven

Ausschluss störender Umweltbedingungen arbeiten werden in Zukunft stark nachgefragt werden. Das Potential einzelner Technologien übersteigt die Leistungsfähigkeit der menschlichen Sinne bereits heute um ein Vielfaches.

7. Abstract

Die Zahl der Landwirte weltweit sinkt kontinuierlich gegensätzlich der ansteigenden Weltbevölkerung. Weniger qualifizierte Arbeitskräfte in der Landwirtschaft müssen zunehmend mehr Menschen mit Lebensmitteln versorgen können. Im Fokus stehen Routinearbeiten, insbesondere die Tierfütterung, die hohen zeitlichen Aufwand verursachen. Ein Lösungsansatz ist es, diese routinemäßigen Arbeiten zu automatisieren. Ziel des Projektes ist es, die konzeptionellen und technologischen Grundlagen für ein neuartiges, elektrisches, selbstfahrendes automatisches Fütterungssystem zu legen.

Durch eine fundierte und breite Recherche konnte der Status Quo in der Fütterungstechnik erarbeitet werden, die die derzeitigen Schwächen bzw. Entwicklungspotenziale aufzeigte. Derzeit ist der Großteil von automatischen Fütterungssystemen baulichen, festinstallierten Anlagen entsprechend, Speziallösungen, die infrastrukturelle Anforderungen haben oder Aufwände bedeuten. Frei navigierende Fahrzeuge, die auch manuell zu nutzen sind, sind derzeit noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Um diese Entwicklung mitzugestalten und den Bedürfnissen der Praxis entsprechend umzusetzen, wurde ergänzend zur Literaturrecherche eine Befragung unter Landwirten durchgeführt. Die Befragung wurde unter fachlicher Mithilfe von Herstellern von Fütterungstechnik, Wissenschaftlern und Praktikern erstellt. Dabei konnten bedeutende Anforderungen abgeleitet werden. Die absolute Toppriorität erfuhr die „Zuverlässigkeit des Systems“, um teure und aufwendige Ausfallzeiten sehr gering wie möglich zu halten. Nahezu gleichauf auf Platz 2 priorisiert, liegt die „Sicherheit für Mensch und Tier“. Mehr als die Hälfte der Befragten spricht sich darüber hinaus für einen elektrischen Antrieb des Systems in Form eines Akkus, verglichen mit einer separaten Stromschiene bzw. einem Verbrennungsmotor.

Das Funktionskonzept des automatischen Fütterungssystems orientierte sich an der Recherche sowie der Befragung. So wurde die Möglichkeit der manuellen Maschinensteuerung vorgesehen. Durch diese Option ist der Landwirt einerseits flexibel im Einsatz der Maschine auch als konventioneller Futtermischwagen. Zum anderen bietet die manuelle Steuerung eine Not-Option um Ausfallzeiten des automatischen Fütterungssystems überbrücken zu können und somit eine bessere „Zuverlässigkeit des Systems“ gewährleisten zu können. Darüber hinaus wurden Technologien für den Personenschutz/Kollisionsschutz ausgewählt, die einerseits mit der LiDAR-Technologie eine ausgereifte Technik verwendete und andererseits mit der Radar-Technologie eine neue Technologie mit großem Potential, gerade im Außenbereich, dazu ergänzte. Dieser Ansatz einer kombinierten Verwendung eines LiDAR- und eines Radar-Scanners bei einem automatischen Fütterungssystem, ist bislang

einzigartig und hoch innovativ. Die Sicherheit, als Teil des Funktionskonzeptes des Gesamtsystems, wurde exemplarisch anhand einer Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie dargestellt und zeigte das Potential dieser Sensorkombination diese Anforderung „Sicherheit für Mensch und Tier“ zu erfüllen. Mit dem weltweit ersten elektrisch betriebenen Futtermischwagen legte die Mayer Maschinenbaugesellschaft zugleich die Grundlage für eine emissionslose, effiziente Antriebstechnik.

Mithilfe eines Roboterfahrzeugs wurde auf einem landwirtschaftlichen Betrieb die Machbarkeit dieses Setups mit LiDAR und Radar erwiesen. Durch ein eigens designtes physikalisches System konnte die Präzision der Navigation per LiDAR und somit der Fahrmanöver nachgewiesen werden. Die Auswertung der Radar-Daten belegte das große Potenzial, künftig auch allein per Radar-Scanner manövrieren zu können. Aus den Erkenntnissen dieser Versuchsreihe mit Roboterfahrzeug wurde eine weitere Versuchsreihe geplant. In der abschließenden Versuchsreihe wurde der Machbarkeitsnachweis erbracht, dass die freie, fahrerlose Navigation unter Verwendung der LiDAR- und Radar-Technologie in einem automatischen Fütterungssystem unter Praxisbedingungen gelingen kann.

In diesem Projekt konnten die konzeptionellen und technologischen Grundlagen für ein neuartiges, elektrisches, selbstfahrendes automatisches Fütterungssystem gelegt werden, indem ein Funktionskonzept erstellt wurde, geeignete Technologien identifiziert und validiert wurden und ein vollelektrischer selbstfahrender Futtermischwagen erstmals unter Praxisbedingungen mit neuartiger Sensorkombination automatisiert und getestet wurde.

8. Ausblick

Die Grundlagen der meisten gegenwärtigen Automatisierungsansätze bilden die Informationstechnologie, die Sensorik und die Aktorik. Das automatisierte System erfährt seine Optimierung in der Weiterentwicklung der einzelnen Hardware-Komponenten und ebenso in der verbesserten Kommunikation bzw. Programmierung. Beide Bereiche, und noch vorrangig die Softwareentwicklung, sind höchst dynamische Forschungs- wie Wirtschaftsbereich. Damit einhergehend fallen die Preise für jeweilige Ressourcen, sowohl physischer als auch digitaler Natur, im monatlichen Verlauf. Die Automatisierung erstreckt sich über viele Wirtschaftssegmente, vom Straßenverkehr und Automobilbereich, über die Medizintechnik, hin zu Industrieanlagen und letztlich die Landwirtschaft. Die gesammelte Innovationskraft über alle Branchen führt unweigerlich, auch in naher Zukunft, zu allgemeingültigen Schlüsseltechnologien und disruptiven Entwicklungen weltweit.

Die Einordnung eines fahrerlosen, frei navigierenden automatischen Fütterungssystems (AFS) unter rechtlichen Aspekten und Haftungsfragen ist äußerst schwierig. Diese Automatisierungsform von AFS ist bislang rechtlich nicht vorgesehen, zumal eine Zuordnung zum Geltungsbereich der Straßenverkehrsordnung unklar ist, da sich diese Fahrzeuge vorrangig auf Hofflächen bewegen. Die unterschiedlichen Infrastrukturen von landwirtschaftlichen Höfen machen eine Einzelfallentscheidung unabdingbar und lassen ein solches AFS mehr als Projekt erscheinen als ein Produkt. Der weiteren Beobachtung und Einschätzung der rechtlichen Situationen kommt in Zukunft eine besondere Bedeutung zu.

