

JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT GIESSEN

Fachbereich 09
Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I

HOCHSCHULE GEISENHEIM

Zentrum für Wein- und Gartenbau
Institut für Technik

**KONSTRUKTION EINES ROBOTERFAHRZEUGES ZUR
HOCHDURCHSATZPHÄNOTYPISIERUNG BEI WEINREBEN**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
DOKTORS DER AGRARWISSENSCHAFTEN
(Dr. agr.)

Philipp Rüger, M. Sc. Oenologie
aus Eimsheim

Gießen, im Dezember 2015

**KONSTRUKTION EINES ROBOTERFAHRZEUGES ZUR
HOCHDURCHSATZPHÄNOTYPISIERUNG BEI WEINREBEN**

**DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS DRIVEN ROBOTIC
PLATFORM USED FOR HIGH-THROUGHPUT-PHENOTYPING
IN VITICULTURE**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
DOKTORS DER AGRARWISSENSCHAFTEN
(Dr. agr.)

vorgelegt von: Philipp Rüger, M. Sc. (Oenologie), Eimsheim

Erster Gutachter: Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Bernd Honermeier

Prüfer: Prof. Dr. Diedrich Steffens

Prüfer: Prof. Dr. Ernst-Heinrich Rühl

Vorsitzende: Prof. Dr. Gesine Lühken

vorgelegt am: 25. August 2015

Tag der Disputation: 7. Dezember 2015

Mit Genehmigung des Fachbereichs Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie
und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XVI
1 EINLEITUNG	1
1.1 NOTWENDIGKEIT.....	2
1.2 THESEN.....	3
2 LITERATUR	5
2.1 ORTUNGSSYSTEME UND IHRE ANWENDUNG.....	5
2.1.1 GEODÄTISCHE GRUNDLAGEN	5
2.1.2 SATELLITENORTUNG UND -NAVIGATION.....	17
2.1.3 GEOINFORMATIONSSYSTEME.....	29
2.2 PRÄZISIONS-LANDWIRTSCHAFT.....	34
2.3 ROBOTIK	38
2.4 PHÄNOTYPISIERUNG UND FERNERKUNDUNG	44
3 MATERIAL UND METHODEN.....	48
3.1 FAHRZEUGENTWICKLUNG	49
3.2 KONSTRUKTIVE ARBEITEN	49
3.3 NAVIGATION	50
3.4 SOFTWARE	51
3.5 VERSUCHSFLÄCHEN.....	53
3.6 MESSTECHNIK	56
3.6.1 TRIMBLE VERMESSUNGSSYSTEM GEISENHEIM.....	56
3.6.2 TRIMBLE VERMESSUNGSSYSTEM SIEBELDINGEN.....	62
3.7 DOKUMENTATION	63
3.7.1 ANWENDUNGSPROTOKOLLE	63
3.7.2 HANDBUCH	65
3.8 VERSUCHSFAHRTEN.....	65
3.8.1 ERPROBUNGSFAHRTEN GEISENHEIM.....	65
3.8.2 MESSFAHRTEN GEISENHEIM.....	66
3.8.3 ERPROBUNGSFAHRTEN SIEBELDINGEN.....	68
3.8.4 MESSFAHRTEN SIEBELDINGEN	68

3.9	DATENAUSWERTUNG UND STATISTISCHE ANALYSE	69
4	ERGEBNISSE	70
4.1	TRÄGERFAHRZEUG	71
4.1.1	NEO ALPIN	71
4.1.2	NEOSAT ALPIN.....	74
4.2	KAMERALAGEREGELUNG	79
4.2.1	ENTWURF I.....	80
4.2.2	ENTWURF II	83
4.2.3	ENTWURF III.....	85
4.3	PHENOBOT.....	92
4.3.1	MONTAGE UND AUFBAU	94
4.3.2	ELEKTRONIK.....	98
4.3.3	SCHRITTMOTORSTEUERUNG PHYMOTION.....	109
4.4	IMPLEMENTIERUNG.....	112
4.5	PHENOBOTCONTROL	112
4.6	NAVIGATION	123
4.6.1	IMPORT	126
4.6.2	VERARBEITUNG	127
4.6.3	EXPORT	128
4.6.4	WORKFLOW	128
4.6.5	BEARBEITUNG IN QGIS	137
4.7	VIRTUELLE MASCHINE	139
4.8	VERSUCHSFAHRTEN.....	140
4.8.1	ERPROBUNGSFAHRTEN GEISENHEIM.....	140
4.8.2	MESSFAHRTEN GEISENHEIM	146
4.8.3	ERPROBUNGSFAHRTEN SIEBELDINGEN	159
4.8.4	MESSFAHRTEN SIEBELDINGEN	163
5	DISKUSSION	175
5.1	TRÄGERFAHRZEUG	175
5.2	KAMERALAGEREGELUNG	177
5.3	PHENOBOT.....	179
5.4	SOFTWAREENTWICKLUNG.....	180
5.5	AUSWERTUNG DER VERSUCHSPHASE.....	181
5.6	BEURTEILUNG DER THESEN	185

5.7	AUSBLICK.....	186
6	ZUSAMMENFASSUNG	189
7	SUMMARY.....	191
8	LITERATURVERZEICHNIS	193
9	DANKSAGUNG	203
10	EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG	205
11	ANHANG.....	206

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD
AKh	Arbeitskraftstunden
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
C/A	Coarse Acquisition Code
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CCD	Charged-Coupled-Device
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
CMR	Trimble Compact Measurement Record
CRS	Coordinate Reference System (Koordinatenreferenzsystem)
csv	Comma separated values (Komma-getrennte Werte in einer Textdatei)
DGNSS	Differenzialmessverfahren für GNSS
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOP	Dilution of Precision
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	European Reference Frame
EVAP	Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation
GB	Gigabyte
GCC	GNU Compiler Collection
GIS	Geoinformationssystem
GK	Gauß-Krüger-Projektion
GLONASS	Globaluaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Globales Positionierungssystem (NAVSTAR GPS)

Abkürzung	Beschreibung
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GRS80	Geodectic Reference System 1980
GUI	Grafical User Interface (grafische Benutzeroberfläche)
H ₀	Nullhypothese
H ₁	Alternativhypothese
ha	Hektar
I/O	Input/Output (Ein- und Ausgänge)
IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung
INRSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IPC	Industrie-PC
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
ITRF2008	International Terrestrial Reference Frame 2008
ITRS	International Terrestrial Reference System
JKI	Julius-Kühn-Institut
LBS	Landwirtschaftliches Bus-System
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme
MKS	Multikamerasystem
NAVSTAR GPS	Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index
NIR	Nah-Infrarot (Near Infra Red)
NN	Normal-Null
OSM	Open Street Maps
P(Y)	Precision Code

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
PPS	Precision Positioning Service
px	Pixel
QGIS	Quantum GIS
QZSS	Quasi-Zenit-Satelliten-System
RMS	Root Mean Square (Quadratisches Mittel)
ROS	Robot Operating System
RTK	Real-Time-Kinematic (Echtzeitkinematisch)
S/A	Selective Availability
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
SPS	Standard Positioning Service
SV	Satellit (engl. von Satellite Vehicle)
TSC1	Trimble Survey Controller 1
UAV	Unmanned aerial vehicle
USSD	Unstructured Supplementary Service Data
UTM	Universale-Transversale-Mercator-Projektion
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
WMS	Web Map Service

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1	Das Geoid modelliert nach Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE). Die Bereiche positiver Geoidundulation sind rot, die negativen Bereiche blau dargestellt (ESA 2013).	8
Abb. 2	Zusammenhang zwischen ellipsoidischer Höhe, Geoidundulation und orthometrischer Höhe, modifiziert nach BKG (2014b).....	9
Abb. 3	Dreidimensionale kartesische Koordinaten (P_k) und Polarkoordinaten (P_p), modifiziert nach MÖSER et al. (2012).....	11
Abb. 4	Schematische Darstellung des Berührungszylinders der Gauß-Krüger-Abbildung, modifiziert nach BVV (2009).	12
Abb. 5	Schematische Darstellung des Schnitzzylinders der UTM-Abbildung, modifiziert nach BVV (2009).	13
Abb. 6	Gauß-Krüger-Streifensystem und UTM-Zonensystem (GEOSN 2014). ...	14
Abb. 7	Definition des Koordinatenreferenzsystems nach ISO 19111:2007 (DIN 2007).	15
Abb. 8	Geschwindigkeitsfeld DTRF2008; weitere Realisierung des ITRS. Die Pfeile zeigen die jährliche Verschiebung der Messstationen als Vektor, die Länge ist ein Maß für die Geschwindigkeit (SEITZ et al. 2012).....	17
Abb. 9	Grundprinzip moderner GNSS-Ortung mit mindestens 4 SV im globalen Koordinatenreferenzsystem WGS84 (GPS), modifiziert nach BAUER (2011).	19
Abb. 10	Umlaufbahnen der GPS-Satelliten (NCO 2015c).	21
Abb. 11	Abschaltung der Selective Availability am 2. Mai 2000. Die Genauigkeit wurde von 100 m auf <10 m verbessert (NCO 2015b).....	23
Abb. 12	Boden-Kontroll-Segment des NAVSTAR GPS, modifiziert nach NCO (2015a).	24
Abb. 13	Sammlung bedeutender GIS-Anwendungen, modifiziert nach BILL (2010), STEINIGER & HUNTER (2013).	30
Abb. 14	Freie und offene GIS-Anwendungen, Stand 2012 (STEINIGER, 2013).....	32
Abb. 15	Schematischer Aufbau des LBS (Vorläufer ISOBUS), modifiziert nach AUERNHAMMER (2002).....	36
Abb. 16	Teilaspekte des Precision Farming, modifiziert nach AUERNHAMMER (2002).	36
Abb. 17	Phänotypisierungsplattform BoniRob V2 (AMAZONEN-WERKE 2011)..	42
Abb. 18	Prozessablauf RemoteFarming.1a unter Verwendung der Plattform BoniRob V2 und einem Telearbeitsplatz zur semiautomatischen Beikrautregulierung (AMAZONEN-WERKE 2011, BANGERT et al. 2013).	43
Abb. 19	Drohne (Octocopter) der Firma geo-konzept bei einer Vorführung am Institut für Weinbau der Hochschule Geisenheim.	45

Abb. 20	Drohne (Octocopter) der Firma geo-konzept bei einer Vorführung bestückt mit einer handelsüblichen Systemkamera der Fa. Sony zur Erzeugung von 3D-Geländeaufnahmen.	46
Abb. 21	Screenshot Versuchsparzelle P23 am JKI Geilweilerhof, exportiert aus QGIS. Die farbigen Punkte markieren die Haltepunkte zur Bildaufnahme. (digitales Orthophoto von Geoportal RLP 2014).	52
Abb. 22	Screenshot Qt Creator 4 mit Quelltext der Steuerungsapplikation.	53
Abb. 23	Versuchsflächen (rote Bereiche) in Geisenheim (digitales Orthophoto Geoportal RLP 2014).	54
Abb. 24	Versuchsfläche JKI Geilweilerhof (roter Bereich) (digitales Orthophoto Geoportal RLP 2014).	55
Abb. 25	Einrichten der Referenzstation auf dem Lagefestpunkt TP 601380/04 Geisenheimer Domplatz.	57
Abb. 26	Lagefestpunktbeschreibung TP 601380/04 Geisenheimer Domplatz, HESSISCHES LANDESAMT FÜR BODENMANAGEMENT UND GEOINFORMATION (2014).	58
Abb. 27	GPS-Antenne (rechts) und Funkmodem (links) der Referenzstation (Trimble) auf dem Dach des Institutes für Technik, Hochschule Geisenheim.	59
Abb. 28	Aufbauschema Echtzeitkinematische Messung Rover, modifiziert nach TRIMBLE (2001).	60
Abb. 29	Lotrechte Ausrichtung der GNSS-Antenne über dem Messpunkt bei einer Echtzeitkinematischen Messung, modifiziert nach TRIMBLE (1998).	62
Abb. 30	Großkistentransporter Neo alpin der Fa. Windegger zum Transport von Erntekisten (WINDEGGER 2015).	72
Abb. 31	Steuerungs- und Leistungselektronik im Neo Alpin.	73
Abb. 32	Akkumulatoren, Leistungs- und Steuerungselektronik (unter der weißen Abdeckung) des Neosat Alpin.	74
Abb. 33	Hemisphere Eclipse II GNSS OEM Module. MAIN: Positionierung. DIR: Richtungsbestimmung.	75
Abb. 34	Neosat Alpin während der Erprobung mit RTK-Basisstation.	76
Abb. 35	Mikrocontrollerboard zur Steuerung und Parametrierung.	78
Abb. 36	MKS JKI Siebeldingen (KICHERER 2013b)	80
Abb. 37	Handwagen zur manuellen Führung des MKS (KICHERER 2013b)	80
Abb. 38	Entwurf I der adaptiven Kameralageregelung.	81
Abb. 39	Multi-Kamera-System Entwurf II in 3D (AUTOVIMATION 2014).	82
Abb. 40	Multi-Kamera-System Entwurf II in 2D mit Bemaßung [mm] (AUTOVIMATION 2014).	83
Abb. 41	Kameralageregelung Entwurf II ohne Antriebsmotoren.	84

Abb. 42	Profilschienen der Firma BSO-GmbH; Links und Mitte: PS40.4.0; Rechts: PS40.12.0; Rastermaß: 40 mm; Nutdurchmesser: 8 mm; modifiziert nach BSO-GMBH (2014).....	85
Abb. 43	Entwurf III mit MKS; Vorderansicht	86
Abb. 44	Entwurf III mit MKS; Rückansicht	86
Abb. 45	Lineare horizontale Verschiebeeinrichtung mit Führungsschienen (WSQ-20-1000) und schrittmotorbetriebenem Spindeltrieb (PTGSG-20x4-01-R-1000).	88
Abb. 46	Vertikale Verschiebeeinheit mit Lineartischen (SLW-2080-AWM-800-ES).	89
Abb. 47	Kardanische Aufhängung des MKS auf den Tischen der vertikalen Lineareinheiten.	90
Abb. 48	Detailansicht der Schwenkachse I mit Rundtischlager, Schrittmotor, Flanschadapter und Zahnriemenvorspanneinheit.	91
Abb. 49	Detailansicht der Schwenkachse II mit Rundtischlager, Schrittmotor, Flanschadapter und Zahnriemenvorspanneinheit.	92
Abb. 50	Vorder-, Seiten- und Rückansicht des PHENObot mit Bemaßung [mm] zur Darstellung der Dimensionen.....	93
Abb. 51	Montage des Grundrahmens der Kameralageregelung. Horizontalverschiebung.	95
Abb. 52	Montage des Grundrahmens der Kameralageregelung. Vertikalverschiebung.	95
Abb. 53	Kameralageregelungsaufbau als abgesetzte Einheit. Rückseite mit Bedieneinheit.....	96
Abb. 54	Kameralageregelungsaufbau als abgesetzte Einheit. Vorderseite mit MKS.	96
Abb. 55	Einer der vier Befestigungspunkte des Kameralageregelungssystems auf dem Trägerrahmen des Fahrzeuges.	97
Abb. 56	Kabelführung horizontale Verschiebung.....	98
Abb. 57	Kabelführung horizontale Verschiebung.....	98
Abb. 58	Kabelführung vertikale Verschiebung.....	98
Abb. 59	Anderson SB50 Anschlussstecker mit Ladekabel zum Aufladen der Akkumulatoren.....	99
Abb. 60	Bedieneinheit Fahrzeug, von links: GPS 1, Zündschloss, Notaus, Generator frei, nicht belegt, GPS 2.....	100
Abb. 61	Systemlayout Steuerung PHENObot.....	101
Abb. 62	Frontpanel der Schrittmotorsteuerung phyMOTION.....	102
Abb. 63	Neigungssensor Kübler 8.IS40.22321.....	103
Abb. 64	Gehäuse Netzwerkschwitch MKS (links) und Gehäuse (rechts) Trigger LED-Beleuchtung mit Spannungsversorgung (Mitte).	104

Abb. 65	Innenansicht des Schaltschranks mit allen Komponenten und Verdrahtung.	105
Abb. 66	Bedientableau Schaltschrank mit Touch-LCD und Maus-Tastaturkombination. Hier ist zusätzlich der Rover des RTK-Systems von Trimble mit TSC 1 angebaut.	106
Abb. 67	Schalterfeld I	107
Abb. 68	Schalterfeld II.....	107
Abb. 69	phyLOGIC Toolbox mit Ausschnitt des Programms PHENObot_auto.mpr zur Steuerung der Nivellierung.	110
Abb. 70	Programmablauf Schrittmotorsteuerung PHENObot_auto.mpr.	111
Abb. 71	Steuerungsapplikation PHENObotControl 1.0 (endgültiger Release)..	112
Abb. 72	Gesamtübersicht der Programmfunktionen, Strukturen und Datentypen der Applikation PHENObotControl.	114
Abb. 73	Ausschnitt einer Joblist (Geilweilerhof, Parzelle 23, Reihe 1) mit Koordinaten, Reihenfolge-Indices, stockIDs und Kommandos.	116
Abb. 74	Programmablauf PHENObotControl 1.0	118
Abb. 75	Statusbereich PHENObotControl 1.0 nach erfolgreicher Initialisierung.	119
Abb. 76	Zentrales Bedienfeld mit Auswahlbereich der Job- oder Projektliste im unteren Bereich.	119
Abb. 77	Aufgabenplaner, während der Ausführung wird die sequentielle Abarbeitung Schritt für Schritt dargestellt.	120
Abb. 78	Register Testfunktionen von PHENObotControl 1.0	121
Abb. 79	Register Parameter zur Einstellung von Fahrzeug- und Programmparametern.....	122
Abb. 80	Statusanzeige Firmware RTK-Basis PHENObot.	124
Abb. 81	Manuelles Setzen der Referenzposition der RTK-Basis PHENObot. ...	124
Abb. 82	Festlegung eines Testparcours während der ersten Erprobungsfahrten mit Daten der Attributtabelle: Kommandos (cmds) und Punktreihenfolge (reihenfolg).....	125
Abb. 83	Ablauf Transformationsskript.	130
Abb. 84	Fallabfrage zur Transformation der Stockkoordinaten. Oben: Gerade Reihennummern. Unten: Ungerade Reihennummern.	132
Abb. 85	Angabe der auszuführenden Kommandos (Jobs).	133
Abb. 86	Ausgabe des Azimut und der Differenz zur Nordrichtung.....	134
Abb. 87	Parameterabfrage zur Berechnung der Transformationsparameter....	134
Abb. 88	Fahrpfade P23 mit Zuwegung (gelb).....	137
Abb. 89	Virtuelle Maschine zur Transformation und Konfiguration der RTK-Basisstation PHENObot.....	139

Abb. 90	Erste Erprobungsfahrten mit Neosat Alpin im Hof des Institutes für Technik.	140
Abb. 91	Erste Erprobungsfahrten mit Neosat Alpin im Hof des Institutes für Technik. Rote Markierung: Position der RTK-Basis.	141
Abb. 92	Vorhergesagte Sichtbarkeit der GPS SV in Geisenheim am 7. März 2013, 9:00-21:00 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	142
Abb. 93	Vorhergesagte Sichtbarkeit der GPS SV in Geisenheim am 31. August 2013, 9:00-21:00 Uhr. Elevation auf 0° gesetzt, da die Basis keine sichtbaren Abschattungen hatte. PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	143
Abb. 94	Fahrspuren vor (gelb) und nach (rot) der Kalibrierung mit dem Datumsformat ETRS89 (identische Jobdatei).	144
Abb. 95	PHENObot in der Versuchsanlage des Instituts für Rebenzüchtung, Hochschule Geisenheim. Korrekte Fahrspur nach Kalibrierung der Position der RTK-Basisstation.	145
Abb. 96	PHENObot bei Bildaufnahme mit LED-Beleuchtungsbalken.	146
Abb. 97	Messung der SV-Verfügbarkeit in der Versuchsanlage Rebenzüchtung, HS Geisenheim am 10. September 2014. Links: Wiederholungen 1-3 in Reihe 33, Rechts: Wiederholungen 1-3 in Reihe 34. Versuchszeitraum 15:07-17:08 Uhr.	147
Abb. 98	Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in Reihe 33, Versuchsanlage Rebenzüchtung HS Geisenheim am 10. September 2014. Links: Einstellung GPS-Antennen 1280 mm über Grund (ant_unten); Rechts: Einstellung GPS-Antennen 2000 mm über Grund (ant_oben).	148
Abb. 99	Vorhersage der SV Verfügbarkeit in Geisenheim am 10. September 2014, 12:00-0:00 Uhr. Versuchszeitraum 15:07-17:08 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	149
Abb. 100	Darstellung der SV-Konstellation am 10. September in Geisenheim um 16:00 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	150
Abb. 101	Übersicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 34, Wiederholung 4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.	151
Abb. 102	Detailansicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 33, Wiederholungen 1-4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.	152
Abb. 103	Darstellung der absoluten Genauigkeit als mittlerer RMS-Fehler in Reihe 33, erfasst mit 2 RTK-Systemen. Links: Transversaler Versatz zur Fahrspur; Rechts: Longitudinaler Versatz des Anhaltepunktes.	154
Abb. 104	Detailansicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 34, Wiederholungen 1-4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.	155

Abb. 105	Darstellung der absoluten Genauigkeit als mittlerer RMS-Fehler in Reihe 34, erfasst mit 2 RTK-Systemen. Links: Transversaler Versatz zur Fahrspur; Rechts: Longitudinaler Versatz des Anhaltepunktes.	157
Abb. 106	Relative Positionsgenauigkeit als RMS-Fehler der Mittelwerte in transversaler (links) und longitudinaler (rechts) Richtung bei den Versuchsfahrten am 2. Dezember 2014 (n=4). Die Mittelwerte der Abweichungen, bezogen auf die Reihen 33 und 34, unterscheiden sich nicht signifikant (transversal, P=0,7853; longitudinal, P=0,7463).	159
Abb. 107	Versuchsträger Neosat Alpin mit statisch montiertem MKS in Parzelle 19 während der ersten Erprobung am JKI.....	160
Abb. 108	Getriebedefekt am Fahrtrieb durch Abscheren der Zahnradflanken.	161
Abb. 109	PHENObot während der Erprobung in der Parzelle 23.....	162
Abb. 110	Erprobungsfahrt in völliger Dunkelheit in Parzelle 23.....	163
Abb. 111	Messung der SV-Verfügbarkeit in der Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 29. August 2014. Links: Reihe 1, Rechts: Reihe 2. Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr.	164
Abb. 112	Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in Reihe 1, Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 29. August 2014. Versuchszeitraum: 11:30-13:00 Uhr. Links: Einstellung GPS-Antennen 1280 mm über Grund; Rechts: Einstellung GPS-Antennen 2000 mm über Grund.	164
Abb. 113	Darstellung der SV-Konstellation in Siebeldingen am 29. August 2014, 09:00-15:00 Uhr. Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	165
Abb. 114	Vorhersage der SV Verfügbarkeit in Siebeldingen am 29. August 2014, 09:00-15:00 Uhr. Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	166
Abb. 115	Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in den Reihen 7-43, Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 16. und 17. September 2014. Versuchszeitraum: jeweils 20:00-02:00 Uhr.....	166
Abb. 116	Vorhersage der SV-Verfügbarkeit in Siebeldingen am 16. September 2014, 18:00-06:00 Uhr. Versuchszeitraum 20:00-02:00 Uhr mit PlanningOnline (http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats).	167
Abb. 117	Relative Abweichungen in transversaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_unten, 29. August 2014.....	168
Abb. 118	Relative Abweichungen in transversaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_oben, 29. August 2014.....	169
Abb. 119	Relative Abweichungen in longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_unten, 29. August 2014.....	170
Abb. 120	Relative Abweichungen in longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_oben, 29. August 2014.....	170

Abb. 121	Beträge der relativen Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl verfügbarer SV in P23, Reihe 1 (oben) und 2 (unten), in den Varianten ant_unten (links) und ant_oben (rechts). Versuchszeitraum: 29. August 2014, 11:30-13:00 Uhr.....	171
Abb. 122	PHENObot bei Erprobungsfahrt in der Parzelle Rebenzüchtung. Deutliche Zerstörung der Grasnarbe im Wendebereich nach mehrmaliger Überfahrt.	176
Abb. 123	PHENObot in der finalen Version bei den Vorversuchen zum Anwendungsversuch.	187

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1	Anwendungen der Ortung, modifiziert nach MANSFELD (2010).	6
Tab. 2	Parameter einiger wichtiger Referenzellipsoide (MÖSER et al. 2012).....	10
Tab. 3	Einordnung der DOP-Werte (DODEL & HÄUPLER 2010).	26
Tab. 4	Kenngößen des Referenzsystems SAPOS, modifiziert nach MANSFELD (2010).	28
Tab. 5	Dreidimensionale Koordinaten Kalibrierung Trimble Referenzstation Geisenheim; Koordinatenreferenzsystem: ETRS89/UTM; Höhe WGS84 = Höhe ü.NN + Undulation (48,34 m).....	60
Tab. 6	Mechanische und elektrische Elemente (Antriebstechnik) der Kameralageregelung (Ziffern in Klammern = Stückzahl).....	87
Tab. 7	Deskriptive Statistik zum Vergleich der absoluten Postionsgenauigkeit des PHENObot in Reihe 33. Datengrundlage sind die mittleren RMS-Fehler aus 4 Fahrten gemessen mit dem RTK-System von Trimble und dem internen System. Positive Prüfung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test.....	153
Tab. 8	Deskriptive Statistik zum Vergleich der absoluten Postionsgenauigkeit des PHENObot in Reihe 34. Datengrundlage sind die mittleren RMS-Fehler aus 4 Fahrten, gemessen mit dem RTK-System von Trimble und dem internen System. Positive Prüfung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test.....	156
Tab. 9	Deskriptive Statistik zum Vergleich der relativen Postionsgenauigkeit (transversal/longitudinal) des PHENObot. Datengrundlage sind die RMS-Fehler aus 4 Fahrten in 2 Reihen (R33/R34).....	158
Tab. 10	Deskriptive Statistik der relativen Abweichungen in transversaler und longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, Varianten ant_unten/ant_oben.....	169
Tab. 11	Auswertung der Einsatzzeiten bei der Bonitur in Parzelle 23, Reihe 9 am 16. September 2014.	173

1 Einleitung

Die Geschichte des Weinbaus ist geprägt durch einen stetigen Wandel. Im Laufe der Zeit vollzogen sich mehr oder weniger schnell ablaufende Veränderungen. Naturgemäß sind diese eng an die Entwicklung der Gesellschaft gebunden. Mit zunehmender Entwicklungsgeschwindigkeit der Menschheit beschleunigen sich auch die Veränderungen in Bereichen des Weinbaus. Betrachtet man die Antike und das Mittelalter, so fallen die Neuerungen in diesen Epochen eher mäßig aus. Mit Beginn der Industrialisierung explodierte die generelle Entwicklung geradezu, mit allen positiven und negativen Auswirkungen, wie wir heute wissen. Der technische Fortschritt hat auch vor dem Weinbau nicht Halt gemacht. Anbau und Bewirtschaftung der Rebanlagen, sowie Ausbau des Weines wurden enorm vereinfacht und erleichtert. Messen kann man dies unter anderem an der Reduzierung der notwendigen Arbeitskraftstunden pro Flächeneinheit. Lagen diese während der Zeit der reinen Bewirtschaftung per Hand im Bereich jenseits von 1 000 Arbeitskraftstunden (AKh), so kann heutzutage ein Weinberg je nach Ausprägung des Mechanisierungsgrades mit weniger als 100 AKh pro Hektar (ha) bewirtschaftet werden (KTBL 2013). Neben allem Positiven sind erfahrungsgemäß die negativen Konsequenzen nicht ausgeblieben. Durch die Verfügbarkeit günstiger und sicherer Verkehrsmittel war es vor allem ab dem 19. Jahrhundert einer breiten Masse möglich auf Reisen zu gehen. Gerne wurden hier auch die Grenzen der Kontinente überschritten. Dabei wurden natürlich auch landwirtschaftliche Güter und Pflanzen ausgetauscht. Im Laufe des teils Jahrtausende alten Anbaus haben sich gerade Pflanzen auf ihr umgebendes Ökosystem eingestellt und natürliche Abwehrmechanismen gegen Schaderreger entwickelt. Im Nordamerikanischen Raum sind Pilze wie *Plasmopara viticola* oder *Erysiphe necator* heimisch, umgangssprachlich bekannt als Falscher und Echter Mehltau. Die dort wachsenden Reben haben Resistenzmechanismen gegen diese Pilze entwickelt. Mitte des 19. Jahrhunderts wurden diese Pathogene nach Europa eingeschleppt, wo die Reben dagegen nicht resistent sind. Ähnlich verhält es sich mit der Reblaus, hier hat allerdings die Veredlungstechnik für Abhilfe gesorgt. Im Bereich der pilzlichen Pathogene besteht bei den in

Europa heimischen Ertragsrebsorten immer noch die Notwendigkeit eines hohen Fungizidaufwandes zur Bekämpfung der Krankheiten. Durch gezielte Einkreuzung der Resistenzmechanismen amerikanischer Reben in europäische Sorten ist es möglich sogenannte pilzwiderstandsfähige Sorten zu züchten.

1.1 Notwendigkeit

Der benötigte Zeitrahmen für die Züchtung einer neuen Rebsorte beträgt in der Regel zwischen 25 und 30 Jahren (KADISCH et al. 2008). Gründe für diesen langen Zeitraum sind zum einen die generative und vegetative Vermehrung der infrage kommenden Sämlinge und zum anderen die aufwendigen Bonituren während dieser Zeit. Es werden einerseits die gewünschte Widerstandsfähigkeit gegen die entsprechenden Pathogene und andererseits weinbauliche Parameter wie Ertragsniveau, Wuchsverhalten und sensorische Eigenschaften überprüft. Bei der Bonitur werden geeignete Schemata, beispielsweise nach OIV (EUROPEAN UNION 2012) oder BBCH (BBA 2001), angewandt. Dabei wird in der Regel manuell vorgegangen, d. h. es kommen fachlich geschulte Prüfer zum Einsatz. Deren Einsatz verursacht, unter anderem, hohe Kosten. Sie sind aufgrund des großen Konzentrationsbedarfes nur relativ kurz (2-4 Stunden) einsetzbar, zudem werden die Boniturergebnisse stark von subjektiven Einflüssen beeinträchtigt. Als Konsequenz werden oftmals nur ausgewählte Zuchtstämme und Gewächshauskulturen mit diesen Methoden untersucht, wobei der flächendeckende Einsatz wünschenswert wäre, um die lange Zeitspanne zwischen Zuchtbeginn und Zulassung der Rebsorte durch bessere Bonituren zu verkürzen (ROSCHE et al. 2014).

Aus genannten Gründen widmet sich das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt „PHENOvines“ der Entwicklung eines Verfahrens zur „Hochdurchsatzphänotypisierung von Ertragsparametern und Mehltaubefall bei Weinreben“. Es soll bei diesem die Bonitur voll automatisiert werden, beginnend bei der Erfassung phänotypischer Merkmale in der Kultur, über die Weiterverarbeitung bis zur Analyse der Daten. Thematisch ist das Projekt in die Teilprojekte A „Phänotypi-

sierung in Rebbeständen“ und B „Konstruktion eines Roboters“ unterteilt. Projektteil A steht unter der Verantwortung des Julius-Kühn-Institutes (JKI), Institut für Rebenzüchtung, Standort Geilweilerhof und behandelt die Kernpunkte „Bilderfassung“ und „Bildanalyse“. Das Institut für Technik der Hochschule Geisenheim bearbeitet den Projektteil B und zeichnet damit verantwortlich für die Entwicklung der automatisch fahrenden Trägerplattform, welche die bilderfassende Kameraeinheit trägt. Dieser Teil ist gleichzeitig auch der Kern der vorliegenden Dissertation. Die Konzeption und Konstruktion der Roboterplattform stehen hierbei im Vordergrund; experimentelle Datenerhebung dient hier nur der Validierung der Konstruktion.

1.2 Thesen

Im Rahmen der Projektbeantragung wurden Zieldefinitionen erstellt nach denen der Zweck und die Eigenschaften des zu erstellenden Bonitursystems klar festgelegt sind. Das Anforderungsprofil richtet sich nach den Gegebenheiten des Institutes für Rebenzüchtung, Geilweilerhof, da im Zuge des Projektabschlusses die Übernahme der Boniturplattform in das Arbeitsprogramm am Standort geplant ist. Nach diesen Vorgaben wurden Eckdaten und Lastprofile festgelegt, an denen die Entwicklung ausgerichtet ist.

Ausgehend von diesen Planungsgrundlagen erfolgte unter Berücksichtigung allgemeiner weinbaulicher Anforderungen und des aktuellen Wissensstandes im Bereich der Agrarrobotik die Formulierung folgender Thesen:

- I. Unter Berücksichtigung allgemeiner weinbaulicher Anforderungen wird im Projekt PHENOvines eine automatisch fahrende Plattform zur Nutzung in Rebbeständen entwickelt.
- II. Mit der Boniturplattform PHENObot können Rebgassen mit ausreichender Genauigkeit befahren werden, wobei eine sichere und reproduzierbare Navigation innerhalb definierter Einsatzgrenzen gewährleistet wird.
- III. Zur Ausführung der Bonituraufgabe werden vorhandene Stockkoordinaten automatisiert in eine Datenverarbeitung eingelesen und so aufbe-

reitet, dass daraus Fahrbefehle und Arbeitsaufträge generiert werden. Die notwendigen Softwareanwendungen sind Bestandteil des Bonitursystems und speziell darauf angepasst.

- IV. Das Bonitursystem basiert auf einem automatisch fahrenden Trägerfahrzeug. Auf diesem ist ein adaptives Lagerregelungssystem mit vier Freiheitsgraden zur Aufnahme bilderfassender Sensoren vorhanden.
- V. Mit dem Bonitursystem wird die schlagkräftige automatisierte Phänotypisierung von Rebbeständen mit einer Flächenleistung von mindestens 250 Rebstöcken pro Stunde ermöglicht.

Die Überprüfung und Validierung dieser fünf Thesen ist zentraler Teil der vorliegenden Arbeit.

2 Literatur

Im Folgenden wird auf die Grundlagen von Ortungssystemen, vor allem satellitenbasierter Natur, und der Geodäsie eingegangen. Es werden Anwendungsmöglichkeiten in der Technik, der Landwirtschaft und dem Weinbau gezeigt. Weitere Kapitel behandeln die Entwicklungen und Applikationen in der Robotik und Phänotypisierungs- sowie Fernerkundungsanwendungen.

2.1 Ortungssysteme und ihre Anwendung

Satellitengestützte Ortungssysteme werden heutzutage in etlichen Lebensbereichen genutzt und sind mittlerweile fast unverzichtbar geworden. Zu den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten zählen unter anderem

- der Militär- und Sicherheitssektor,
- das Verkehrswesen (Land-, Wasser-, Luftfahrzeuge),
- Flottenmanagement,
- das Bau- und Vermessungswesen,
- der Freizeitsektor,
- Wissenschaft und Forschung,
- landwirtschaftliche Anwendungen.

Jeder dieser Bereiche stellt eigene Anforderungen und bedingt unterschiedliche Präzisionsniveaus. Im Folgenden werden Grundlagen des Vermessungswesens und der satellitengestützten Ortung erläutert. Kapitel 2.1.3 zeigt den Aufbau und Anwendungsmöglichkeiten von Geoinformationssystemen. In Abschnitt 2.2 wird speziell auf Anwendungen im landwirtschaftlichen Sektor eingegangen.

2.1.1 Geodätische Grundlagen

MANSFELD (2010) teilt die *Ortung* grundlegend in die zwei Gruppen *Positionsbestimmung* und *Navigation* ein (Tab. 1). Dabei wurde die Satellitenortung zuerst zur Navigation im Militärsektor und erst nach Freigabe für den zivilen Bereich auch für die Positionsbestimmung eingesetzt (MANSFELD 2010).

Tab. 1 Anwendungen der Ortung, modifiziert nach MANSFELD (2010).

<i>Positionsbestimmung</i>	<i>Navigation</i>
Geodäsie	Raumfahrt
Objektvermessung	Luftfahrt
Exploration	Fahrt zu Wasser
Überwachung	Fahrt zu Lande
Forschung	

BAUER (2011) stellt die Begriffe *Vermessung*, *Ortung* und *Geodäsie* dagegen auf eine Stufe und sieht die Unterscheidungsmerkmale der ersten beiden in der Punktdynamik. Aufgabe einer *Vermessung* ist die Beschreibung der Geometrie von Objekten durch geeignete Verfahren, wobei sich die zu erfassenden Punkte in relativer Ruhelage zur Erdoberfläche befinden. Dagegen werden bei einer Ortung in der Regel Punkte erfasst, die sich relativ zur Erdoberfläche in Bewegung befinden, bzw. beweglich sein können. Somit ist die Ortung als Teil der *Navigation* zu sehen (BAUER 2011). Weiterhin zitiert BAUER (2011) den deutschen Geodäten HELMERT: „Geodäsie ist die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“. Dabei müssen allerdings alle Aufgaben berücksichtigt werden, die Geodäten heutzutage zu bewältigen haben; unter anderem die Beobachtung geodynamischer Phänomene und die Bestimmung des Schwerefelds der Erde (BECKER & HEHL 2012). BAUER (2011) fasst den Unterschied zwischen *Geodäsie* und *Vermessung* wie folgt zusammen: „Geodäsie liefert die theoretischen Grundlagen für die vermessungstechnische Praxis“.

Das klassische Verfahren der Vermessung ist die *Triangulation*. Damit können zum einen die sog. *Festpunktfelder* erzeugt, und zum anderen Koordinaten von neuen Punkten oder Strecken zwischen Punkten mit Hilfe bestehender Festpunktfelder bestimmt werden (MÖSER et al. 2012). Mit diesem Verfahren kann im kleinräumigen Bereich von der Erde als ebenes System ausgegangen werden, während bei weiträumigen Messaufgaben die *Figur der Erde*, d. h. die Erdkrümmung berücksichtigt werden muss. Vor der Verfügbarkeit der Satellitengeodäsie waren keine global einheitlichen geo-

dätischen Punktfelder vorhanden, da die Küsten der Ozeane für das Verfahren der *Triangulation* eine natürliche, unüberwindbare Grenze darstellten. So konnte beispielsweise die Entfernung zwischen Europa und Amerika nur auf eine Genauigkeit von etwa 100 m bestimmt werden (BAUER 2011). Mit dem Beginn des Satellitenzeitalters in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts konnten diese Grenzen überwunden werden. BECKER und HEHL (2012) sehen drei Grundpfeiler der Geodäsie:

- Geometrie,
- Schwerefeld und Geoid,
- Erdrotation und Erdorientierung.

Diese werden durch ein Bezugssystem miteinander verknüpft (BECKER & HEHL 2012). Mit einem *Bezugs-* oder *Referenzsystem* ist es grundsätzlich möglich die räumliche Position, die Lage, die Höhe oder die Schwere von Punkten zu bestimmen. Es wird generell in

- Lagebezugssysteme,
- Höhenbezugssysteme,
- Schwerebezugssysteme

unterschieden. Alle bestehen aus einem Koordinatensystem und einem Festpunktfeld. Ausgehend von den jeweiligen *Bezugssystemen* leiten sich *Bezugsflächen* ab. Bei Messungen mit geodätischen Instrumenten werden diese stets mit ihrer Stehachse in Richtung des Schweremittelpunktes ausgerichtet. Die so entstehenden Flächen senkrecht zum Schwerevektor werden als *Äquipotenzialflächen* bzw. *Niveauflächen* bezeichnet. In der Geodäsie sind diese bezogen auf den mittleren Meeresspiegel und werden als *Geoid* bezeichnet (Abb. 1). Aufgrund von Masseunregelmäßigkeiten im Erdinneren kommt es zu *Lotabweichungen* beim Ausrichten der Messgeräte im Vergleich zur Erdoberfläche; bezogen auf die idealisierte Darstellung als Ellipsoid ergibt sich die *Lotrechte* im Gegensatz zur *Senkrechten*. Somit entsteht die mit Beulen und Dellen versehene Figur in Abb. 1. Mathematisch ist das *Geoid* nicht als Funktion beschreibbar. Im Vergleich zur Erdgröße nähert sich das *Geoid* der idealisierten Form des Rotationsellipsoids jedoch gut an. Die Abweichung zwischen beiden wird als *Geoidundulation* bzw.

Geoidhöhe bezeichnet (Abb. 2) (BAUER 2011, MÖSER et al. 2012, BECKER & HEHL 2012). Je nach Form des Geoids, resultierend aus der Massenverteilung im Erdkörper, nimmt die *Geoidundulation* positive oder negative Werte an. Im Bereich Geisenheim liegt die Undulation bei 48,34 m (BRUNNER 2014), im Indischen Ozean beispielsweise bei -100 m (im Referenzsystem WGS84) (BAUER 2011).

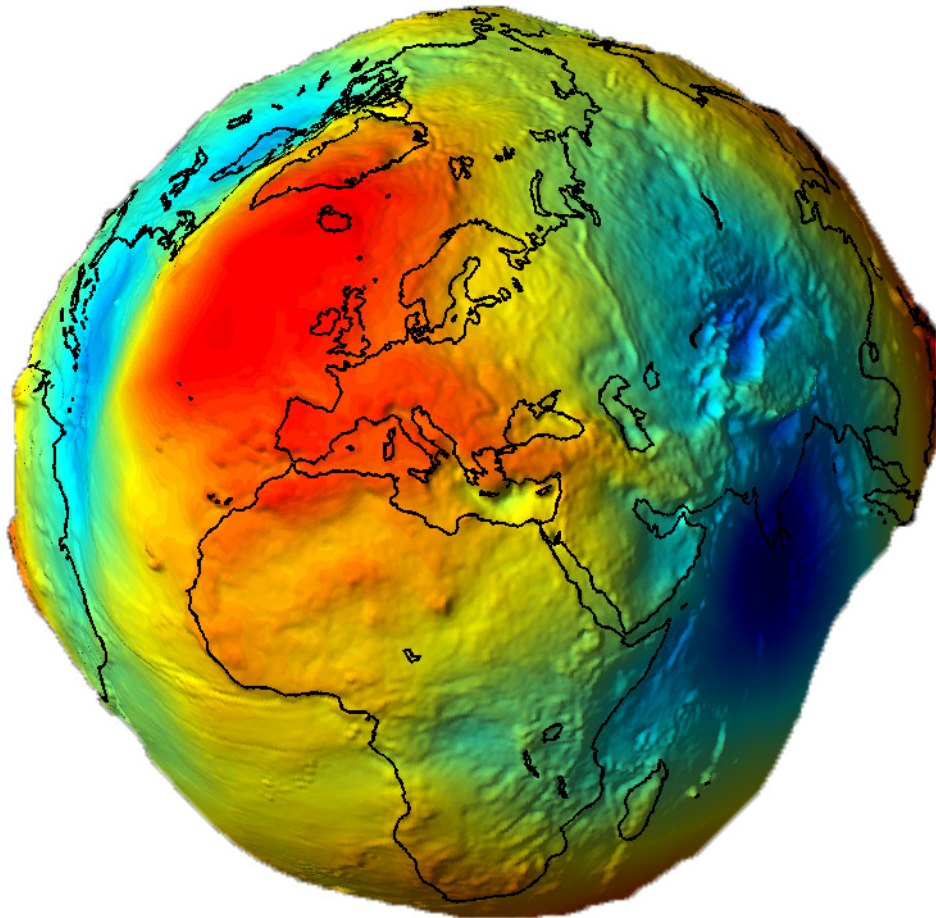


Abb. 1 Das Geoid modelliert nach Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE). Die Bereiche positiver Geoidundulation sind rot, die negativen Bereiche blau dargestellt (ESA 2013).

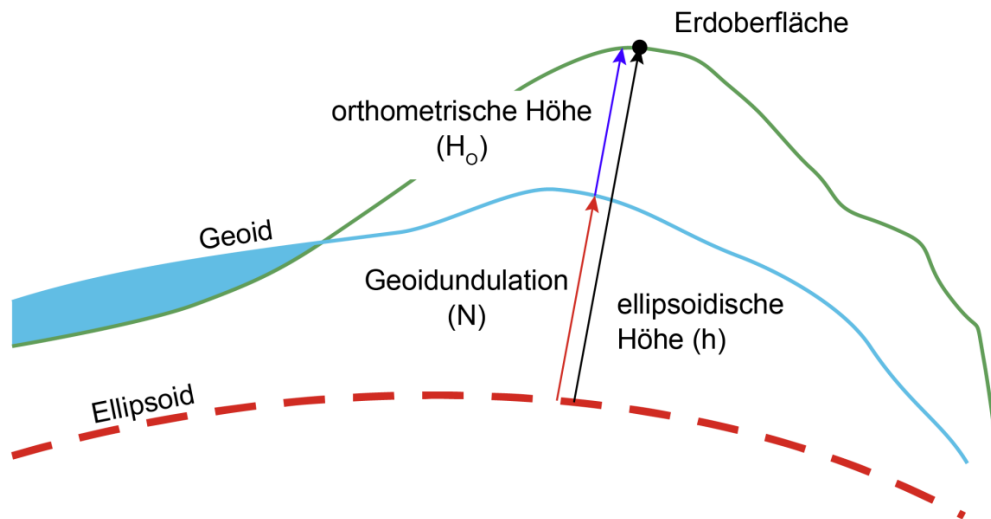


Abb. 2 Zusammenhang zwischen ellipsoidischer Höhe, Geoidundulation und orthometrischer Höhe, modifiziert nach BKG (2014b).

Das verwendete Rotationsellipsoid wird als *Referenzellipsoid* bezeichnet und hat seinen Mittelpunkt im Massenmittelpunkt der Erde. Es wird durch die Parameter

- Große Halbachse (a),
- Kleine Halbachse (b),
- Abplattung (f)

beschrieben. Diese stehen in der Beziehung

$$f = \frac{a-b}{a} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Es gibt eine Reihe historischer und wichtiger *Referenzellipsoide* (Tab. 2) (MÖSER et al. 2012):

Tab. 2 Parameter einiger wichtiger Referenzellipsoide (MÖSER et al. 2012).

Referenzellipsoid	Große Halbachse a [m]	Kleine Halbachse b [m]	Abplattung
<i>BESSEL</i>	6.377.397	6.356.078	1:299,1528
<i>HAYFORD</i>	6.378.388	6.356.911	1:297,0000
<i>KRASSOWSKIJ</i>	6.378.245	6.356.863	1:298,3000
<i>WGS72</i>	6.378.135	6.356.750	1:298,2600
<i>GRS80</i>	6.378.137	6.356.752	1:298,2572
<i>WGS84</i>	6.378.137	6.356.752	1:298,2572

Punkte und/oder höhere geometrische Informationen werden räumlich als Koordinaten in Form von Zahlenpaaren oder Zahlentripel beschrieben. Zur geodätischen Nutzung müssen diese Informationen mit dem Erdkörper verknüpft werden (BAUER 2011). Dazu dienen *Bezugs- bzw. Referenzsysteme*. Grundlage eines solchen Bezugsrahmens ist ein *Referenzellipsoid*. In diesem werden *Koordinaten* in einem spezifischen System und bezogen auf einen *Lagerungspunkt* wiedergegeben (BAUER 2011, BECKER & HEHL 2012, MÖSER et al. 2012).

Als Koordinatentypen kommen in der Regel zwei Systeme zum Einsatz. Die rechtwinkligen, dreidimensionalen *kartesischen Koordinaten* nutzen orthogonale Achsen gleicher Skalierung mit den Bezeichnungen *X*, *Y* und *Z* (Abb. 3). In Abwandlung kann dieses System zur besseren Verständlichkeit auch als *topozentrisches Koordinatensystem* verwendet werden. Dabei wird es tangential an die Oberfläche der Erde bzw. des *Geoids* oder des *Rotationsellipsoids* angelegt. Dann fällt die Höhenachse *Z* mit dem Erdradius, bzw. der *Ellipsoidnormalen* zusammen. Die Orientierung der beiden anderen Achsen zeigt nach Norden bzw. Osten mit den Bezeichnungen *Northing* resp. *Easting*. Die Wahl der primären Achse unterscheidet sich in den Fachgebieten *Navigation* und *Geodäsie*. In ersterem zeigt die erste Achse i. d. R. nach Osten und die zweite nach Norden. Die *Geodäsie* arbeitet mit vertauschten Achsen, die primäre Achse zeigt nach Norden, die sekundäre nach Osten. Bei Navigationsanwendungen werden Winkel gegen, in der *Ge-*

odäsie mit dem Uhrzeigersinn wiedergegeben. Somit entspricht die *Naviga-tion* prinzipiell den üblichen mathematischen Konventionen, die *Geodäsie* verwendet die entgegengesetzte Orientierung (BECKER & HEHL 2012).

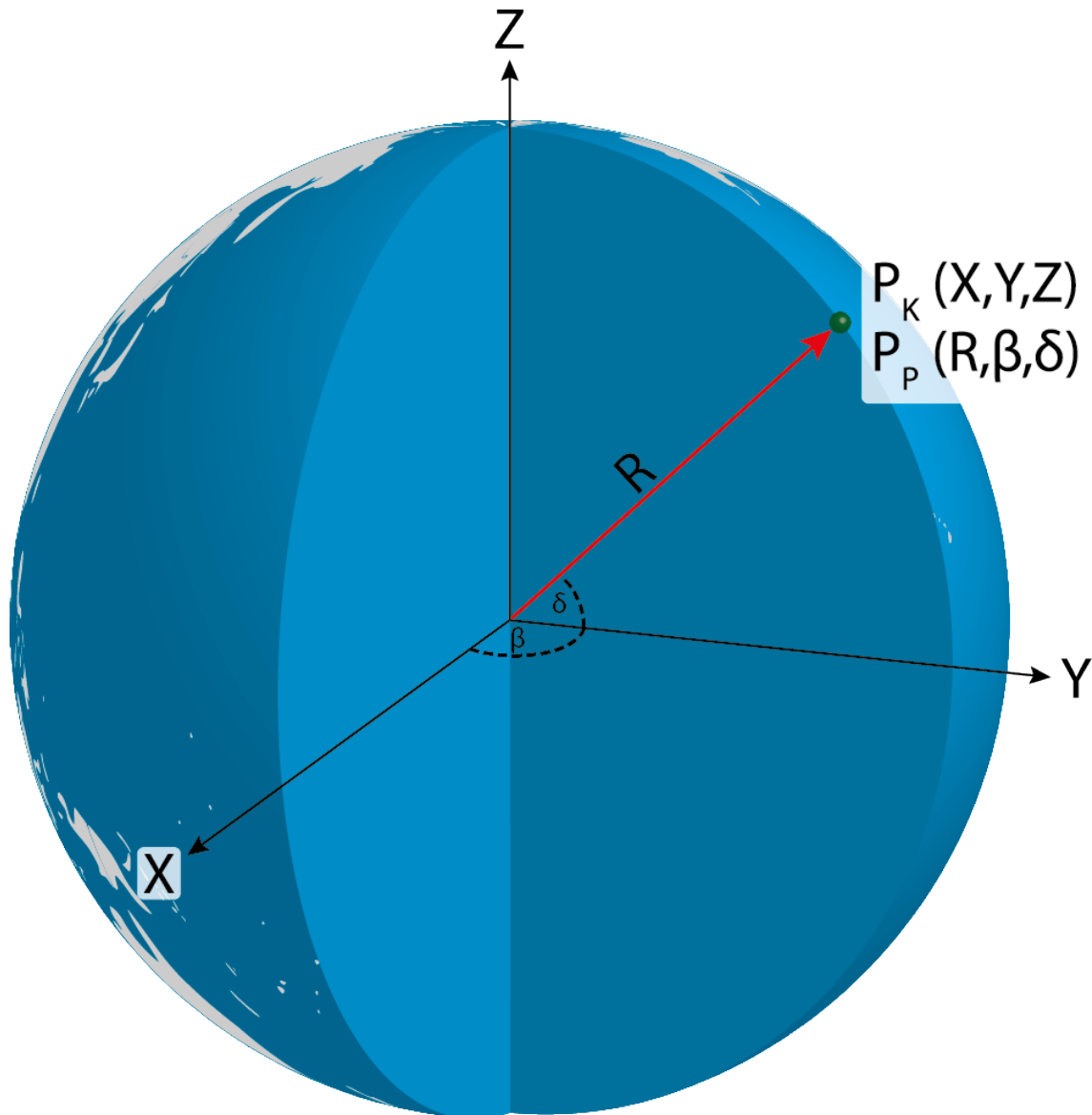


Abb. 3 Dreidimensionale kartesische Koordinaten (P_K) und Polarkoordinaten (P_P), modifiziert nach MÖSER et al. (2012).

Eine weitere häufig verwendete Darstellungsform sind *sphärische* oder *ellipsoidische Koordinaten*. Dabei werden die Koordinaten eines Punktes als *geografische Breite, Länge* und *Höhe* angegeben. Die *Breite* β wird als Winkel der *Ellipsoidnormalen* R zur XY -Ebene, die *Länge* δ als Winkel der Meridianebene durch den Punkt P zur XZ -Ebene durch den *Nullmeridian* bei Greenwich definiert (BECKER & HEHL 2012).

Bei *kartesischen Koordinaten* werden Meter als Einheit, bei *ellipsoiden Koordinaten* für die Winkelmaße sexagesimale Grad, Minuten, Sekunden oder Dezimalgrad verwendet. Die Höhe ist im Falle der *ellipsoiden Koordinaten* ebenfalls in Metern angegeben.

Zur Darstellung und erleichterten Bearbeitung werden geodätische Koordinaten in die Ebene projiziert. Bei dieser Verebnung kommt es zur verzerrten Abbildung der gekrümmten Flächen. Es haben sich im deutschsprachigen Raum vor allem zwei konforme (winkeltreue) *Projektionsarten* etabliert. Die *Gauß-Krüger-Projektion (GK)* als *Querzylinderprojektion* bildet den *Berührungsmeridian* längentreu ab und verwendet 3° breite Abbildungsstreifen (Abb. 4). Sie wurde in der Vergangenheit in Deutschland als amtliches Koordinatensystem verwendet (MÖSER et al. 2012, ADV 2015).

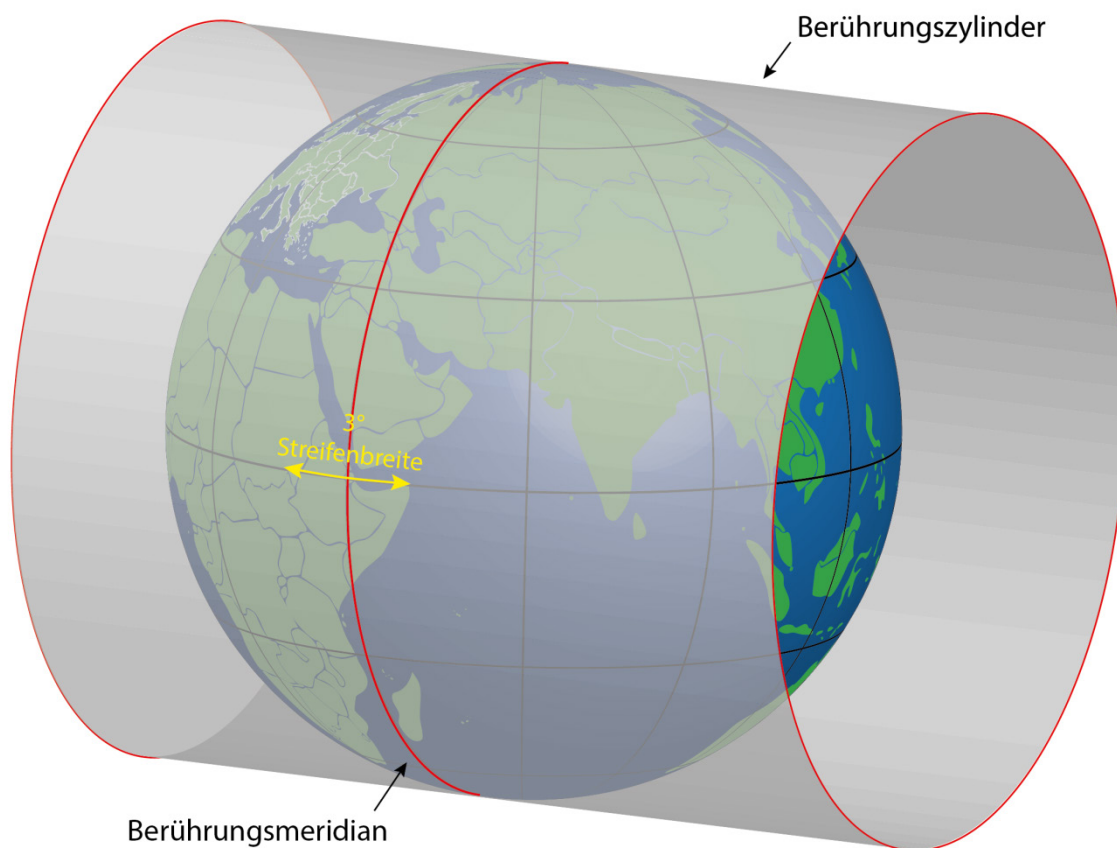


Abb. 4 Schematische Darstellung des Berührungszylinders der Gauß-Krüger-Abbildung, modifiziert nach BVV (2009).

Mit Verfügbarkeit eines einheitlichen, europäischen *Referenzsystems* wurde beschlossen als zugehörige Abbildung die *Universale-Transversale-*

Mercator-Projektion (UTM) zu verwenden (Abb. 5) (ADV 1995). Die Meridianstreifen sind im Gegensatz zu GK 6° breit, somit sind für eine große Ost-West-Ausdehnung weniger Zonen zur Darstellung notwendig (Abb. 6) (ADV 2014). Das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland liegt überwiegend in den Zonen 32U und 33U (BECKER & HEHL 2012).

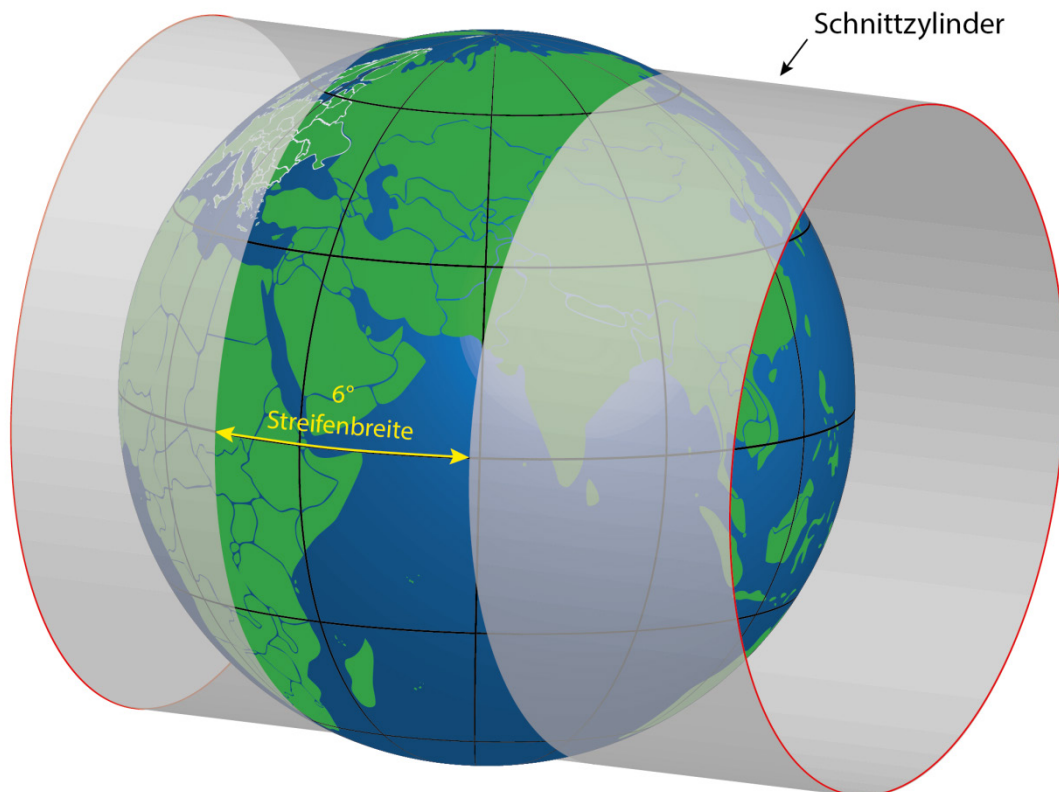


Abb. 5 Schematische Darstellung des Schnittzylinders der UTM-Abbildung, modifiziert nach BVV (2009).

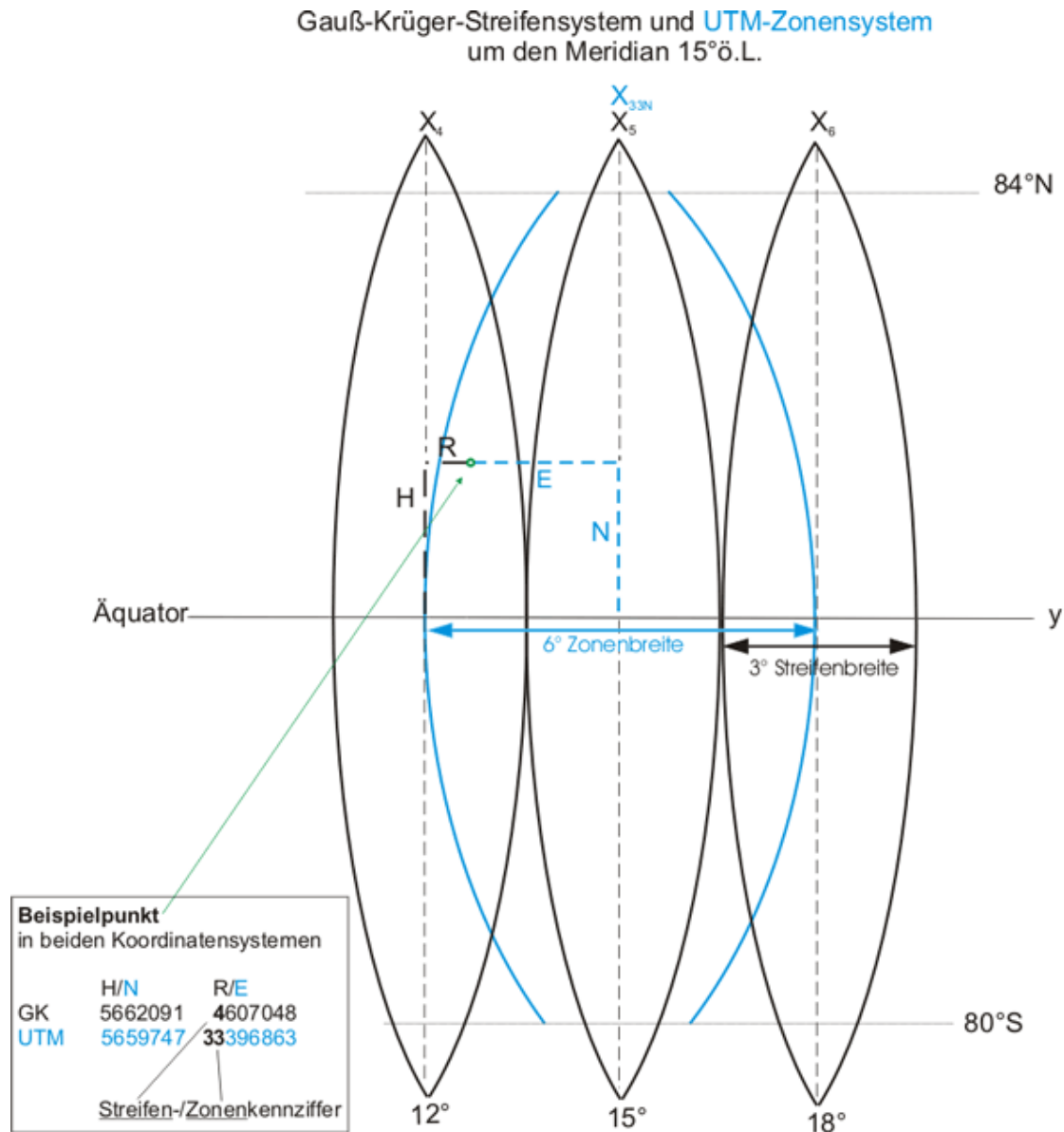


Abb. 6 Gauß-Krüger-Streifensystem und UTM-Zonensystem (GEOSN 2014).

Das Koordinatensystem, bzw. die Angabe der Projektion alleine stellt kein Lagebezugssystem dar. Es muss stets ein dazugehöriges *Referenzsystem*, bzw. *Koordinatenreferenzsystem (CRS)* angegeben werden (Abb. 7) (DIN 2007). Ein Beispiel hierfür ist das *World Geodetic System 1984 (WGS84)* als globales terrestrisches Bezugssystem. Zum bereits beschriebenen mathematischen Teil, den Koordinatensystemen, gehört noch ein *geodätisches Bezugssystem* (physikalischer Teil), bestehend aus dem o. g. *Lagerungspunkt* und einem *Bezugsrahmen* (Festpunktfelder und Geschwindigkeiten). Die Lagerung des *Referenzellipsoids* im Erdkörper/Geoid unter Be-

rücksichtigung der Orientierung und des Maßstabes wird als *Geodätisches Datum* bezeichnet (MÖSER et al. 2012). Zusammenfassend kann es auch als Lage eines *exzentrischen* relativ zu einem *geozentrischen Koordinatensystem* verstanden werden (BECKER & HEHL 2012).

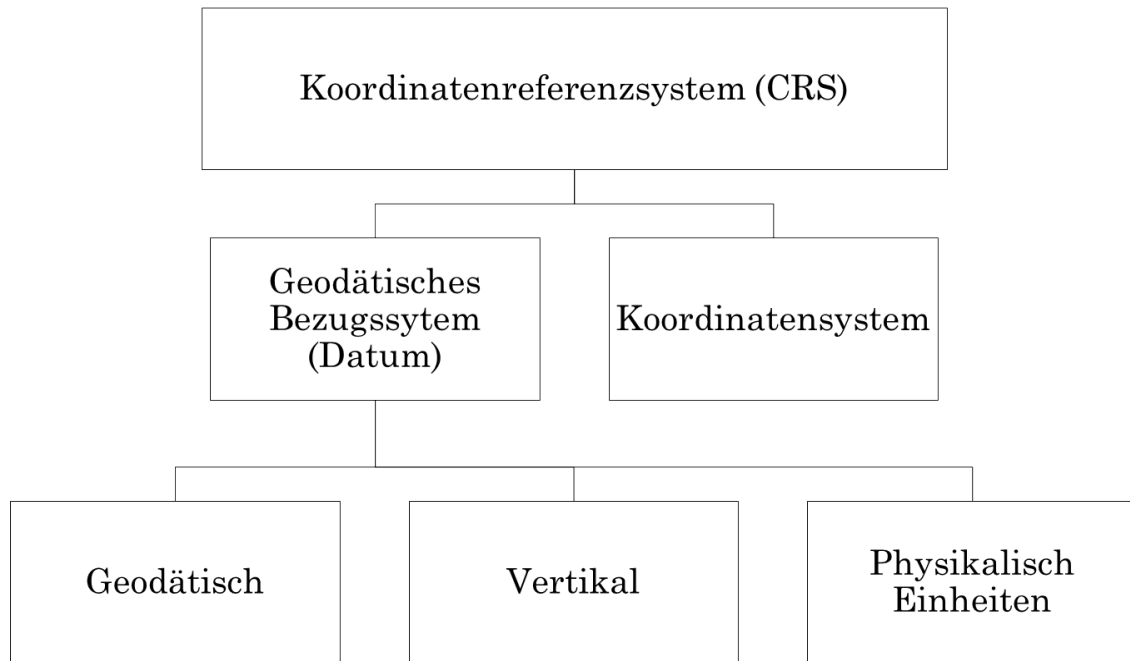


Abb. 7 Definition des Koordinatenreferenzsystems nach ISO 19111:2007 (DIN 2007).

Das *geodätische Datum* wird über sieben definierte Parameter beschrieben:

- 3 Translationen (ΔX , ΔY , ΔZ),
- 3 Rotationen (ε_x , ε_y , ε_z),
- 1 Maßstabsfaktor (m , q oder μ).

Zusätzlich gelten die oben beschriebenen Parameter des Referenzellipsoids. Es sind drei wichtige Umformungen in Zusammenhang mit dem *geodätischen Datum* erwähnenswert. Als *Datumstransformation* wird die Transformation zwischen exzentrischen und geozentrischen Koordinatensystemen, als *Datumsübergang* die Transformation zwischen zwei exzentrischen Koordinatensystemen unterschiedlichen Datums und als *Ellipsoidübergang* die Umformung zwischen Referenzsystemen unterschiedlicher Ellipsoidparameter bezeichnet (BECKER & HEHL 2012, MÖSER et al. 2012).

Den Berechnungen liegen Gleichungen zugrunde, die den einschlägigen Formelsammlungen zu entnehmen sind (BECKER & HEHL 2012, GRUBER & JOECKEL 2014).

Bedeutende Beispiele für *geodätische Datumsfestlegungen* sind (BAUER 2011, BECKER & HEHL 2012, MÖSER et al. 2012, GEOSN 2014):

- International Terrestrial Reference System (ITRS),
- European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89),
- World Geodetic System 1984 (WGS84),
- Rauenberg Datum RD/83.

Dem ITRS und ETRS89 liegt das Referenzellipsoid des *Geodetic Reference System 80 (GRS80)* zugrunde, wobei für ETRS89 die Epoche 1989.0 des zugehörigen Bezugsrahmens angenommen wurde. WGS84 ist grundsätzlich bis auf eine zu vernachlässigende Abweichung in der Abplattung identisch (ADAM et al. 2000). Seitdem driften die Referenzsysteme im Bereich Mitteleuropa aufgrund der Plattentektonik jährlich um ca. 2,5 cm in nordöstlicher Richtung auseinander (Abb. 8). Zum *Bezugsrahmen* gehören die sog. *Realisierungen* der Bezugssysteme, als Beispiel der *International Terrestrial Reference Frame 2008 (ITRF2008)*. In diesen Rahmen werden mittels geodätischer Raumverfahren die Transformationsparameter regelmäßig neu berechnet (BECKER & HEHL 2012, MÖSER et al. 2012).

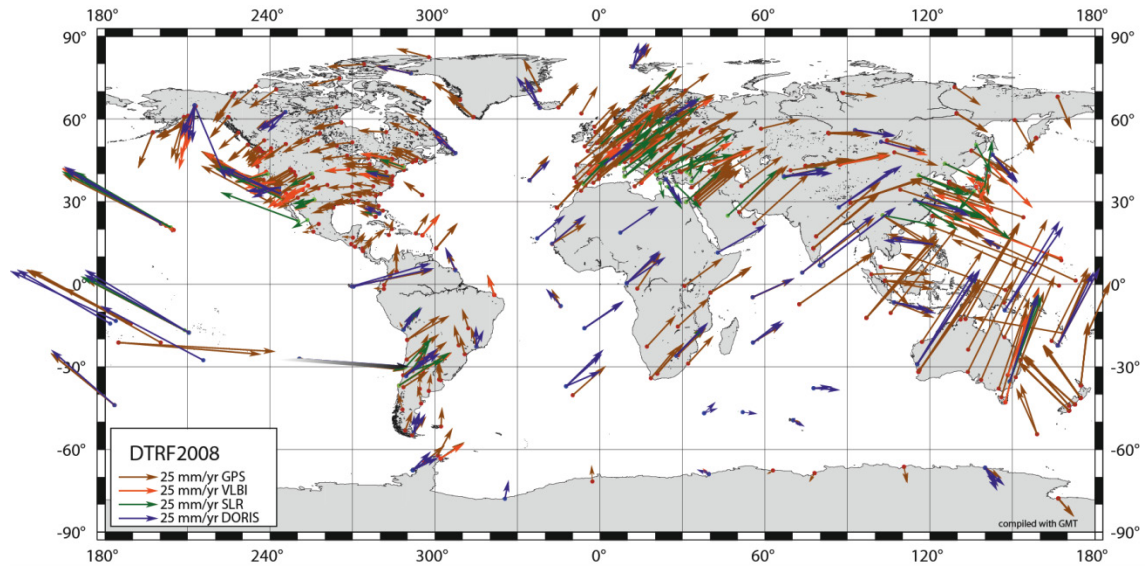


Abb. 8 Geschwindigkeitsfeld DTRF2008; weitere Realisierung des ITRS. Die Pfeile zeigen die jährliche Verschiebung der Messstationen als Vektor, die Länge ist ein Maß für die Geschwindigkeit (SEITZ et al. 2012).

In der praktischen Geodäsie wäre es unvorteilhaft, wenn Koordinatenwerte der Festpunktfelder durch die Plattendrift ständig wechseln würden. Deshalb wurde zu Beginn der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts auf Ebene der EUREF-Arbeitsgruppe (European Reference Frame) die Etablierung eines regionalen Referenzsystems ETRS89 für Europa beschlossen. Als Grundlage wurde das globale Referenzsystem ITRS der Epoche 1989.0 gewählt. Damit ist die europäische Kontinentaldrift im Bezugssystem ETRS89 eliminiert (GÖRRES et al. 2012). Darauf aufbauend hat die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD (AdV) die bundeseinheitliche Einführung von ETRS89 mit UTM als zugehörigem Koordinatensystem im Bereich Landesvermessung und Liegenschaftskataster beschlossen (ADV 1995). Die Einführung auf Länderebene ist größtenteils abgeschlossen.

2.1.2 Satellitenortung und -navigation

Die Verfügbarkeit der Satellitentechnik hat die Vereinfachung und Lösung etlicher geodätischer Fragestellungen ermöglicht. So können Geoinformationen mittlerweile in globalen Lagebezugssystemen angegeben werden. Es wurde damit die Genauigkeit der Erdvermessung und Geodynamik entscheidend gesteigert (BAUER 2011). Vor allem das Militär hat die techni-

sche Entwicklung in diesem Bereich enorm gefördert, um den Streitkräften global eindeutige und universell verfügbare Ortungs- und Navigationslösungen bieten zu können (DODEL & HÄUPLER 2010). Allgemein werden satellitengestützte Ortungssysteme als *Global Navigation Satellite Systems (GNSS)* bezeichnet. International sind vor allem das amerikanische *Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS)* und das russische *Globaluaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, (GLONASS)* von Bedeutung. Im Sprachgebrauch hat sich die Bezeichnung des häufiger verwendeten *NAVSTAR GPS*, kurz *GPS*, als Synonym für satellitenbasierte Ortungs- und Navigationsanwendungen durchgesetzt. Fachlich korrekt ist allerdings das Akronym *GNSS*. Weiterhin gibt es noch das im Aufbau befindliche europäische System *Galileo*, das chinesische *Beidou*, das japanische *QZSS* und das ebenfalls im Aufbau befindliche indische *IRNSS* (MANSFELD 2010). Alle wichtigen modernen GNSS arbeiten als passive Systeme, d. h. ein *Empfänger* empfängt Signale mehrerer Satelliten und kann daraus seine Position und Geschwindigkeit errechnen (BAUER 2011). BAUER (2011) fasst die Funktionen eines GNSS anschaulich in die Beantwortung dreier Fragen zusammen:

- Wo bin ich?
- Wie schnell bewege ich mich?
- Wie spät ist es?

Dabei funktioniert die Ortung analog zu den bekannten erdgestützten Funkortungssystemen (MANSFELD 2010). Ein Empfänger berechnet die Laufzeit des vom Sender übermittelten Signals. Zur Positionsbestimmung der Empfangseinheit wird eine Trilateration durchgeführt (Abb. 9). Bei GNSS sind dazu mindestens vier verfügbare Satelliten (SV) notwendig, wobei der vierte Kanal/SV zur Synchronisation bzw. Korrektur der Zeitinformation dient (KRÜGER et al. 1994).

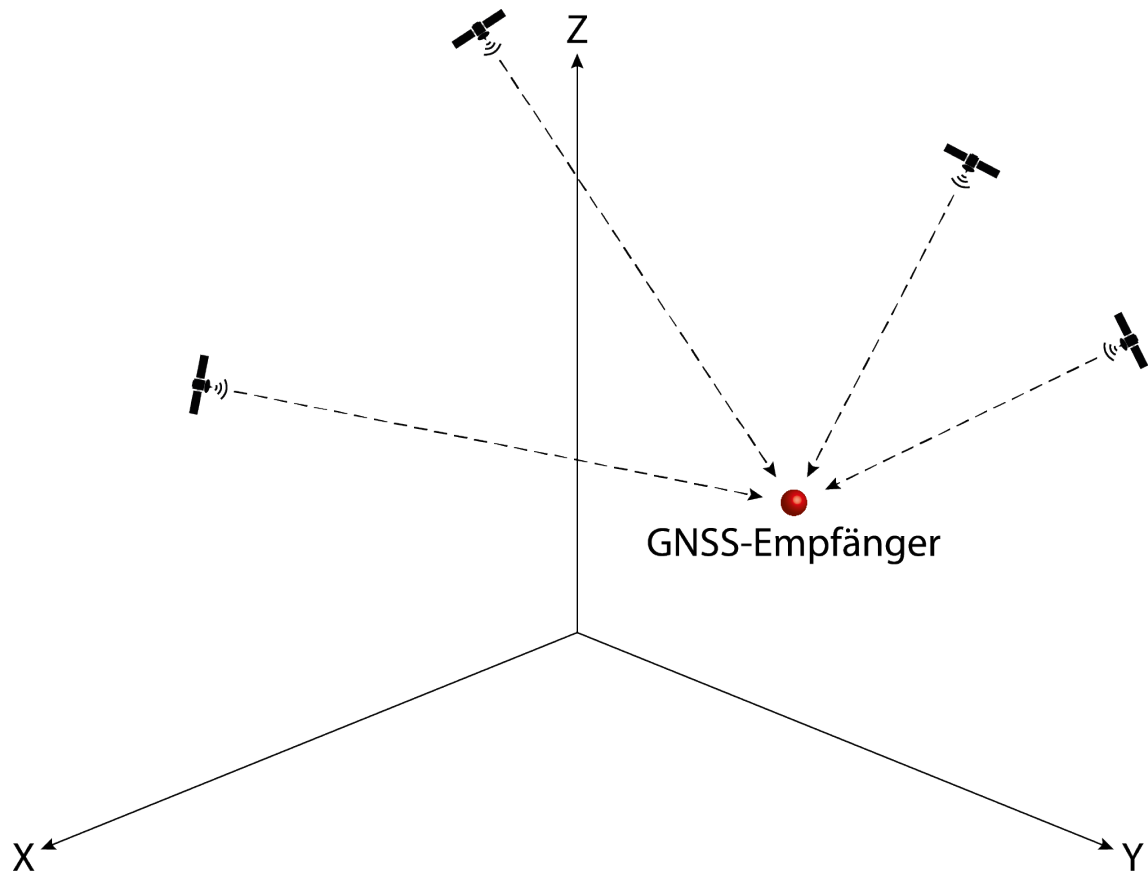


Abb. 9 Grundprinzip moderner GNSS-Ortung mit mindestens 4 SV im globalen Koordinatenreferenzsystem WGS84 (GPS), modifiziert nach BAUER (2011).

Die Position des Empfängers ergibt sich als Schnittpunkt der Kugeloberflächen des jeweils ausgestrahlten Funksignals (MANSFELD 2010).