Ein Teil der Automation der Fütterung kann bislang technisch nicht abgebildet werden. Die Prüfung der Futterqualität liegt weiterhin beim Landwirt. Bisher ist eine umfassende automatisierte Beprobung der Silage technisch nicht gelöst, auf Basis derer das System selbstständig Entnahmestellen im Silo definieren könnte. Zwar gibt es Roboter, die Proben unterschiedlichster Art und auch aus einem Silo ziehen können, um sie dann teils auch mobil auszuwerten. Allerdings entspricht das Spitzentechnologien, die außerhalb von Forschung und Entwicklung bislang aus finanzieller Sicht, verfahrenstechnischen Aspekten und fehlender Robustheit nicht eingesetzt werden. Auch hier ist zu erwarten, dass die benötigte Hardware im Preis sinkt und die Multi-Sensorik und Datenanalyse künftig diese Aufgabe lösen kann. Beispiele für Entwicklungen in dieser Richtung sind die Feuchtemessung in Mähdreschern, die NIRS (Nahinfrarotspektroskopie) in Futtermischwagen zur Trockenmasseberechnung, Bildauswertungen mit KI (Künstlicher Intelligenz) bei der Bekämpfung von Pflanzen im Ackerbau oder Fäulnisgas-Sensoren zur Detektion von Fäulnisnestern im Silo.

9. Danksagung

Eine Dissertation ist ein Marathon. Es ist erlaubt zu sprinten, schnell zu laufen, zu gehen, stehen zu bleiben und auch durchzuatmen. Manche Abschnitte meistert man mit Leichtigkeit. Andere fühlen sich an, als würde auf der Stelle treten.

Ich habe meinen Marathon erfolgreich absolviert. Und dass auch dank vieler „Fans“ an der Strecke, dank „Helfern“ die einem mit „Erfrischungen“ neuen Antrieb geben. Diesen Fans und Helfern – meiner Familie, meinen Freunden und meinen Förderern – gebührt meine tiefste Dankbarkeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Heinz Bernhardt, für das von Anbeginn große Vertrauen in meine Person und Fähigkeiten und für die Möglichkeit dieses Thema bearbeiten zu dürfen. Die Arbeit an der TU, in Forschung und Lehre, hat mir viele wertvolle Erfahrungen beschert, auf die ich mit Freude zurückblicken kann.

Ebenso möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Jörn Stumpfenhausen bedanken. Sie haben mich bereits während meiner Bachelorarbeit betreut und hatten schon damals große Fürsprache für mich übrig. Durch Sie kam der Stein der Promotion ins Rollen und Sie haben großen Anteil daran, dass dieser nicht auf halbem Wege liegen blieb.

Herrn Dr. Felix Adrion gilt mein Dank, da er mir als Mentor im Rahmen der TUM Graduate School zur Seite stand. Vielen Dank für die große Förderung, auch bereits während meines Masterstudiums. Des Weiteren möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Julia Steinhoff-Wagner bedanken, die den Vorsitz der Prüfungskommission übernommen hatte. Vielen Dank für Ihren beharrlichen Einsatz.

Allen Studierenden, die mit ihren Abschlussarbeiten einen wertvollen Beitrag geleistet haben, möchte ich für Ihre stets freundliche, engagierte und fachlich hilfreiche Unterstützung danken.

Ein herzliches Dankeschön gilt allen Kolleginnen, Kollegen und Freunden am Lehrstuhl für die fortwährende Unterstützung all die Jahre. Ihr habt diese Zeit, mit eurer Unterstützung, Freundschaft und Menschlichkeit erst so besonders gemacht.

Abschließend bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Frau, meiner Tochter, meinen Eltern, meinen Geschwistern, meiner großen Familie. Ohne eure unermüdliche Unterstützung, euer Verständnis, wäre mir die erfolgreiche Promotion nicht möglich gewesen. Danke, dass ihr stets an meiner Seite steht und mich mit Rat, Tat und Wohlwollen unterstützt!

10. Literaturverzeichnis

Adeili (2015): Development of a control unit for the autonomous guidance of manure removal—, cubicle cleaning—and bedding machines, as well as of automotive feeder—mixing—vehicles. In: *Proceedings of the Environmentally Friendly Agriculture and Forestry for Future Generations. XXXVI CIOSTA & CIGR SECTION V Conference*, S. 19.

Adeili, Stefanie; Haidn, Bernhard; Robert, Markus (2015a): Development of a control unit for the autonomous guidance of manure removal-, cubicle cleaning- and bedding machines, as well as of automotive feeder-mixing-vehicles. In: V. D. Popov und V. V. Belyakov (Hg.): *Environmentally Friendly Agriculture and Forestry for Future Generations. XXXVI CIOSTA & CIGR SECTION V Conference*. Sankt Petersburg, 26. - 28.05.2015. Saint Petersburg State Agrarian University. Sankt Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University, S. 19–26.

Adeili, Stefanie; Haidn, Bernhard; Robert, Markus (2015b): Entwicklung eines Steuerungsmoduls zur autonomen Führung eines Selbstfahrer-Futtermischwagens. In: KTBL (Hg.): *Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2015*. 12. Jahrestagung: Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2015. Freising, 08. - 10.09.2015. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, S. 218–224.

Agerer, Markus Sebastian (2021): Risikobeurteilung & Gefahrenanalyse. Olching. Online verfügbar unter <http://www.maschinen-sicherheit.net/07-seiten/-02-risikobeurteilung.php>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (Hg.) (2018): *Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbstfahrenden Auto*. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/grundlagen/autonomes-fahren-5-stufen/>, zuletzt geprüft am 15.06.2020.

B. Strautmann & Söhne GmbH u. Co. KG (Hg.) (o. J.): *Weltneuheit aus dem Hause Strautmann*. Online verfügbar unter <http://www.strautmann.de/Unternehmen/Aktuelles/Weltneuheit%20-%20Autonomer%20Selbstfahrer%20Verti-Q.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.

Bava, Luciana; Tamburini, Alberto; Penati, Chiara; Riva, Elisabetta; Mattachini, Gabriele; Provolo, Giorgio; Sandrucci, Anna (2016): Effects of feeding frequency and environmental conditions on dry matter intake, milk yield and behaviour of dairy cows milked in conventional or automatic milking systems. In: *Italian Journal of Animal Science* 11 (3), e42. DOI: 10.4081/ijas.2012.e42.

- Bechar, Avital; Vigneault, Clément (2016): Agricultural robots for field operations: Concepts and components. In: *Biosystems Engineering* 149, S. 94–111. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014.
- Belair Sarl (2012a): AVISO - Robot d'alimentation distributeur mélangeur. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=sylFftJgHVQ>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.
- Belair Sarl (2012b): AVISO ROBOT ALIMENTATION AVISO. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=bO7ZNNi78E0>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.
- Bellof, Gerhard; Granz, Susanne (Hg.) (2019): Tierproduktion. Nutztiere züchten, halten und ernähren. Unter Mitarbeit von Georg Dusel, Marco König, Hans-Jürgen Kunz, Katrin Mehlkow-Nerge, Johann Marx, Wilhelm Pabst et al. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Bernhardt, Heinz (2021): Technik in der Rinderhaltung. In: Ludger Frerichs (Hg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2020*. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek Braunschweig. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge. Braunschweig, S. 1–15. Online verfügbar unter <https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2020/chapter/rinderhaltung.html>, zuletzt geprüft am 03.10.2022.
- Bisaglia, Carlo; Nydegger, Franz; Grothmann, Anne; Pompe, Hanneke (2010): Automatic and Frequency-programmable Systems for Feeding TMR: State of the Art and available Technologies. In: CIGR (Hg.): *17th World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*.
- Bonett, Douglas G.; Price, Robert M. (2002): Statistical inference for a linear function of medians. Confidence intervals, hypothesis testing, and sample size requirements. In: *Psychological Methods* 7 (3), S. 370–383. DOI: 10.1037/1082-989X.7.3.370.
- Bonsels, Thomas (2016): Wie genau füttern Roboter? In: *Top Agrar* (3), S. 30–37.
- Bragg, D.St.A.; Murphy, M. R.; Davis, C. L. (1986): Effect of Source of Carbohydrate and Frequency of Feeding on Rumen Parameters in Dairy Steers. In: *Journal of Dairy Science* 69 (2), S. 392–402. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(86)80417-9.
- Breitkopf, A. (2019): Prognostizierter Umsatz mit Servicerobotern weltweit nach Bereichen im Jahr 2025. Hg. v. Tractica Market Forecasts. Statista.de. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/870614/umfrage/prognostizierter-umsatz-mit-servicerobotern-weltweit-nach-bereichen/#statisticContainer>, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- C4Real (2016): Innovado automatisch voersysteem - Schuitemaker. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=WowOIWReJtc&t=85s>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