Die Berechnung stellt sich als Gleichungssystem der sphärischen Trigonometrie mit vier Gleichungen und vier Unbekannten dar (DODEL & HÄUPLER 2010):

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = c \cdot (t_1 - t) \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$d_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} = c \cdot (t_2 - t) \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$d_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} = c \cdot (t_3 - t) \quad \text{Gl. 2-4}$$

$$d_4 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} = c \cdot (t_4 - t) \quad \text{Gl. 2-5}$$

Je orthogonaler die Kugelschnitte sind, desto besser ist die erzielbare Genauigkeit der Ortung. Die SV spannen eine umgedrehte Pyramide mit

dem Empfänger in der Spitze auf. Deren Volumen ist proportional zur Genauigkeit: Je kleiner das Volumen, desto schlechter wird die Genauigkeit. Sollten also alle SV, unabhängig von ihrer Anzahl, in einer Linie über dem Empfänger stehen, wird dieses Volumen null betragen (DODEL & HÄUPLER 2010).

Alle Systeme arbeiten grundsätzlich nach diesem Funktionsprinzip. Im Folgenden wird deshalb nur noch auf NAVSTAR GPS eingegangen, das sich bisher der größten Beliebtheit erfreut. Die technischen Kenndaten beziehen sich ebenfalls nur auf GPS.

GNSS bestehen aus drei Segmenten. Das *Raumsegment* im Falle von GPS beinhaltet nominell 24 SV, wobei zurzeit (Dezember 2014) 30 SV in Betrieb sind und ein SV als Reserve vorgehalten wird (NGA 2014). Diese befinden sich in sechs Bahnen (Abb. 10) mit einer Umlaufzeit von elf Stunden und 58 Minuten, bei einer Inklination von 55° zur Äquatorebene und einem Bahnabstand von 60° (LECHNER & BAUMANN 2000). Die Bahnhöhe beträgt 20 230 km (MANSFELD 2010); es sind für jeden Nutzer auf der Erde mindestens vier SV gleichzeitig sichtbar (NCO 2015c). Mit der erhöhten Satellitenzahl liegt die Verfügbarkeit real im Bereich zwischen fünf und acht SV (LECHNER & BAUMANN 2000). Es wird jeden Tag mit einer Verfrühung von ca. vier Minuten die identische Satellitenkonstellation sichtbar (MANSFELD 2010). Die SV übertragen die Ortungssignale als Hochfrequenzträger im L-Band als Optimum zwischen notwendiger Bandbreite, Strahlungscharakteristik und Dämpfung. Es werden zurzeit zwei Sendefrequenzen genutzt, das L1-Band mit 1 575,42 MHz und das L2-Band mit 1 227,60 MHz.

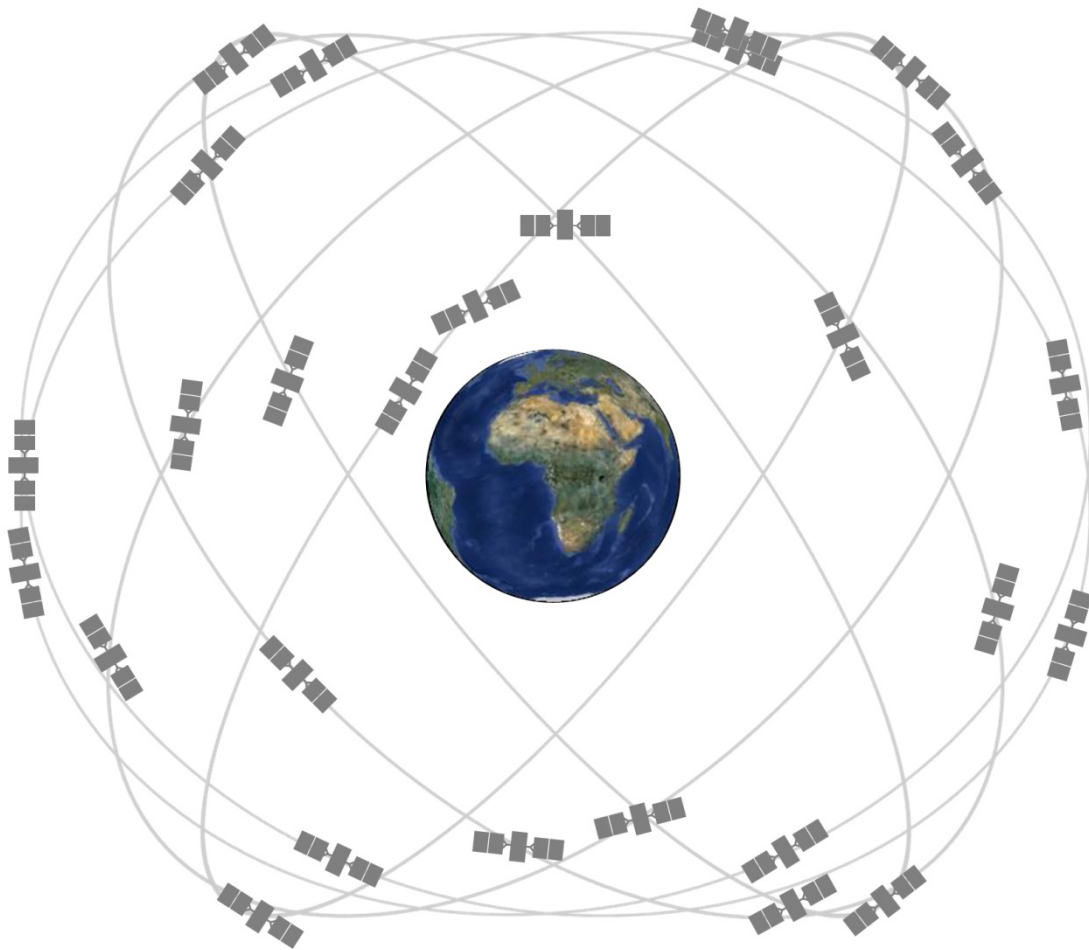


Abb. 10 Umlaufbahnen der GPS-Satelliten (NCO 2015c).

Diese sind Multiplikationen der Systemgrundfrequenz von 10,23 MHz, wobei diese aufgrund der Eliminierung relativistischer Effekte genaugenommen 4,550 MHz geringer ausfällt (MANSFELD 2010). Das L1-Band ist mit den *Coarse Acquisition Code (C/A)* codiert und öffentlich verfügbar. Das L2-Band ist mit dem, nur militärischen Anwendern (US-Streitkräfte) zugänglichen, *Precision Code (P(Y))* verschlüsselt. Der zivil nutzbare Dienst wird als *Standard Positioning Service (SPS)*, der geschützte Dienst als *Precise Positioning Service (PPS)* bezeichnet (LECHNER & BAUMANN 2000). Durch die Erfassung und Auswertung der Phasenlagen des Hochfrequenzträgers sind moderne Empfänger in der Lage auch das L2-Band ohne Kenntnis des P(Y)-Codes zu nutzen und *Ionosphärenfehler* und *Multipath-Effekte* zu eliminieren (DODEL & HÄUPLER 2010). Mit den aktuellen Satellitengenerationen werden zwei weitere zivile Signale verfügbar, das L2c-Band und das L5-Band, jeweils mit freiverfügbarer Codierung. Die kommende

dritte Satellitengeneration wird dann ein viertes ziviles Signal bereitstellen, das L1c-Band (NCO 2015c).

DODEL et al. (2010) sowie MANSFELD (2010) stellen die wichtigsten Fehlerquellen beim Einsatz von GNSS zusammen:

- Ionosphärenfehler,
- Troposphärenfehler,
- Mehrwegefehler (Multipatheffekte) durch Reflexionen,
- Empfängerfehler,
- Geometriebedingte Fehler,
- Fehlerhafte Zeitinformation des SV,
- Fehlerhafte Bahnparameter.

Die genannten Fehler haben Auswirkungen auf die Genauigkeit im Meterbereich. Das bewusste Reduzieren der Messgenauigkeit war die sog. *Selective Availability (S/A)* durch die US-Regierung. Auslöser war die geforderte zivile Verfügbarkeit des GPS Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts. Um trotzdem aus Sicherheitsbedenken die Genauigkeit im dann frei verfügbaren zivilen Bereich auf etwa 100 m zu beschränken, wurden die SV ab Generation IIA mit der Fähigkeit ausgestattet, stochastisch auftretende Bahn- und Uhrfehler zu simulieren. Auf eine Direktive von US-Präsident Clinton wurde die Funktion am 2. Mai 2000 wieder abgeschaltet (Abb. 11). Ab Generation III werden die GPS-Satelliten keine S/A mehr haben (NCO 2015b).



SA Transition -- 2 May 2000

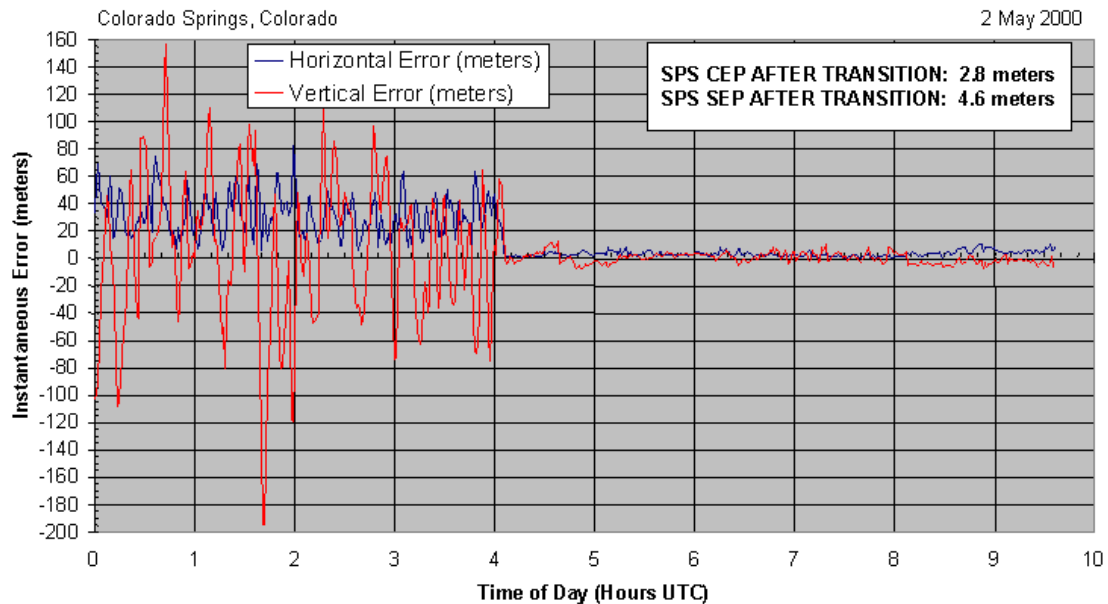


Abb. 11 Abschaltung der Selective Availability am 2. Mai 2000. Die Genauigkeit wurde von 100 m auf <10 m verbessert (NCO 2015b).

Das *Bodensegment* des GPS erfüllt vier Hauptaufgaben (MANSFELD 2010)

- Funktionskontrolle des gesamten Systems,
- Beobachtung der Satellitenbahnen,
- Kontrolle der Zeitinformation,
- Vorausberechnung der Satelliten-Ephemeriden und der Zeitinformation.

Das auch als Kontrollsegment (Abb. 12) bezeichnete Organ besteht aus (NCO 2015a)

- 1 Hauptkontrollstation (Master Control Station),
- 16 Monitorstationen (Monitor Station),
- Bodensendestationen (Ground Antennas).

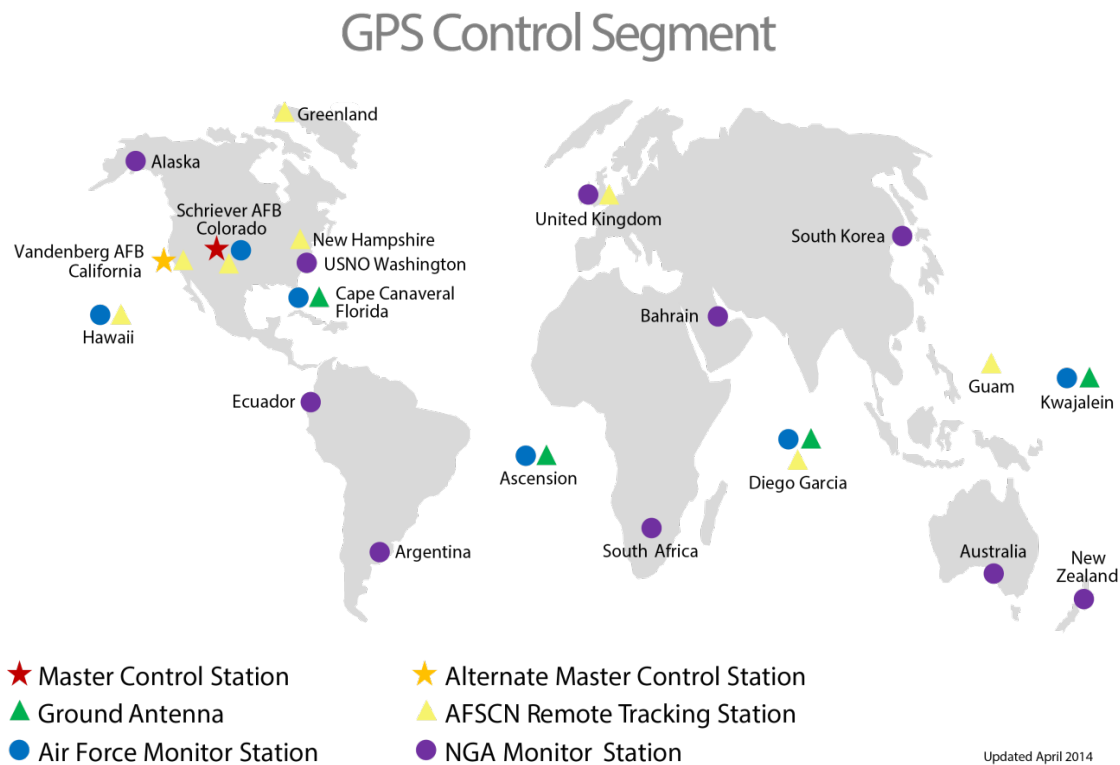


Abb. 12 Boden-Kontroll-Segment des NAVSTAR GPS, modifiziert nach NCO (2015a).

Das *Nutzersegment* setzt sich aus allen Anwendern eines GNSS zusammen. Dabei können alle vom System gelieferten Informationen

- Position,
- Geschwindigkeit,
- Zeit,

mit unterschiedlichen Genauigkeitskriterien, abhängig von den Anforderungen und der technischen Ausstattung genutzt werden. Im Folgenden werden exemplarisch mögliche Anwendungsgebiete aufgelistet (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

- Geodäsie/Vermessungswesen,
- Verkehrswesen (Boden, Luft, Seefahrt),
- Militär- und Sicherheitsbereich,
- Raumfahrt,
- Wissenschaft,
- Landwirtschaft (Kap. 2.2).

Ortungs- und Navigationssysteme lassen sich mit *Leistungsparametern* beschreiben. Hiervon gibt es eine Fülle sowie weitere Einflussgrößen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle nur auf drei wichtige Begriffe eingegangen:

- Sichtbarkeit,
- Verfügbarkeit,
- Integrität.

Die *Sichtbarkeit (visibility)* gibt zunächst einmal lediglich an, ob beispielsweise ein SV am Ort des Anwenders sichtbar ist, d. h. dass eine Sichtlinie zwischen beiden frei von Hindernissen besteht. Verbindungslinien dicht über dem Horizont sind hierbei jedoch kritisch zu bewerten, da oftmals Behinderungen durch die Topografie entstehen können. Zudem müssen bei dieser Geometrie die Ortungssignale die Atmosphäre mit einem längeren Weg durchlaufen, was Laufzeitfehler zur Folge haben kann (MANSFELD 2010). Deshalb wird ein minimaler Erhebungswinkel, die sog. *Elevation* definiert. Unterhalb dieser Schranke werden sichtbare SV vom Empfänger ignoriert. In der Praxis liegt die *Elevationsmaske* üblicherweise zwischen 5° und 15° (KRÜGER et al. 1994, LECHNER & BAUMANN 2000, DODEL & HÄUPLER 2010). Zur Überprüfung der Sichtbarkeit können Softwareanwendungen eingesetzt werden, die Sichtbarkeiten von SV abhängig von Zeit, Ort und Elevation angeben können. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf die Onlineanwendung der Firma Trimble verwiesen:

<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/>

Die *Verfügbarkeit (availability)* gibt an, dass dem Anwender mindestens vier SV zur Verfügung stehen, womit die prinzipielle Ortung mittels GNSS möglich ist. Verbunden mit einer geforderten Genauigkeit kann die *Verfügbarkeit* mit den *Dilution of Precision (DOP)* Faktoren charakterisiert werden. Allgemein sind die DOP-Faktoren ein Maß für die geometrisch bedingten Ortungsfehler. Dabei gilt

$$DOP = \frac{\text{Standardabweichung des Positionsfehlers } \sigma_p}{\text{Standardabweichung des Entfernungsfehlers } \sigma_r} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Es werden weitere Differenzierungen der DOP-Faktoren vorgenommen (MANSFELD 2010):

- PDOP (Position DOP),
- HDOP (Horizontal DOP),
- VDOP (Vertikal DOP),
- TDOP (Zeit DOP).

Bezogen auf das Volumen der o. g. Pyramide bedeutet dies: Je größer das Volumen (bis zum Maximum), desto höher ist die Genauigkeit, desto kleiner wird der DOP-Wert (DODEL & HÄUPLER 2010). Die Autoren ordnen die Werte in Tab. 3 ein.

Tab. 3 Einordnung der DOP-Werte (DODEL & HÄUPLER 2010).

DOP	Note	Leistungsbeschreibung
1	Sehr gut	Genügt höchsten Ansprüchen
2-3	Gut	Für alle Genauigkeitsforderungen hinreichend
4-6	Befriedigend	Gut für allgemeine Anforderungen
7-8	Ausreichend	Wert ist eingeschränkt akzeptabel für viele Anwendungen
9-20	Mangelhaft	Wert ist nur als Grobschätzung tauglich
>20	Ungenügend	Messungen sind bis auf die Größe eines Fußballfeldes genau; sollten nicht benutzt werden

HDOP und PDOP werden meist in GNSS-Messsystemen als Güteparameter zur Beurteilung einer Satellitenkonstellation herangezogen. TRIMBLE (2001) empfiehlt zur Durchführung einer *Echtzeitkinematischen Messung* beispielsweise einen PDOP von sechs als obere Schranke (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 2001).

Die *Integrität* eines Systems charakterisiert dessen Fähigkeit den Nutzer rechtzeitig vor einem Ausfall zu warnen. Dabei werden die Faktoren Systemgenauigkeit an den Toleranzgrenzen, Zeit bis zu einem Alarm, Integritätsrisiko und Falschalarmrate mit einbezogen (DODEL & HÄUPLER 2010, MANSFELD 2010).

Die erzielbare Genauigkeit bei der reinen Verwendung eines GNSS (stand-alone) ist für etliche Anwendungen nicht ausreichend. Deshalb wurden in der Vergangenheit Systeme zur Erhöhung der Präzision und Sicherheit etabliert, die sog. *Augmentierung* (DODEL & HÄUPLER 2010). Im Rahmen dieser Übersicht wird auf die Grundlagen zweier Verfahren eingegangen (KRÜGER et al. 1994, LECHNER & BAUMANN 2000, DODEL & HÄUPLER 2010, MANSFELD 2010).

Mit Hilfe von *Differenzialmessverfahren (DGNSS)* kann die Genauigkeit der Laufzeit-/Entfernungsmessung und somit der Positionsmessung erheblich verbessert werden. Bei diesem werden zwei Empfänger verwendet, einer für das *Nutzersegment (Rover)*, der zweite als *Referenzstation (Basis)*. Letzterer wird auf einem Standort positioniert, dessen Koordinaten durch eine genaue Messung bekannt sind. Mit der *Basis* wird eine Position gemessen; durch den bekannten Standort können mit geeigneten Algorithmen system- und ausbreitungsbedingte Fehler eliminiert werden. Die korrigierte Position kann über ein Funksignal, dem sog. *Korrektursignal*, dem *Rover* mitgeteilt werden. Damit erfolgt eine Reduktion der Fehlereinflüsse. Bei der Positionsbestimmung wird die Entfernung zu den SV mit zwei Verfahren gemessen, der *Code-Phasenmessung* und der *Trägerphasenmessung*. Erstere erzeugt eindeutige Ergebnisse mit einer Genauigkeit im Meterbereich, letztere mehrdeutige Ergebnisse mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Die *Code-Phasenmessung* wird allgemein als *DGNSS*, bzw. *DGPS* bezeichnet. Die Korrekturdaten werden als Funksignal im Datenformat RTCM SC-104 (Radio Technical Committee for Maritime Applications) über das GSM-, UKW-Netz oder das 2-m-Band (160 MHz) ausgestrahlt. DGNSS wird unter anderem bei den Augmentierungsdiensten *Wide Area Augmentation System (WAAS)* und *European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)* eingesetzt. Diese wurden zur Gewährleistung einer ausreichenden Genauigkeit und Sicherheit (Integritätsprüfung) für die zivile Luftfahrt entwickelt. Hier kommen noch zusätzliche Techniken zur Integritätsprüfung zum Einsatz. Die Übertragung der Korrektursignale erfolgt über Satellitentechnik.

Bei der *Träger-Phasenmessung* wird das Verfahren der *Echtzeitkinematischen Messung*, bzw. engl. *Real-Time-Kinematic (RTK)* mit hoher Präzision angewandt. Meist werden die Referenzstationen direkt vom Nutzer betrieben. Dies können mobile oder festinstallierte Einrichtungen sein. Es wird ebenfalls das Standarddatenformat des RTCM (RTCM 2.x o. RTCM 3.x) verwendet, einzelne Hersteller bieten für ihre Systeme allerdings auch proprietäre Formate an, z. B. Trimble mit CMR und CMR+ (Compact Measurement Record) (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 2001). Auch im Bereich RTK werden öffentliche Systeme angeboten, so beispielsweise der von der AdV initiierte *Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS)*. Es werden drei Dienste mit unterschiedlichen Genauigkeiten, vergleichbar mit nutzereigenen RTK-Stationen bis zu 1 cm bereitgestellt (Tab. 4) (KRÜGER et al. 1994, LECHNER & BAUMANN 2000, DODEL & HÄUPLER 2010, MANSFELD 2010).

Tab. 4 Kenngrößen des Referenzsystems SAPOS, modifiziert nach MANSFELD (2010).

<i>Dienst</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Verfahren</i>	<i>Übertragung</i>	<i>Datenformat</i>	<i>Genauigkeit</i>
Echtzeit-Position.-Service	EPS	RTK	2-m-Band GSM UKW	RTCM	0,5-3 m
Hochpräzis. Echtzeit-Position.-Service	HEPS	RTK	GSM 2-m-Band	RTCM	1-2 cm 2-5 cm
Geodät-Postproz.-Position.-Service	GPPS	Postprocessing	Email, Datenträger	RINEX	1 cm <1 cm

Zur Steigerung der Genauigkeit und Effizienz kann im Bereich *Navigation* die *Integrierte Navigation* eingesetzt werden. Dabei werden computer-gestützt die Daten aus zwei oder mehr getrennt voneinander arbeitenden Navigationssystemen verarbeitet. Die Systeme erfassen hierbei unterschiedliche physikalische Messwerte und fusionieren die Daten, wobei selbstständig zwischen validen und fehlerhaften Daten unterschieden wird.

Das Gesamtsystem besteht aus verschiedenen Sensoren, den *referenz-abhängigen* und *referenzgebenden* Systemen, den

- Trägheitssystemen (Inertial Navigation Systems),
- Kartenabgleichssystemen (Map Matching Systems),
- Geländeabgleichssystemen (Terrain Contour Matching),
- Bildabgleichssystemen (Pattern Recognition Systems),

und den Funknavigationssystemen, wozu auch die GNSS zählen (DODEL & HÄUPLER 2010).

2.1.3 Geoinformationssysteme

Zur Verarbeitung raumbezogener Daten werden sogenannte Geoinformationssysteme (GIS) verwendet. Die ersten Ansätze moderner rechnergestützter Systeme wurden in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts in Kanada eingeführt. Zuvor wurden Geodaten analog in Registerform seit dem 19. Jahrhundert gepflegt (BILL 2010).

In erster Linie wird ein GIS nach BILL (2010) zur rechnergestützten Bearbeitung und Modellierung raumbezogener Problemstellungen auf interdisziplinärer Ebene eingesetzt. Hierfür werden Daten und Informationen digital erfasst, verändert, verwaltet, analysiert und präsentiert. Dies kann auf ein Vierkomponenten-System reduziert werden: Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation (EVAP). Somit ist ein GIS als übergeordneter Begriff für eine Technologie, bzw. ein Verfahren zu sehen, wird jedoch im Sprachgebrauch auch für die eingesetzte Software verwendet.

Die Softwareprodukte können in sieben Klassen eingeteilt werden (STEINIGER & WEIBEL 2009, STEINIGER & HUNTER 2013):

- Desktop GIS,
- Spatiale Datenbank Management Systeme,
- Web Map Server,
- Server GIS,
- Web GIS Clients,
- Mobile GIS,
- Bibliotheken und Erweiterungen.

Der in Deutschland erscheinende GIS-Report (HARZER 2014) wandelt diese Klassifizierung etwas ab; es wird nach Funktionsumfang in

- GIS (GIS Engine und Client),
- Desktop GIS,
- GIS Viewer

bzw. nach technischer Charakteristik in

- CAD-GIS,
- GIS-Fachschale und Applikation,
- Internet GIS,
- GIS-Ergänzung,
- Geodatenserver,
- Mobile GIS

unterteilt. Diese Sammlung trägt jährlich alle bekannten Hersteller, Anbieter und Produkte im Bereich der Geoinformationssysteme zusammen. Aktuell umfasst die Auflistung über 1 000 Kurzbeschreibungen verfügbarer Einzelapplikationen. Abb. 13 zeigt eine Auswahl (BILL 2010, STEINIGER & HUNTER 2013).



Abb. 13 Sammlung bedeutender GIS-Anwendungen, modifiziert nach BILL (2010), STEINIGER & HUNTER (2013).

Weiterhin können GIS-Anwendungen in kommerzielle und freie Angebote unterschieden werden. Im Bereich der freien Produkte ist oftmals die

Rede von Open Source. Dies stellt allerdings nur einen Teilaspekt dar, es wird mit Open Source lediglich die Offenlegung des Programm-Quellcodes beschrieben. In Zusammenhang mit freier (nicht zwangsläufig kostenloser) Verfügbarkeit werden diese Softwareprodukte als sog. *FOSS* (Free and Open Source Software) bezeichnet (STEINIGER & HUNTER 2013). Gerade dieser Produktbereich unterliegt in den letzten Jahren einem enormen Wandel und einer kontinuierlichen Weiterentwicklung, getragen von einer breiten Anhängerschaft. Speziell in wissenschaftlichen Institutionen und Fakultäten werden vielfach Open-Source-, bzw. Free-Software-Ansätze verfolgt, da bei diesen Anwendungen die Entwicklungsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt sind. Das GNU-Projekt definiert Freie Software als frei, wenn folgende vier Freiheiten erfüllt sind (STALLMAN 2014):

- Freie Ausführung,
- Freie Untersuchung und Anpassung,
- Freie Weiterverbreitung,
- Freie Verbesserungsmöglichkeiten.

Unter diesen Aspekten wird es gerade für ressourcenschwache Bereiche, Kommunen, Institutionen, Körperschaften und Gruppierungen möglich, die Vorteile rechnergestützter Geoinformationsverarbeitung zu nutzen (CALDEWEYHER et al. 2006). Es werden in allen tangierten Fachbereichen zunehmend Untersuchungen zur Nutzung freier und offener GIS-Anwendungen zu vielfältigen Problemstellungen durchgeführt (MITASOVA et al. 2005, STEINIGER & HAY 2009, CHEN et al. 2010, NETELER et al. 2012, ZARAGOZÍ et al. 2012, STEINIGER & HUNTER 2012). In den Klassifizierungen nach STEINIGER & HAY (2009), bzw. HARZER (2014) gibt es im Bereich der FOSS eine Vielzahl verfügbarer Anwendungen und Sammlungen (Abb. 14). In Bezug auf die vorliegende Arbeit sind vor allem die Desktop-GIS-Anwendungen und internetbasierten Dienste von Bedeutung.



Abb. 14 Freie und offene GIS-Anwendungen, Stand 2012 (STEINIGER, 2013).

Bei den Desktop-Anwendungen sehen die Autoren aktuell die beiden Systeme GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) und QGIS (Quantum-GIS) in der Leistungsstärke, dem Funktionsumfang und der Verbreitung an der Spitze (BORK 2008, CHEN et al. 2010). Diese Systeme beschränken sich nicht auf die reinen, isolierten Funktionen als Desktop-GIS (BILL 2010), sondern besitzen darüber hinaus Schnittstellen, Erweiterungen und Importfunktionen unter anderem zur Nutzung netzgestützter Funktionen, wie *Web Map Servern* zur Einbindung zusätzlicher Ebenen. Beispielhaft für servergestützte Systeme seien die Geoportale des Bundes, der Bundesländer oder anderer administrativer Institutionen genannt (BKG 2014a). Hier finden sich beispielsweise frei zugänglich hochaufgelöste, digitale Orthophotos mit einer Bodenauflösung von 40 cm px^{-1} und Daten des amtlichen Liegenschaftskatasters (ALKIS). Damit vergleichbare Anwendungen unterschiedlichen Funktionsumfangs sind WebGIS-Systeme von

Kommunen und Forschungseinrichtungen wie kvwmap (GDI SERVICE 2014) oder GeoWiki (FRITZ et al. 2012). Eine Auflistung weiterer Dienste findet sich unter anderem am Fachbereich Geoinformation der Universität Rostock (UNIVERSITÄT ROSTOCK 2012), sowie bei der AG Geoinformatik der Hochschule Osnabrück (HOCHSCHULE OSNABRÜCK 2014). Zu WebGIS-Anwendungen des öffentlichen und populärwissenschaftlichen Bereichs zählen Anwendungen wie Google Earth, Google Maps, Bing Maps und Open Street Maps (OSM) (CIEPLUCH et al. 2010).

Technisch interpretieren GIS-Programme, vor allem die Desktopanwendungen, Geoinformationen nach dem EVAP-Prinzip als Raster- oder Vektordaten und damit verknüpfte Sachinformationen (Attribute) (STEINIGER & WEIBEL 2009, BILL 2010). Das Rasterdatenmodell basiert auf einer regelmäßigen, rechteckigen, bzw. quadratischen Tessellierung einer Ebene. Dabei wird bei Fragestellungen der Geoinformationen jedem entstandenen Pixel eine diskrete Ortsinformation in Form einer zwei- oder dreidimensionalen Koordinate zugewiesen. Die homogene Aufteilung wird durch die „Maschenweite“ des Gitters, basierend auf der Pixelgröße definiert. Verbundene Attributinformationen beziehen sich auf die gesamte Fläche eines Pixels, bei digitalen Höhenmodellen wird üblicherweise die mittlere Elevation auf der Pixelfläche geschätzt. In RGB-Rasterkarten sind Rot-, Grün, und/oder Blauwerte als Attributdaten hinterlegt. Räumlich diskrete Objekte werden in Form von Punkten, Linien oder Polygonen als Vektorgeometrie mit entsprechenden räumlichen Koordinaten gespeichert. Jedem Objekt können eine oder mehrere Informationen als Attribute zugewiesen werden. Die dritte Schicht der Datenstruktur in Geoinformationssystemen ist die Datenbankebene. Diese wird mit Raster- oder Vektordaten verknüpft und speichert die Attribute in Tabellen ab. Zur Vereinfachung der Datenbankstruktur werden die Geoinformationen thematisch in Ebenen gruppiert, wodurch auch für den Anwender die Übersichtlichkeit gewahrt wird. So können beispielsweise Einzelpunkte in einer Feldmessung mittels GNSS-Systemen erfasst, zu komplexen geometrischen Formen weiterverarbeitet und in einer Ebene über ein in einer separaten Ebene befindliches digitales Orthophoto gelegt werden. (GOODCHILD 1992, STEINIGER & WEIBEL 2009).

2.2 Präzisions-Landwirtschaft

Der *präzise Landbau* wurde in unzähligen Publikationen detailliert beschrieben. Im Folgenden werden deshalb nur kurz die Grundlagen und der Werdegang dargestellt. Vertiefende Informationen und Untersuchungen zur Anwenderakzeptanz sind unter anderem bei MAOHUA (2001), ZHANG et al. (2002), NEMÉNYI et al. (2003), SEELAN et al. (2003), ADRIAN et al. (2005), NOACK (2006), EHRL & AUERNHAMMER (2007), LAMB et al. (2008), REICHARDT & JÜRGENS (2009), TOZER (2009), NIKKILÄ et al. (2010), BOGUE (2013), KRUIZE et al. (2013), CUBERO et al. (2014) und MIELE et al. (2014) zu finden.

Die zunehmende Verfügbarkeit der Informationstechnologie (IT) führte in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts zur Entwicklung neuer Methoden in der Landwirtschaft. Trotz allem war es der Praxis zum damaligen Zeitpunkt nicht gelungen, den damit verbundenen Problemen wie Ungleichgewicht zwischen Produktion und Konsum in Form von gleichzeitiger Überproduktion und Hunger Herr zu werden. AUERNHAMMER (1994) beschreibt treffend die Anforderungen an die Pflanzenproduktion als Basis der Human-Ernährung in seinem Editorial einer Sonderpublikation zur Präzisions-Landwirtschaft. Die größten Herausforderungen liegen im Bereich der Informationsbeschaffung. Landwirtschaftliche Produktionsflächen unterliegen einer hohen Variabilität und Heterogenität hinsichtlich Bodenbeschaffenheit, Bodenfruchtbarkeit und resultierendem Ertrag. Diese Faktoren werden als Grundlage und Ausgangspunkt der sog. *Präzisions-Landwirtschaft (Precision Farming/Agriculture)* angesehen und gehen bis in die Antike zurück. Die Kleinparzellierung im Mittelalter ermöglichte die individuelle Bewirtschaftung unterschiedlich fruchtbarer Flächen (STAFFORD 2000). Die zunehmende Parzellenvergrößerung im 20. Jahrhundert verhinderte diese Vorgehensweise zunehmend. Deshalb waren technische Verfahren zur *Teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (engl. Site-specific crop production)* von Nöten.

Die Techniken des *Precision Farming* teilt COX (2002) in ein dreistufiges Modell ein:

Datenerfassung

- Fernerkundung (Radar, LIDAR, sichtbares, unsichtbares Licht, Spektroskopie),
- Naherkundung (Photogrammetrie, Multispektroskopie, NIR, CCD-Kameras),
- chemische Sensoren (elektronische Nase),
- Positionsdaten (GNSS).

Datenverwertung

- Beobachten und Kontrollieren (Maschinenführung und -kontrolle),
- Modellierung und Datenmanagement.

Datenaustausch

- Maschine-Maschine (LBS, ISOBUS, CAN),
- Maschine-Mensch (GUI, Mensch-Maschine-Schnittstelle),
- Mensch-Mensch (IT, Internet).

Die Realisierung dieses Datenstroms setzt die Vernetzung der landwirtschaftlichen Arbeitsgeräte voraus. Einen Ansatz liefern das *Landwirtschaftliche Bussystem (LBS)* (Abb. 15) und dessen Nachfolger, der *ISOBUS*. Diese Netzwerke basieren auf dem *Controller Area Network (CAN)* und sind nach DIN 9684/1 bzw. ISO 11783 genormt (AUERNHAMMER 2000). Der ISOBUS setzt sich zunehmend als herstellerübergreifender Standard bei der Vernetzung durch und kann bisherige proprietäre Insellösungen verdrängen (BÖTTINGER 2010a, ROTHMUND & WODOK 2010).

Zunächst wurden die Techniken des Precision Farming nur in Zusammenhang mit der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zur Bodenuntersuchung, Ertragskartierung, sowie zur teilflächenspezifischen Düngung und zu Pflanzenschutzmaßnahmen eingesetzt (AUERNHAMMER et al. 1994, DELCOURT & BAERDEMAEKER 1994, SCHUELLER & WANG 1994, STAFFORD & AMBLER 1994, BASTIAANSEN et al. 2000).

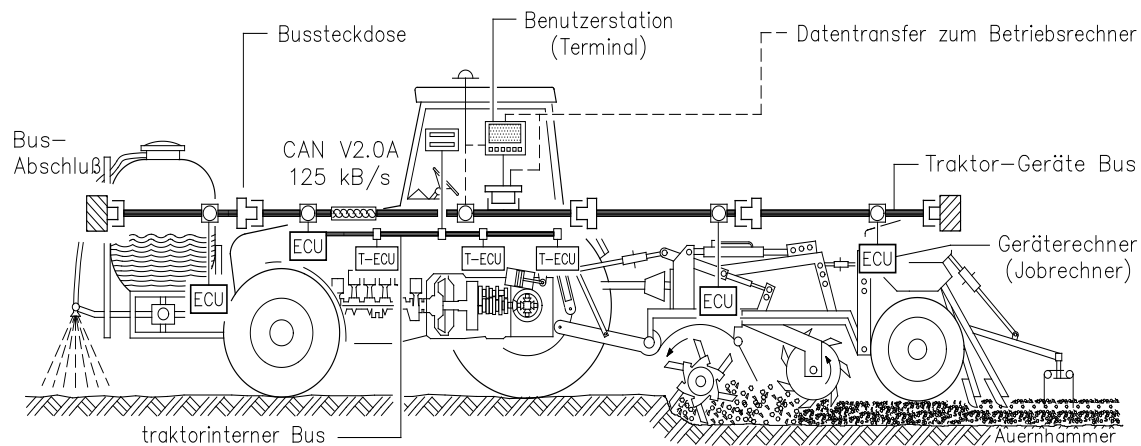


Abb. 15 Schematischer Aufbau des LBS (Vorläufer ISOBUS), modifiziert nach AUERNHAMMER (2002).

Nach AUERNHAMMER (Abb. 16) kann Precision Farming auch Lösungsmöglichkeiten für *Dokumentation*, *Flottenmanagement* und *Feldrobotik* bereitstellen (AUERNHAMMER 2000, AUERNHAMMER 2001, AUERNHAMMER 2002).

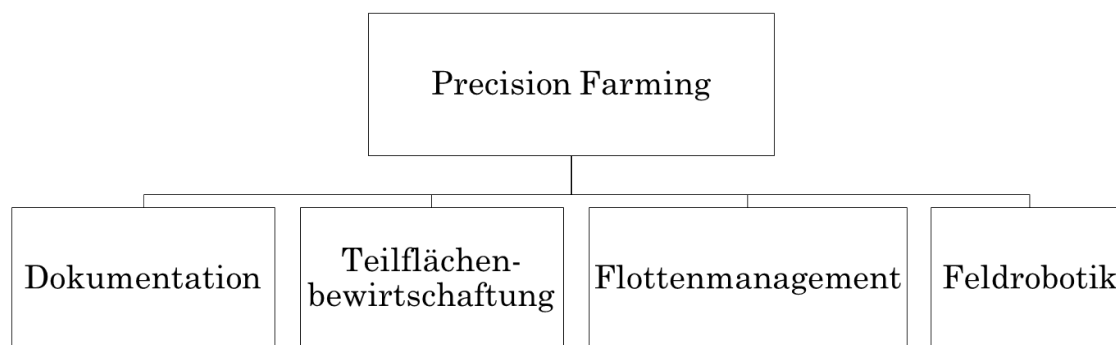


Abb. 16 Teilaspekte des Precision Farming, modifiziert nach AUERNHAMMER (2002).