- Cacilo, Andrej; Schmidt, Sarah; Wittlinger, Philipp; Herrmann, Florian; Bauer, Wilhelm; Sawade, Oliver et al. (2015): Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen - Industriepolitische Schlussfolgerungen. Dienstleistungsprojekt 15/14: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi): Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/H/hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D1, zuletzt geprüft am 18.09.2018.
- Colman, D. R.; Beever, D. E.; Jolly, R. W.; Drackley, J. K. (2011): Commentary: Gaining from technology for improved dairy cow nutrition: Economic, environmental, and animal health benefits. In: *The Professional Animal Scientist* 27, S. 505–517. Online verfügbar unter <http://pdfs.semanticscholar.org/3bd1/84bd898d7dbb126d70c49e02cde0b5ea211f.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2020.
- Cormall A/S (2014a): MultiFeeder V4. Hg. v. Cormall A/S. Online verfügbar unter <http://www.cormall.dk/index.php/DE/2-uncategorised/95-foderrobot>, zuletzt geprüft am 12.01.2018.
- Cormall A/S (2014b): MultiFeeder V4. Youtube.com. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=vcwy1Q9x8LQ>, zuletzt geprüft am 11.01.2018.
- Cormall1 (2011): Cormall Dairy feeding with belt conveyer. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=i-6gTm_29ds, zuletzt geprüft am 05.09.2018.
- Csaba (2018): Mobil robot navigation using 2D LIDAR. In: *Proceedings of the 2018 IEEE 16th World Symposium*, S. 143.
- DeLaval (2014): DeLaval Optimat Automated Feeding System. Hg. v. DeLaval GmbH. Youtube.com. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=46_LWI2OQiY, zuletzt geprüft am 16.01.2018.
- DeLaval GmbH (Hg.) (2018): DeLaval Optimat - Sparen Sie Zeit und Arbeitskosten. Online verfügbar unter <https://www.delaval.com/de/unsere-losungen/futterung/delaval-optimat/>, zuletzt geprüft am 16.01.2018.
- DeVries, T. J. (2010): Review: Behaviour and its role in the nutritional management of the growing dairy heifer. In: *Canadian Journal of Animal Science* 90 (3), S. 295–302. DOI: 10.4141/CJAS09123.
- DeVries, T. J.; Keyserlingk, M.A.G. von; Beauchemin, K. A. (2005): Frequency of Feed Delivery Affects the Behavior of Lactating Dairy Cows. In: *Journal of Dairy Science* 88 (10), S. 3553–3562. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(05)73040-X.

EDER GmbH (Hg.) (o. J.): feedstar. Das automatische Fütterungssystem. Die wirtschaftliche und robuste Lösung für eine tiergerechte Fütterung. Online verfügbar unter <http://www.eder-feedstar.de/index.html>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.

Eichhorn, Horst; Götz, August (Hg.) (1985): Landtechnik. 6., Neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Ulmer (Landwirtschaftliches Lehrbuch, in vier Bänden / Schriftleitung: August Götz ... ; 4).

Eichler, Jürgen; Eichler, Hans-Joachim (2010): Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 7., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.

VDI Richtlinie 4602, April 2018: Energiemanagement. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/>, zuletzt geprüft am 05.10.2022.

Esterer, Magdalena (2013): SIMA Innovation Awards 2013: 19 innovative Neuheiten ausgezeichnet (Teil 2). In: *landtechnikmagazin.de*. Online verfügbar unter <https://www.landtechnikmagazin.de/Messen-und-Veranstaltungen-Bild-SIMA-Innovation-Award-Lobende-Erwaehnung-fuer-Fuetterungsroboter-Aviso-von-Belair-20465-3908.php>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

Euromilk (2016): TMRobot. Hg. v. GAMA Group. Online verfügbar unter <http://euromilk.pl/de/produkte/futterungsautomatisierung/tmrobot-OVGSRJ/>, zuletzt geprüft am 05.09.2018.

EUROMILK POLSKA (2016): TMRobot - automated animal feeding system. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=PB0g_AuDBhk, zuletzt geprüft am 05.09.2018.

Europäische Union (2006): Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=DE>, zuletzt geprüft am 08.10.2018.

French, N.; Kennelly, J. J. (1990): Effects of Feeding Frequency on Ruminant Parameters, Plasma Insulin, Milk Yield, and Milk Composition in Holstein Cows. In: *Journal of Dairy Science* 73 (7), S. 1857–1863. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(90)78866-2.

Friedrich, Johannes (2017): Technologische Analyse der freien Navigation von mobilen AFS im Milchviehstall. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Weihenstephan. Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik.

Fritsche, Paul; Kueppers, Simon; Briese, Gunnar; Wagner, Bernardo (2016): Radar and LiDAR Sensorfusion in Low Visibility Environments. In: Proceedings of the 13th International

Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics: SCITEPRESS - Science and and Technology Publications.

Fröhlich, Georg; Böck, Stephan; Rödel, Gerhard; Wendling, Franz; Wendl, Georg (2005): Automatische Fütterungsanlagen für Veruchs- und Prüfbetriebe. In: *Landtechnik* 60 (2), S. 102–103. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt5_publication_landtechnik_2-2005.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2019.

Frost & Sullivan (2016): LiDAR: Driving the Future of Autonomous Navigation. Hg. v. Frost & Sullivan. Mountain View, CA. Online verfügbar unter <https://pdf4pro.com/download/lidar-driving-the-future-of-autonomous-navigation-2f66.html>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Gao, Xinyu; Li, Jinhai; Fan, Lifeng; Zhou, Qiao; Yin, Kaimin; Wang, Jianxu et al. (2018): Review of Wheeled Mobile Robots' Navigation Problems and Application Prospects in Agriculture. In: *IEEE Access* 6, S. 49248–49268. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2868848.

Gasser, Tom Michael; Seeck, Andree; Walker Smith, Bryant: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 27–54. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-05734-3>, zuletzt geprüft am 25.02.2021.

Gavrilov, Yulia; Benjamini, Yoav; Sarkar, Sanat K. (2009): An adaptive step-down procedure with proven FDR control under independence. In: *Ann. Statist.* 37 (2), S. 619–629. DOI: 10.1214/07-AOS586.

GEA Farm Equipment / Mullerup (Hg.) (o. J.a): Belt Feeder, Belt Conveyor. Die Wegbereiter für die effiziente Rohfuttermittellversorgung. GEA Farm Technologies GmbH. Online verfügbar unter <https://www.gea.com/de/products/automatic-feeding-belt-feeder.jsp>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.

GEA Farm Equipment / Mullerup (Hg.) (o. J.b): Free Stall Feeder. Mit optimierter Futtermittellversorgung zur Qualitätsmilch. GEA Farm Technologies GmbH. Online verfügbar unter <https://www.gea.com/de/products/free-stall-feeder.jsp>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.

GEA Farm Equipment / Mullerup (Hg.) (o. J.c): Mix & Carry. Reine Profis für das Futtermittellmanagement im Laufstall. GEA Farm Technologies GmbH. Online verfügbar unter <https://www.gea.com/de/products/automatic-feeding-mix-and-carry.jsp>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.

GEA Farm Technologies GmbH (Hg.) (o. J.): GEA MixFeeder with WIC. Precise and efficient group feeding with intelligent Wireless Integrated Control (WIC). GEA Farm Technologies GmbH. Online verfügbar unter <https://www.gea.com/de/products/automatic-feeding-mix-feeder.jsp>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.

Geduld, Georg (2012): Lidarsensorik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2., korrigierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 172–185.

Göbel, Jürgen (2011): Radartechnik. Grundlagen und Anwendungen. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin: VDE-Verl.

Götting KG (Hg.) (o. J.): Laserscanner zur Navigation. Online verfügbar unter <https://www.goetting.de/komponenten/43600>, zuletzt geprüft am 19.09.2018.

Gotzig, Heinrich; Geduld, Georg; Geduld, Georg Otto (2015): LIDAR-Sensorik. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 317–334. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-05734-3.pdf>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Greis, Friedhelm (2016): Wiener Übereinkommen erlaubt vollautomatisierte Autos. Hg. v. Golem Media GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.golem.de/news/autobahnpilot-wiener-uebereinkommen-erlaubt-vollautomatisierte-autos-1603-119922.html>, zuletzt geprüft am 25.02.2021.

Griepentrog, Hans W. (2019): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Wichtige Zusammenhänge kurz erklärt. DLG-Merkblatt 447. In: *DLG-Merkblatt* (447). Online verfügbar unter https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_447.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2020.

Grondahl, Dirk (2018): CCC. (Clean with Comfort and Continuity). Hg. v. Cormall. Online verfügbar unter <http://www.cormall.dk/index.php/DE/2-uncategorised/95-foderrobot>, zuletzt geprüft am 11.01.2018.

Grothmann (2015a): Einfluss von Automatischen Fütterungsverfahren in der Milchviehhaltung auf das Tierverhalten und die Futterqualität. In: *Ph.D. Thesis*.

Grothmann, Anne (2015b): Einfluss von automatischen Fütterungsverfahren in der Milchviehhaltung auf das Tierverhalten und die Futterqualität. Dissertation. Universität Hohenheim, Hohenheim. Institut für Agrartechnik; Forschungsanstalt Agroscope Tänikon.

DIN 1319-1, 1995: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.

Haidn, Bernhard (2014a): Automatische Fütterungssysteme für Rinder - Techniküberblick. Unter Mitarbeit von Johannes Zahner. Hg. v. LfL Landesanstalt für Landwirtschaft (Flyer Nr. 1).

Haidn, Bernhard (2014b): Automatische Fütterungssysteme für Rinder - Techniküberblick. Unter Mitarbeit von Johannes Zahner. Hg. v. LfL Landesamt für Landwirtschaft (Flyer Nr. 2).

Haidn, Bernhard (2014c): Der autonom fahrende Selbstfahrer Futtermischwagen. Unter Mitarbeit von Johannes Zahner. Hg. v. LfL Landesamt für Landwirtschaft (Flyer Nr. 3).

Haidn, Bernhard; Macuhova, Juliana; Maier, Stefanie; Oberschätzl, Rosemarie (2013): Automatisierung der Milchviehhaltung in Beständen bis 200 Kühe - Schwerpunkt Fütterung. Hg. v. Wissenschaftliche Gesellschaft der Milcherzeugerberater e. V. Kiel. Online verfügbar unter <http://www.wgmev.de/download/jahrestagungen/jahrestagungen-archiv/jahrestagung-2013/automatisierung-fuetterung-in-der-milchviehhaltung.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2018.

Hata, Alberto; Wolf, Denis (2014): Road Marking Detection Using LIDAR Reflective Intensity Data and its Application to Vehicle Localization // Road marking detection using LIDAR reflective intensity data and its application to vehicle localization. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (Hg.): 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China. IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE, S. 584–589. Online verfügbar unter <http://islab.ulsan.ac.kr/files/announcement/502/Road%20Marking%20Detection%20Using%20LIDAR%20Reflective%20Intensity%20Data%20and%20its%20Application%20to%20Vehicle%20Localization.pdf>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Hermes, Jörg (2015): Sicherer Zustand. Hg. v. Jörg Hermes. Hermes Sicherheits- und Qualitätsmanagement. Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://16590.de/sicherer-zustand>, zuletzt geprüft am 12.11.2018.

Hess, Wolfgang; Kohler, Damon; Rapp, Holger; Andor, Daniel (2016): Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. In: Allison Okamura und Arianna Menciassi (Hg.): 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, May 16th-21st. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE International Conference on Robotics and Automation; ICRA. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1271–1278.

Hetwin Automation Systems GmbH (Hg.) (o. J.a): Aramis II - Fütterungsroboter. Online verfügbar unter <http://www.hetwin.at/de/aramis-ii-fuetterungsroboter.html>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.

Hetwin Automation Systems GmbH (Hg.) (o. J.b): Athos - Fütterungsroboter. Online verfügbar unter <http://www.hetwin.at/de/athos-futterungsroboter.html>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.

Hetzenauer, Josef (2017): Einzigartiger Fütterungsroboter ARAMIS 2 mit Schneidwerk und 8mm doppelter wechselbarer Mischerwanne. Youtube.com. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=bW2sJzIJMcU>, zuletzt geprüft am 18.01.2018.

Höwer, Daniel; Oberst, Christian A.; Madlener, Reinhard (2019): General regionalization heuristic to map spatial heterogeneity of macroeconomic impacts: The case of the green energy transition in NRW. In: *Utilities Policy* 58, S. 166–174. DOI: 10.1016/j.jup.2019.05.002.

Jeantil (Hg.) (o. J.): JEANTIL Automatic Feeding. Online verfügbar unter http://www.jeantil.com/Contenus-Jeantil/2-50-0-0-0-0-145-3-JEANTIL_Automatic_Feeding.html, zuletzt geprüft am 12.01.2018.

JEANTIL VIDEO (Hg.) (2017): Jeantil Automatic Feeding - Robot d'alimentation. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=Qvp-a5s59y0>, zuletzt geprüft am 18.01.2018.

Jendro, Melanie (2018): Weltweit der Erste seiner Art: SICK präsentiert mit dem outdoorScan3 einen Sicherheits-Laserscanner für den Außenbereich. Waldkirch. Jendro, Melanie, melanie.jendro@sick.de. Online verfügbar unter <https://www.sick.com/de/de/weltweit-der-erste-seiner-art-sick-praesentiert-mit-dem-outdoorscan3-einen-sicherheits-laserscanner-fuer-den-aussenbereich/w/press-2018-SPS-outdoorscan3/>, zuletzt geprüft am 03.06.2020.