Die Einzelkomponenten der Systeme sind so ausgelegt, dass die erfassten Daten verarbeitet, ausgewertet und direkt zur Dokumentation aufbereitet werden können (AUERNHAMMER et al. 1999).

Ein häufig genutzter Anwendungsfall informationsgestützter Landwirtschaft sind *automatische Lenksysteme*, bzw. *automatische Spurführung*. Seit Mitte der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts wurden vermehrt satellitengestützte Verfahren entwickelt (LARSEN et al. 1994, STAFFORD & AMBLER 1994). Zuvor waren vor allem optische Verfahren, z. B. mittels Laser, oder

mechanische Verfahren bekannt (TILLET 1991). Durch die automatische Spurführung werden Überlappungsbereiche der Arbeitsgeräte reduziert und damit die Flächenleistung gesteigert. Gleichzeitig sinken dadurch Umweltbelastungen durch Kraftstoffeinsparung, vermindertem CO₂-Ausstoß, reduziertem Pflanzenschutzmittelaufwand und Reduzierung der Bodenbelastung durch eine geringere Anzahl von Überfahrten. In der Literatur werden Steigerungen der Flächenleistungen und Arbeitsgeschwindigkeit von bis zu 15 % genannt (GAN-MOR et al. 2007). Die Anschaffungskosten für die notwendige Technik (GNSS-System, automatische Lenkung) können je nach Automatisierungsgrad im Bereich von 1.300 € bei einfachen Parallelfahrssystemen bis zu 45.000 € bei RTK-gestützten vollautomatischen Lenksystemen liegen (BÖHRNSEN 2009). Der Einsatz letzterer ist jedoch nur im überbetrieblichen Einsatz wirtschaftlich rentabel (KÜBLER 2010). Zur Beurteilung rein monetärer Vorteile der automatischen Spurführung ist eine Differenzierung in Arbeitsvorgänge vorzunehmen. Beim reinen Fahrbetrieb, beispielsweise bei der Bodenbearbeitung, sind die zu erwartenden Kosteneinsparungen durch verminderte Überlappung lediglich im Bereich von 0,09-0,25 € ha⁻¹, abhängig von der Arbeitsbreite, anzusetzen (BATTE & EHSANI 2006, BÖHRNSEN 2009). Sobald weitere Einsatzmittel wie Pflanzenschutz- oder Düngemittel ausgebracht werden, ist die Kostenreduktion durch Mitteleinsparung deutlich höher anzusetzen. KÜBLER (2010) berichtet von einem Kostenvorteil von 20,12 € ha⁻¹ durch den Einsatz automatischer Lenksysteme ausgehend von einer Betriebsgröße von 1 600 ha. Damit werden insgesamt 25.184 € a⁻¹ eingespart. Untersuchungen im Gemüsebau haben Einsparpotentiale bei den Verfahrenskosten durch den Einsatz satellitengestützter Hacktechnik zur Beikrautregulierung im Vergleich zu praxisüblichen, konventionellen Verfahren von bis zu 60 % aufgezeigt. Gleichzeitig werden Kraftstoff und weitere Betriebsmittel eingespart, was zur Verbesserung der CO₂-Bilanz beiträgt. Der Arbeitszeitbedarf wurde durch größere Arbeitsbreiten um bis zu 70 % verringert (SCHWARZ & HEGE 2014).

Um die Positionsgenauigkeit bei Verwendung von automatischen Lenksystemen charakterisieren zu können, erfolgt eine Aufteilung der auftretenden Fehler in Bezug auf die Fahrtrichtung. Zum einen werden Abweichun-

gen quer zur Fahrtrichtung (transversal), zum anderen entlang des Pfades (longitudinal) beurteilt. Bei Betrachtung der resultierenden Positionsfehler fanden PEREZ-RUIZ et al. (2012) bei der Pflanzung von Tomatensetzlingen RMS-Fehler (Root Mean Square, dt: Quadratisches Mittel) von 23,9 mm (transversal) und 26,7 mm (longitudinal) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1,6 km h⁻¹. Der Gesamtfehler betrug im Mittel 55,8 mm. GAN-MOR et al. (2007) untersuchten die Abweichungen von Arbeitsgeräten abhängig von der Entfernung zur Hinterachse bei landwirtschaftlichen Schleppern. Der Positionsfehler der Schlepperhinterachse betrug bei der Fahrt auf unebenem Gelände im Mittel 36,4 mm bei einer Geschwindigkeit von 4 km h⁻¹. NØRREMARK et al. (2007) fanden maximale Abweichungen von 37,3 mm beim Ablegen von Zuckerrübensaatgut. Die longitudinalen Fehler waren in diesen Fällen tendenziell größer. Alle Autoren verwendeten Spurführungssysteme mit Kompensation der Fahrzeugneigung zur Korrektur der Fahrspur. NØRREMARK et al. (2007) untersuchten deren Einfluss und fanden signifikant größere Positionsfehler beim Verzicht auf Neigungskompensation. Je nach Fahrtrichtung wurden 1,6-59-fach größere Abweichungen ohne Neigungskompensation registriert.

Zusätzlich zu rein satellitenbasierten Navigationssystemen ist der Einsatz weiterer Sensorik möglich. Hier sind Systeme mit mechanischer Abtastung eines Bestandes verfügbar. Zunehmend werden in den letzten beiden Dekaden Systeme mit berührungsloser, optischer oder akustischer Nachführung entwickelt und angeboten. Dabei kommen beispielsweise bildgebende Verfahren mit CCD-Kameras (Charged-Coupled-Device), 3D-Bildverarbeitung, Laserscanner oder Ultraschallsensoren zum Einsatz (KEICHER & SEUFERT 2000, KEICHER 2002, BÖTTINGER 2010b).

2.3 Robotik

Mitte des 21. Jahrhunderts wird eine Weltbevölkerung von etwa neun Milliarden Menschen erwartet. Zur adäquaten Ernährung dieser Zahl müsste die Nahrungsmittelproduktion global um 70-100 % gesteigert werden, wobei es zu einem Wettstreit um Land, Wasser und Energie kommen wird. Ein direkter Konkurrent zur Nahrungsmittelproduktion ist beispiels-

weise die Herstellung von Biokraftstoffen (GODFRAY et al. 2010). Die weitere Automatisierung der Landwirtschaft kann unter anderem Lösungsansätze liefern (WUNDER et al. 2012).

Ebenso wie AUERNHAMMER (2001) sieht auch RUCKELSHAUSEN (2010) die Feldrobotik als nächste Stufe des Automatisierungsgrades in der Landwirtschaft. Er stellt mehrere Optionen des Flottenmanagements bei der Feldbewirtschaftung dar:

- Kombination bemannter und unbemannter Fahrzeuge existierender Konzepte (teilautonome Flotten).
- Rein unbemannte Fahrzeuge existierender Konzepte (autonome Flotten).
- Kombination bemannter Fahrzeuge existierender Konzepte und unbemannter Fahrzeuge neuer Konzepte (teilautonome Flotten mit Feldrobotern).
- Unbemannte Fahrzeuge neuer Konzepte (autonome Feldroboterschwärme).

Als existierende Konzepte werden hier beispielsweise Standardschlepper mit automatischen Lenksystemen angenommen. Den Übergang zu vollautonomen Systemen sehen die Autoren als fließenden Prozess.

Exemplarisch sei hier das Konzept der *elektronischen Deichsel* genannt. Dabei werden serienmäßig mit automatischer Lenkung ausgestattete Schlepper virtuell gekoppelt. Diese Verknüpfung wird über eine Funkstrecke realisiert und ist mit verschiedenen Hard- und Softwaremodulen ausgestattet. Sie funktioniert nach dem *Master-Slave-Prinzip*, wobei der Master-Schlepper von einem Fahrer geführt wird, jedoch auch mittels automatischer Spurführung gelenkt werden kann (NOACK et al. 2010).

Vielfach wird auf die Problematik großer Maschinen mit daraus resultierender Bodenverdichtung hingewiesen (AUERNHAMMER 2001, BLACKMORE et al. 2009). Aus diesem und weiteren Gründen wird bei der Feldrobotik konzeptionell auf kleinere, leichtere und flexiblere Maschinen gesetzt. Dadurch wird die Wendigkeit erhöht und die Bearbeitung ungünstig geschnittener Schläge erleichtert. Die Skalierungseffekte durch den Einsatz

großer Arbeitsgeräte werden bei kleineren autonomen Maschinen durch verlängerte Einsatzzeiten (24 Stunden), den Einsatz vieler kleiner Maschinen und den effizienteren Einsatz (z. B. Bestandserkennung) kompensiert (BLACKMORE et al. 2009, GRIEPENTROG 2010).

VÖGELE (2010) fasst die Anforderungen an einen ausgereiften mobilen Landwirtschaftsroboter wie folgt zusammen:

- Geländetauglichkeit und Robustheit,
- Energieautonomie,
- Orientierungsfähigkeit im Gelände,
- Hinderniserkennung,
- Änderung von Fahrwegen und Aufgaben beim Auftreten von Hindernissen,
- Effiziente Kooperation mit Mensch und anderen Robotern,
- Kognitive und manipulatorische Fähigkeiten zur autonomen Lösung komplexer Aufgaben.

Seit 2003 wird jährlich der sog. Field Robot Event veranstaltet. Hier treten vor allem studentische Teams verschiedener europäischer Fakultäten gegeneinander in mehreren Disziplinen an und zeigen den aktuellen Stand der Forschung im Bereich Feldrobotik (MARTINET & BLAAUW 2014).

Darüber hinaus wurden in einigen Forschungsprojekten in den vergangenen Jahren diverse Prototypen für den Einsatz in Ackerbau und Sonderkulturen entwickelt. Der Bereich Robotik in der Milchwirtschaft in Form der Melkroboter wird hier bewusst ausgeklammert. Es werden exemplarisch einige Projekte der Feldrobotik genannt.

Bereits Ende der 1980er Jahre wurden in Italien Untersuchungen zur vollständigen Mechanisierung des Rebschnitts mittels eines schleppergetriebenen Rebschnittroboters angestellt (VANNUCCI et al. 1990). Seit 2008 unternimmt die US-amerikanische Firma Vision Robotics Versuche zur Automatisierung des Fruchtrutenschnitts durch 3D-Bildererkennung (BLOSS 2014, VISION ROBOTICS 2015). In Neuseeland versucht seit 2010 eine Arbeitsgruppe die menschlichen kognitiven Prozesse beim Rebschnitt in Re-

geln für eine künstliche Intelligenz zur Anwendung in einem Roboter zu übertragen (SAXTON et al. 2014).

1996 wurde in Japan ein Modell zur Ernte in Obst- und Gemüsekulturen beschrieben (KONDO et al. 1996). Ebenfalls in Japan wurde ein Prototyp eines Ernteroboters für Säulenkirschen mit 3D-Bilderkennung und einem Ernteorgan mit vier Freiheitsgraden hergestellt und getestet (TANIGAKI et al. 2008). Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich mit dem Einsatz eines Erntesystems für Erdbeeren in Gewächshäusern mit anschließender Ablage in Schalen. Dabei benötigte das System etwa die dreifache Zeit im Vergleich zum Menschen (HAYASHI et al. 2010).

Mit dem Roboter U-Go wird versucht eine elektrisch angetriebene Multifunktionsplattform für den Weinbau zu etablieren. Dabei kann das Fahrzeug entweder mit einem Joystick ferngesteuert, mittels Laserscanner semiautonom an Rebzeilen entlang geführt oder satellitengestützt vollautonom navigiert werden. Aktuell ist ein Sprühgerät zur Pflanzenschutzapplikation verfügbar (LONGO et al. 2010, LONGO et al. 2012).

Mit der Automatisierung non-invasiver Boniturtechniken im Weinbau beschäftigt sich zurzeit das Forschungsprojekt VineRobot. Dabei sollen mit einem bodengeführten Fahrzeug die Parameter Ertrag, vegetatives Wachstum, Wasserstatus und Beereninhaltsstoffe erfasst werden (VINE ROBOT 2015).

Eine chinesische Arbeitsgruppe hat einen Roboter zur Apfelernte entwickelt und getestet. Die kettenbetriebene Plattform wird über GNSS navigiert. Zur Apfelerkennung kommen bildgebende Verfahren zum Einsatz. Durchschnittlich wurden 15,4 s pro Frucht bei einer Erfolgsrate von 77 % benötigt (DE-AN et al. 2011, JI et al. 2012).

Zur Ernteautomatisierung von Artischocken wurden erste Simulationen und Modellbildungen in Italien durchgeführt. Die Autoren haben Möglichkeiten zur maschinellen Ernte, Objekterkennung und Schlagkraft untersucht (LONGO & MUSCATO 2013).

Im Arbeitsfeld der automatisierten Phänotypisierung, beispielsweise der Bonitur von Pflanzenbeständen, ist vor allem der *BoniRob* (Abb. 17), ein

Kooperationsprojekt wissenschaftlicher und industrieller Projektpartner, erwähnenswert. Es wurde eine Plattform zur Aufnahme verschiedener, sog. *Applikationen*, zur Bonitur, Bodenuntersuchung oder Beikrautregulierung entwickelt (BANGERT et al. 2013). Der Antrieb erfolgt über Radnabenmotoren mit variablem Lenkkonzept (RUCKELSHAUSEN et al. 2009). Zur Navigation des Fahrzeugs wird das Konzept der *Sensorfusion* angewandt, d. h. es werden im mehrschichtigen Navigationssystem die Daten mehrerer Sensoren (LIDAR, Inertial, RTK-GPS) zusammengeführt (BIBER et al. 2012).



Abb. 17 Phänotypisierungsplattform BoniRob V2 (AMAZONEN-WERKE 2011).

In der zweiten Generation soll das System analog zu Schlepper-Anbaugerät-Kombinationen nutzbar sein. Es wird durch die modulare Applikationsaufnahme eine multifunktionale Nutzung ermöglicht. Abb. 18 zeigt den Ablauf der Beikrautregulierung als kooperativen Prozess unter Beteiligung des BoniRob V2 und eines humanen Bedieners zur semiautomatischen Erkennung von Beikräutern (RemoteFarming.1a). In der nächsten Entwicklungsstufe soll durch lernfähige Algorithmen dieser Prozess weiter

automatisiert werden (RemoteFarming.1b), um den Bediener zu entlasten. Die vollständige Automatisierung wird zurzeit nicht angestrebt (BANGERT et al. 2013).

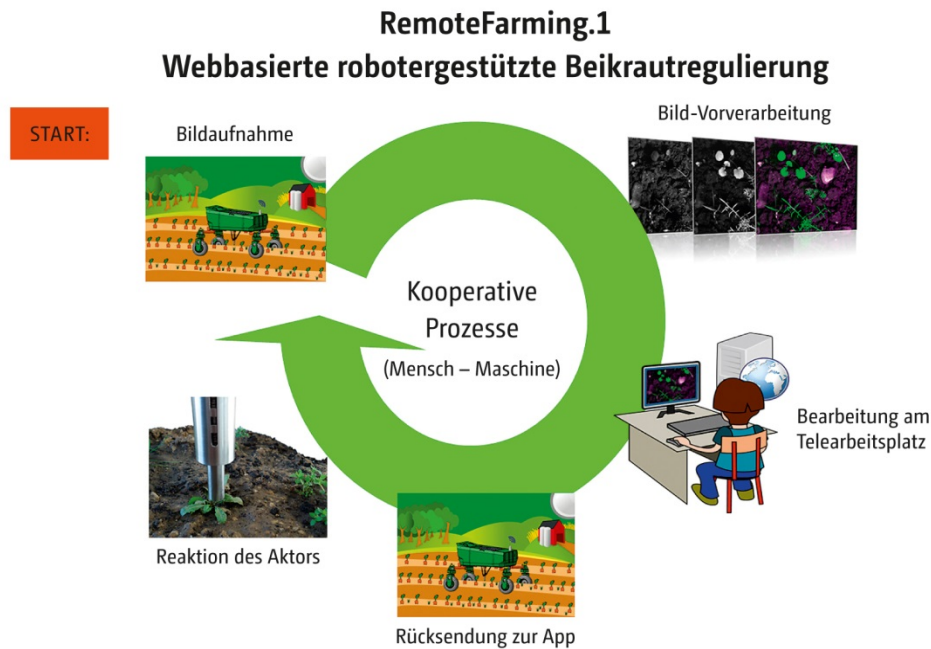


Abb. 18 Prozessablauf RemoteFarming.1a unter Verwendung der Plattform *BoniRob V2* und einem Telearbeitsplatz zur semiautomatischen Beikrautregulierung (AMAZONEN-WERKE 2011, BANGERT et al. 2013).

Nach Einschätzung der Autoren ist das Konzept *BoniRob* eines der Systeme, die dem kommerziellen Einsatz am nächsten sind (BANGERT et al. 2013).

Ein zurzeit in der Entwicklung befindliches, interdisziplinäres Forschungsprojekt kann auf die Erfahrungen aus dem Projekt *BoniRob* zurückgreifen (LINZ et al. 2014b). Bei der Plattform *elWObot* zur Pflanzenschutzmittelapplikation im Wein- und Obstbau werden Ansätze aus Sensorfusion, Navigationskonzept und Steuerung mittels *Robot Operating System (ROS)* angewandt (LINZ et al. 2014a). Zur Entwicklung der Navigationsalgorithmen wurde bei diesem und auch bei einigen der o. g. Projekten die Simulationsumgebung *GAZEBO* verwendet (RUCKELSHAUSEN et al. 2009, EMMI et al. 2013, LINZ et al. 2014a, LINZ et al. 2014b).

2.4 Phänotypisierung und Fernerkundung

Die Entwicklungen im Bereich der elektronisch unterstützten Präzisions-Landwirtschaft zeigen immer neue Anwendungsmöglichkeiten dieser Techniken. Generell sind auf dem Gebiet der Flächenlandwirtschaft stets Entwicklungs- und Anwendungsvorsprünge feststellbar; neue Methoden verbreiten sich meist zuerst in diesem Feld. Bei der Beurteilung von Bestandsparametern wie der Bodengüte und Bodenbeschaffenheit oder Pflanzenmerkmalen kommen Techniken aus den Kapiteln 2.2 und 2.3 zum Einsatz. Speziell bei der Beobachtung von Pflanzen, dem Erfassen phänotypischer Merkmale gibt es das Bestreben die Bonitur non-invasiv, also ohne Verletzung oder Zerstörung durchführen zu können. Hier kommen seit einigen Jahren berührungslose Methoden zum Zuge. Diese sind der Nah-, bzw. Fernerkundung zuzuordnen. Für etliche landwirtschaftliche Kulturen gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Systemen und Methoden. In der Literatur finden sich einige umfassende Übersichten zu verfügbaren Anwendungen (BASTIAANSEN et al. 2000, NICOLAÏ et al. 2007, LEE et al. 2010, RUIZ-ALTISENT et al. 2010, SANKARAN et al. 2010, AQEEL-UR-REHMAN et al. 2014, DEERY et al. 2014).

Im wissenschaftlichen Sprachgebrauch wird als Überbegriff oftmals der englische Ausdruck *Remote Sensing* verwendet, der die direkte Übersetzung zu *Fernerkundung* darstellt. Als Definition gibt das Springer-Gabler Wirtschaftslexikon an (NEUMAIR & HAAS):

„Verfahren zur Beobachtung der Erdoberfläche, der Meeresoberfläche und der Atmosphäre aus Flugzeugen oder Raumfahrzeugen (Satelliten), welche zur Gewinnung von Informationen die von den Objekten ausgehende elektromagnetische Strahlung benutzen (Remote Sensing).“

Zusätzlich können Fernerkundungssensoren auch mittels Drohnen oder Ballons über die Erdoberfläche geführt werden (ALBERTZ 2009). Vor allem der Einsatz von Drohnen (Abb. 19) nimmt in den letzten Jahren deutlich zu und ist im Vergleich zu herkömmlichen Techniken kosteneffizient darstellbar. Die rechtlichen Auflagen zum Betrieb dieser unbemannten Luftfahrt-

zeuge (engl. unmanned aerial vehicle = UAV) sind allerdings nicht unbedeutend (GEO-KONZEPT 2014).



Abb. 19 Drohne (Octocopter) der Firma geo-konzept bei einer Vorführung am Institut für Weinbau der Hochschule Geisenheim.

Der Octocopter der Firma geo-konzept kann mit einer Nutzlast von ca. 1,5 kg beladen werden. Zum einen kann dies eine handelsübliche Systemkamera sein, aus deren Bildern 3D-Geländeaufnahmen mit einer Bodenauflösung von 10 mm px^{-1} erstellt werden können (Abb. 20). Zum anderen kann das System mit einer Multispektralkamera versehen werden (GEO-KONZEPT 2014).



Abb. 20 Drohne (Octocopter) der Firma geo-konzept bei einer Vorführung bestückt mit einer handelsüblichen Systemkamera der Fa. Sony zur Erzeugung von 3D-Geländeaufnahmen.

Die o. g. Bildtypen (RGB, Multispektral) sind neben Thermalbildern Beispiele für passive Fernerkundungssysteme. Dabei wird die Reflexion der Sonnenstrahlung, bzw. von der Oberfläche emittierte Strahlung genutzt. Aktive Systeme arbeiten mit der Aussendung von Mikrowellen (Radar) oder anderen Wellenarten (Laser) (VOSS 2012). Die Fernerkundung kann zudem in die Bereiche *Photogrammetrie* und *Satellitengeodäsie* aufgeteilt werden (ALBERTZ 2009).

Bereits seit einigen Jahren werden Fernerkundungstechnologien auch für den Weinbau entwickelt, adaptiert und eingesetzt. Zu Beginn der 2000er Jahre wurden in etlichen Studien die Nutzungsmöglichkeiten der verfügbaren Satellitentechniken (Landsat, SPOT, IKONOS) und Luftbildtechniken sowie anderen berührungslosen Messtechniken untersucht (HALL et al. 2002). Es können zum einen Bodenuntersuchungsmethoden mit elektromagnetischen Sensoren zur Beurteilung der Wasserversorgung über die elektrische Leitfähigkeit des Bodens angewandt werden (LAMB et al. 2002). Diese Untersuchungen wurden darüber hinaus mit bildgebenden Verfahren verglichen um deren Aussagekraft zu überprüfen (HALL et al. 2002). Zum

anderen können die bildgestützten Verfahren neben den guten Ergebnissen zur Charakterisierung des Bodens und dessen Zonierung auch zur Beurteilung und Beschreibung der bedeckenden Vegetation herangezogen werden (LAMB et al. 2002). Durch Aufnahmen mit Multispektralkameras können diverse Indices berechnet werden, beispielsweise der *Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)*, der als Indikator für Pflanzenwüchsigkeit und Biomassebildung genutzt werden kann (JOHNSON et al. 2001, HALL et al. 2002, HALL et al. 2003, ARNÓ et al. 2009). Über die photosynthetisch aktive Biomasse können Aussagen zu sekundären Pflanzeninhaltsstoffen wie Phenolen getroffen werden. Damit ist es möglich während der Vegetationsphase den potentiellen Phenolgehalt zur Reife zu untersuchen (LAMB et al. 2004).

Neben luftgestützten Fernerkundungsmethoden können diese Techniken auch am Boden eingesetzt werden. Im Falle des Weinbaus erfolgt die Führung der Sensoren entlang der Laubwand. Einsetzbar sind hier ebenfalls RGB- und Multispektralbilder (FERNÁNDEZ et al. 2013, KICHERER et al. 2013).

Diese Seite wurde absichtlich frei gelassen.

3 Material und Methoden

Im Fokus dieser Arbeit liegt vor allem die Entwicklung und Konstruktion der automatisierten Boniturplattform PHENObot als Teil des Forschungsprojektes PHENOVines. Die damit ermittelten Boniturmethode und -ergebnisse sind Teil der Publikationen der Kollegen des JKI, Standort Geilweilerhof, und werden nur am Rande behandelt.

3.1 Fahrzeugentwicklung

In der Kooperationsvereinbarung, basierend auf dem Projektantrag, wurde vereinbart, die Entwicklung und Herstellung des Trägerfahrzeuges so kosteneffizient und ressourcenschonend wie möglich zu gestalten. Es wurde zuerst ein Anforderungsprofil für die Plattform erstellt:

- Kompakte Größe und niedriger Schwerpunkt,
- Nutzlast mindestens 250 kg,
- Vibrationsarmer Antrieb,
- Fahrgeschwindigkeit 2-4 km h⁻¹.

Zur Minimierung der Entwicklungskosten bot es sich an, möglichst viele Serienkomponenten zur Erstellung zu verwenden. Unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils fand eine Sondierung der am Markt befindlichen Fahrzeugkonzepte und Fahrzeugteile statt. Die Ergebnisse dieser Evaluation und den Werdegang der weiteren Entwicklungsarbeiten beschreibt Kapitel 4.

3.2 Konstruktive Arbeiten

Die Erstellung der Konstruktion sowie die Ausführung wurden am Institut für Technik der Hochschule Geisenheim realisiert. Zur Planung und Planerstellung wurde die CAD-Software SolidWorks 2011 SP 5.0 verwendet. Das Fahrzeug wurde mit allen Komponenten als 3D-Modell erstellt. Die daraus erstellten 2D-Herstellungszeichnungen konnten direkt zur Fertigung verwendet werden. Einige Werkstücke mussten aus hochfestem Aluminium gefertigt werden; mit deren Erstellung wurde ein externes, metallverarbeitendes Unternehmen beauftragt.

3.3 Navigation

Aufgrund der Anforderungen an die Boniturplattform wurde der Roboter nicht als vollautonomes System realisiert. Prinzipiell sollte das System die bisher manuelle Bonitur der Rebstöcke weitestgehend automatisieren. Die einzelnen Zuchtstämme oder Klone stehen als Einzelstöcke oder in Kleingruppen in Rebzeilen. Es ist ein Codierungssystem vorhanden, das jedem Rebstock eine eindeutige Identifizierungsnummer zuweist. Alle Stöcke sind georeferenziert und mit eindeutigen Koordinaten wiederauffindbar positioniert. Um das Gesamtsystem schlank und einfach zu halten, wurde deshalb auf einen autonomen Stockerkennungsmodus verzichtet. Die Zuordnung und Ansteuerung erfolgt rein auf Basis der Stockkoordinaten durch Planung von Fahrpfaden.

Zur Pfadplanung bei der Navigation des Roboters und Auswertung positionsbezogener Daten kamen GIS-Programme zum Einsatz (vgl. Kap. 2.1.3).

Die Positionsdaten der Rebstöcke in Anlagen des JKI lagen als kartesische Koordinaten (3D) im Koordinatenreferenzsystem ETRS89 in der Projektion UTM vor. Die Komponente *Höhe* wurde bei der Positionierung nicht berücksichtigt, da die Steuerungsapplikation des Fahrzeugs lediglich mit zweidimensionalen Koordinaten arbeitete. Diese Positionsdaten wurden im Zuge der Entwicklung durch weitere Informationen ergänzt und als Datenbank übergeben.

In dieser Datenbank sind neben den eindeutigen Koordinaten (*easting*, *northing*) eine dem Stock zugehörige Identifikationsnummer (*stockID*) im Format

Parzellenummer-Rebzeilenummer-Stocknummer

(z. B. 23-001-001), die Biegerichtung der Bogrebe, sowie die Identifikation der Zeilenanfangs- und Endpunkte vorhanden. Die *stockID* wird bei der Bildaufnahme jedem Bild sowie den übergebenen Koordinaten zugeordnet und erleichtert so die Zuordnung der Bilder. Näheres zur automatisierten Jobausgabe in Kapitel 4.6

3.4 Software

Die komplette Steuerungsapplikation sowie die GIS-Programme wurden unter dem Linux basierten Betriebssystem Kubuntu 12.04.4 LTS ausgeführt. Alle Bibliotheken der Fahrzeugsteuerung lagen für dieses System vor, zur Vereinheitlichung wurden die weiteren Anwendungen auch darauf angepasst.

Zur Pfaderstellung wurde die freiverfügbare Open-Source Software GRASS GIS in der Version 6.4.4 eingesetzt. Diese eignet sich sehr gut für die kommandozeilenorientierte Arbeitsweise und besitzt einen enormen Funktionsumfang zur Bearbeitung und Transformation von Geodaten. Die vorliegenden Stockkoordinaten wurden aufbereitet und in einer ASCII-Textdatei in GRASS GIS eingelesen. Der Import wurde mittels eines Shell-Skripts (bash) automatisiert, wobei einige Vektorverschiebungen und Berechnungen durchgeführt wurden. Im letzten Schritt des Skripts erfolgte der Export in eine weitere ASCII-Textdatei, welche in den Navigationsrechner des PHENObots als sogenannte *Joblist* übertragen wurde.

Während der Abarbeitung dieser *Joblist* erstellt die Steuerungsapplikation mehrere Protokolldateien, die zur Auswertung und Funktionsüberprüfung herangezogen werden können. Hierfür wurde Quantum GIS (QGIS) in der Version 2.6 als ein weiteres GIS-Programm aufgrund guter grafischer Darstellungsmöglichkeiten eingesetzt. Bei QGIS ist eine Vielzahl zusätzlicher Plugins zur vertieften Analyse von Geodaten verfügbar; hier wurden die zusätzlichen Module zur Erstellung sogenannter Heatmaps und der Ausgabe von azimutabhängigen Polylinien verwendet. Darüber hinaus lassen sich die verfügbaren digitalen Orthophotos und die amtlichen Liegenschaftskarten der länderspezifischen Geoportale (Geoportal Rheinland-Pfalz und Geoportal Hessen) als Web Map Service (WMS) Layer einbinden (Abb. 21).



Abb. 21 Screenshot Versuchsparzelle P23 am JKI Geilweilerhof, exportiert aus QGIS. Die farbigen Punkte markieren die Haltepunkte zur Bildaufnahme. (digitales Orthophoto von GeoportallRP 2014).

Der Hersteller der Antriebskomponenten des Trägerfahrzeuges lieferte zur Ansteuerung Bibliotheken der objektorientierten Programmiersprache C++. In der integrierten Entwicklungsumgebung (IDE) Qt Creator 4 (Abb. 22) wurde die Steuerungsapplikation geschrieben. Als Compiler kam der C++-Compiler g++ der GNU Compiler Collection (GCC) zum Einsatz. Die gesamte Programmentwicklung fand wiederum unter Kubuntu 12.04.4 LTS und Debian 7 (Wheezy) statt.

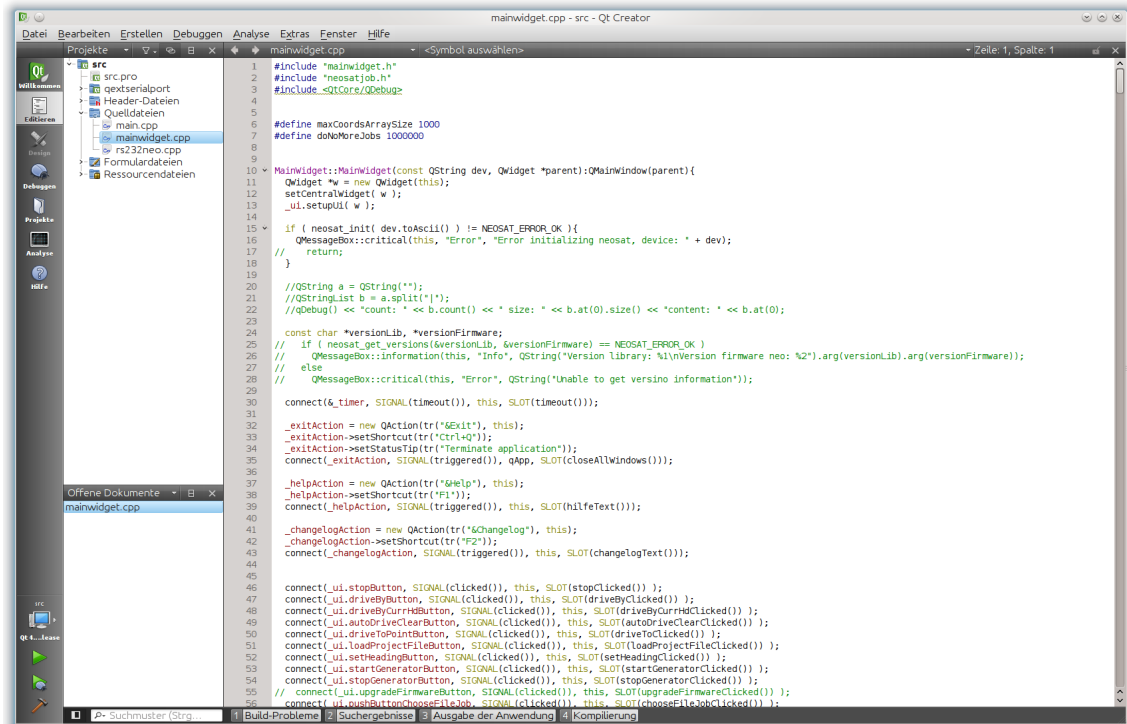


Abb. 22 Screenshot Qt Creator 4 mit Quelltext der Steuerungsapplikation.

3.5 Versuchsflächen

Die Erprobungsfahrten im Feld fanden sowohl auf Versuchspartzen der Hochschule Geisenheim (Abb. 23), Bundesland Hessen, als auch am JKI, Standort Geilweilerhof (Abb. 24), Bundesland Rheinland-Pfalz statt. Nach Abschluss des Projektes wird der PHENObot am JKI in Siebeldingen verbleiben und in den dortigen Anlagen eingesetzt werden. Diese sind als klassische Rebanlagen in Spaliererziehung mit einer Gassenbreite von 1,90-2,00 m und einem Stockabstand von 1,00-1,20 m angelegt. An diese Gegebenheiten sollten die Dimensionen des PHENObots angepasst werden. Zur Erprobung während der Entwicklungsphase wurden Tests in Geisenheim auf Flächen der Hochschule durchgeführt. Die Versuche fanden vorrangig in drei Gebieten statt. Im Hof des Institutes für Technik stand ein Bereich von etwa 1 100 m² als Testfläche zur Verfügung. Hier wurden die Tests der Konstruktion und Software durchgeführt. Die Fläche von etwa 400 m² am Gewächshaus des Institutes wurde vor allem zu Test- und Präsentationszwecken im zweiten Versuchsjahr verwendet. Hier handelte es sich um einen Gehölzeversuch des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen

(LLH), der in Reihen äquivalent zu Rebassen angelegt ist. In der finalen Projektphase wurde eine Parzelle des Institutes für Rebenzüchtung mit acht Rebzeilen mittels des RTK-GPS-System (Fa. Trimble) des Institutes für Technik eingemessen. Hierbei wurden jeweils die Koordinaten der Einzelstöcke, der Endverankerung und der Zuwegung nach dem definierten Vermessungsstil (Kap. 3.6.1) erfasst. Die Anlage war in Aufbau, Ausrichtung und Zustand vergleichbar mit den Versuchsanlagen in Siebeldingen, wodurch die Vergleichbarkeit der jeweils erzielten Ergebnisse gewährleistet war.



Abb. 23 Versuchsfelder (rote Bereiche) in Geisenheim (digitales Orthophoto Geoportal RLP 2014).

Der Versuchsweinberg wurde 2011 mit einem Reihenabstand von 1,80 m und einem Stockabstand von 1,30 m gepflanzt. Es handelt sich um ein Sortengemisch, unter anderem aus St. Laurent, Traminer, sowie Spät- und Grauburgunder. Als Unterlage wurde Börner verwendet (KONRAD 2015). Die mittlere Reihenlänge der acht Zeilen beträgt 65 m. Eingemessen wurde jeweils in der zu erwartenden Fahrtrichtung, d. h. die Aufnahme begann auf der Südseite mit der jeweils östlichen Rebzeile und wurde in nördlicher Richtung durchgeführt. Am Ende der Zeile erfolgte die Fortsetzung mit der westlichen Zeile in südlicher Richtung. Die Koordinaten der Messpunkte wurden mit einem Code versehen:

RZR [Zeilennummer] S [Stocknummer].

Begonnen wurde mit der Endverankerung (Stocknummer 0). Auf östlicher Seite schloss sich direkt ein Wirtschaftsweg an die Parzelle an, die die Randzeile war mit der 34 nummeriert. Für diese Zeile ergab sich demzufolge ein Codebereich von RZR34S0-RZR34S47. Diese Codierung wurde bei der Erstellung der *Joblists* weitergegeben, sodass bei der Auswertung die eindeutige Zuordnung einer Koordinate zum jeweiligen Stock, bzw. der Messposition (vgl. Kap. 3.8) gegeben war.

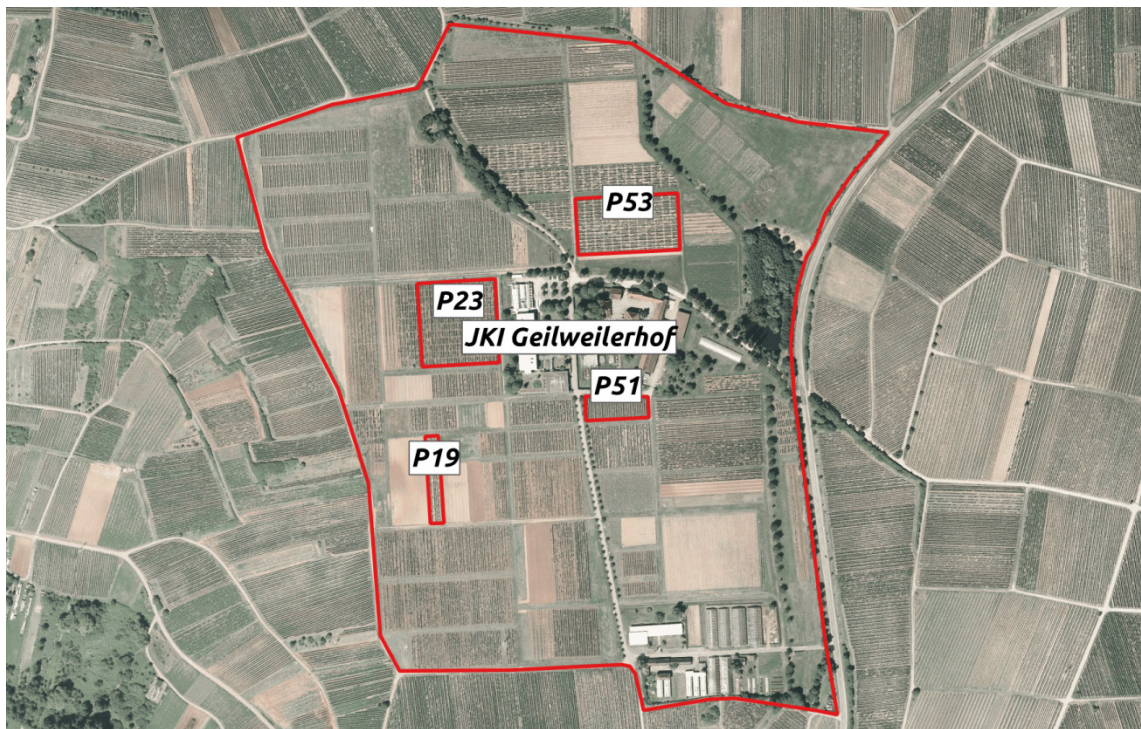


Abb. 24 Versuchsfläche JKI Geilweilerhof (roter Bereich) (digitales Orthophoto Geoportal RLP 2014).

Am JKI wurden Versuche in vier Einzelparzellen durchgeführt bzw. vorbereitet. Im ersten Versuchsjahr 2013 wurden in den Parzellen 19 und 51 Erprobungsfahrten durchgeführt. Zusätzlich wurden in der Parzelle 23 während der Vegetationsphase 2014 Fahrten unternommen. In dieser Parzelle 23 fand im September 2014 der abschließende Anwendungsversuch zur Einsatz- und Leistungsfähigkeit des gesamten Bilderfassungssystems statt. Die Gassenbreite der Anlage beträgt 2,00 m. Bei einem Stockabstand von 1,10 m ergibt sich ein Standraum pro Stock von 2,10 m². Die Parzelle 53 wurde zum Test der automatisierten *Joblist*-Erstellung herangezogen.

3.6 Messtechnik

Die Einmessung der Stockkoordinaten und die Bestimmung der relativen und absoluten Genauigkeit (vgl. Kap. 3.8) wurde mit GNSS-Vermessungssystemen durchgeführt. An beiden Versuchsstandorten sind bauindustrielle Systeme der Firma Trimble im Einsatz, die aus drei Hauptkomponenten bestehen:

- RTK-Referenzstation (Basiseinheit),
- Rover (Mobileinheit),
- Bedieneinheit.

Zur Verbindung der Referenzstation und des Rovers dient eine UHF-Funkverbindung im Frequenzbereich 433 MHz. Die Konfiguration erfolgte unter Zuhilfenahme der technischen Dokumentation des Herstellers (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 1998, TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 2001).

3.6.1 Trimble Vermessungssystem Geisenheim

Als Basisstation wurde der GPS-Empfänger Trimble 4400 verwendet. Dieser empfängt die Signale der GPS-Satelliten auf den L1- und L2-Bändern. Der GPS-Empfänger Trimble 4700 fungierte als Rover (ebenfalls L1/L2). An beiden Empfängern wurden baugleiche GPS-Antennen des Modells Trimble Micro-Centered L1/L2 angeschlossen. Der Rover Trimble 4700 verfügte über ein internes Modem, die Basisstation Trimble 4400 nutzte das externe Funkmodem Trimble Trintalk 450S. Die Funkverbindung wurde mit 433,4 MHz im Sendeformat CMR plus hergestellt. Beide Modems wurden mit abgestimmten Funkantennen des Typs Trimble 24253-44 betrieben.

Zur Konfiguration und Bedienung wurde der Trimble Survey Controller 1 (TSC1) benutzt. Für die Messungen wurden einzelne Projekte (benannt nach den jeweiligen Versuchsvarianten) gleicher Konfiguration angelegt. Als Koordinatensystem wurde UTM in der Zone 32 Nord mit dem Datumsformat WGS84 verwendet. Die große Halbachse betrug 6 378 137,000 m, die Abplattung 298,257223563 (dimensionslos). Dies waren automatische Vorgaben aus der Bibliothek des TSC1. Bei der Projekterstellung wurde ein übergreifender Vermessungsstil *PHENObot* erstellt. Darin sind alle Para-

meter und Einstellungen zum Betrieb und der Durchführung einer Vermessung definiert, u.a. Einstellungen zum Rover, zur Basis, zum Funkprotokoll, zu den verwendeten Einheiten, Anzahl der Einzelmessungen und Koordinatenformaten. Das mittlerweile in der amtlichen Vermessung eingesetzte Datumsformat ETRS89 mit dem Referenzellipsoid GRS80 war in der Konfiguration des TSC1 nicht enthalten. Mit Hilfe von Lagefestpunkten des Hessischen Landesamtes für Bodenmanagement und Geoinformation konnte eine Kalibrierung auf das Raumbezugssystem ETRS89 durchgeführt werden. Dazu wurde die Trimble Referenzstation auf den Lagefestpunkt TP 601380/04 (Tab. 5; GPS-tauglicher Punkt auf dem Geisenheimer Domplatz) (Abb. 25 und Abb. 26) positioniert und in der Konfiguration die amtlichen Koordinaten nach dem Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM eingegeben.



Abb. 25 Einrichten der Referenzstation auf dem Lagefestpunkt TP 601380/04 Geisenheimer Domplatz.

Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation		TP - Beschreibung	TK 25: 6013	TP-Nr.: 80									
Name: <i>Kath. Kirche</i>		Kreis: <i>Rheingau-Taunus-Kreis</i>											
TP 4. Ordnung		Gemarkung: <i>Geisenheim</i>											
		Flur: Gemeinde: <i>Geisenheim</i>											
Ansichts-, Lage- und Einmessungsskizze													
Stand: 01.01.2001													
F1	Festlegung 1. Ordnung	SI	Stein	PIB	Plattformbolzen	LS	Leuchtschraube	D	Drainrohr	FI	Flasche	KD	Kanaldeckel
F	Festlegung 2. - 4. Ordnung	PI2	Platte 2. Ordnung	B	Bolzen	MgM	Messingmarke	H	Hohlziegel	N	Nagel	PIK	Plastikkegel
AF	Alle Festlegung	PI	Platte	TB	Tümbolzen	PI	Metallrohr	V	Vermessungsmarke mit Schutz	MK	Meißelkreuz	TK	Türkegel
P	Stein-, Betonpfeiler	SIW	Steinwürfel	LB	Leuchtbolzen	KR	Kunststoffrohr			MZ	Meißelzeichen	KPI	Klinkerplatte
Folgepunkt: Festlegung:		Identitätsart:		identischer Punkt:									
00 18201		"N" Nassauisches System		2340									
02 11701		HFP		6013900078									
04 05001		GPS-tauglich											

Abb. 26 Lagefestpunktbeschreibung TP 601380/04 Geisenheimer Domplatz, HESSISCHES LANDESAMT FÜR BODENMANAGEMENT UND GEOINFORMATION (2014).

Mit dieser Kalibrierung erfolgte die Einmessung der vorgesehenen Position der Referenzstation auf dem Dach des Institutes für Technik. Dazu wurde die GPS-Antenne auf einer Teleskophalterung (Abb. 27) montiert und an den Rover Trimble 4700 angeschlossen.



Abb. 27 GPS-Antenne (rechts) und Funkmodem (links) der Referenzstation (Trimble) auf dem Dach des Institutes für Technik, Hochschule Geisenheim.

Zusätzlich wurden die Funkantenne, eine Gleichspannung von 12 Volt und der TSC1 mit dem Rover verbunden (Abb. 28). Zur Erfassung von Punktkoordinaten wurde im Menü des TSC1 eine Vermessung gestartet. Dabei war der vorkonfigurierte Vermessungsstil *PHENObot* hinterlegt. Es wurde die Verbindung zwischen Rover und Basisstation aufgebaut. Zur Initialisierung der Messung sind nach den Vorgaben des Herstellers mindestens fünf verfügbare Satelliten notwendig. Damit ergibt sich der sogenannte RTK-Fix, dies ist die genaueste Messmethode mit dem vorliegenden System. Es wurde die Messmethode *Festpunkt* gewählt. Dabei wurden 180 Einzelmessungen mit einer Frequenz von 1 Hz über drei Minuten Messdauer erhoben und daraus vom TSC1 eine dreidimensionale Position im UTM-Gitter errechnet. Im Folgenden wurde an den Antennen der Referenzstation der Basisempfänger Trimble 4400 angeschlossen und über den TSC1 diesem die

neu eingemessenen Koordinaten mitgeteilt. Somit befand sich die Basisstation quasi auf einer Position (Tab. 5) im Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM und sendete dem verbundenen Rover ein um den Versatz zwischen WGS84 und ETRS89 berichtigtes Korrektursignal.

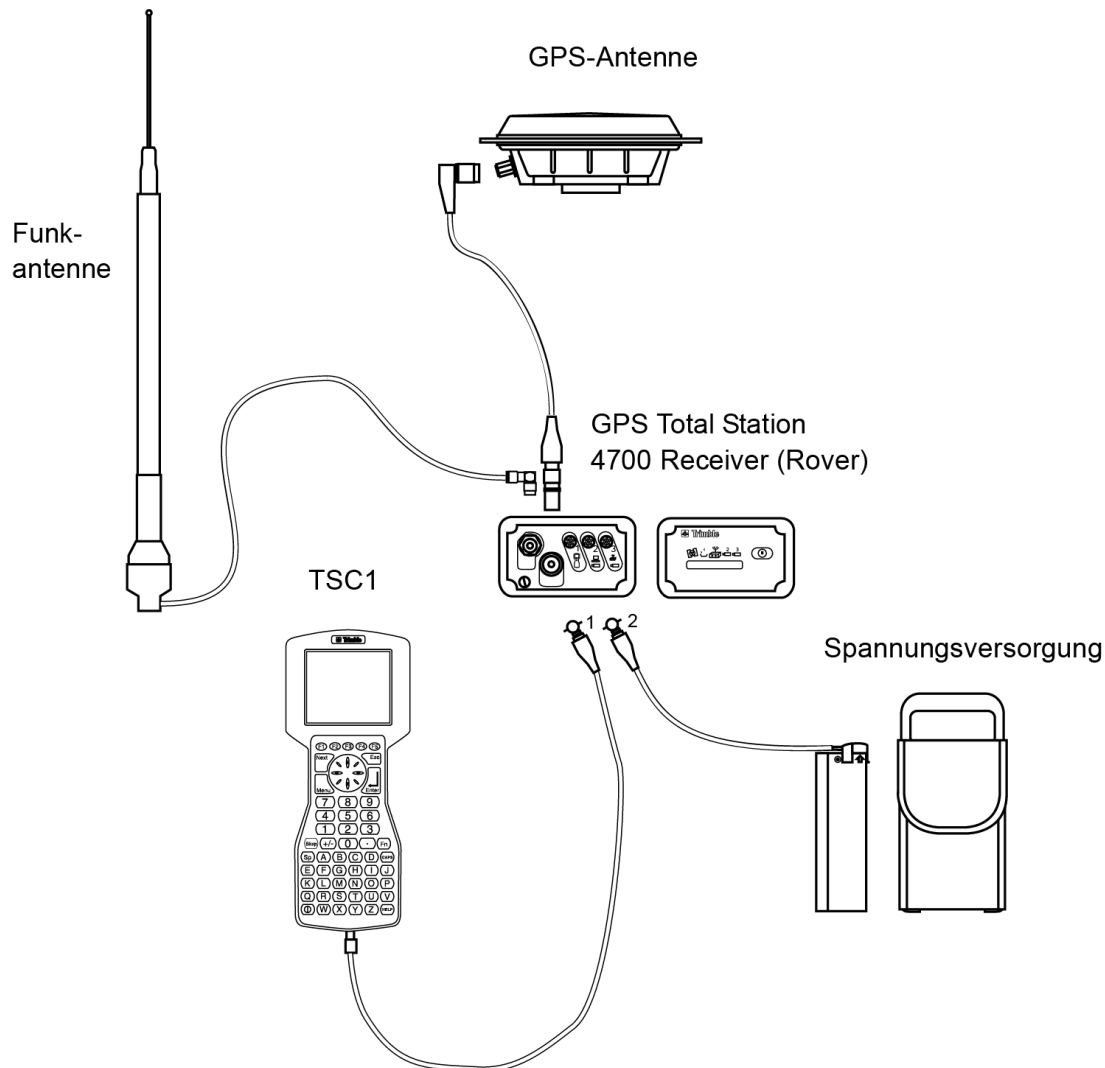


Abb. 28 Aufbauschema Echtzeitkinematische Messung Rover, modifiziert nach TRIMBLE (2001).

Tab. 5 Dreidimensionale Koordinaten Kalibrierung Trimble Referenzstation Geisenheim; Koordinatenreferenzsystem: ETRS89/UTM; Höhe WGS84 = Höhe ü.NN + Undulation (48,34 m).

Punktname	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe WGS84 [m]
TP 601380/4	425907,829	5537209,922	136,301
Referenzstation Institut für Technik	425644,575	5537320,944	163,884

Bei den RTK-Messungen während aller Versuche zu den relativen und absoluten Genauigkeiten, sowie der Einmessung der Stockkoordinaten, wurde das Trimble Vermessungssystem nach dem Schema der Abb. 28 im Vermessungsstil *PHENObot* eingesetzt. Die Punkterfassung erfolgte nach der Messmethode *Topografischer Punkt* mit drei Einzelmessungen in der Frequenz 1 Hz bei einer Mindestbelegungsdauer von drei Sekunden und einer horizontalen Genauigkeitsschwelle von 0,015 m. Wurde diese Schwelle überschritten, pausierte die Messung bis zur Unterschreitung. Bei der Einmessung von Punkten mit dem Vermessungsstab musste auf die stets lotrechte Ausrichtung der GPS-Antenne über dem Messpunkt geachtet werden (Abb. 29). Am Stab befanden sich hierzu zwei Dosenlibellen.

Zusätzlich wurden bei einigen Erprobungsfahrten sog. *kontinuierliche Messungen* mit dem GPS-System durchgeführt. Zum einen wurden Punkte durchgehend mit einer Frequenz von 1 Hz, zum anderen bei einer resultierenden Positionsveränderung von $\Delta x = 0,1$ m erfasst.

Die Bedieneinheit TSC1 arbeitete mit einer Speicherkarte im Format *PC-Card*, Größe 128 MB. Alle Projekte wurden auf dieser Karte angelegt und speicherten die erfassten Punkte auf dieser in einem proprietären Dateiformat ab. Über die Exportfunktion des TSC1 wurden die Punktinformationen in ASCII-Textdateien (csv-Datei) exportiert und zur weiteren Auswertung von der Speicherkarte ausgelesen:

- Rechtswert [m],
- Hochwert [m],
- Höhe (korrigiert) [m],
- Punktname,
- Namenscode.



Abb. 29 Lotrechte Ausrichtung der GNSS-Antenne über dem Messpunkt bei einer Echtzeitkinematischen Messung, modifiziert nach TRIMBLE (1998).

3.6.2 Trimble Vermessungssystem Siebeldingen

Schematisch war das GPS-System des JKI vergleichbar, jedoch jüngeren Baujahrs. Es kamen für den Rover und die Referenzstation zwei baugleiche GNSS-Receiver Typ Trimble SPS852 mit jeweils eingebautem Funkmodem zum Einsatz. Als GNSS-Antennen wurden zwei Trimble Zephyr-Model 2

eingesetzt. Die Funkverbindung wurde im Protokoll CMR+ mit einer Frequenz von 433,0 MHz aufgebaut. Dieses System wurde hauptsächlich zur Kennzeichnung der aufgenommenen Bilddaten mit Geoinformationen verwendet. Darüber hinaus wurde einmalig die Referenzstation des Fahrzeugs mit diesem System eingemessen und die Position in der Firmware hinterlegt. Zur Überprüfung der relativen und absoluten Genauigkeit bei Fahrten in Siebeldingen wurden die Geoinformationen ebenfalls ausgewertet. Dazu erfolgte der Export in ASCII-Textdateien.

3.7 Dokumentation

Dieser Punkt gliedert sich in zwei Teilbereiche: Die Erstellung von Protokolldateien während der Anwendung des Versuchsträgers und die Anfertigung des Betriebshandbuches.

3.7.1 Anwendungsprotokolle

Zur Auswertung der Versuchsfahrten und Funktionskontrolle aller Hard- und Softwarekomponenten wurde in der Steuerungsapplikation die Erstellung von Protokolldateien vorgesehen. Bei Aktivierung der Protokollfunktion erfolgte die Ausgabe bestimmter Parameter in einer ASCII-Textdatei. Es wurden vier unterschiedliche Ausgaben, bzw. Funktionen vorgesehen:

- `logAll`,
- `logJob`,
- `logPos`,
- Kommandozeilen-Protokoll.

Für die Funktionen `logAll`, `logJob` und `logPos` wurden verschiedene Fahrzeug- und Navigationsparameter und Koordinaten ausgegeben:

- `x` (relative horizontale Entfernung zur RTK-Basis in Metern),
- `y` (relative vertikale Entfernung zur RTK-Basis in Metern),
- `easting` (Ostwert als UTM-Koordinate),
- `northing` (Nordwert als UTM-Koordinate),

- heading (Orientierung Fahrzeug rechtsweisend Nord im Dezimalgradmaß),
- GPS1stat (Statusmeldung GPS-Antenne 1),
- GPS2stat (Statusmeldung GPS-Antenne 2),
- GPS1numSat (Anzahl der empfangenen Satelliten GPS1),
- GPS2numSat (Anzahl der empfangenen Satelliten GPS2),
- autodrive (Statusmeldung Fahrbetrieb),
- time (Zeitangabe MEZ oder MESZ in hh:mm:ss),
- StockID (eindeutige Zeichenkette für einen Punkt oder Rebstock).

Die Parameter wurden durch ein Verkettungszeichen (senkrechter Strich |) getrennt, die ASCII-Textdatei trug die Endung *.txt.

logAll

Diese Funktion ermöglichte eine Protokollierung der Parameter `x`, `y`, `easting`, `northing`, `heading`, `GPS1stat`, `GPS2stat`, `GPS1numSat`, `GPS2numSat`, `autodrive` und `time` mit 10 Hz unabhängig von der Ausführung eines Arbeitsauftrages.

logJob

Diese Funktion ermöglichte eine Protokollierung der Parameter `x`, `y`, `easting`, `northing`, `heading`, `GPS1stat`, `GPS2stat`, `GPS1numSat`, `GPS2numSat`, `autodrive` und `time` mit 10 Hz während der Ausführung eines Arbeitsauftrages.

logPos

Diese Funktion ermöglichte eine Protokollierung der Parameter `easting`, `northing`, `heading` und `StockID` zum Einfügen in eine *Joblist* als eigenständiger Arbeitsauftrag. Pro begonnener *Joblist* wurde eine einzelne `logPos`-Datei erzeugt; bei jeder Ausführung der Funktion wurden die Parameter in eine neue Zeile dieser Datei geschrieben.

Kommandozeilen Protokoll

Die Steuerungsapplikation wurde als Kommandozeilen-Programm mit grafischer Oberfläche (GUI) konzipiert. Beim Ausführen der Applikation erfolgte auf der Kommandozeilen-Ebene eine kontinuierliche Textausgabe der ausgeführten Funktionen, die in einer ASCII-Textdatei (Dateiendung *.log) sequentiell abgespeichert wurden.

3.7.2 Handbuch

Der PHENObot ist als Maschine zum Einsatz in der Forschung nach der Neufassung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG §1 Satz 1 h von diesen Bestimmungen ausgeschlossen. Trotzdem wurde bei der Konstruktion und Erstellung der Betriebsanleitung versucht, die Grundsätze dieser Richtlinie einzuhalten (LENZ & OTTO 2013). Zur Abfassung wurde das Textverarbeitungsprogramm Microsoft Office Word 2010 verwendet. Das Handbuch ist im elektronischen Anhang enthalten.

3.8 Versuchsfahrten

Es wird prinzipiell in Erprobungs- und Messfahrten unterschieden. Erstere dienen zur Überprüfung konstruktiver Entwicklungen, Veränderungen und Anpassungen auch im Sektor Software und Navigation. In den Messfahrten erfolgte u.a. die Quantifizierung einiger Prozess- und Genauigkeitsparameter.

3.8.1 Erprobungsfahrten Geisenheim

Diese wurden vor allem ortsnah zum Institut für Technik durchgeführt (vgl. Kap. 3.5: Hof Technik, Fläche Gewächshaus, Rebzuchtung). Hier wurde kein Versuchsprotokoll definiert, je nach Fragestellung ergab sich ein individueller Ablauf. Bei allen Tests mit GPS-gestützter Fahrweise erfolgte in der Regel zuerst die Inbetriebnahme der RTK-Basisstation zur Bereitstellung des Korrektursignals.

3.8.2 Messfahrten Geisenheim

Die Messungen zur Bestimmung der relativen und absoluten Genauigkeit der Navigationslösung wurden auf der Fläche „Rebenzüchtung“ ausgeführt.

Zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs wurden die Protokollfunktionen `logJob` und `logPos` verwendet. Über die Steuerungsapplikation erfolgte die Aufzeichnung der Koordinaten der positionsbestimmenden GPS-Antenne-1. Als Navigationspunkt wurde ein virtueller, im Drehpunkt des Fahrzeugs liegender Punkt verwendet. Dieser konnte aus den Rohdaten der Protokolle trigonometrisch rekonstruiert werden. Der detaillierte Aufbau der Fahrzeugkonfiguration ist Kapitel 4.1 zu entnehmen, nachfolgend wird die Korrekturberechnung aufgeführt. Es sei vorwegzunehmen, dass die Position der GPS-Antenne 1 um 350 mm vom Drehpunkt in x-Richtung und 800 mm in y-Richtung abweicht. Die folgenden Gleichungen verwenden lediglich die Variablen x und y . Die resultierende Navigationspunktlage ist im kartesischen Koordinatensystem abhängig von der Fahrzeugorientierung. Es muss eine zweistufige Winkelberechnung zur Bestimmung der Verschiebungsfaktoren Δx und Δy durchgeführt werden.

$$\alpha_d = \tan^{-1} \left[\frac{x}{y} \right] \quad \text{Gl. 3-1}$$

Mit Gl. 3-1 wird der Winkel α des Dreiecks resultierend aus x und y als Gegen- und Ankathete berechnet.

$$\alpha = 180^\circ - \textit{heading} + \alpha_d \quad \text{Gl. 3-2}$$

Gl. 3-2 ergibt den Winkel zur orientierungsabhängigen Positionsverschiebung von x und y . Der Wert `heading` gibt die Fahrzeugorientierung α wieder.

$$\Delta x = \cos \alpha \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$\Delta y = \sin \alpha \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Gl. 3-4}$$

Gl. 3-3 und Gl. 3-4 berechnen die Verschiebung von x und y . Addiert mit den Ausgangskordinaten ergibt sich der virtuelle Navigationspunkt P_0 :

$$P_0 = [x + \Delta x \mid y + \Delta y] \quad \text{Gl. 3-5}$$

Zur Bestimmung der absoluten Genauigkeit wurde dieser Punkt P_0 zuerst durch Differenzbildung der einzelnen Vektoren mit der anzufahrenden Stockkoordinate S_0 verglichen.

Hierbei erfolgte die Unterscheidung der Abweichung in transversaler, bzw. longitudinaler Richtung als quadratische Mittelwerte (Root Mean Square=RMS).

Daraus konnte die mittlere Abweichung der Ist- und Sollposition, rein mit fahrzeugeigenen Daten, errechnet werden. Um diese Daten zu validieren, erfolgte eine Sekundärmessung mit dem in Kapitel 3.6.1 beschriebenen GPS-System der Fa. Trimble. Die GPS-Antenne wurde an eine im Fahrzeugmittelpunkt definierte Stelle montiert und mit dem Rover verbunden. Die Messung wurde in dreifacher Wiederholung mit der zur Einmessung der Stockkoordinaten verwendeten, identischen Konfiguration (Projekt und Vermessungsstil *PHENObot*) durchgeführt.

Die Einzelwerte der drei Wiederholungen wurden durch Differenzbildung der Vektoren zur Bestimmung der relativen Genauigkeit verwendet. Der transversale Versatz bezog sich auf die senkrechte Abweichung der Position zur Fahrspurachse. Die Abweichung in longitudinaler Richtung ergab sich als Differenz entlang der Fahrtrichtung. Die Rechengrundlage bildeten die Differenzen der Rechts- bzw. Hochwerte aus den Protokolldateien zusammen mit der aufgezeichneten Fahrzeugorientierung α :

$$\Delta_{transversal} = \frac{\Delta x}{\cos \alpha} \quad \text{Gl. 3-6}$$

$$\Delta_{longitudinal} = \frac{\Delta y}{\cos(180-\alpha)} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Dies erfolgte jeweils mit den fahrzeugeigenen, sowie mit den Sekundärdaten.

Durch die vollausgebildete Laubwand der Rebzeilen waren Auswirkungen auf die Empfangsqualität der GPS-Antennen zu erwarten. Ein Maß für die Güte des Empfangs kann die Anzahl verfügbarer Satelliten sein. Über die Protokollfunktion der Steuerungsapplikation konnte mit $f=10$ Hz die Anzahl der verfügbaren Satelliten für beide vorhandenen GPS-Antennen des Fahrzeugs mit fester Positionszuweisung aufgezeichnet werden. Die

Anordnung dieser Antennen wurde über einen Verschiebemechanismus variabel gestaltet, um die Positionierung in verschiedenen Höhen realisieren zu können. Es wurden Messungen der Verfügbarkeit in der niedrigsten Einstellung (`ant_unten`) (Höhe über Grund: 1 280 mm, etwa Mitte der Laubwand) und der höchsten Einstellung (`ant_oben`) (Höhe über Grund: 2 000 mm, oberes Ende der Laubwand) in dreifacher Wiederholung erhoben. Mit der GIS-Software QGIS konnten die erfassten Werte auf einer Choroplethenkarte bzw. einer sog. Heatmap visualisiert werden. Dazu wurde das in der Attributstabelle der Vektorkarte vorhandene Merkmal „Anzahl an Satelliten“ in einer Rasterkarte als farblich abgestufte Häufigkeitsverteilung dargestellt. Hierzu ist in QGIS das Plugin „Interpolation“, mit der auch zwischen den aufgezeichneten Koordinaten die Verteilung interpoliert werden kann, verwendet worden.

3.8.3 Erprobungsfahrten Siebeldingen

Während der Konstruktions- und Entwicklungsphase in den Jahren 2013 und 2014 wurden auch am JKI in Siebeldingen reine Erprobungsfahrten durchgeführt. Hier standen vor allem die Überprüfung der Stockkoordinatenbestimmung, die Weiterverarbeitung, die Zusammenarbeit und Übereinstimmung mit dem dort vorhandenen GPS-System (Fa. Trimble) und die Entwicklung und Optimierung eines geeigneten Arbeitsablaufes im Vordergrund. Unter den genannten Voraussetzungen und Zielen wurden diese Fahrten prinzipiell analog zu denen in Geisenheim ausgeführt.

3.8.4 Messfahrten Siebeldingen

Nach Abschluss der Implementierungsphase (vgl. Kap. 4.3) wurde ein Anwendungsversuch in der Parzelle 23 mit 2 726 Rebstöcken in 43 Rebzeilen realisiert. Bei einem Standraum von 2,10 m² pro Stock ergab sich eine zu bonitierende Fläche von rund 5 725 m² bzw. 0,5725 ha. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen bei der Bilderfassung mit dem Multi-Kamera-System des JKI fanden die Fahrten nachts (vgl. Kap. 4.2.1 und 4.8), verteilt an zwei aufeinanderfolgenden Terminen statt. Die Protokollfunktionen der Steuerungsapplikation waren bei diesen Messungen ebenfalls aktiviert, um

die Parameter absolute und relative Genauigkeit, sowie die Anzahl verfügbarer Satelliten aufzuzeichnen. Zur Sicherstellung der höchsten Satellitenverfügbarkeit wurden die GPS-Antennen des Fahrzeugs in die Einstellung `ant_oben` gebracht.

3.9 Datenauswertung und statistische Analyse

Zur Datenauswertung und statistischen Analyse wurden die gängigen Tabellenkalkulationsprogramme Microsoft Excel 2010 unter Microsoft Windows 7, sowie Libre Office 3 unter Kubuntu 12.04.4 LTS, sowie die quelloffene Statistikprogrammiersprache R in Version 3.1.2 eingesetzt.

Die Ergebnisse der experimentellen Versuche aus den Messfahrten in Geisenheim und Siebeldingen wurden mit verschiedenen, den Messdaten entsprechenden, statistischen Verfahren untersucht.

Zur Überprüfung der Satellitenverfügbarkeit wurden die Verteilungen mit dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen miteinander verglichen.

Beim Vergleich der RMS-Fehler der absoluten und relativen Genauigkeiten kamen verschiedene deskriptive statistische Kennzahlen zum Einsatz. Die Beurteilung der Streuung und Varianz erfolgte mit der Standardabweichung s_x sowie dem Variationskoeffizienten cv . Der Mittelwertvergleich wurde bei gleichen Varianzen mit dem t-Test, bei unterschiedlichen Varianzen mit dem Welch-Test durchgeführt. Der t-Test setzt normalverteilte Daten voraus, weshalb eine Überprüfung der entsprechenden Datensätze mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test vorausging. Als Signifikanzniveau wurde für alle Tests ein α -Fehler von mindestens 5 % ($P = 0,05$) festgelegt.

Diese Seite wurde absichtlich frei gelassen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse und die dazu notwendigen Schritte zum Aufbau des endgültigen Versuchsträgers beschrieben. Während der Erprobung wurden zahlreiche Versuche (vgl. Kap. 3.8) durchgeführt, deren Verlauf ebenfalls kurz dargestellt wird. Schlussendlich folgen die Ergebnisse der Messfahrten in Geisenheim und am JKI in Siebeldingen.

4.1 Trägerfahrzeug

Im Rahmen der Marktevaluierung vor Beginn der konstruktiven Arbeiten wurden die verfügbaren Komponenten zur Erstellung einer geeigneten Trägerplattform betrachtet. Zur Wahrung eines vibrationsarmen Antriebs fiel die Wahl des Antriebskonzeptes auf elektrisch betriebene Kettenlaufwerke. Bei der weiteren Sondierung zeigte sich, dass eine eigene Konstruktion mit eigenständigen Laufwerken, Energiespeichern und Leistungs-, sowie Steuerungselektronik nicht kosteneffizient im Vergleich zu einer Lösung mit einem Serienfahrzeug durchzuführen war.

4.1.1 Neo Alpin

Zeitgleich zur Marktevaluierung wurde auf der Sitevi 2011, der in Montpellier stattfindenden Fachmesse für Sonderkulturen, der Großkistentransporter *Neo Alpin* (Abb. 30) der Südtiroler Firma Windegger präsentiert. Diese funkferngesteuerte Plattform zum Transport von Großkisten bei der Obsternte wird elektrisch angetrieben. Es sind Rad- und Kettenlaufwerke als alternative Antriebskonzepte verfügbar. Als Energiespeicher kommen zwei 12 Volt Bleiakkumulatoren zum Einsatz (Systemspannung 24 Volt). Die Leistungs- und Steuerungselektronik stammt aus dem Bereich der Flurförderfahrzeuge und ist dadurch nach industriellen Standards robust ausgelegt. Die Fahrzeugbreite beträgt 1 120 mm bei einer Länge von 1 140 mm. Der Hersteller gibt eine Nutzlast von 500 kg (WINDEGGER 2015) und eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 3 km h^{-1} an (WINDEGGER 2012). Diese Maße bieten bereits eine Anpassung an die Gassenbreiten in Rebanlagen. Die geringe Bauhöhe und der bodennahe Einbau der Akkumulatoren führen zu einem niedrigen Schwerpunkt.

Im Frühjahr 2012 wurde ein Neo Alpin als Basis für das Bonitursystem angeschafft. Nach der Lieferung wurde auf einer Teststrecke von 30 m im Hof des Institutes für Technik die maximale Geschwindigkeit gemessen. Es ergab sich ein mittlerer Wert von 1,8 km h⁻¹.



Abb. 30 Großkistentransporter Neo alpin der Fa. Windegger zum Transport von Erntekisten (WINDEGGER 2015).

Zunächst war vorgesehen mit der Firma Reichardt Steuerungstechnik eine Navigationslösung mit einem RTK-GPS-System der Firma Trimble zu realisieren. Dazu sollte die zu entwickelnde Steuerplatine/Mikrocontroller mit den Fahrbereingängen der auf dem Neo Alpin verbauten Impulsmotorsteuerungen der Firma Curtis verbunden werden (Abb. 31).

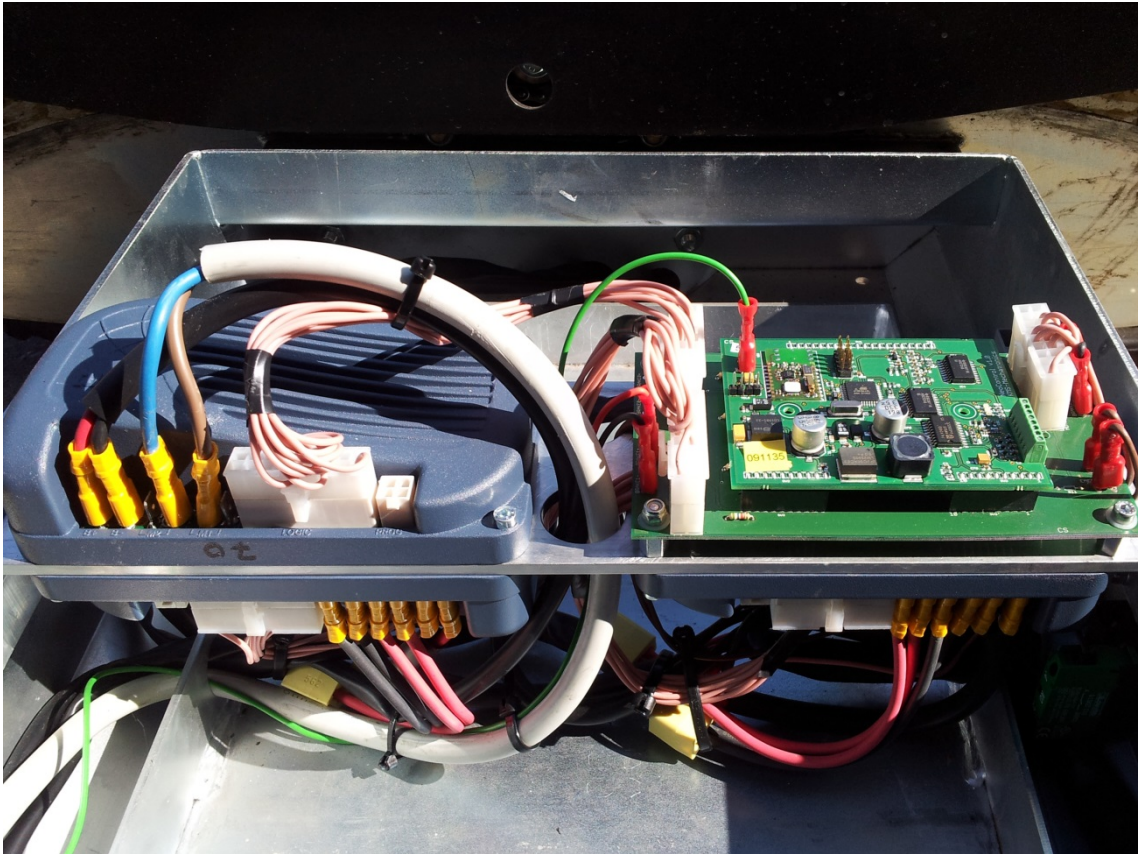


Abb. 31 Steuerungs- und Leistungselektronik im Neo Alpin.

4.1.2 Neosat Alpin

Bei der Kontaktaufnahme mit der Firma Windegger zur Klärung der technischen Details und Beschaltung des Systems wurde auf die damals in der Entwicklung befindliche satellitengestützte Navigationslösung hingewiesen. In Zusammenarbeit mit einem auf Mechatronik spezialisierten Ingenieurbüro (KMS) entwickelte Windegger diese zur Verwendung in der Plattform Neo Alpin. Es folgte die Vereinbarung, die vorhandene Hardware mit Upgrades zu versehen und die weitere Entwicklung und Anpassung an die Anwendung als PHENObot gemeinsam voranzutreiben.

Im Zuge der Aufrüstung ist die Versorgungsspannung des Fahrzeuges durch Einbau von zwei weiteren Bleiakкумуляtoren auf 48 Volt erhöht worden (Abb. 32).

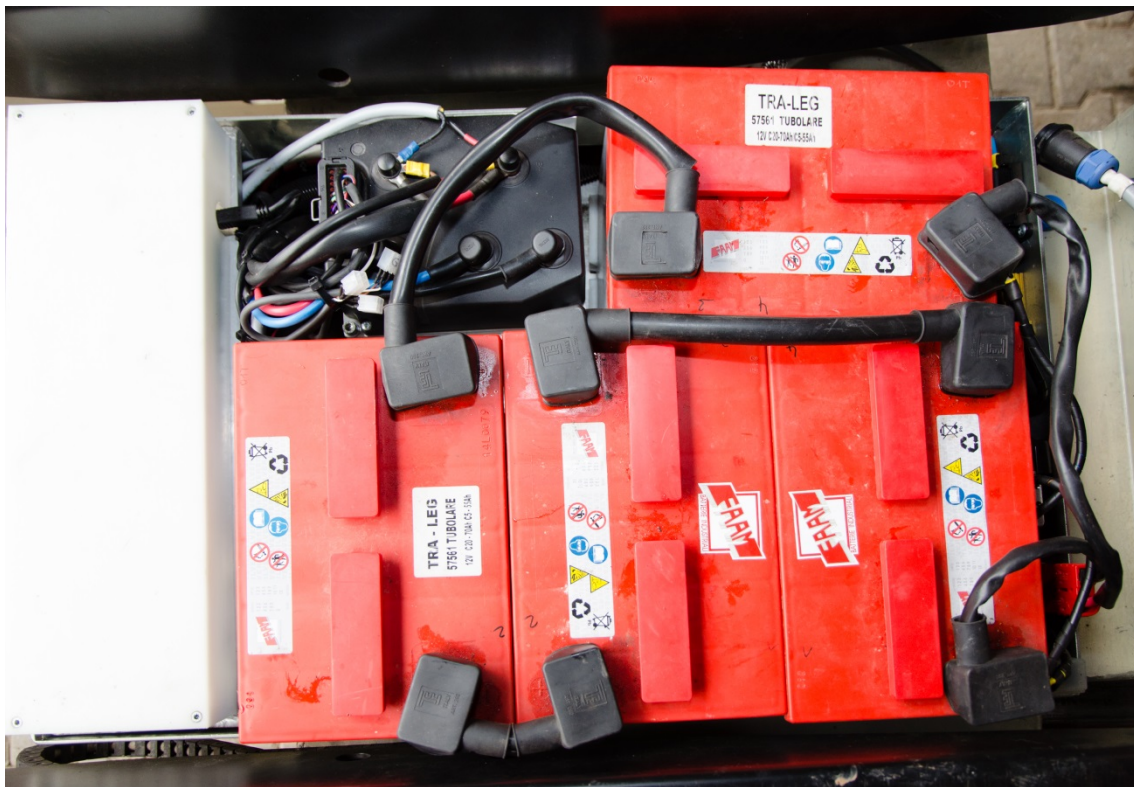


Abb. 32 Akkumulatoren, Leistungs- und Steuerungselektronik (unter der weißen Abdeckung) des Neosat Alpin.

Zusätzlich wurde ein 4-Takt-Verbrennungsmotor mit 196 cm³ und 4,1 kW (HONDA 2015) zum Antrieb eines Generators verbaut. Damit ist das Aufladen der Akkumulatoren während des Betriebs und der Verlängerung der Betriebszeit möglich. Der Generator kann gleichzeitig reversibel zum

elektrischen Starten des Verbrennungsmotors verwendet werden. Dabei ist einerseits ein manuelles Starten über das Steuerungsprogramm (vgl. Kap. 4.5) und andererseits das automatische Starten bei Unterschreitung eines definierten Batteriespannungswertes möglich.

Zur Realisierung der satellitengestützten Navigation wurden zwei Hemisphere Eclipse II GNSS OEM Module mit zugehörigen Antennen verbaut (Abb. 33).