Klasmeyer, T. H.; Cameron, M. R.; McCoy, G. C.; Clark, J. H. (1990): Effects of Feed Processing and Frequency of Feeding on Ruminal Fermentation, Milk Production, and Milk Composition. In: *Journal of Dairy Science* 73 (12), S. 3538–3543. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(90)79053-4.

Krause, K. Marie; Oetzel, Garrett R. (2006): Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: A review. In: *Animal Feed Science and Technology* 126 (3-4), S. 215–236. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2005.08.004.

Kring, Friedhelm (2020a): Grundsätze der Risikobeurteilung von Maschinen. Hg. v. WEKA MEDIA GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.weka-manager-ce.de/risikoanalyse/grundsaeetze-risikobeurteilung-von-maschinen/>, zuletzt geprüft am 25.02.2021.

Kring, Friedhelm (2020b): Risikoeinschätzung, Risikobewertung, Risikoanalyse? So hängen diese Schritte zusammen. Hg. v. WEKA MEDIA GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter

<https://www.weka-manager-ce.de/risikoanalyse/risikoeinschaetzung-risikobewertung-risikoanalyse-zusammenhang/>, zuletzt geprüft am 03.06.2020.

Kubinger, Wilfried; Peschak, Bernhard; Wöber, Wilfried; Sulz, Clemens (2017): Bildgebende Sensorsysteme für robotische Systeme in der Agrar- und Landtechnik. In: *Elektrotech. Inftech.* 134 (6), S. 316–322. DOI: 10.1007/s00502-017-0513-3.

KUHN S.A. (2014): Automatic Feeding. KUHN - TKS: Neue Partnerschaft für die Entwicklung automatischer Fütterungssysteme. Saverne (Frankreich). Rau, Frank. Online verfügbar unter [http://www.kuhn.de/internet/webde.nsf/0/9CC9A56A4124C805C1257D86003C98B1/\\$File/Pressemitteilung%20TKS%20%20KUHN_%202014_DE.pdf](http://www.kuhn.de/internet/webde.nsf/0/9CC9A56A4124C805C1257D86003C98B1/$File/Pressemitteilung%20TKS%20%20KUHN_%202014_DE.pdf), zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Lange, Holger (2020): Funktionale Sicherheit: Der Schutz des Menschen vor der Maschine. Hg. v. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. Deutsches Institut für Normung e.V. Online verfügbar unter <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/funktionale-sicherheit>, zuletzt geprüft am 09.06.2020.

Lechler GmbH (Hg.) (o. J.): Flachstrahldüsen. Metzingen. Online verfügbar unter https://www.lechler.com/fileadmin/media/kataloge/pdfs/industrie/katalog/DE/04_flachstrahl/04_Flachstrahl_D_0616.pdf, zuletzt geprüft am 17.10.2018.

Lefcourt, Alan M.; Schmidtman, Edward T. (1989): Body Temperature of Dry Cows on Pasture: Environmental and Behavioral Effects. In: *Journal of Dairy Science* 72 (11), S. 3040–3049. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(89)79457-1.

Lely (Hg.): Lely Vector. Automatisches Fütterungssystem. Online verfügbar unter https://www.lely.com/media/filer_public/50/d6/50d6ed36-d4fa-4aba-9972-ad345bb1bc86/lely_vector_lhqb04014dea.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2018.

LemmerFullwood (Hg.) (2012): Lemmer Fullwood FMR Fütterungsroboter. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=pfuYBJXwkIA>, zuletzt geprüft am 18.01.2018.

Liu, Feng (2010): Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. Dissertation. Karlsruher Insitut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Insitut für Mess- und Regelungstechnik mit Maschinenlaboratorium (MRT). Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000019589>, zuletzt geprüft am 19.09.2018.

Lucas G (Hg.) (2017): I-Ron Mix System. Automatic Feeding System. Online verfügbar unter <http://www.lucasg.com/de/product/i-ron-mix-system-f%C3%BCtterungsrobotter>, zuletzt geprüft am 12.01.2018.

- Malberg, Horst (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. Fünfte, erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-37222-6>.
- Mäntysaari, P.; Khalili, H.; Sariola, J. (2006): Effect of Feeding Frequency of a Total Mixed Ration on the Performance of High-Yielding Dairy Cows. In: *Journal of Dairy Science* 89 (11), S. 4312–4320. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72478-X.
- Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (Hg.) (2015): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. s.l.: Springer. Online verfügbar unter <http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=18942>.
- Meltebrink, Christian; Malewski, Benjamin; Trabhardt, Andreas; Igelbrink, Tristan; Hellermann, Steffen; Ruckelshausen, Arno (2018): Vom manuellen Selbstfahrer zum autonomen Futtermischwagen: Konzept, Technologie und Sicherheit. In: *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, S. 159–162. Online verfügbar unter <https://www.gil-net.de/Tagung/660.pdf>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.
- Menge-Sonnentag, Rainald (2016): Google veröffentlicht Cartographer zum Erstellen von Karten mit Robotern. Hg. v. Heise Medien. Website. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/developer/meldung/Google-veroeffentlicht-Cartographer-zum-Erstellen-von-Karten-mit-Robotern-3341743.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2020.
- Mulligan, F. J.; O’Grady, L.; Rice, D. A.; Doherty, M. L. (2006): Herd Health approach to dairy cow nutrition and production diseases of the transition cow. In: *Animal Reproduction Science* 96, zuletzt geprüft am 16.05.2020.
- N.N. (2020): Risikominderung durch Benutzerinformation. Hg. v. Markus Sebastian Agerer. [maschinen-sicherheit.net](http://www.maschinen-sicherheit.net). Olching. Online verfügbar unter <http://www.maschinen-sicherheit.net/07-seiten/0487-risikominderung-benutzerinformation.php>, zuletzt geprüft am 03.06.2020.
- Nikkhah, A.; Furedi, C. J.; Kennedy, A. D.; Crow, G. H.; Plaizier, J. C. (2008): Effects of feed delivery time on feed intake, milk production, and blood metabolites of dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 91 (11), S. 4249–4260. DOI: 10.3168/jds.2008-1075.
- Nocek, James E. (1997): Bovine Acidosis: Implications on Laminitis. In: *Journal of Dairy Science* 80 (5), S. 1005–1028. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76026-0.
- Oberschätzl, Rosemarie (2015): Energieverbrauch automatischer Fütterungssysteme in Praxisbetrieben. 12. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Freising, 2015.

O'Mahony, Niall; Campbell, Sean; Carvalho, Anderson; Harapanahalli, Suman; Velasco-Hernandez, Gustavo Adolfo; Riordan, Daniel; Walsh, Joseph (2019): Adaptive Multimodal Localisation Techniques for Mobile Robots in Unstructured Environments : A Review. In: 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT'19). Limerick, Ireland, 4/15/2019 - 4/18/2019: IEEE, S. 799–804.

One2Feed (2015): Automatic feeding ONE2FEED. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=H6zXOTRCD3w>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

One2Feed (2016): Mobil Hopper MWF 2160 - Automatic feeding. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=41UBRdspwYE>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

One2Feed (2018): Homepage. Silkeborg (Dänemark). Online verfügbar unter <https://www.one2feed.dk/de/>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Orlosky, Scott; Hubsch, Jean-Marc (2018): Der Weg zum sicheren Design. Das A und O der funktionalen Sicherheit: In: *Elektronik Safety+Security* 2018, 2018 (September 2018), S. 25–27.