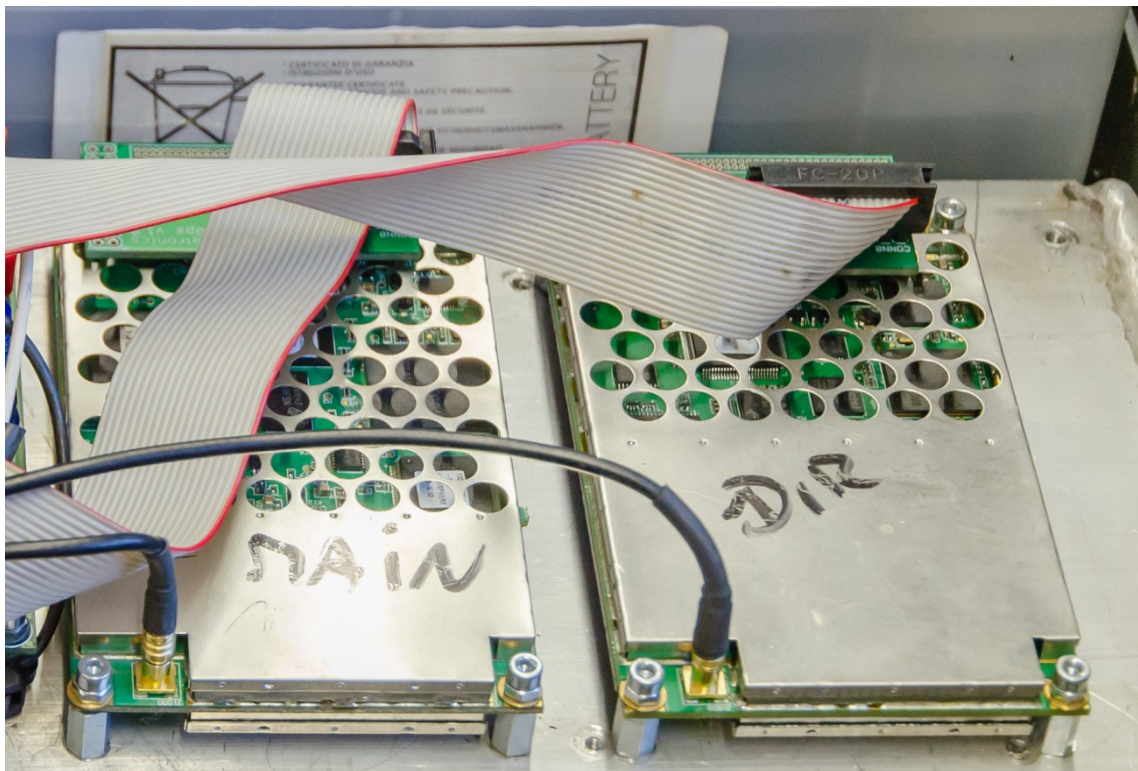


Abb. 33 Hemisphere Eclipse II GNSS OEM Module. MAIN: Positionierung. DIR: Richtungsbestimmung.

In der momentanen Ausbaustufe (Projektabschluss 2014) wird lediglich das NAVSTAR GPS-System verwendet. Durch Erwerb der entsprechenden Lizenzen wäre auch die zusätzliche Nutzung von GLONASS möglich. Die Empfänger können das L1- und L2-Band nutzen. Die horizontale Genauigkeit gibt der Hersteller mit 20 mm an (HEMISPHERE 2012). Das Gesamtsystem ist als RTK-GNSS ausgelegt und verfügt über eine Basisstation zur Korrektursignalübertragung (Abb. 34). In dieser kommt ebenfalls ein o. g. Modul von Hemisphere zum Einsatz. Auf dem Fahrzeug wird ein GNSS-Modul zur Positionsbestimmung und das zweite zur Richtungsbestimmung

verwendet. Die zweite Antenne ist in horizontaler Richtung im Winkel von 90° zur Fahrtrichtung montiert.



Abb. 34 Neosat Alpin während der Erprobung mit RTK-Basisstation.

Gesteuert wird das Fahrzeug über ein von KMS entwickeltes Mikrocontrollerboard (Abb. 35) (KOFLER 2015). An diesem sind die GPS-Module, die Funkantennen zum Empfang des Korrektursignals und der Fernbedienung für den manuellen Betrieb, die Impulsmotorsteuerungen, die Sicherheitsensoren und Antriebsmotorsensoren angeschlossen. Für den automatischen Fahrbetrieb ist ein Rechner über eine USB-Schnittstelle verbunden.

Die Steuerung gliedert sich in zwei Teile. Ein Teil übernimmt dabei die Integration und Ansteuerung der Hardware. Im Wesentlichen beinhaltet dies:

- Lesen/Setzen der I/Os,
- Kommunikation CanOpen Motortreiber,
- Kommunikation/Initialisierung GPS-Module,
- Kommunikation/Initialisierung Funkmodule,
- Regelung Antriebsmotoren,

- Regelung Generator,
- Steuerung des manuellen Fahrbetriebes,
- Sicherheitsfunktionen (Auswertung Ultraschallsensoren und mechanisches Sicherheitsschild).

Im zweiten Teil der Steuerung sind sämtliche Regler und Algorithmen zum automatisierten Fahrbetrieb implementiert. Dabei werden die Aufgaben mit Hilfe von sog. *Tasks* realisiert:

- Task Positionsregler,
- Task Richtungsregler,
- Task Positionsbeobachter,
- Task Richtungsbeobachter,
- Task Fahrregler,
- Task Sicherheit,
- Task Kommunikation.

Der Positionsregler führt das Fahrzeug beim automatisierten Fahrbetrieb entlang einer Linie, die durch mindestens zwei gegebene Punkte definiert ist (aktueller Standpunkt und mind. ein weiterer anzufahrender Punkt). Es wird zwischen *linearer* und *zirkularer* Trajektorie unterschieden. Beim Anfahren eines Punktes i richtet sich das Fahrzeug zunächst entlang einer zirkularen Trajektorie (definiert durch einen Wenderadius) zum Punkt i (Richtungsregler) aus. Dann wird entlang der linearen Trajektorie zum Punkt i gefahren. Werden mehrere Punkte sequentiell angefahren, findet stets ein Wechsel zwischen zirkularer und linearer Trajektorie statt. Die Regelung erfolgt mit 20 Hz. Alle Punkte und Linien der Fahraufgaben sind in der Steuerung in Form einer *Wegkarte* gespeichert. Der integrierte Routenplaner berechnet die optimale Route zwischen den anzufahrenden Punkten.

Für den Versuchsbetrieb stellte die Firma KMS eine einfache Testapplikation und die notwendigen Softwarebibliotheken zur Verfügung. Die Software wurde für Linux-basierte Betriebssysteme entwickelt. Bei den Versuchs- und Erprobungsfahrten im Jahr 2013 kam ein Laptop Hewlett-Packard Compaq 6530b mit Kubuntu 12.04 LTS zum Einsatz. Aufgrund der

Fahrzeugvibrationen wurde dieser mit einer Solid-State-Disk ausgestattet. Zur Spannungsversorgung des Rechners ist ein Wechselrichter (48 V DC auf 230 V AC) eingebaut worden. Um die Steuerungsapplikation während der Fahrt fernbedienen und überwachen zu können, wurde die Fernwartungssoftware TeamViewer 8 bzw. 9 verwendet. Die Fernbedienung erfolgte über verschiedene Android-Endgeräte. Als Verbindung wurde ein WLAN-Netzwerk mit einem Router genutzt. Zum Schutz aller externen Versorgungs-, Steuerungs- und Verbindungskomponenten ist ein spritzwasser- und staubgeschützter Schaltschrank im Heckbereich des Raupenfahrzeugs aufgebaut (Abb. 34). Am Ende des Erprobungsbetriebes ohne Kamera-lageregelung wurde ein Industrie-PC (vgl. Kap. 4.3.2) angeschafft und mit der notwendigen Software ausgestattet (vgl. Kap. 4.4).

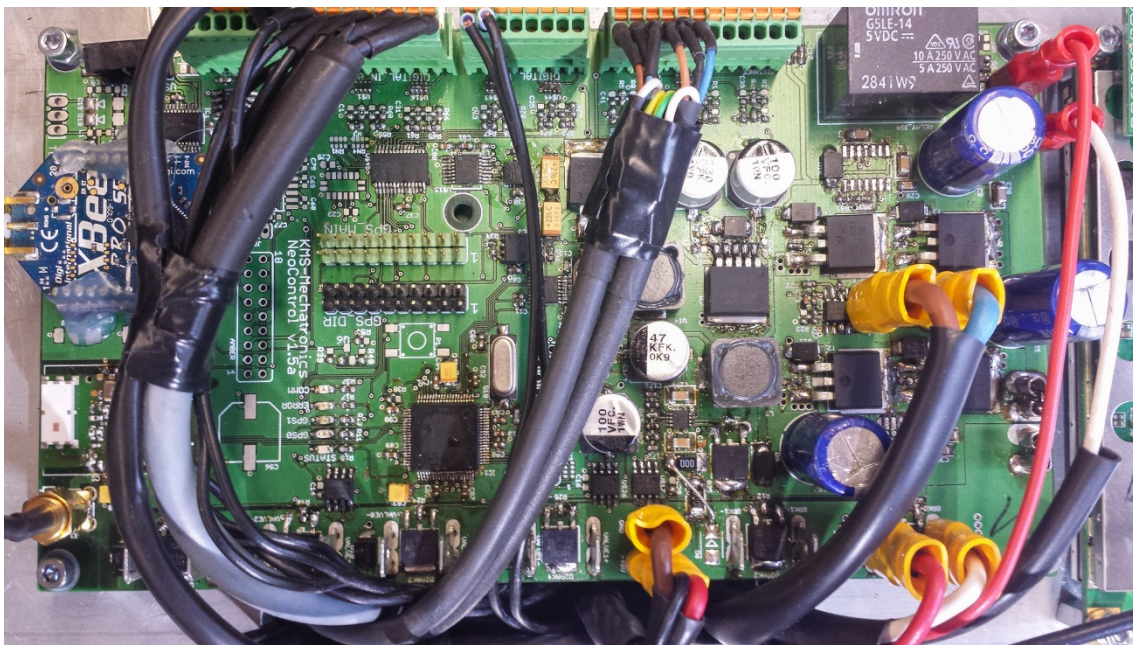


Abb. 35 Mikrocontrollerboard zur Steuerung und Parametrierung.

4.2 Kameralageregelung

Zur Realisierung der nicht-invasiven Bonitur baute der Projektpartner JKI Siebeldingen ein Multi-Kamera-System (MKS) (Abb. 36) auf und testete dieses. Die ersten Versuche und Referenzbonituren wurden mit einem hand- bzw. schleppergeführten Wagen (Abb. 37) und statischem Anbau des MKS durchgeführt.

Das MKS setzt sich aus fünf Kameras zusammen, drei Monochromkameras, eine RGB-Kamera und eine NIR-Kamera (KICHERER et al. 2015). Alle Kameras sind in Gehäuse eingebaut, die nach IP67 zertifiziert, und damit für die Ansprüche einer Freilandanwendung geeignet sind. In der ersten Ausbaustufe hatte das MKS eine Breite von 600 mm, eine Höhe von 500 mm, eine Tiefe von 500 mm und eine Masse von 20 kg. Es wurden zur Führung des MKS am PHENObot folgende Anforderungen definiert:

- Aktive Positionierung mit vier Freiheitsgraden: 2 Translationen vertikal und horizontal; 2 Rotationen zur Neigung des MKS,
- Vertikale Positionierung (gemessen zur mittleren Kamera) von ca. 800-1 600 mm absolut zum Boden,
- Horizontaler Abstand der Brennebene zur Laubwand von 1 000 mm,
- Nivellierung (Ausrichtung in der Senkrechten) vor der Bildaufnahme Schwenkbereich pro Achse $\pm 15^\circ$.

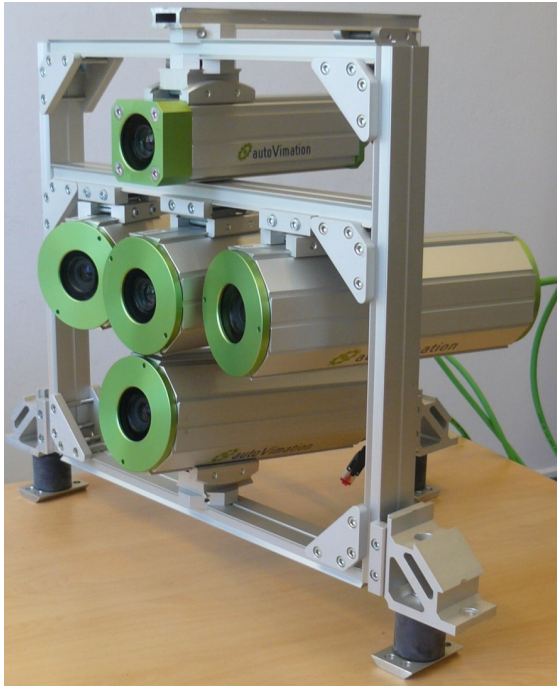


Abb. 36 MKS JKI Siebeldingen (KICHERER 2013b) Abb. 37 Handwagen zur manuellen Führung des MKS (KICHERER 2013b)

Nach diesen Vorgaben wurden Konstruktionsentwürfe (3D) mit der CAD-Software SolidWorks 2011 erstellt.

4.2.1 Entwurf I

Die erste Planung der Kameralageregelung erfolgte passend zum Aufbau in Abb. 36. Dabei sollte genügend Bauraum für ein zweites MKS inkl. Kameraführung verbleiben. Entsprechend kompakt musste die Konstruktion ausfallen. Abb. 38 zeigt den ersten Entwurf als Grundkonzept. Die linearen Verstellwege entlang der Horizontalen und Vertikalen wurden als spindelbetriebene Linearverschiebungen mit zylindrischen Profilen ausgelegt. Die Rotationsbewegungen zur Nivellierung des MKS sollten durch Getriebe untersetzt werden. Der Entwurf sah für jede Achse Schrittmotoren als Antriebskomponenten vor. Im Zuge der ersten Planungen wurde das Konzept mit der Firma Nanotec, einem Anbieter von Linear- und Drehantrieben, diskutiert und geeignete Antriebs- und Steuerungskomponenten evaluiert.

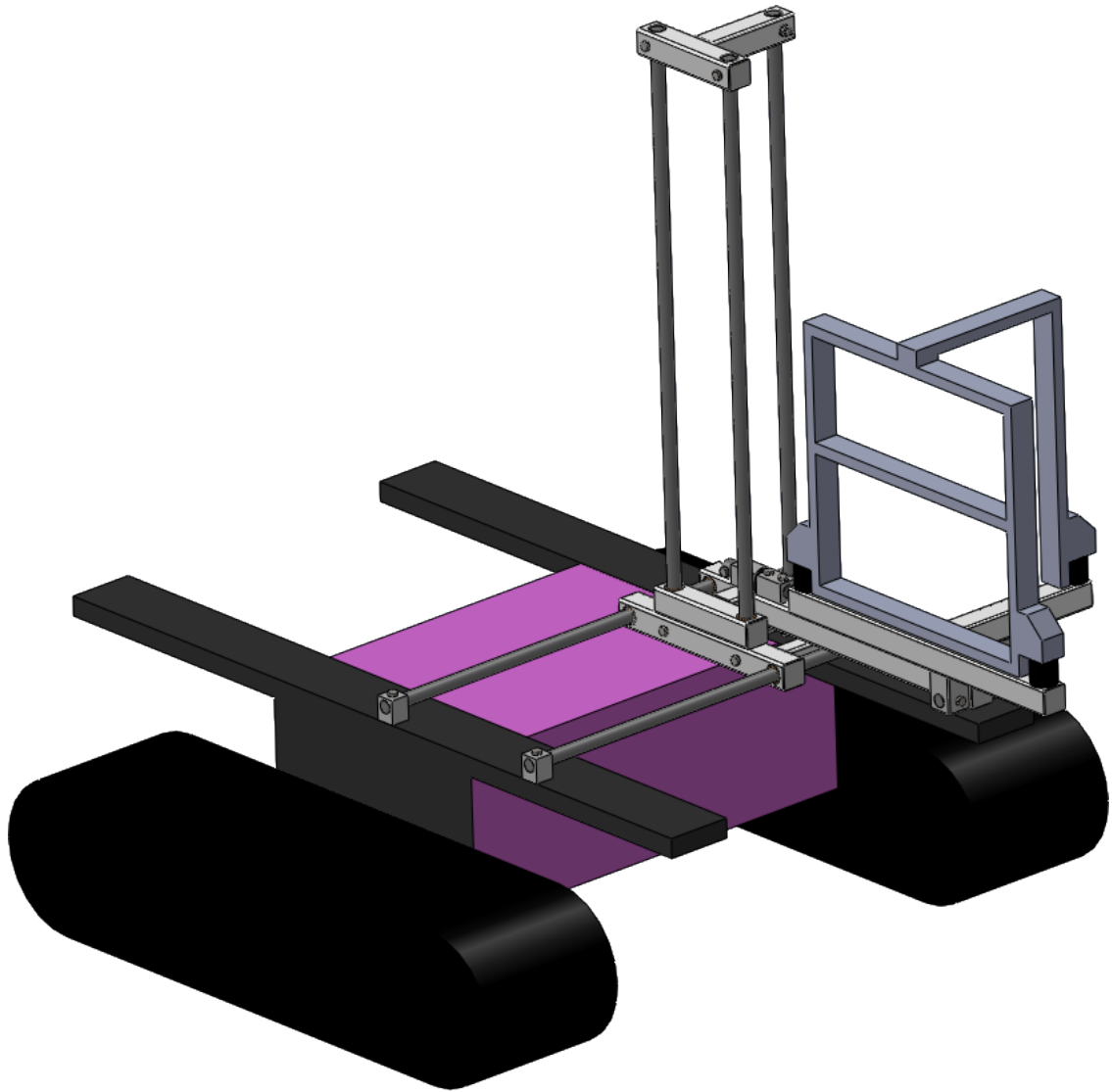


Abb. 38 Entwurf I der adaptiven Kameralageregelung.

Während der Detailplanung wurden erste Boniturergebnisse mit dem MKS auf dem Handwagen ausgewertet. Es zeigte sich die Notwendigkeit einer künstlichen Beleuchtung, da vor allem der sich ändernde Sonnenstand erhebliche Einflüsse auf die Belichtungsqualität der aufgenommenen Bilder hatte (KICHERER 2013a). Deshalb erfolgte seitens des Projektpartners JKI Siebeldingen die Anschaffung von LED-Beleuchtungsbalken und geeigneter Befestigungsprofile zur Montage am MKS (Abb. 39).

Dadurch vergrößerten sich die Dimensionen des MKS mit Beleuchtung erheblich (Abb. 40):

- Höhe: 730 mm,
- Breite: 870 mm,
- Tiefe: 327,03 mm,
- Masse: ca. 60 kg.

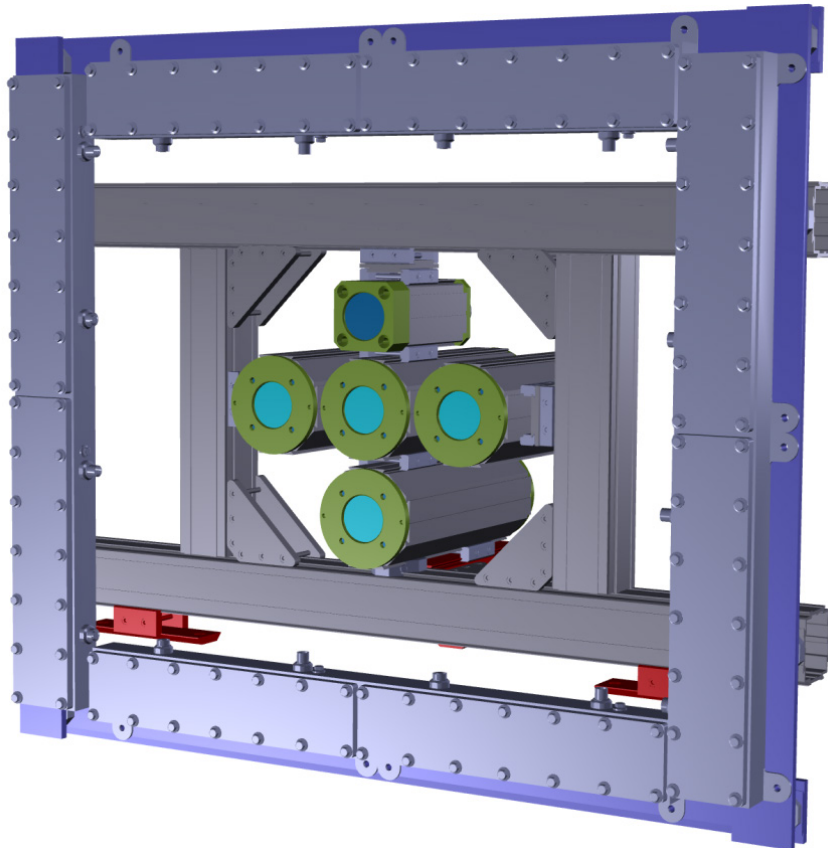


Abb. 39 Multi-Kamera-System Entwurf II in 3D (AUTOVIMATION 2014).

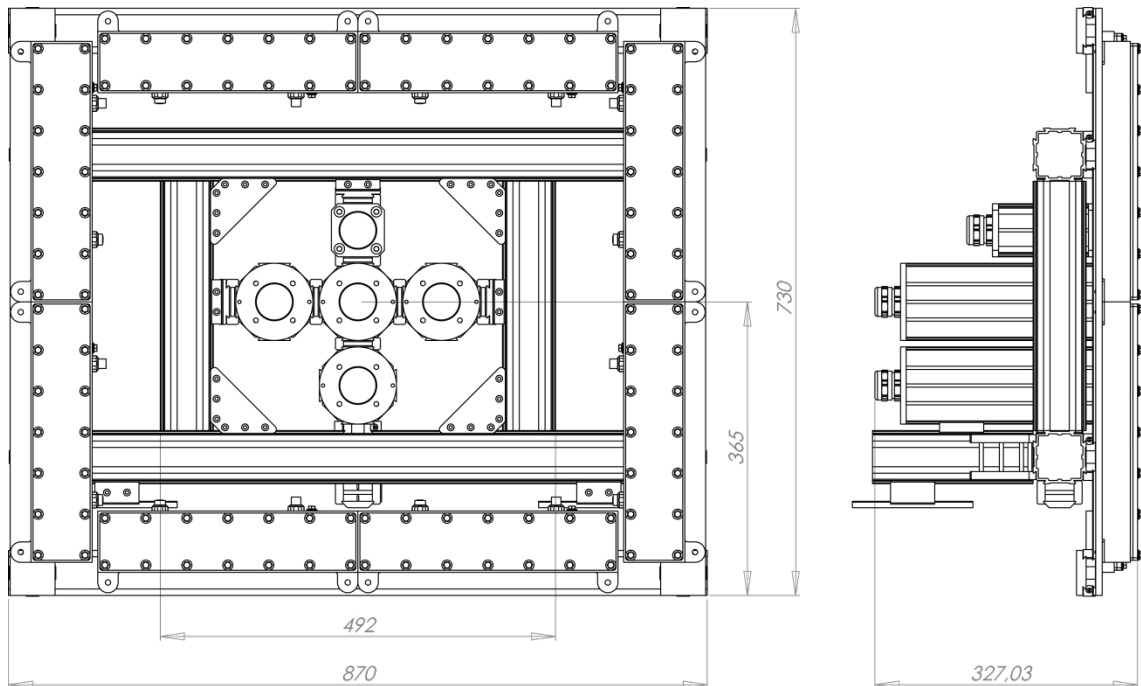


Abb. 40 Multi-Kamera-System Entwurf II in 2D mit Bemaßung [mm] (AUTOVIMATION 2014).

4.2.2 Entwurf II

Aufgrund der veränderten Rahmenbedingungen war auf der Trägerplattform nicht ausreichend Platz zur Aufnahme eines weiteren MKS vorhanden. Deshalb wurde bei der Erstellung des zweiten Entwurfes das Konzept grundlegend verändert und die Kameralageregelung zentriert auf dem Fahrzeug positioniert. Zudem wurde entschieden, die Linear- und Rotationsantriebe gänzlich bei Drittanbietern anzukaufen. Nach einer Marktevaluierung wurde bei der Firma Igus die Auslegung gemäß der vorgegebenen Rahmenbedingungen in Auftrag gegeben.

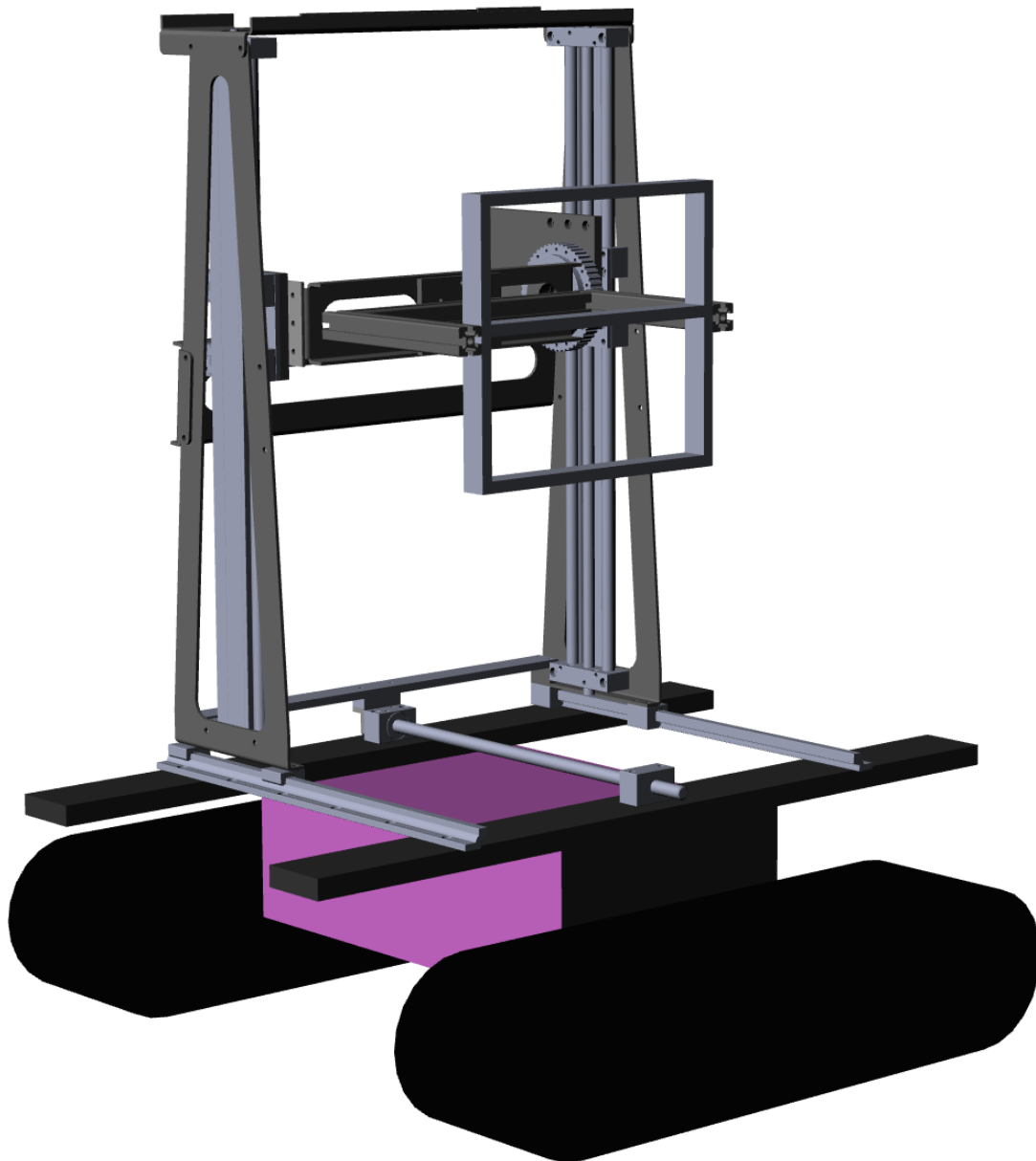


Abb. 41 Kameralagerung Entwurf II ohne Antriebsmotoren.

Abb. 41 zeigt den Entwurf II als 3D-Modell. Dieser sah zur Aufnahme der Antriebskomponenten lasergeschnittene, abgekantete Aluminiumbleche (AlMg3 3.3535) vor. Aus Gründen der Flexibilität wurde dieses Trägerkonzept durch Profilschienen (Abb. 42) aus der Aluminiumlegierung AlMgSi0,5 (3.32.06.72) ersetzt.

4.2.3 Entwurf III

Am Institut für Technik wurde in der Vergangenheit bereits mit dem Profilsystem der Firma BSO-GmbH gearbeitet. Daher waren Werkzeuge und einige Reste an Zubehör sowie Verbindungsmaterial vorhanden. Zur Konstruktion des Grundrahmens fiel die Wahl auf das Rastermaß 40 mm mit einem Nutdurchmesser von 8 mm in schwerer Ausführung (PS40.4.0) und mit einem spezifischen Gewicht von $2,41 \text{ kg m}^{-1}$. Die direkte Aufhängung des MKS wurde nach dem Prinzip der *kardanischen Aufhängung* mit Profilschienen des Systems PS40.12.0 realisiert.

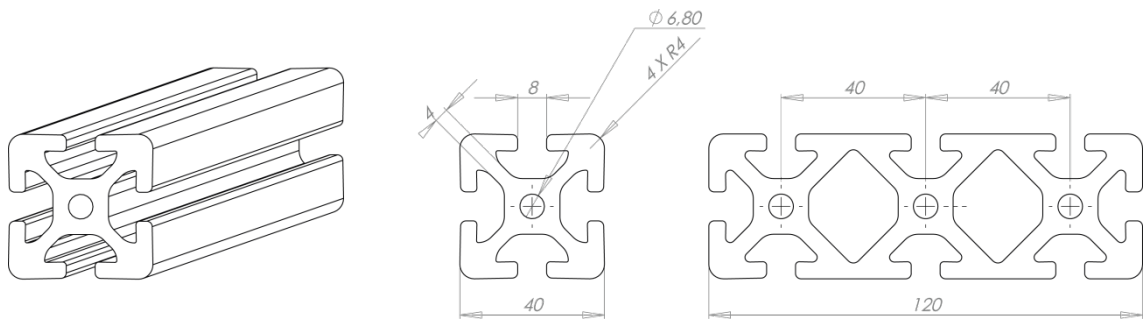


Abb. 42 Profilschienen der Firma BSO-GmbH; Links und Mitte: PS40.4.0; Rechts: PS40.12.0; Rastermaß: 40 mm; Nutdurchmesser: 8 mm; modifiziert nach BSO-GMBH (2014).

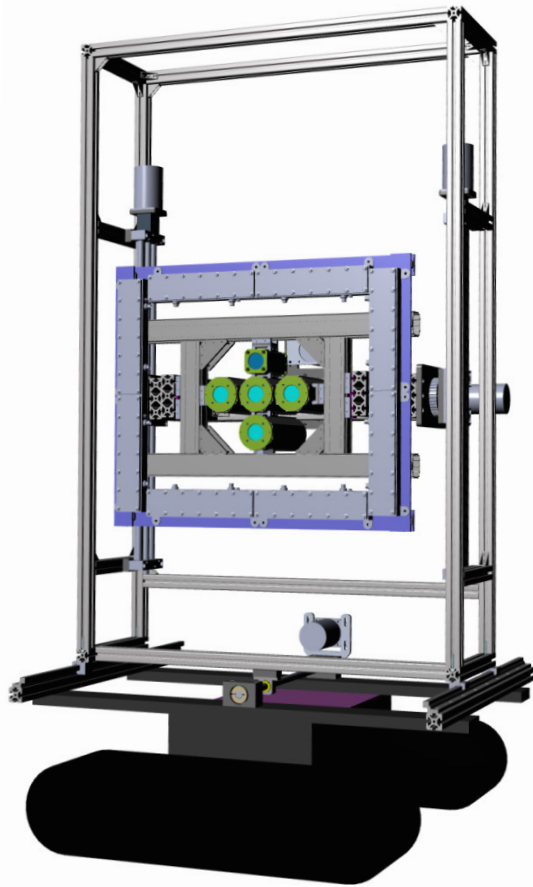


Abb. 43 Entwurf III mit MKS; Vorderansicht

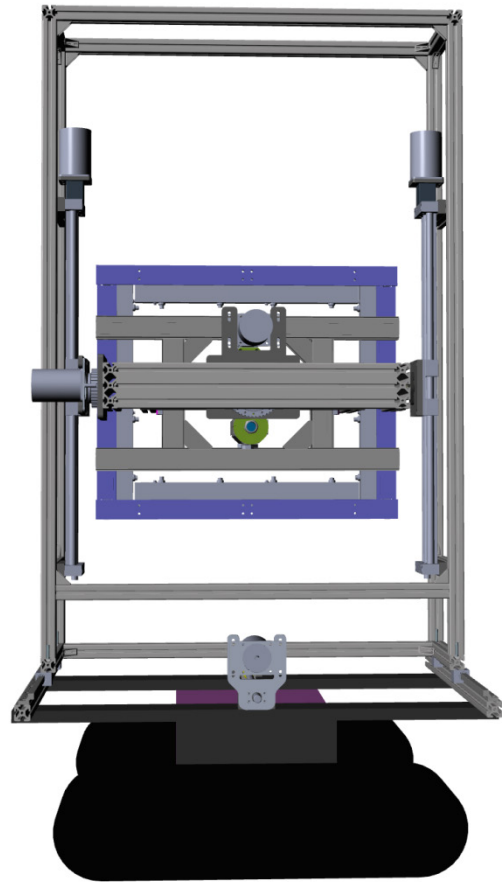


Abb. 44 Entwurf III mit MKS; Rückansicht

Die Firma Nanotec hat keine Schrittmotoren im Lieferprogramm um die zum Antrieb erforderlichen Kräfte zu gewährleisten. Um den langfristigen Einsatz im Freiland sicherstellen zu können, sollten alle Antriebskomponenten mindestens nach IP67 klassifiziert sein. Nach einer weiteren Marktsondierung wurden Angebote zu adäquaten Schrittmotoren mit IP68-Klassifizierung auf der Spulenseite als auch an der Antriebswellendichtung eingeholt. Die Firma Phytron bietet geeignete Motoren mit der zugehörigen Steuerungsreihe phyMOTION an. Diese modularen Mehrachsen-Motor-Steuerungen sind mit eigenen Hauptprozessoren (CPU) ausgestattet, und können die notwendigen digitalen, sowie analogen Ein- und Ausgänge und die benötigten Kommunikationsschnittstellen zu übergeordneten Systemen aufnehmen (PHYTRON 2014). Zur Programmierung wird die proprietäre Programmiersprache phyLOGIC verwendet.

Nach Sichtung der Angebote wurden alle benötigten Komponenten bei den Firmen BSO-GmbH, Igus und Phytron bestellt (Tab. 6).

Tab. 6 Mechanische und elektrische Elemente (Antriebstechnik) der Kameralageregelung (Ziffern in Klammern = Stückzahl).

<i>Freiheitsgrad/Element</i>	<i>Mechanisches Element</i>	<i>Elektrisches Element</i>
Horizontal (linear)	WSQ-20-1000 (2)	
	WJ200QM-01-20 (2)	
	WL200QM-01-20 LLZ (2)	
	RGAS-JTRM-20x4 (1)	
	SLS-20x4-FL (1)	ZSH 88/3.200.4-IP68 (1)
	SLS-20x4-LL (1)	INI-AB-I-025-B-AA (2)
	PTGSG-20x4-01-R-1000 (1)	
	21 AT10/20-2/22H8 (2)	
	TLK350 12x22 (2)	
	AT10-600-16 (1)	
Vertikal (linear)	SLW-2080-AWM-800-ES (2)	ZSH 88/3.200.4-IP68 (2)
	MF-3648-NEMA34 (2)	IK-0009 (1)
	COU-AR-K-120-120-32-32-B-AAA	
Schwenk 1 (rotatorisch)	PRT-01-30-TO-AT10 (1)	
	EFOM-20 (1)	
	PN034-010 (1)	ZSH 87/2.200.5-H 200-IP68 (1)
	21 AT10/15-2/20H8 (1)	INI-AB-I-025-B-AA (2)
	TLK350 10x20 (1)	
Schwenk 4 (rotatorisch)	AT10-560-16 (1)	
	PRT-01-60-TO-AT10 (1)	
	21 AT10/15-2/20H8 (1)	ZSH 87/2.200.5-H 200-IP68 (1)
	TLK350 10x20 (1)	INI-AB-I-025-B-AA (2)
	AT10-660-16 (1)	
Steuerung		POWM01.2 (1)
		MCM01.1 (1)
	phyMOTION-10SL-W-s (1)	I4XM01.1 (1)
	Kübler 8.IS40.22321 (1)	INAM01.1 (4)
		I1AM02.1 (1)
		DIOM01.1 (1)
		AIM01.1 (1)

Im Folgenden werden die einzelnen Freiheitsgrade näher erläutert. Aus Gründen des Umfangs und fehlender CAD-Vorlagen sind Komponenten wie Schrauben, Riemenscheiben und Zahnriemen nicht in den 3D-Modellen enthalten.

4.2.3.1 Horizontal

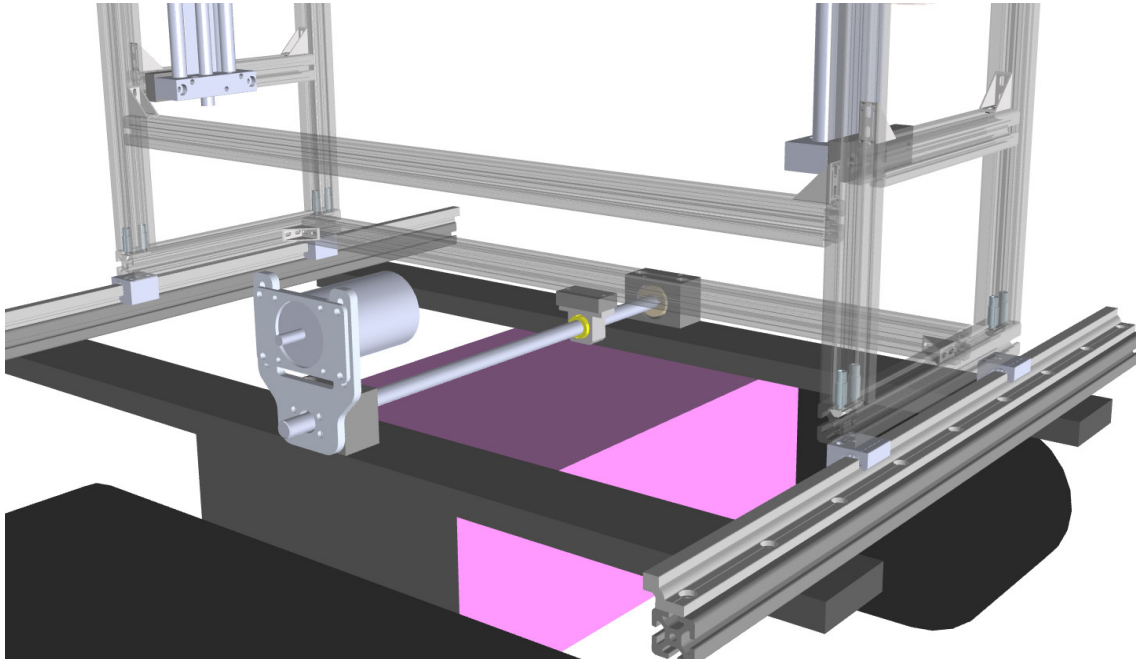


Abb. 45 Lineare horizontale Verschiebeeinrichtung mit Führungsschienen (WSQ-20-1000) und schrittmotorbetriebenem Spindeltrieb (PTGSG-20x4-01-R-1000).

Zur Anpassung des Abstandes des MKS in horizontaler Richtung zur Laubwand wurde eine Linearverschiebung in aufgelöster Bauweise vorgesehen. Der gesamte Grundrahmen ist dabei verschiebbar auf zwei Schienen aus hartanodisiertem Aluminium mit quadratischem Profilquerschnitt gelagert. Auf der einen Schiene laufen zwei Festlagerböcke (WJ200QM-01-20), auf der anderen zwei Loslagerböcke (WL200QM-01-20 LLZ). Nach der Auslegung wird mindestens eine Antriebskraft von 292 N benötigt. Bei Verwendung einer Gewindespindel (PTGSG-20x4-01-R-1000) mit 4 mm Steigung, einer Hublänge von ca. 500 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m min}^{-1}$ ergab sich ein erforderliches Drehmoment von 1,8 Nm. Bereitgestellt wird dieses Drehmoment von einem Schrittmotor (ZSH 88/3.200.4-IP68). Zur Verkleinerung des Bauraumes erfolgt der Antrieb der Gewindespindel über einen Zahnriementrieb (21 AT10/20-2/22H8, TLK350 12x22, AT10-600-16) mit einem Übersetzungsverhältnis von $i = 1:1$, wodurch der Schrittmotor um 180° gedreht werden konnte und somit nicht über das Fahrzeug hinausreichte. Um den Schrittmotor anzubringen und die Riemenspannung einstellen zu können, wurden zwei Adapterplatten aus Aluminium (AlZnMgCu1,5) konstruiert (siehe elektronischer Anhang). Die Er-

kennung der Endlage und Sicherheitsabschaltung ist mit zwei Initiatoren (INI-AB-I-025-B-AA) an den äußersten Bewegungspunkten realisiert worden.