Paar, Johannes (2013): SIMA war Zentrum der Landtechnik. In: *Landwirt* (6).

Pascher, Peter; Hemmerling, Udo; Naß, Silke; Stork, Simon (2019): Situationsbericht 2019/20. Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Hg. v. DBV Deutscher Bauernverband e. V. Visselhövede. Online verfügbar unter <https://www.bauernverband.de/situationsbericht>, zuletzt geprüft am 09.06.2020.

Pellon GmbH (2016): Feedline. Automatisierte Fütterungssysteme. Hg. v. Pellon GmbH. Online verfügbar unter https://www.pellon-gmbh.de/wp-content/uploads/2017/02/Feedline2016_GER.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Pellon Group Oy (2010): PELLON TMR. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=7DkOn2HLUYA>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Pilz GmbH & Co. KG (Hg.) (o. J.): Recht & Normen - Gesetze, Richtlinien, Normen für die Maschinensicherheit. Online verfügbar unter <https://www.pilz.com/de-DE/knowhow/law-standards-norms>, zuletzt geprüft am 12.11.2018.

PitchEngine Inc. (2012): The latest Lely innovation - Lely Vector automatic feeding system. Online verfügbar unter <https://pitchengine.com/pitches/a8f4cf82-0e4c-4794-9c4c-ef4b28917a28>.

Pleinchamp (Hg.) (2014): [SPACE 2014] Jeantil : le robot d'alimentation Automatic Feeding en action. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=eZRowLjlyXw&t=231s>, zuletzt geprüft am 18.01.2018.

- Presse- und Informationsdienst der Bundesregierung (2016): Rechtssicherheit für automatisiertes Fahren. Strassenverkehr 4.0. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/rechtssicherheit-fuer-automatisiertes-fahren-349048>, zuletzt geprüft am 15.06.2020.
- Reger, Matthias (2018a): FMCW-Radar. Interview mit Dominik Herwald. Telefoninterview. Protokoll.
- Reger, Matthias (2018b): Notizen zur EuroTier 2018. Hannover. schriftliche Notiz.
- Reger, Matthias; Bernhardt, Heinz; Stumpenhausen, Jörn (2017): Navigation and Personal Protection in Automatic Feeding Systems. In: Igor Kovačev (Hg.): Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 45th International Symposium on Agricultural Engineering. Actual Tasks on Agricultural Engineering. Opatija, Kroatien, 21.-24.02.2017. University of Zagreb, Faculty of Agriculture: Thomas Reuters (Actual Tasks on Agricultural Engineering, 45), S. 523–530. Online verfügbar unter http://atae.agr.hr/45th_ATAE_proceedings.pdf, zuletzt geprüft am 18.06.2022.
- Reger, Matthias; Friedrich, Johannes; Wörz, Sascha; Stumpenhausen, Jörn; Sieghart, Anton; Bernhardt, Heinz (2018): Challenges in modern automated Feeding Systems. In: 2018 Annual International Meeting. 2018 Annual International Meeting. Detroit, Michigan, USA, 29.07.-01.08.2018. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers (Annual International Meeting). Online verfügbar unter [https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=49456&t=1&redir=aid=49456&redir=\[confid=det2018\]&redirType=techpapers.asp&redirType=techpapers.asp](https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=49456&t=1&redir=aid=49456&redir=[confid=det2018]&redirType=techpapers.asp&redirType=techpapers.asp), zuletzt geprüft am 18.06.2022.
- Reger, Matthias; Stumpenhausen, Jörn; Bernhardt, Heinz (2022a): Evaluation of LiDAR for the Free Navigation in Agriculture. In: *AgriEngineering* 4 (2), S. 489–506. DOI: 10.3390/agriengineering4020033.
- Reger, Matthias Thomas Anton Johann; Stumpenhausen, Jörn; Bernhardt, Heinz (2022b): Lidar and Radar Enable the Next Generation of Dairy Cattle Feeding. In: *Applied Engineering in Agriculture* 38 (1), S. 207–217. DOI: 10.13031/aea.14741.
- Regler, Fredrik (2018): Automatische Rinderfütterung - Was wollen Landwirte eigentlich? Bachelorarbeit. Technische Universität München, Weihenstephan. Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik.
- Regler, Fredrik; Reger, Matthias; Oberschätzl-Kopp, Rosemarie; Stumpenhausen, Jörn; Bernhardt, Heinz (Hg.) (2019): Requirements for Automatic Feeding Systems in Southern German Dairy Farms. XXXVIII CIOSTA & CIGR V International Conference. Rohdos, Griechenland, Juni 24-26, 2019. Online verfügbar unter <https://efita-org.eu/wp-content/uploads/2020/02/11.-ciosta3.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2020.

- Reich, Annika (2019): Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für einen autonomen Futtermischwagen. Masterarbeit. Technische Universität München, Freising/Weihenstephan. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.
- Richter, Ralf (2014): Das Verfahren der Risikobeurteilung in Form eines Ablaufdiagramms. Hg. v. Wikimedia Foundation Inc. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Risikobeurteilung.jpg>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2014, zuletzt geprüft am 29.06.2020.
- Rintelen, Markus; Boos, Alexander (2016): Angebot: Sensorik für Innok HEROS. Dienstleistung: Consulting, Training und Implementierung. Münchsried.
- Rittershaus, Christiane (2002): Analyse zu geräte- und verfahrenstechnischen Einflüssen in Melkständen auf Eutergesundheit und Milchqualität. 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5022069>.
- Robles, V.; González, L. A.; Ferret, A.; Manteca, X.; Calsamiglia, S. (2007): Effects of feeding frequency on intake, ruminal fermentation, and feeding behavior in heifers fed high-concentrate diets. In: *Journal of animal science* 85 (10), S. 2538–2547. DOI: 10.2527/jas.2006-739.
- Rovibec Agrisolutions (Hg.) (o. J.): Feeding Robots. Online verfügbar unter <https://rovibecagrisolutions.com/en/cat-produit/feeding-robots>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.
- Schauer Agrotronic GmbH (Hg.) (o. J.): Rinderfütterung. Innovative Lösungen zum Leistungssteigern und Futterkostensparen. Online verfügbar unter <https://www.schauer-agrotronic.com/rinderstall/rinderfuetterung/>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.
- Schick, Matthias (2019): Smart Farming in der Tierhaltung. Grundlagen, Chancen, Herausforderungen. SVT Jahrestagung 2019 AgroVet. Strickhof, 2019, zuletzt geprüft am 31.05.2020.
- Schön, Hans; Auernhammer, Hermann; Bauer, Roland; Boxberger, Josef; Demmel, Markus; Estler, Manfred et al. (1998): Landtechnik, Bauwesen. Verfahrenstechnik - Arbeit - Gebäude - Umwelt. Unter Mitarbeit von Hans Schön. 9., völlig Neubearb. und erw. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV-Verlagsgesellschaft; Landwirtschaftsverlag (Die Landwirtschaft, Bd. 3).
- Schubnel, Matthieu (2017): L´automate I-Ron Mix System de Lucas G nourrit les ruminants. Hg. v. Matériel - Agricole Magazine. Online verfügbar unter <https://www.materielagricole.info/50819/lautomate-i-ron-mix-system-de-lucas-g-nourrit-les-ruminants/?v=11aedd0e4327>, zuletzt geprüft am 12.01.2018.

Schuitemaker Machines (Hg.) (o. J.): Vollautomatisch Füttern - Innovado. Unter Mitarbeit von Pieter Vos. Online verfügbar unter <https://www.schuitemaker-landtechnik.de/produkte/f%C3%BCttern/vollautomatisch-f%C3%BCttern-innovado/>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

Shabi, Z.; Arieli, A.; Bruckental, I.; Aharoni, Y.; Zamwel, S.; Bor, A.; Tagari, H. (1998): Effect of the Synchronization of the Degradation of Dietary Crude Protein and Organic Matter and Feeding Frequency on Ruminal Fermentation and Flow of Digesta in the Abomasum of Dairy Cows. In: *Journal of Dairy Science* 81 (7), S. 1991–2000. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75773-X.

Shabi, Z.; Bruckental, I.; Zamwell, S.; Tagari, H.; Arieli, A. (1999): Effects of Extrusion of Grain and Feeding Frequency on Rumen Fermentation, Nutrient Digestibility, and Milk Yield and Composition in Dairy Cows. In: *Journal of Dairy Science* 82 (6), S. 1252–1260. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(99)75348-8.

Shabi, Z.; Murphy, M. R.; Moallem, U. (2005): Within-Day Feeding Behavior of Lactating Dairy Cows Measured Using a Real-Time Control System. In: *Journal of Dairy Science* 88 (5), S. 1848–1854. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72859-9.

DIN EN ISO 12100:2011, 2011: Sicherheit von Maschinen. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-12100/128264334>, zuletzt geprüft am 08.10.2018.

SICK AG (Hg.) (2018): LMS100-10000. LMS1xx. Waldkirch. Online verfügbar unter https://cdn.sick.com/media/pdf/1/41/841/dataSheet_LMS100-10000_1041113_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.10.2018.

Sieber, Josef; Groß, E. (2008): Automatische Melksysteme - neue Technik aus Sich des Unfallschutzes. Unter Mitarbeit von Wolfgang Schatz. Hg. v. Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau. SVLFG. Kassel. Online verfügbar unter http://www.svlfg.de/30-praevention/prv051_fachinfos_a_z/prv0502-landwirtschaft-forstwirtschaft-jagd/06_tierhaltung/06_02_richtiger-umgang-mit-rindern/info0030_melksysteme.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2019.

Smith, N. E.; Ufford, G. R.; Coppock, C. E.; Merrill, W. G. (1978): One Group Versus Two Group System for Lactating Cows Fed Complete Rations. In: *Journal of Dairy Science* 61 (8), S. 1138–1145. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(78)83697-2.

Spiecker, Stephan; Weber, Christoph (2014): The future of the European electricity system and the impact of fluctuating renewable energy – A scenario analysis. In: *Energy Policy* 65, S. 185–197. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.10.032.

Spiekers, Hubert (2016a): 3.1.3 Bedeutung der Energieversorgung. In: Edgar Littmann, Georg Hammerl und Friedhelm Adam (Hg.): *Landwirtschaftliche Tierhaltung*. 13. Aufl.

- München, Münster-Hiltrup: BLV Buchverlag; Landwirtschaftsverlag (Die Landwirtschaft, Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen ; 2), S. 91–92.
- Spiekers, Hubert (2016b): 3.1.5 Steuerung der Futteraufnahme. In: Edgar Littmann, Georg Hammerl und Friedhelm Adam (Hg.): Landwirtschaftliche Tierhaltung. 13. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV Buchverlag; Landwirtschaftsverlag (Die Landwirtschaft, Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen ; 2), S. 94–97.
- Starr, Joseph W.; Lattimer, B. Y. (2014): Evaluation of Navigation Sensors in Fire Smoke Environments. In: *Fire Technol* 50 (6), S. 1459–1481. DOI: 10.1007/s10694-013-0356-3.
- Stumpenhausen, Jörn; Bernhardt, Heinz (2019): Entwicklung der technischen Architektur des "Stall 4.0"-Konzeptes. In: KTBL (Hg.): 14. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. 24.-26. September 2019 in Bonn = 14th Conference Construction, Engineering and Environment in Livestock Farming, Bd. 14. 14. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Bonn, 24.-26. September 2019. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL-Tagungsband), zuletzt geprüft am 21.06.2022.
- SurveyMonkey (Hg.) (2020): Fehlerspanne berechnen mit dem Konfidenzintervallrechner. Online verfügbar unter <https://www.surveymonkey.de/mp/margin-of-error-calculator/>, zuletzt geprüft am 09.06.2020.
- Sutton, J. D.; Hart, I. C.; Broster, W. H.; Elliott, R. J.; Schuller, E. (1986): Feeding frequency for lactating cows: effects on rumen fermentation and blood metabolites and hormones. In: *The British journal of nutrition* 56 (1), S. 181–192.
- TKS Agri (2016a): TKS FeedBelt med FeedMixer. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=K8iNk5Y4Yhw>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.
- TKS Agri (2016b): TKS FeedRobot System + FeedMixer. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=z3ffjdx_duo, zuletzt geprüft am 04.09.2018.
- TKS AS (Hg.) (o. J.): TKS Agri. Online verfügbar unter <http://tk-as.no/tks-agri/category2853.html>, zuletzt geprüft am 04.09.2018.
- top agrar (2018): Wasserbauer präsentiert neuen Futterroboter Shuttle Eco. Weitere Beteiligte: Torsten Altmann. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=vnp-O2JMXqE>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.
- Trabold, Rolf-Jürgen (2007): Fahrerloses Transportieren. In: *Logistik Heute* 29 (1-2). Online verfügbar unter <https://www.logistik-heute.de/Kompetenz-Logistik-Wissen-Know-How/7766/Checklisten/Fahrerloses-Transportieren?page=2>, zuletzt geprüft am 08.10.2018.

Trioliet Mullos BV (Hg.) (2018): TRIOMATIC. Automatisches Fütterungssystem T10 - T20 - T30 - T40. Online verfügbar unter <http://produkte.trioliet.de/automatische-futterung/automatisch-futterung-triomatic-futterungsroboter-hp-2-300.html>, zuletzt geprüft am 16.01.2018.

Ullrich, Günter (2014): Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. 1 Band. Wiesbaden: Springer Vieweg; Springer Fachmedien Wiesbaden.

Ullrich, Günter (2015): The History of Automated Guided Vehicle Systems. In: Günter Ullrich (Hg.): Automated Guided Vehicle Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–14.

Valmetal (Hg.) (o. J.): DAF. New Generation of Automated Ration Distributor. Online verfügbar unter https://valmetal.com/wp-content/uploads/2013/11/2765_valmetal_DAF_en_v2.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Valmetal (2014a): Automated feeding systems - Robotic feeding - Valmetal. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=h_Q9eEEETaU, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Valmetal (2014b): The Valmetal Grain Robot - Robot 210. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?time_continue=10&v=5BA-07Qxe8E, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Valmetal (2016): La Bergerie du Faubourg (Autoration) - Valmetal inc. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=dxxeoSOy91U, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

van Hattum, Bas; Lehnert, Silvia (2007): Die Revolution am Futtertisch. In: *Top Agrar* (5), S. 6–11.

Vargas, Jorge; Alsweiss, Suleiman; Toker, Onur; Razdan, Rahul; Santos, Joshua (2021): An Overview of Autonomous Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (16), S. 5397. DOI: 10.3390/s21165397.