4.2.3.2 Vertikal

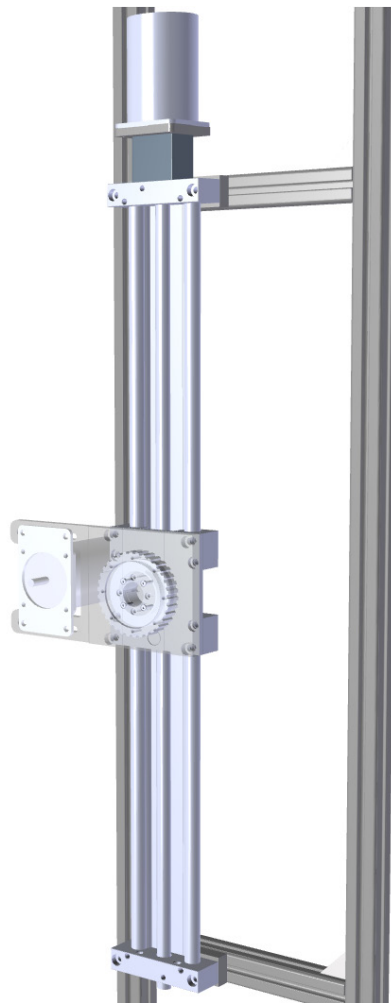


Abb. 46 Vertikale Verschiebeeinheit mit Lineartischen (SLW-2080-AWM-800-ES).

Zur Anpassung der Bildaufnahmehöhe kann das gesamte MKS um 800 mm vertikal verschoben werden. Dazu sah das Konzept die seitliche Befestigung an zwei Lineartischen (SLW-2080-AWM-800-ES) aus hartanodisiertem Aluminium mit Edelstahlspindeln vor. Diese wurden an den Seiten des Grundrahmens befestigt und werden jeweils mit einem Schrittmotor (ZSH 88/3.200.4-IP68) angetrieben. Als Gewichtskraft des MKS zuzüglich der kardanischen Aufhängung (vgl. 4.2.3.3) wurden 800 N angenommen. Nach der Auslegung muss pro Lineartisch eine minimale Antriebskraft von

441 N aufgebracht werden. Aus den Spindelparametern folgt ein nötiges Antriebsmoment von 2,46 Nm. Die Wellenverbindung erfolgte mittels Klauenkupplungen (COU-AR-K-120-120-32-32-B-AAA). Um den Gleichlauf der beiden Lineareinheiten zu gewährleisten, wurden die Schrittmotoren in der Steuerung synchronisiert. Zur Endlagenschaltung dient ein vorkonfiguriertes Initiatoren-/Montageadapterset (IK-0009).

4.2.3.3 Schwenkachse I

Zum Ausgleich von Geländeneigung und Unebenheiten dient die drehbare Lagerung des MKS in einer kardanischen Aufhängung (Abb. 47). Beide Achsen sollten jeweils um $\pm 15^\circ$ schwenkbar sein.

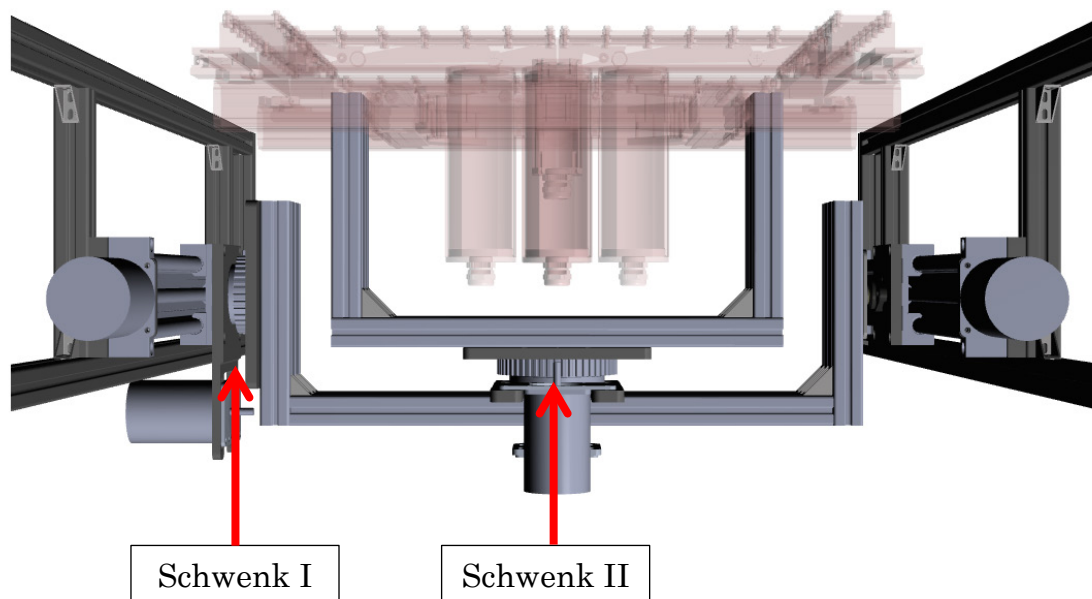


Abb. 47 Kardanische Aufhängung des MKS auf den Tischen der vertikalen Lineareinheiten.

Die Drehpunkte der ersten Schwenkachse parallel zur Fahrtrichtung (Einstellung der Parallelität zur Laubwand) befinden sich auf den Tischen der beiden vertikalen Lineareinheiten. Als Lagerkomponenten wurden auf der passiven Seite ein einfacher Gleitlagerbock (EFOM-20) und auf der aktiven angetriebenen Seite ein Rundtischlager (PRT-01-30-TO-AT10) mit Außenverzahnung zur Aufnahme des Zahnriemens (AT10-560-16) vorgese-

hen (Abb. 48). Durch die Geometrie der Zweipunktaufhängung tritt eine mittige, radiale Lagerbelastung von 400 N (angenommene Gewichtskraft des MKS mit Kardan $\times 0,5$) auf. Der Schrittmotor (ZSH 87/2.200.5-H 200-IP68) mit angeflanschem Planetengetriebe (PN034-010) ($i = 1:15$) wurde mit zwei Adapterplatten am Tisch eines SLW-2080-AWM-800-ES befestigt. Angetrieben wird der Schwenktisch über einen Zahnriementrieb mit einem Übersetzungsverhältnis $i = 1:2,27$. Damit wird mindestens das zum Antrieb notwendige Drehmoment von 31,2 Nm bereitgestellt. Die Erkennung der Endlage und Sicherheitsabschaltung ist mit zwei Initiatoren (INI-AB-I-025-B-AA) an den äußersten Bewegungspunkten realisiert worden.

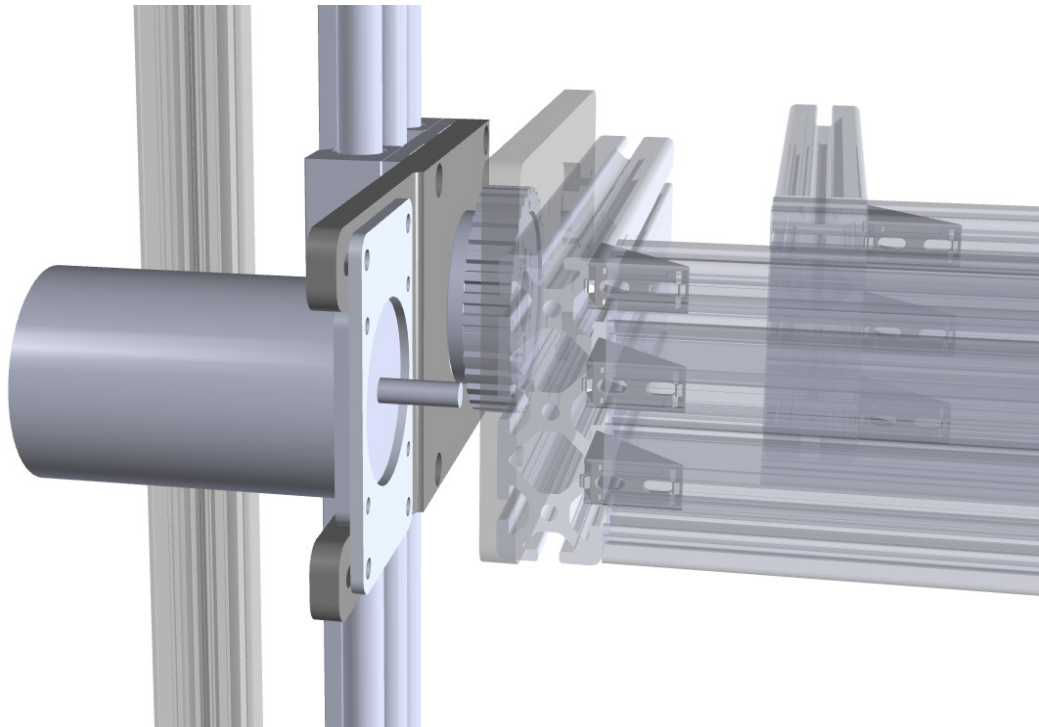


Abb. 48 *Detailansicht der Schwenkachse I mit Rundtischlager, Schrittmotor, Flanschadapter und Zahnriemenvorspanneinheit.*

4.2.3.4 Schwenkachse II

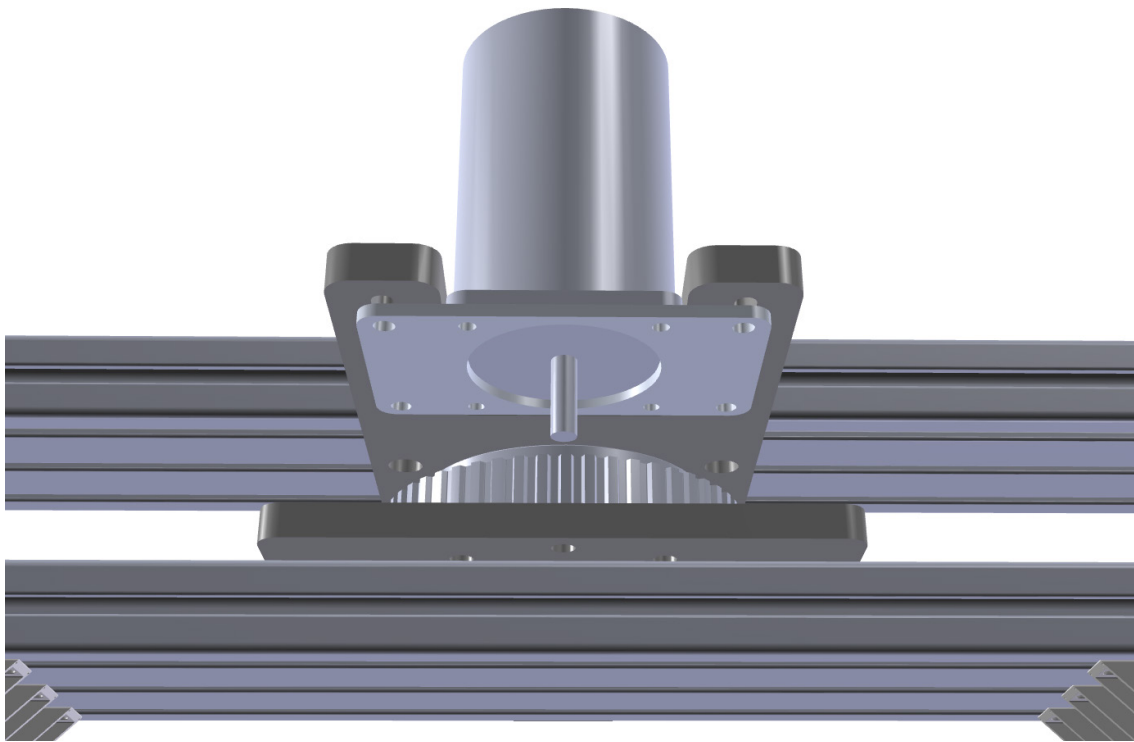


Abb. 49 *Detailansicht der Schwenkachse II mit Rundtischlager, Schrittmotor, Flanschadapter und Zahnriemenvorspanneinheit.*

Die zweite Drehachse verläuft senkrecht zur Fahrtrichtung und kann somit zum Ausgleich der Neigung in Fall- oder Steiglinie dienen. Dazu wurde ein Rundtischlager größerer Bauart (PRT-01-60-TO-AT10) vorgesehen (Abb. 49). Der Antrieb erfolgt mit einem Schrittmotor (ZSH 87/2.200.5-H 200-IP68) über einen Zahnriementrieb (21 AT10/15-2/20H8, TLK350 10x20, AT10-660-16). Zur Endlagenschaltung wurden wiederum zwei Initiatoren benötigt (INI-AB-I-025-B-AA).

4.3 PHENObot

Nach Abschluss der technischen Konzeption und Planung erfolgte der Aufbau des Bonitursystems. Abb. 50 zeigt eine Dreiseitenansicht zur Darstellung der Fahrzeugdimensionen laut Konzeption.

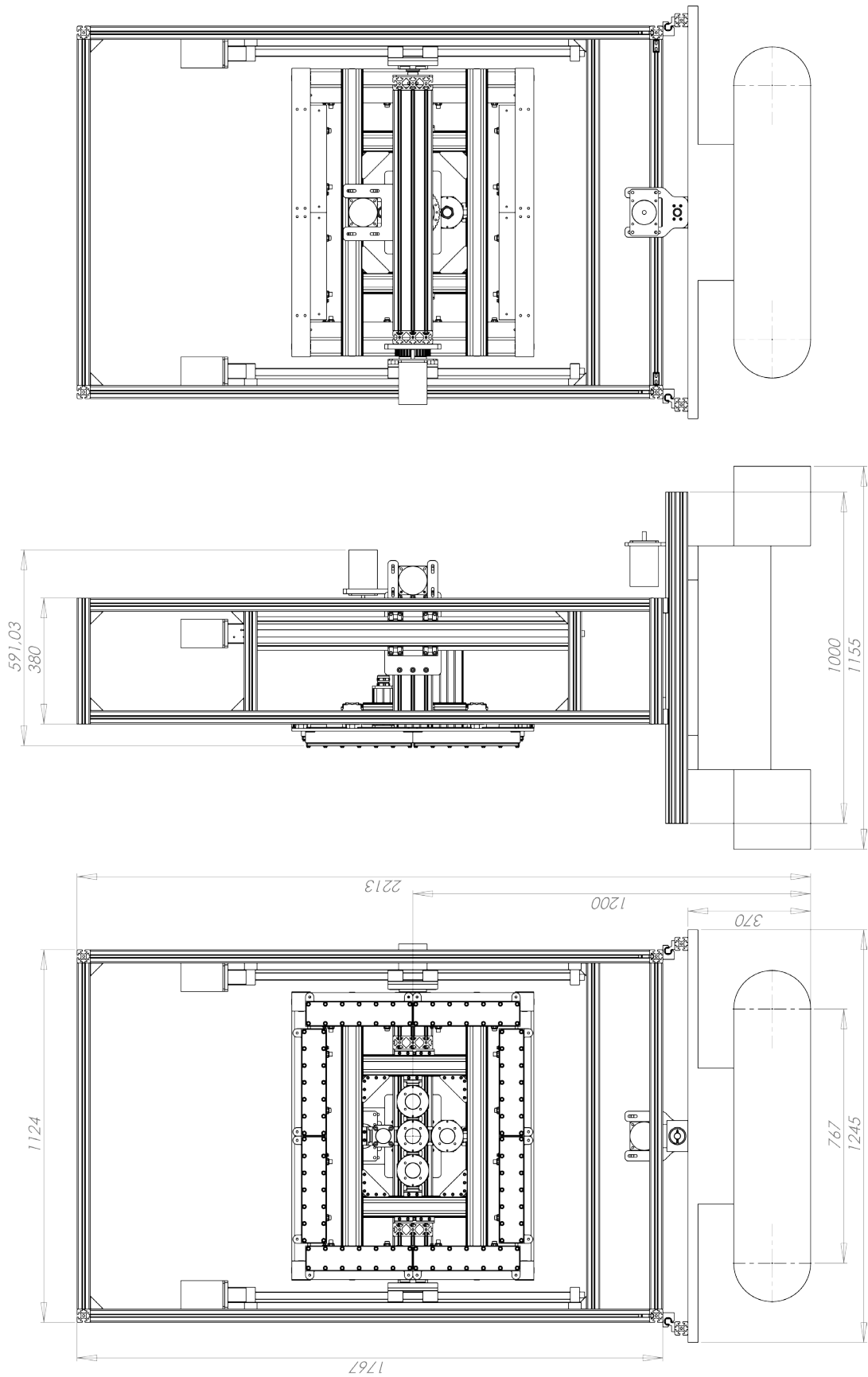


Abb. 50 Vorder-, Seiten- und Rückansicht des PHENObot mit Bemaßung [mm] zur Darstellung der Dimensionen.

4.3.1 Montage und Aufbau

Nach Lieferung aller Komponenten erfolgte die Montage der Kameralage-
regelung und Verkabelung der elektrischen Komponenten. Abweichend
zum Konstruktionsentwurf mussten bei der Montage einige Änderungen
aufgrund der baulichen Gegebenheiten am Fahrzeug, speziell am Kisten-
schlitten, und bedingt durch die Generatoreinheit vorgenommen werden.

Zunächst wurde der Grundrahmen (Abb. 51) angefertigt und auf die
Schienen zur Horizontalverschiebung gesetzt. Zur besseren Befestigung
wurden die Schienen mit den Trägerprofilen um 180° nach innen gedreht.
Um den gesamten Aufbau mit MKS beispielsweise zu Wartungsarbeiten
abnehmen zu können, wurden Profile zur Querverbindung (Abb. 52) einge-
fügt.



Abb. 51 Montage des Grundrahmens der Kamera-
lageregelung. Horizontalverschiebung.

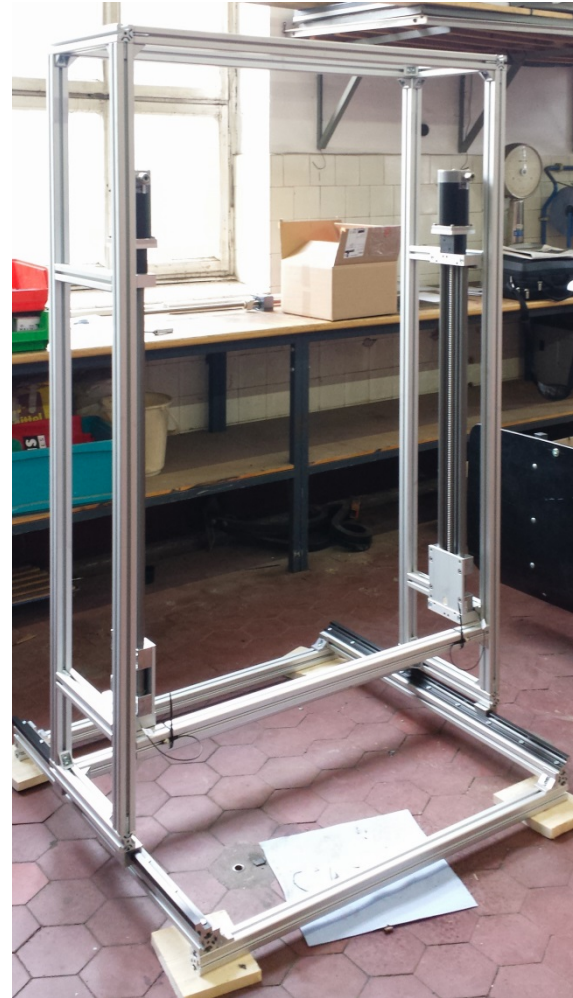


Abb. 52 Montage des Grundrahmens der Kame-
ralageregelung. Vertikalverschiebung.

Die Querverbinder wurden verlängert um die Steuereinheit mit Schaltkasten und Bedientableau aufzunehmen (Abb. 53).

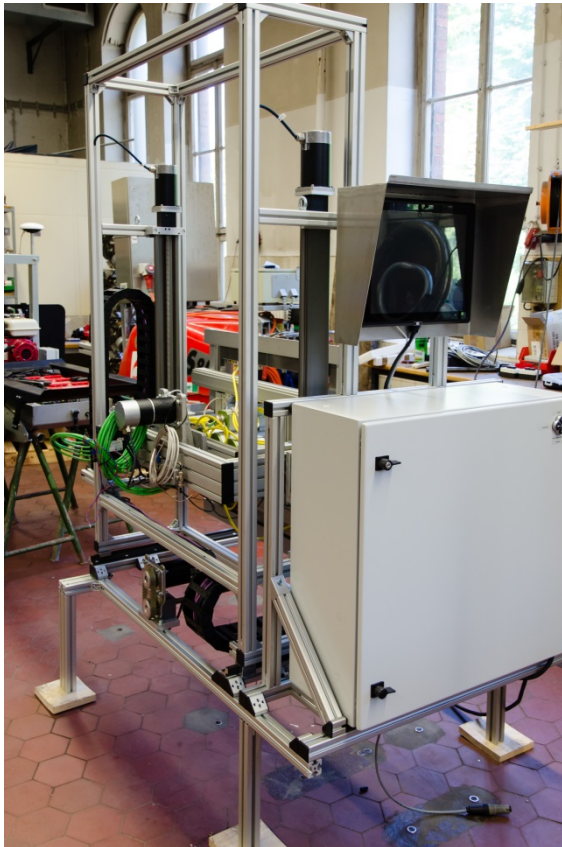


Abb. 53 Kameralagerungsaufbau als abgesetzte Einheit. Rückseite mit Bedieneinheit.

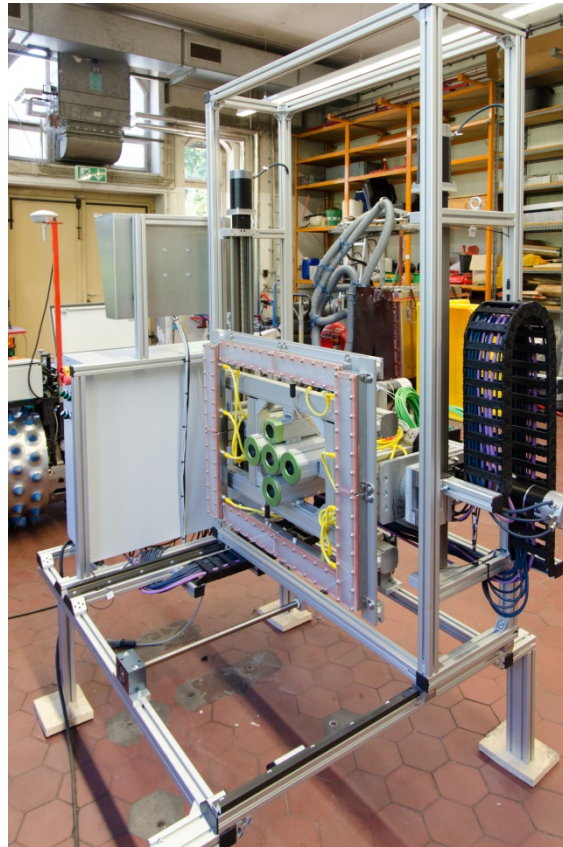


Abb. 54 Kameralagerungsaufbau als abgesetzte Einheit. Vorderseite mit MKS.

Das abgesetzte Kameralagerungssystem kann mit vier Stützen versehen werden. Zur Demontage wird das gesamte Fahrzeug mit einem Gabelhubwagen angehoben. An den vier Befestigungspunkten (Abb. 55) werden jeweils zwei Schrauben gelöst. Nach der Trennung der Kabelverbindungen (vgl. Kap. 4.3.2) wird bis auf die Stützfüße abgelassen, das Fahrgestell ist hierbei immer noch in der Schwebelage und kann mit dem Hubwagen ganz herausgefahren werden.



Abb. 55 Einer der vier Befestigungspunkte des Kameralagerungssystems auf dem Trägerrahmen des Fahrzeuges.

Zur Führung der Steuer- und Leistungskabel entlang der Verstellachsen *Horizontal* und *Vertikal* dienen Energieketten (Abb. 56, Abb. 57 und Abb. 58).

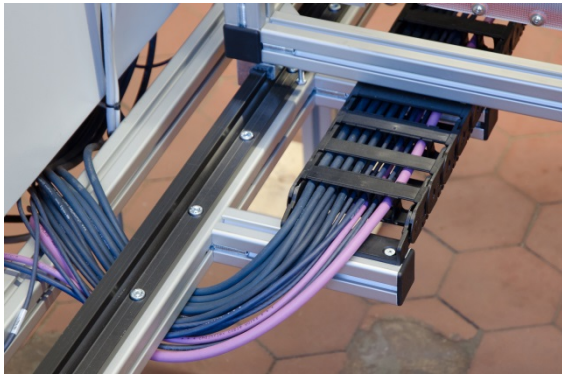


Abb. 56 Kabelführung horizontale Verschiebung.

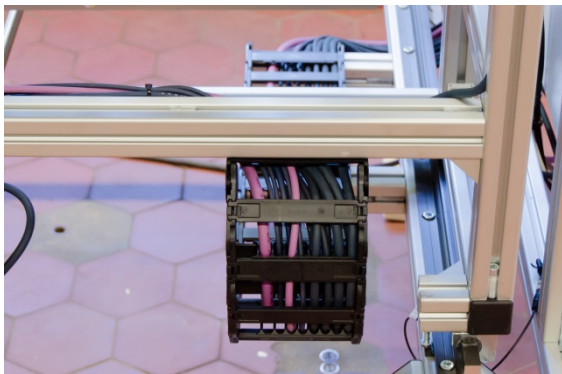


Abb. 57 Kabelführung horizontale Verschiebung. Abb. 58 Kabelführung vertikale Verschiebung.

4.3.2 Elektronik

Die elektrischen und elektronischen Bauteile und Komponenten auf dem PHENObot teilen sich in Versorgung und Steuerung auf.

4.3.2.1 Versorgung

Als Bordnetz liegt auf dem Trägerfahrzeug ein Gleichspannungssystem mit 48 V vor. Vier in Reihe geschaltete Bleiakumulatoren mit je 12 V und 55 Ah dienen als Spannungsquelle (Abb. 32). Das Akkumulatorenpaket ist über eine Anderson SB50 Hochstromsteckverbindung mit dem Fahrzeugsystem verbunden. Herstellerseitig ist zum Aufladen diese Steckverbindung zu lösen. Dann können die Batterien an das mitgelieferte Ladegerät angeschlossen werden. Ist das Kameralageregelungssystem montiert, ist dieser Anschluss nicht zugänglich. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Anschlussstecker zum Aufladen der Akkumulatoren in einem spritzwasserge-

geschützten Gehäuse verbaut (Abb. 59). Der Zugang zum Stecker ist mit einem Schloss gesichert. Um das Ladegerät anschließen zu können, muss der Zündschlüssel (Abb. 60) des Fahrzeuges abgezogen und mit diesem der Zugang geöffnet werden. Damit wird sichergestellt, dass die Fahrzeugelektronik nicht versehentlich während des Ladevorgangs eingeschaltet bleibt. Ansonsten wären Schäden zu erwarten.



Abb. 59 Anderson SB50 Anschlussstecker mit Ladekabel zum Aufladen der Akkumulatoren.

Zwischen Batteriepaket und Leistungselektronik für den Fahrtrieb wurde eine Vorsicherung mit 80 A als Schutzelement eingebaut. Die Spannungsversorgung für den Schaltschrank im Heckbereich (Kameralageregelung, Navigations- und Bildrechner) wurde mit einer 30 A Sicherung geschützt. Die Verbindung zum Fahrzeug ist über eine Steckverbindung trennbar. Zur Minimierung des Schaltstroms wird beim Einschalten der Zündung der Mikrocontroller mit der Systemspannung versorgt. Der Bootvorgang der Firmware wird initiiert. Nach dessen Ende (ca. nach 10 Sekunden) wird eine Steuerspannung an ein Relais gelegt, das den Laststromkreis mit 48 V einschaltet. Danach ist das Fahrzeug im manuellen Modus per Fernbedienung fahrbereit.

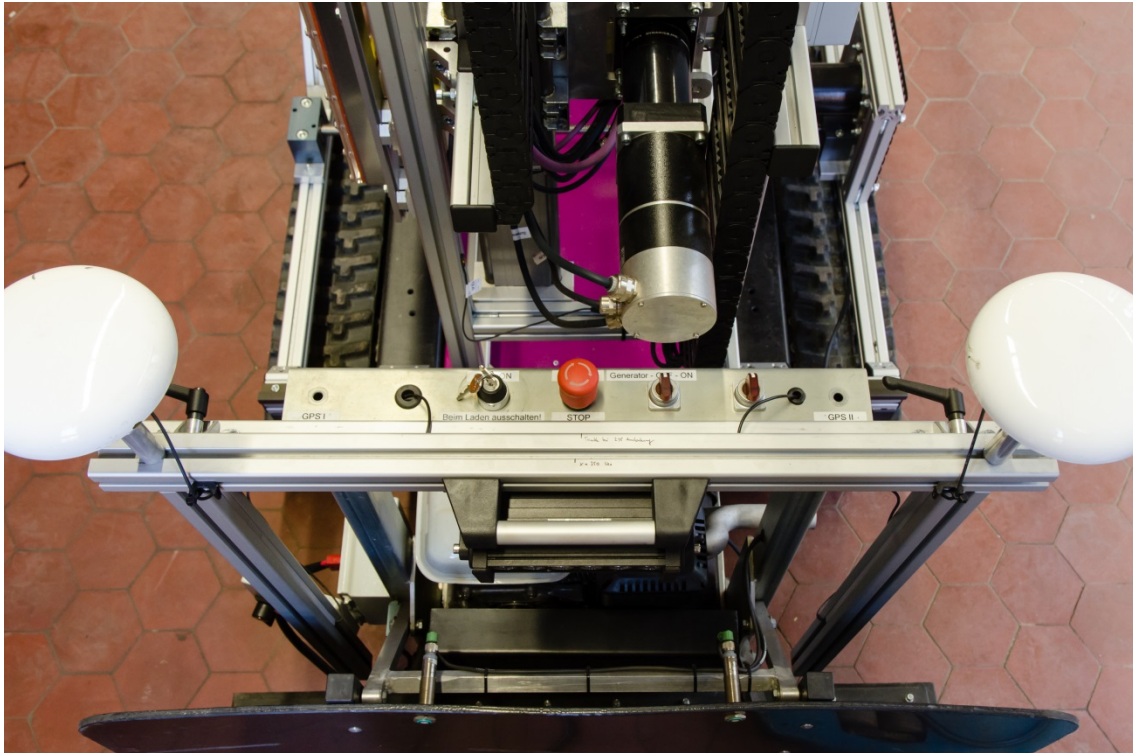
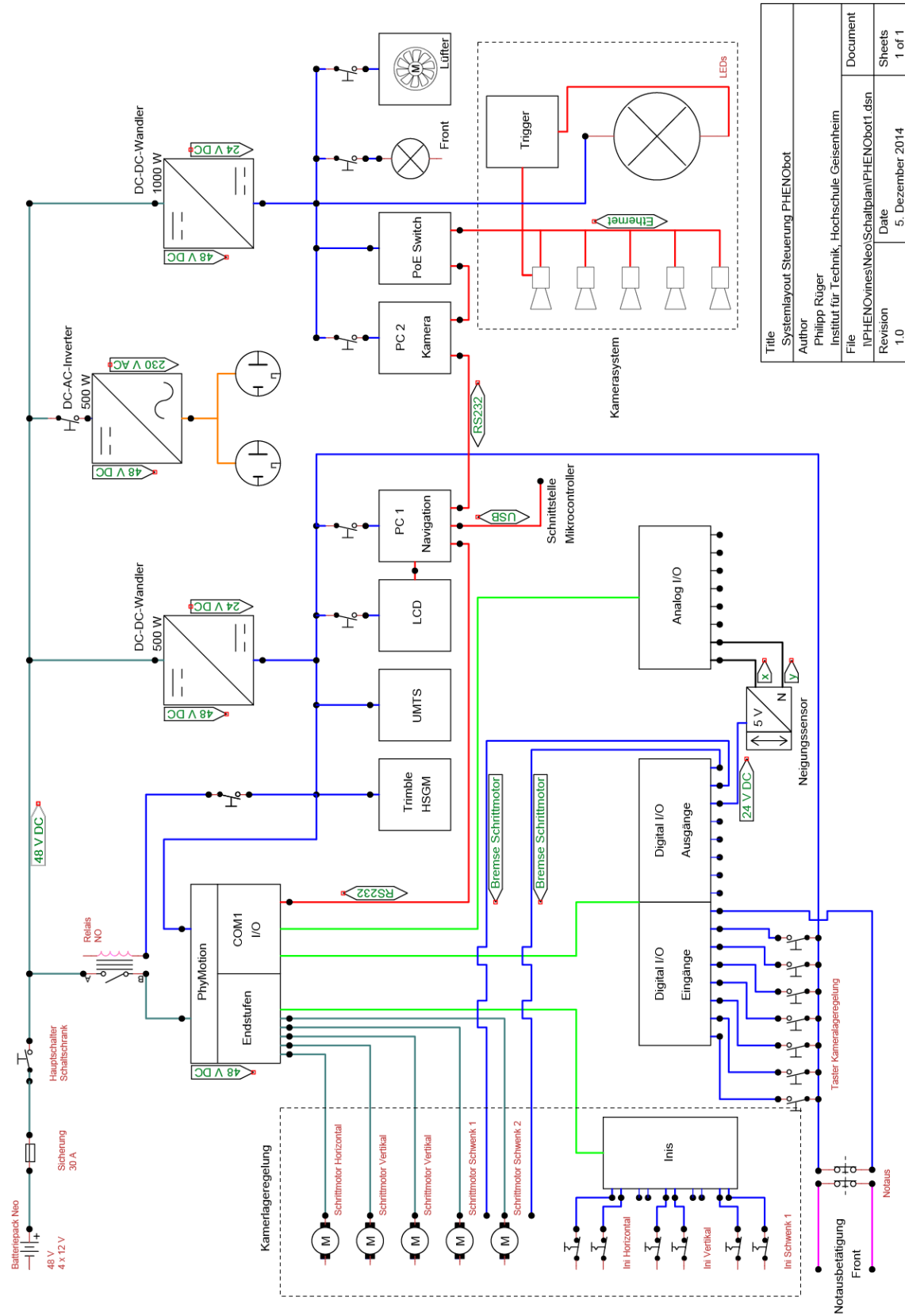


Abb. 60 Bedieneinheit Fahrzeug, von links: GPS 1, Zündschloss, Notaus, Generator frei, nicht belegt, GPS 2.

4.3.2.2 Systemlayout PHENObot

Abb. 61 zeigt den gesamten Aufbau des elektrischen/elektronischen Systems des Bonitursystems. Grundlegend besteht der PHENObot aus:

- Trägerfahrzeug,
- Navigationssystem mit Rechner I (Schnittstelle zum Fahrzeug),
- Kameralageregelung,
- Kamerasystem mit Rechner II (Schnittstelle zum Navigationssystem),
- Steuereinheit (Schaltschrank mit Bedientableau und Versorgungselektrik).



Title		Systemlayout Steuerung PHENObot	
Author		Philipp Rügner	
File		I:\PHENOVines\Neo\Schaltplan\PHENObot1.dsn	
Revision	Date	Document	Sheets
1.0	5. Dezember 2014	1 of 1	1 of 1

Abb. 61 Systemlayout Steuerung PHENObot.

Das Trägerfahrzeug und seine Komponenten wurden bereits unter Kapitel 4.1 eingehend beschrieben. Die Navigationsalgorithmen werden auf dem Mikrocontroller des Fahrzeugs ausgeführt. Zur Zielvorgabe und Bedienung wird ein Rechner (PC 1) benötigt. Dazu wurde ein widerstandsfähiger Industrie-PC (IPC) spo-book MOVE T56N der Firma spo-comm mit x86-Architektur, 8 GB RAM, einer 120 GB Solid State Disk, WLAN- und UMTS-Modulen, sowie einem 800 mAh Batteriepack angeschafft (PC 1). Das Gehäuse erfüllt den Standard MIL-STD-810F. Die Verbindung zum Mikrocontroller wird mittels USB-Schnittstelle hergestellt. Weitere Verbindungen bestehen über die seriellen Schnittstellen RS232 zur Schrittmotorsteuerung und zum Bildrechner (PC 2). Dieser Rechner wurde seitens des JKI bereitgestellt, deshalb wird an dieser Stelle nicht näher auf die Spezifikationen eingegangen.

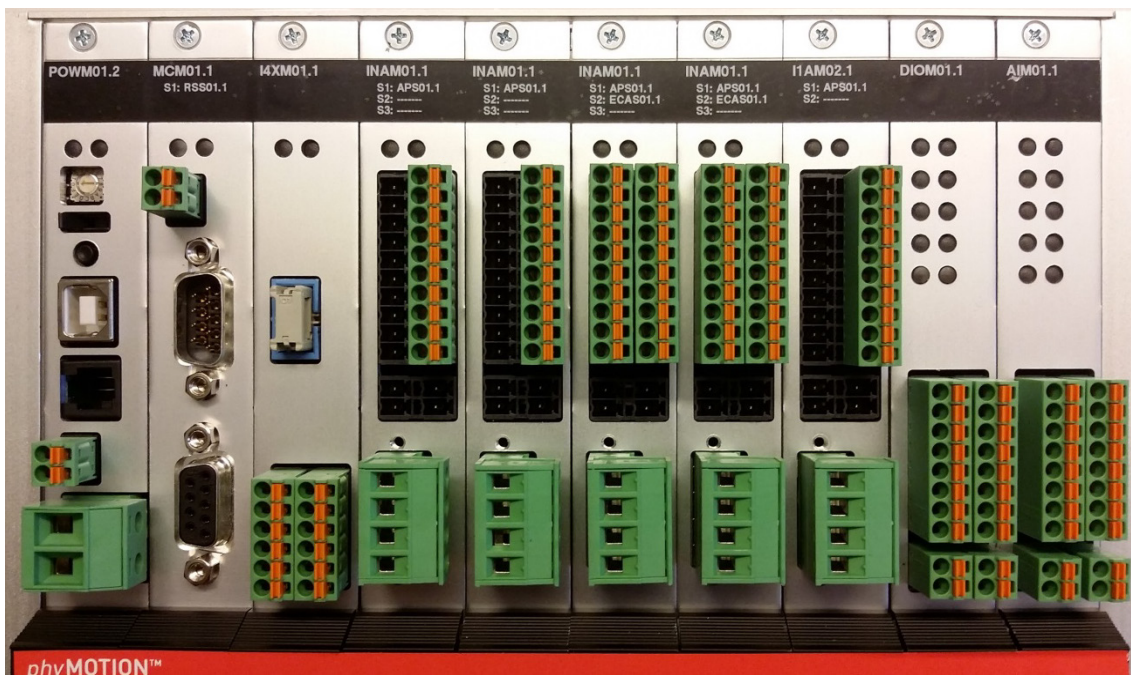


Abb. 62 Frontpanel der Schrittmotorsteuerung phyMOTION.