Veauthier, Gregor; Ostermann-Palz (2014): Bequem füttern! In: *Elite* (3), S. 38–45.

Wang, Heng; Wang, Bin; Liu, Bingbing; Meng, Xiaoli; Yang, Guanghong (2017): Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle. In: *Robotics and Autonomous Systems* 88, S. 71–78. DOI: 10.1016/j.robot.2016.11.014.

Wasserbauer GmbH (Hg.) (o. J.a): MixMeister 3000. Online verfügbar unter <https://www.wasserbauer.at/fuetterungsroboter/mixmeister-3000-en.html>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.

- Wasserbauer GmbH (Hg.) (o. J.b): NANOCONCEPT. Online verfügbar unter <https://www.wasserbauer.at/fuetterungsroboter-shuttle-port-lift/nanoconcept1.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.
- wasserbauer123 (2014): Wasserbauer MixMeister KnowHow. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=4hrJsVLuY6c>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.
- wasserbauer123 (2018): Wasserbauer NANO Concept - Shuttle Eco, Power Shuttle, Lift, Port. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=f9zNRUymRkc>, zuletzt geprüft am 12.09.2018.
- Weidmann, Wolfgang (o. J.): Applikationsschrift I. Radarsensorik zur Erfassung bewegter und stationärer Objekte. Hg. v. InnoSent GmbH. Donnersdorf. Online verfügbar unter https://www.innosent.de/fileadmin/media/dokumente/Downloads/InnoSenT_Applikationsschrift_1_-_web.pdf, zuletzt geprüft am 19.09.2018.
- Winckler, Christoph (2009): 4.3 Futteraufnahmeverhalten. In: Steffen Hoy (Hg.): Nutztierethologie. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG (UTB, 3312), S. 89–92.
- Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hg.) (2015): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wirtz, Norbert (2004): Vergleich zwischen automatischem und konventionellem Melken im Hinblick auf Milchleistung und Futteraufwand. Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 2004. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier (Arbeiten aus dem Institut für Tierzuchtwissenschaft, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, 124).
- Wittkowski, Gerhard (2016): 2.1.6 Verdauungssystem. In: Edgar Littmann, Georg Hammerl und Friedhelm Adam (Hg.): Landwirtschaftliche Tierhaltung. 13. Aufl. München, Münster-Hiltrup: BLV Buchverlag; Landwirtschaftsverlag (Die Landwirtschaft, Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen ; 2), S. 37–40.
- Wolff, Christian (o. J.): Grundlagen der Radartechnik. Hg. v. Christian Wolff. Ingenieurbüro Christian Wolff. Köln. Online verfügbar unter <http://www.radartutorial.eu/index.html>, zuletzt geprüft am 05.10.2018.
- Wörz, Sascha; Mederle, Michael; Heizinger, Valentin; Bernhardt, Heinz (2017): A novel approach to piecewise analytic agricultural machinery path reconstruction. In: *Engineering Optimization* 49 (12), S. 2150–2173. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1289742.
- Yamauchi, Brian (2010): Fusing ultra-wideband radar and lidar for small UGV navigation in all-weather conditions. In: Grant R. Gerhart, Douglas W. Gage und Charles M. Shoemaker (Hg.): Unmanned Systems Technology XII. SPIE Defense, Security, and Sensing. Orlando, Florida, Monday 5 April 2010: SPIE (SPIE Proceedings), 769200.

Yang, Shenghui; Liang, Shenghao; Zheng, Yongjun; Tan, Yu; Xiao, Zhang; Li, Baosheng; Liu, Xingxing (2020): Integrated Navigation Models of a Mobile Fodder-Pushing Robot Based on a Standardized Cow Husbandry Environment. In: *Transactions of the ASABE* 63 (2), S. 221–230. DOI: 10.13031/trans.13365.

Zeiske, Karl (2000): Vermessen leicht gemacht. Hg. v. Leica Geosystems AG. Heerbrugg (Schweiz). Online verfügbar unter http://www.vermessungsseiten.de/vermessungstechniker/vermessen_leicht_gemacht.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2020.

V. Publikationsliste

REGER, M.; STUMPENHAUSEN, J.; BERNHARDT, H. (2022): Evaluation of LiDAR for the Free Navigation in Agriculture. In: *AgriEngineering* 4 (2), S. 489–506. DOI: 10.3390/agriengineering4020033.

REGER, M.; STUMPENHAUSEN, J.; BERNHARDT, H. (2022): Lidar and Radar Enable the Next Generation of Dairy Cattle Feeding. In: *Applied Engineering in Agriculture* 38 (1), S. 207–217. DOI: 10.13031/aea.14741.

REGLER, F., REGER, M., OBERSCHÄTZL-KOPP, R., STUMPENHAUSEN, J., BERNHARDT, H. (2019): Requirements for automatic feeding systems in southern German dairy farms. In: XXXVIII CIOSTA & CIGR V International Conference (Conference Paper), ISBN 978-618-80440-9-8, CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering), 24. – 26.06.2019, Rodos (GRC)

REGER, M., FRIEDRICH, J., WÖRZ, S., STUMPENHAUSEN, J., SIEGHART, A., BERNHARDT, H. (2018): Challenges in modern automated Feeding Systems. In: Annual International Meeting (Conference Paper), ASABE 2018 (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 29.07. – 01.08.2018, Detroit (USA)

REGER, M., FRIEDRICH, J., WÖRZ, S., STUMPENHAUSEN, J., SIEGHART, A., BERNHARDT, H. (2018): Challenges in modern automated Feeding Systems: Navigation Technologies. In: New engineering concepts for a valued agriculture (Conference Paper), EurAgEng 2018 (European Society of Agricultural Engineers), 08. – 12.07.2018, Wageningen (NL)

REGER, M., STUMPENHAUSEN, J., BERNHARDT, H. (2017): Navigation und Personenschutz mit Radar bei einem automatischen Fütterungssystem. In: Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft (Conference Paper), Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft (GIL e. V.), 37. GIL-Jahrestagung vom 06.-07.03.2017 in Dresden (GER)

REGER, M., BERNHARDT, H., STUMPENHAUSEN, J. (2017): Navigation and Personal Protection in Automatic Feeding Systems. In: Actual Tasks on Agricultural Engineering (Conference Paper), University of Zagreb Faculty of Agriculture, 45. Symposium vom 21.-24.02.2017 in Opatija (CRO)

VI. Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die bei der promotionsführenden Einrichtung bzw. Fakultät

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

der TUM zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

Technologische und Verfahrenstechnische Grundlagen für die Entwicklung eines neuartigen, elektrisch betriebenen, selbstfahrenden automatischen Fütterungssystems.

am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

unter der Anleitung/Betreuung durch

Prof. Dr. H. Bernhardt

Ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Abs.6 und 7 Satz 2 angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht, oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad **noch nicht** erworben und bin **nicht** in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Die öffentlich zugängliche Promotionsordnung der TUM ist mir bekannt, insbesondere habe ich die Bedeutung von § 28 (Nichtigkeit der Promotion) und § 29 (Entzug des Doktorgrades) zur Kenntnis genommen. Ich bin mir der Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung bewusst.

Mit der Aufnahme meiner personenbezogenen Daten in die Alumni-Datei bei der TUM bin ich einverstanden

Freising, den

.....
Unterschrift