Die Kameralageregelung setzt sich aus den elektrischen Bewegungskomponenten (Schrittmotoren), der Steuerung (phyMOTION, Betätigungsschalter) und diversen Sensoren (Initiatoren, Neigungssensor) zusammen. Es wurden fünf Hybrid-Schrittmotoren mit je zwei Phasen in bipolarer Betriebsart verbaut. Die beiden Schrittmotoren der Schwenkachsen haben zusätzlich Motorbremsen und Inkrementalgeber (Encoder). Laststromseitig

sind die Motoren mit fünfadrigen Kabeln an die Schrittmotorendstufen der phyMOTION (Abb. 62) angeschlossen. Für jede Phase stehen zwei Leiter mit einem Querschnitt von 1 mm^2 zur Verfügung. Die Wicklungen in den Schrittmotoren sind parallel geschaltet. Der fünfte Draht ist der Schutzleiter. Die Motorbremsen wurden zweiadrig mit einem Querschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$ an das Digitalausgangsmodul der phyMOTION angeschlossen. Jede Bewegungsachse verfügt über ein Initiatorpaar zur Endlagenschaltung. Diese wurde mit dreiadrigen Initiatoranschlussleitungen mit einem Querschnitt von $0,25 \text{ mm}^2$ mit den entsprechenden Eingängen der phyMOTION verbunden. Zur Lageerkennung des MKS dient ein zweiachsiger Neigungssensor Kübler 8.IS40.22321 (Abb. 63). Dieser wurde vieradrig mit einem Querschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$ an zwei Analogeingänge der phyMOTION angeschlossen.

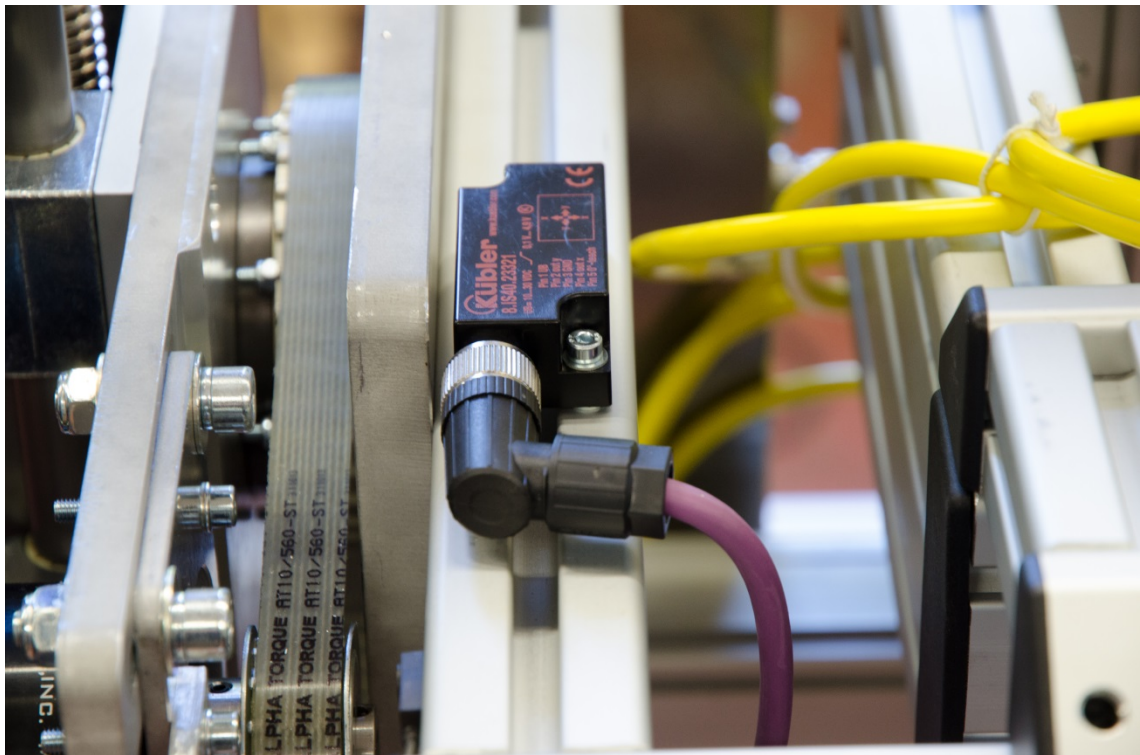


Abb. 63 Neigungssensor Kübler 8.IS40.22321.

Das Multikamerasystem wird mit CAT6 Ethernet-Kabeln an ein PoE-Netzwerkswitch (Abb. 64) angeschlossen und über dieses mit Spannung versorgt. Die acht LED-Beleuchtungsbalken sind in zwei Stromkreisen à vier Einheiten in Reihe geschaltet und werden über eine Triggerbox

(Abb. 64) simultan von einer der fünf Kameras ausgelöst. Kameranetzwirkswitch und Triggerbox werden mit jeweils einem $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$ Querschnitt mit Spannung versorgt.

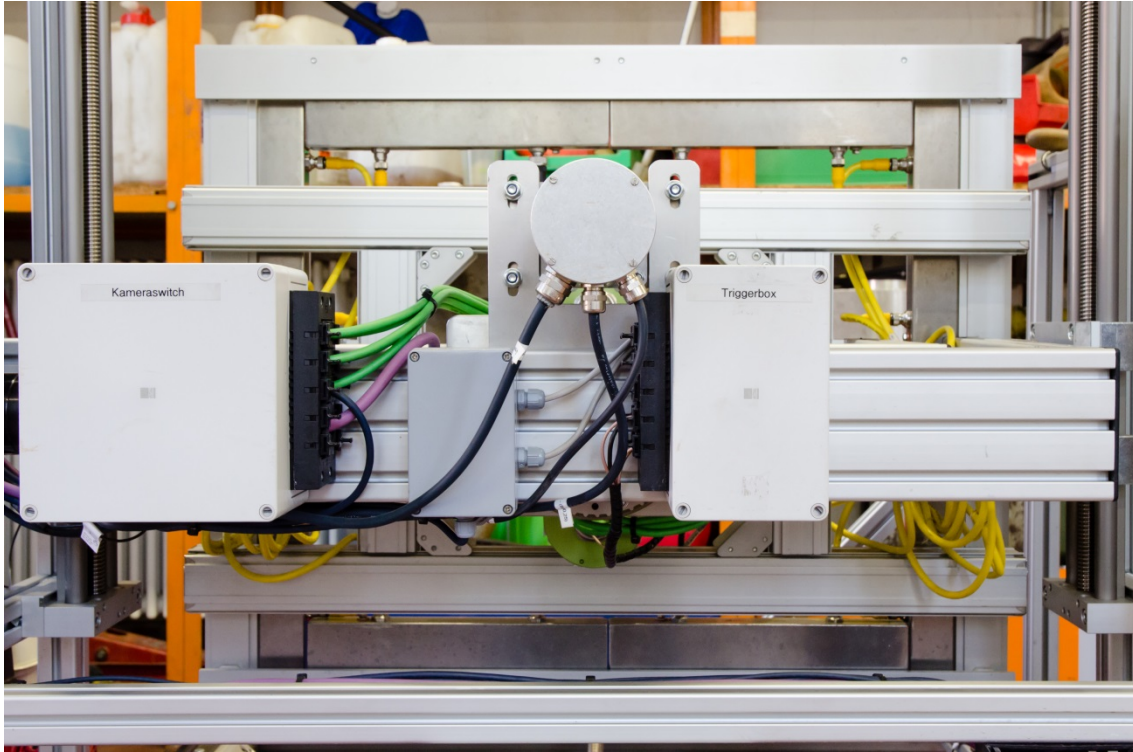


Abb. 64 Gehäuse Netzwerkswitch MKS (links) und Gehäuse (rechts) Trigger LED-Beleuchtung mit Spannungsversorgung (Mitte).

In der Steuereinheit (Abb. 65) werden drei Spannungsbereiche zur Verfügung gestellt:

48 V Gleichstrom (direkt vom Fahrzeug)

- Schrittmotoren über Schrittmotorendstufen,
- Spannungswandler zur Erzeugung der anderen Spannungsbereiche (DC-DC- bzw. DC-AC-Wandler).

24 V Gleichspannung (Kreis I; DC-DC-Wandler 500 W)

- Navigationskomponenten,
- Bedientableau,
- WLAN-Router,
- Sekundär-GPS,
- I/O-Versorgung phyMOTION.

24 V Gleichspannung (Kreis II; DC-DC-Wandler 1000 W)

- MKS mit PC 2,
- LED-Beleuchtung,
- Frontscheinwerfer (LED),
- Schaltschranklüfter.

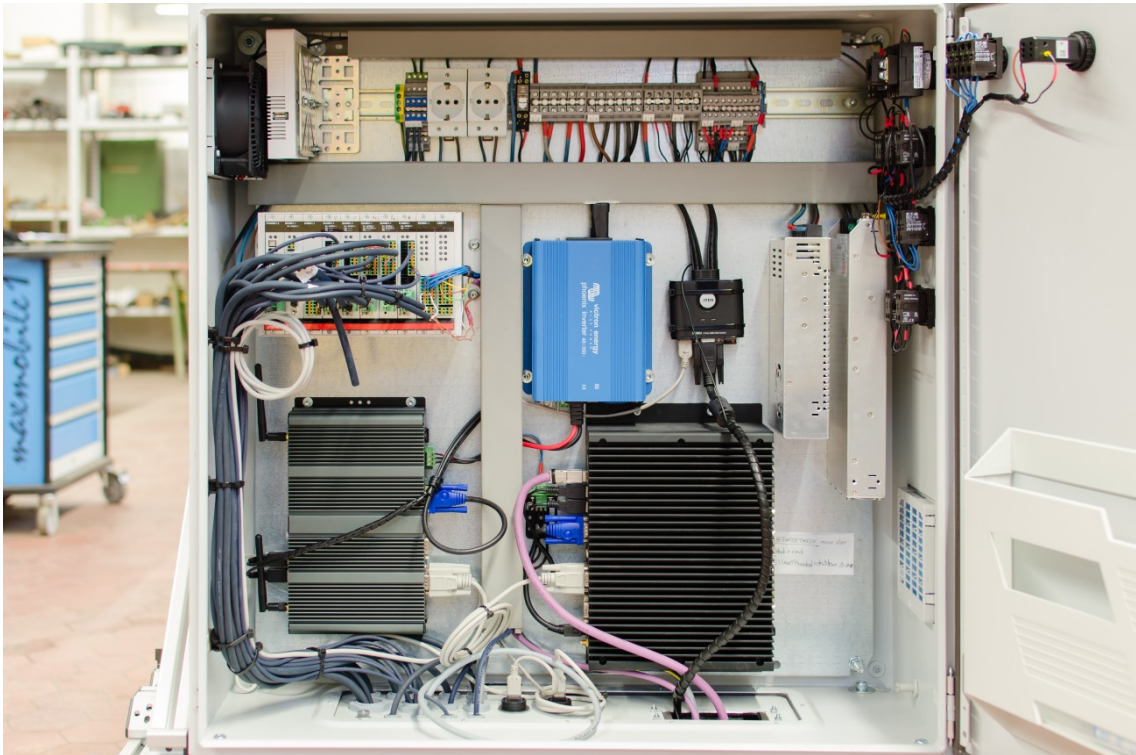


Abb. 65 Innenansicht des Schaltschranks mit allen Komponenten und Verdrahtung.

4.3.2.3 Steuerung

Zur Steuerung des Bonitursystems sind zwei Bedienbereiche am Fahrzeug vorhanden. Im vorderen Bereich (Abb. 60) werden die Funktionen des Trägerfahrzeuges gewählt. Im hinteren Bereich sind am Schaltschrank (Abb. 65) ein Schalterfeld (Abb. 67 und Abb. 68), sowie ein kapazitiv berührungsempfindlicher LCD-Bildschirm (Abb. 66) zur Bedienung der beiden Rechner vorhanden.



Abb. 66 *Bedientableau Schaltschrank mit Touch-LCD und Maus-Tastaturkombination. Hier ist zusätzlich der Rover des RTK-Systems von Trimble mit TSC 1 angebaut.*

Über den Touch-LCD werden alle relevanten Programmfunktionen von PHENObotControl 1.0 (vgl. Kap. 4.4), sowie IGG Geotagger auf dem Bildrechner gesteuert. Zusätzlich ist eine Maus-Tastaturkombination für Sonderfunktionen und umfangreiche Texteingaben vorhanden. Die Bedien- und Anzeigeelemente sind über einen Umschalter (KVM-Switch) mit beiden Rechnern verbunden.



Abb. 67 Schalterfeld I

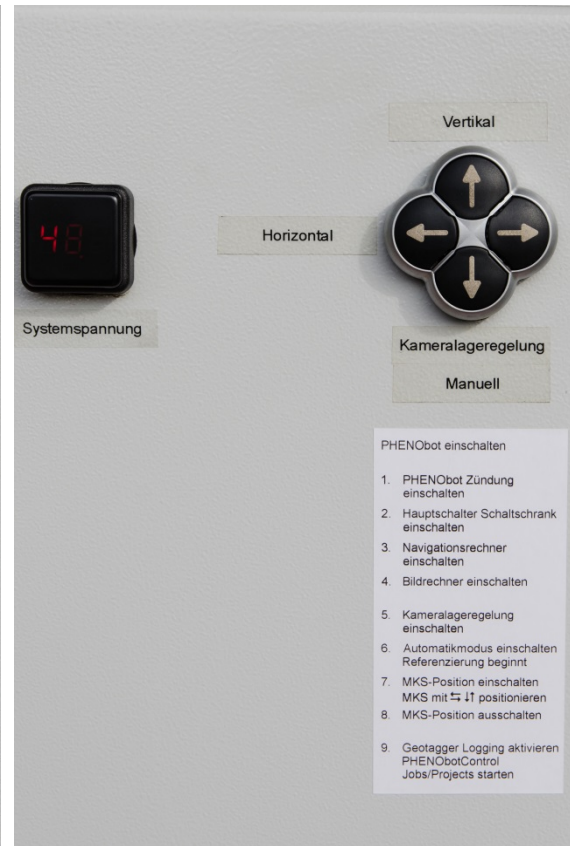


Abb. 68 Schalterfeld II

Der Schaltschrank wird über einen Hauptschalter mit der Systemspannung versorgt. Ist dieser eingeschaltet, starten die beiden DC-DC-Wandler und stellen 24 V Gleichspannung bereit. Alle weiteren Hardwarekomponenten sind getrennt über Drehschalter einschaltbar (Abb. 67). An den Schaltern liegt die jeweilige Versorgungsspannung an, durch Schließen der Schalter werden die Komponenten an den Schalteingängen mit Spannung versorgt. Bei der Schrittmotorsteuerung phyMOTION ist ein Relais zwischengeschaltet, da die Stromstärke die Spezifikation der verwendeten Schalter übersteigt. Der Navigationsrechner PC 1 verfügt über einen Batteriepack zum Ausgleich von möglichen Spannungsunterbrechungen. Beim Ausschalten über den zugehörigen Drehschalter am Bedienfeld wird der Rechner noch für fünf Minuten mit dem Akku weiterbetrieben. Danach fährt der Rechner automatisch herunter. Der DC-AC-Wandler verfügt über einen eigenen, direkt am Gerät befindlichen Schalter, deshalb wurde hier auf eine externe Schaltmöglichkeit am Bedienfeld verzichtet.

Die beiden Schalter *MKS-Betriebsmodus* und *MKS-Position* (Abb. 67), sowie das Steuerkreuz (Abb. 68) sind mit Digitaleingängen (EX.X) der phy-MOTION verbunden. Werden diese eingeschaltet, liegen am jeweiligen Eingang 24 V an, damit wertet die Steuerung diesen als gesetzt (Wert = S; ungesetzt = R) aus.

- MKS-Betriebsmodus Hand: E1.7 = S; E1.8 = R
- MKS-Betriebsmodus Auto: E1.7 = R; E1.8 = S
- MKS-Betriebsmodus 0: E1.7 = R; E1.8 = R
- MKS-Position 0: E1.2 = R
- MKS-Position 1: E1.2 = S

Die Notaus-Schalter im Front- und Heckbereich haben keine spannungsfreischaltende Funktion. Es wird lediglich jegliche Bewegung (Kameralageregelung und Fahrzeugbewegung) unterbrochen. Beim Wiedereinschalten setzt die Ausführung an der unterbrochenen Stelle fort. Die beiden Notaus-Schalter haben beide dieselbe Funktionalität. Der vordere Schalter ist über eine Kabelverbindung mit dem Schaltschrank verbunden. Diese ist über eine Steckverbindung trennbar (Abnahme des Kameragestells).

Der Spannungsanzeiger im Schaltschrank ist parallel zu den Fahrzeugakkumulatoren geschaltet und zeigt somit die Systemspannung an.

4.3.3 Schrittmotorsteuerung phyMOTION

Zur Lageregelung des MKS werden die Schrittmotoren an den Bewegungsachsen von der Schrittmotorsteuerung phyMOTION gesteuert (Abb. 62). Diese verfügt dazu über fünf Endstufen sowie integrierte Indexer zur Steuerung und Synchronisation der beiden Schrittmotoren für die Vertikalfahrt des MKS. Die Schrittmotorsteuerung enthält eine eigene CPU und kann mittels USB-Anschluss mit einem PC verbunden werden. Mit dem Konfigurationsprogramm phyLOGIC Toolbox kann die Steuerung parametrisiert werden (Abb. 69). Phytron stellt mit phyLOGIC eine eigene Programmiersprache zur Erstellung von komplexen Fahraufträgen zur Verfügung. Die entsprechenden Programme werden von der phyMOTION interpretiert und ausgeführt. Zur Nivellierung des MKS und zum manuellen Betrieb über das Steuerkreuz (Abb. 68) wurde das Programm PHENObot_auto.mpr in phyLOGIC geschrieben und in den Speicher der phyMOTION geladen. Dieses wird bei jedem Start der Steuerung automatisch ausgeführt. In der Hauptschleife erfolgt die Abfrage der Stellung des Drehschalters *MKS-Betriebsmodus* (Abb. 70). Im Modus *Hand* ist die Einstellung der horizontalen und vertikalen Achse per Steuerkreuz möglich. Im Modus *Auto* beginnt die Schwenkachse I die Referenzierung auf den Initiator MOP+, setzt an diesem Endschalter den Positionszähler auf null und fährt in Mittelstellung (Waagrechte). Danach beginnen die Achsen *Horizontal* und *Vertikal* parallel die Referenzierung. Die Achse *Horizontal* verfährt das MKS auf größtmöglichen Abstand zur potentiellen Laubwand, vertikal wird es in niedrigste Stellung gebracht. Im Folgenden kann das MKS manuell in die gewünschte Höhe und den gewünschten Abstand zur Laubwand gebracht werden. Dazu wird der Schalter *MKS-Position* eingeschaltet und damit das Steuerkreuz freigegeben. Ist die Positionierung abgeschlossen und *MKS-Position* wieder ausgeschaltet, können Nivellierbefehle von der Applikation PHENObotControl auf dem Navigationsrechner per serieller Schnittstelle empfangen werden. Dieses RS232-Telegramm setzt das Register R99 in der phyMOTION auf den Wert 1. Damit beginnt die automatische Nivellierung in dreifacher Wiederholung nach den Messwerten des Neigungssensors Kübler 8.IS40.22321 (Abb. 63). Nach Beendigung der Ni-

vellierung wird erneut die Stellung des Schalters *MKS-Betriebsmodus* abgefragt und die entsprechende Programmschleife aufgerufen.

```

1  *PROG*
2  while(E1.7==S && E1.8==R) {
3    U*HAND*
4  }
5  while(E1.8==S && E1.7==R) {
6    U*AUTO*
7  }
8  !*PROG*
9
10 *HAND*
11 U*MAINHAND*
12 UE*HAND*
13
14 *MAINHAND*
15 while(E1.3==S && E1.7==S && E1.1==S) {
16   M2.1L-
17   E1.3R
18   M2.1S
19 }
20 while(E1.4==S && E1.7==S && E1.1==S) {
21   M2.1L+
22   E1.4R
23   M2.1S
24 }
25 while(E1.5==S && E1.7==S && E1.1==S) {
26   M1.1L-
27   E1.5R
28   M1.1S
29 }
30 while(E1.6==S && E1.7==S && E1.1==S) {
31   M1.1L+
32   E1.6R
33   M1.1S
34 }
35 while (1.1!H || 1.3!H || 2.1!H) {
36   U*STOP*
37 }
38 if(E1.7==R) { !*PROG*
39 }
40 !*MAINHAND*
41
42 *AUTO*
43 U*HIVREF*
44 H
45 U*REV*

```

Abb. 69 *phyLOGIC Toolbox mit Ausschnitt des Programms PHENObot_auto.mpr zur Steuerung der Nivellierung.*

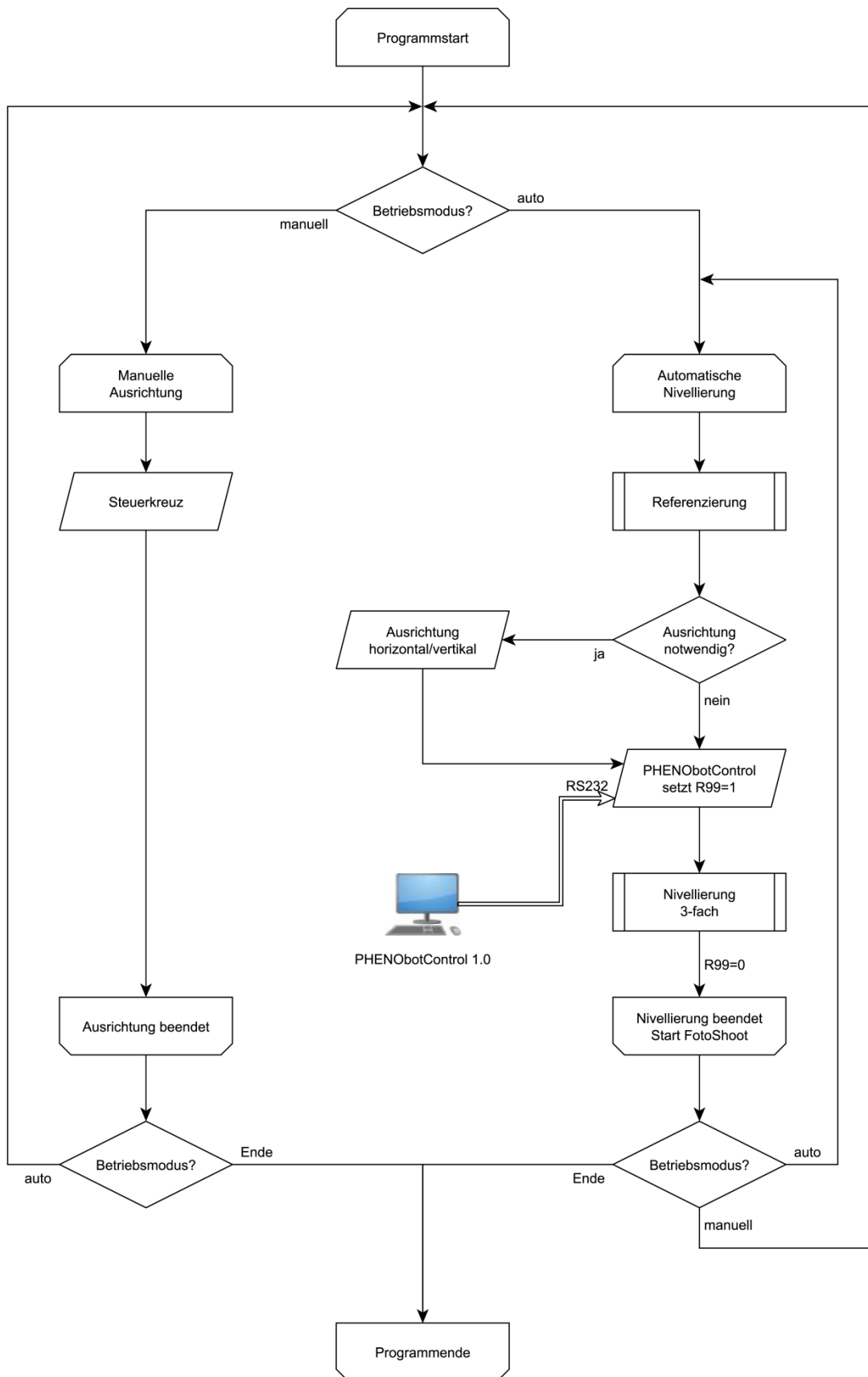


Abb. 70 Programmablauf Schrittmotorsteuerung PHENObot_auto.mpr.

4.4 Implementierung

Nach Abschluss der Aufbauarbeiten am Kameralageregelungssystem erfolgte die Implementierung des MKS in das Trägerfahrzeug. Dazu wurde der Profiltrahmen der Beleuchtungseinheit fest mit der inneren Drehgabel der kardanischen Aufhängung verschraubt. Den Abschluss bildete die Herstellung der Spannungsversorgung und der Datenverbindung. Die Beschreibung der ausführlichen Versuchsphase folgt in Kapitel 4.8.

4.5 PHENObotControl

Auf Basis der Erfahrungen mit der Testapplikation der Firma KMS wurde eine eigene Steuerungsapplikation entwickelt (Abb. 71). Die C++-Anwendung nutzt die von KMS zur Verfügung gestellte Bibliothek zur Verarbeitung und Ansteuerung von Parametern und Aufgaben.

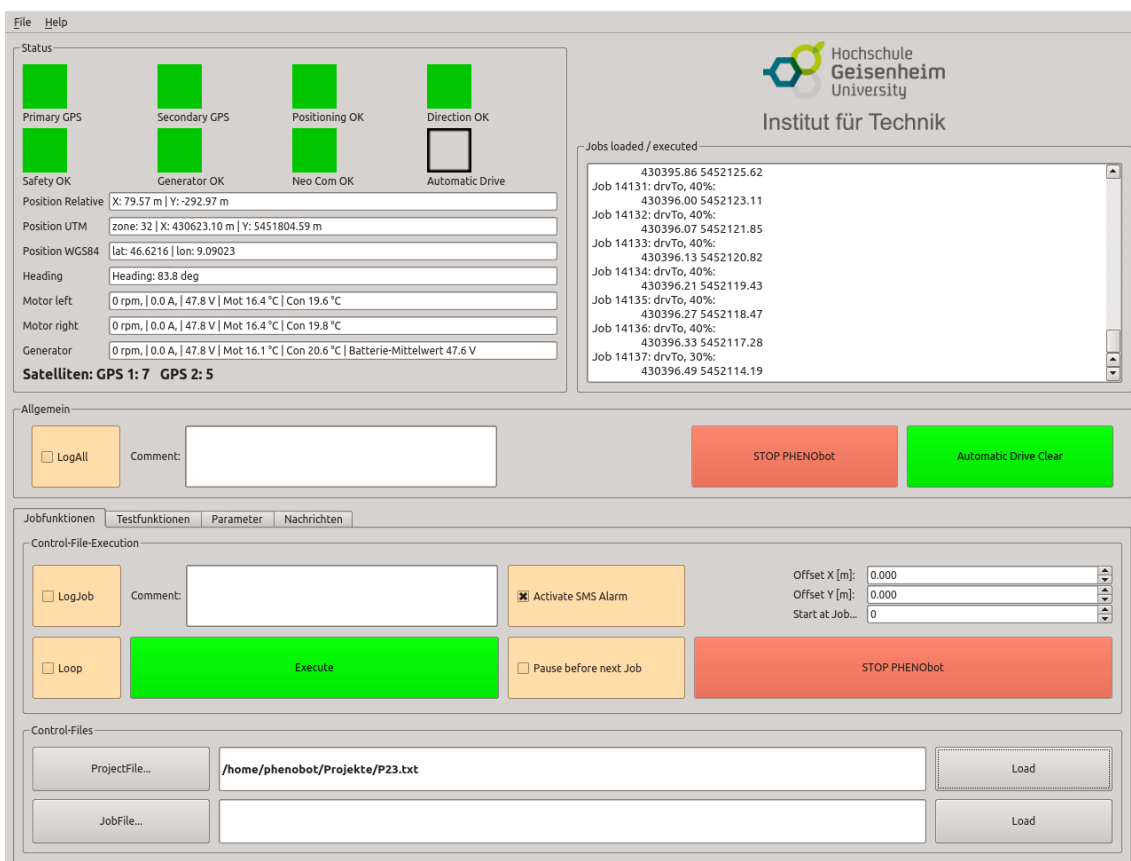


Abb. 71 Steuerungsapplikation PHENObotControl 1.0 (endgültiger Release).

Die Fahr- und Parametersteuerung wurde seitens KMS in der Bibliothek `libneosat.so` und den dazugehörigen Headerdateien `neosaterror.h`, `neosatjob.h` und `neosatlib.h` definiert. Eine Übersicht der definierten Strukturen, Datentypen und Funktionen der gesamten Applikation liefert Abb. 72. Die grünen und grauen Felder enthalten die Typdefinitionen, die Strukturen sind in den weißen Feldern beschrieben, die Funktionen der eigentlichen Applikation im gelben Feld. Zur Realisierung der grafischen Benutzeroberfläche ist die Qt-Bibliothek als C++-Klassenbibliothek eingebunden. Dabei wurde vor allem das Modul *Widgets* zur Erstellung der GUI verwendet. Die Elemente der GUI sind nach dem *Signal-Slot-Konzept* von Qt mit den Programmfunktionen verknüpft. Es wurden folgende Quellcodedateien erzeugt:

- `main.cpp/.h`,
- `mainwindow.cpp/.h`,
- `rs232neo.cpp/.h`.

In der Datei `main.cpp` wird das Hauptprogramm ausgeführt. Dieses ist in der Datei `mainwindow.cpp` definiert und wird als Funktion `MainWidget()` in der Datei `main.cpp` aufgerufen.

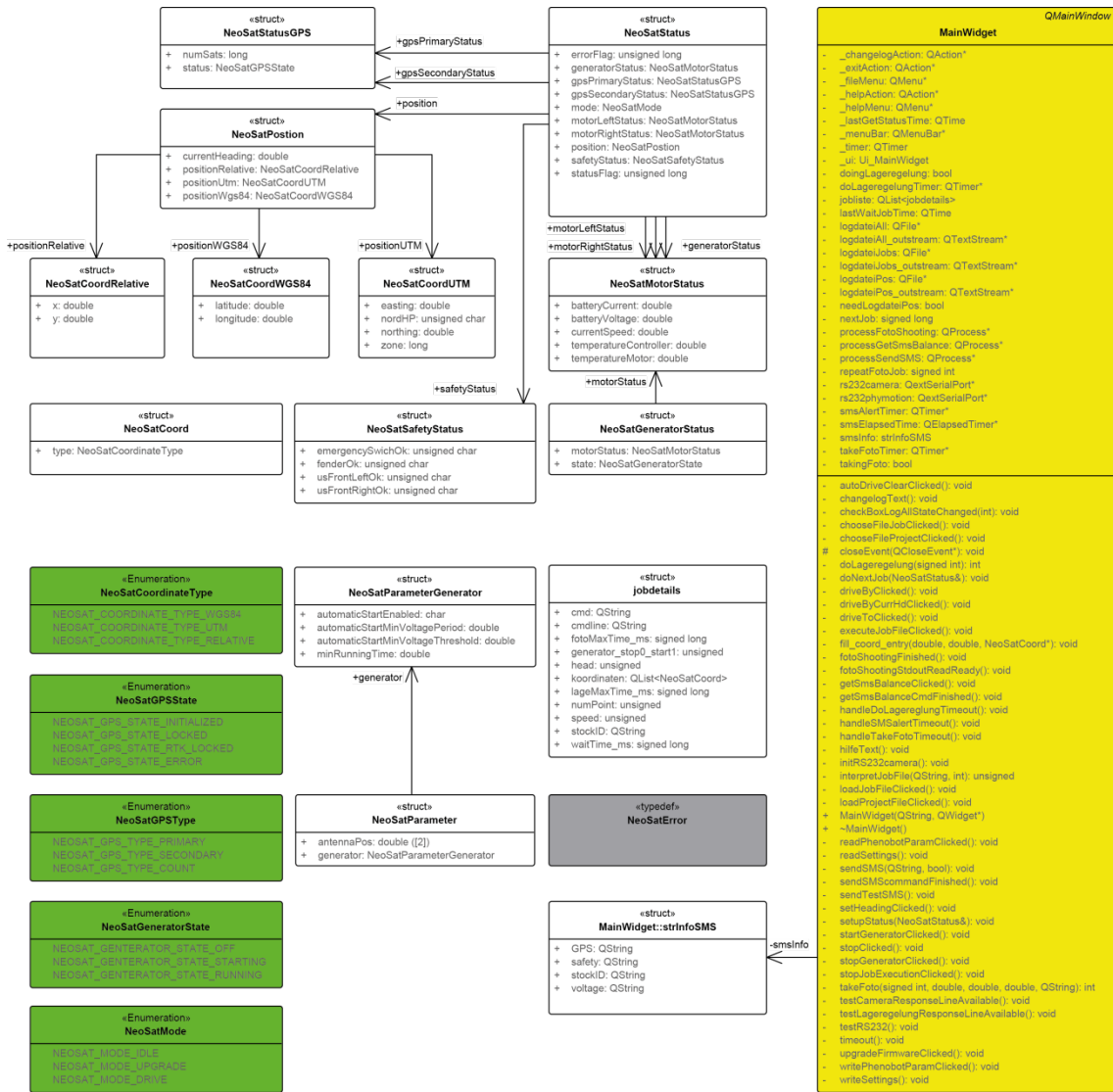


Abb. 72 Gesamtübersicht der Programmfunktionen, Strukturen und Datentypen der Applikation PHENObotControl.

Die zentrale Anwendung des Steuerungsprogramms ist die Interpretation von Fahraufträgen und anderen Aufgaben wie Initiieren der MKS-Niveauregulierung sowie Triggern des MKS. Zur Kommunikation mit der phyMOTION Schrittmotorsteuerung und dem Bildrechner über zwei serielle Schnittstellen wurde die Bibliothek QextSerialPort implementiert. Die Funktionen der Lageregelung und Bildauslösung sind in der Datei `rs232neo.cpp` definiert. Der Funktionsaufruf erfolgt aus der Datei `mainwindow.cpp`.

Die Ausführung der Aufträge wird durch Kommandos initiiert. Diese müssen zusammen mit Koordinaten in einer Textdatei vorliegen (vgl. Kap. 4.6). Mögliche Kommandos sind:

- `drvTo`, [...] (Fahrauftrag mit Geschwindigkeitsangabe [%]),
- `setHd`, [...] (Einstellen eines Headings mit Angabe eines Winkels),
- `wait`, [...] (Wartezeit mit Zeitangabe [ms]),
- `doCmd`, [...] (Ausführung eines Kommandozeilenbefehls),
- `foto`, [...] (Triggern des Bildrechners mit Wartezeit [ms]),
- `lage`, [...] (Triggern der Lageregelung mit Wartezeit [ms]),
- `logPos` (Erzeugen einer Log-Datei vgl. Kap. 3.7.1),
- `generator`, [...] (Ein-[Arg=1] bzw. Ausschalten [Arg=0] Generator).

Die Textdateien (Joblisten) werden mit sechs Spalten angelegt (Abb. 73). In den ersten beiden sind die UTM-Koordinaten (X, Y) enthalten, die vom `drvTo`-Befehl interpretiert werden. Die Spalten drei und fünf beinhalten Indices zur Sortierung der Punkte beim Export aus der GIS-Software (vgl. Kap. 4.6). In Spalte vier kann eine Identifikationsmöglichkeit (`stockID`) eingefügt werden. Die letzte Spalte enthält die Kommandos. Alle Befehle werden sequentiell interpretiert und abgearbeitet. Im Beispiel (Abb. 73) wird in Zeile 2 die Koordinate des Stockes mit der ID 23-001-072 mit einer Geschwindigkeit von 30 % der Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit angefahren. Es folgt eine Wartezeit von 200 ms, danach wird die Nivellierung des MKS ausgelöst. Nach der Wartezeit von 4 500 ms erhält der Bildrechner das Telegramm zur Auslösung des MKS. Die Erfolgsmeldung der Bildauslösung muss innerhalb von 6 000 ms erfolgen. Schließlich wird nach 500 ms Wartezeit der nächste Job ausgeführt.

```

1 430476.169500|5452118.773100|73|23-001-E|72|drvTo,30,wait,500
2 430475.996800|5452122.068600|72|23-001-072|71|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
3 430475.938458|5452123.140772|71|23-001-071|70|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
4 430475.866781|5452124.458021|70|23-001-070|69|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
5 430475.806218|5452125.571011|69|23-001-069|68|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
6 430475.738166|5452126.821648|68|23-001-068|67|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
7 430475.677321|5452127.939812|67|23-001-067|66|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
8 430475.551148|5452130.272039|66|23-001-066|65|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
9 430475.508391|5452131.044333|65|23-001-065|64|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
10 430475.444686|5452132.215057|64|23-001-064|63|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
11 430475.378618|5452133.429237|63|23-001-063|62|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
12 430475.310855|5452134.674542|62|23-001-062|61|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
13 430475.243134|5452135.919081|61|23-001-061|60|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
14 430475.125461|5452138.095084|60|23-001-060|59|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
15 430475.083049|5452138.861043|59|23-001-059|58|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
16 430475.024561|5452139.935907|58|23-001-058|57|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
17 430474.954593|5452141.221746|57|23-001-057|56|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
18 430474.893575|5452142.343092|56|23-001-056|55|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
19 430474.827284|5452143.561369|55|23-001-055|54|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500
20 430474.707915|5452145.768544|54|23-001-054|53|drvTo,30,wait,200,lage,4500,foto,6000,wait,500

```

Abb. 73 Ausschnitt einer Joblist (Geilweilerhof, Parzelle 23, Reihe 1) mit Koordinaten, Reihenfolge-Indices, stockIDs und Kommandos.

Das Telegramm, das über die serielle Schnittstelle an den Bildrechner gesendet wird, setzt sich in diesem Falle (Abb. 73, Zeile 2) wie folgt zusammen:

```
, $PosReached, 430475.9968 5452122.0686 357.1 23-001-072 `.
```

Mit dem Schlüsselwort `$PosReached` wird dem Bilderfassungsprogramm IGG Geotagger auf dem Bildrechner signalisiert, dass die Position zur Bildaufnahme vor dem Stock 72 in der ersten Reihe der Parzelle 23 erreicht wurde und die Bildauslösung erfolgen kann. Die hier verwendeten Koordinaten für X und Y wurden beispielhaft aus der Jobdatei (Abb. 73) entnommen. Im realen Fall werden diese von der positionsgebenden GPS-Antenne I übernommen und sind um die Fahrzeugorientierung ($357,1^\circ$) und die Offsetparameter zu korrigieren, um die auf den Fahrzeugmittelpunkt bezogene Position zu erhalten (vgl. Kap. 0). Bei erfolgreicher Bildaufnahme sendet der Bildrechner ein weiteres Telegramm über die serielle Schnittstelle an den Navigationsrechner mit dem Inhalt `$OK` zurück. Diese Nachricht muss innerhalb der Timeout-Schwelle empfangen werden, die in der Jobdatei mit dem Foto-Befehl definiert wurde (z. B. 6 000 ms). Ansonsten geht die Applikation von einem Fehler bei der Bilderfassung aus und sendet den Foto-Befehl ein weiteres Mal. Erfolgt auch in diesem Fall keine positive Rückmeldung vom Bildrechner, pausiert die weitere Jobausführung und sendet einen SMS-Alarm. Der Benutzer muss den Fehler bei der Bilderfassung beheben und das Pausieren beenden. Danach wird ein

weiteres Mal versucht an der gleichen Position die Bildaufnahme auszulösen. Diese Prozedur wird solange wiederholt bis eine positive Rückmeldung empfangen wird. Die Daten aus dem Telegramm legt die Aufnahmesoftware IGG Geotagger zusammen mit Positionsdaten des RTK-Systems der Firma Trimble in einer Textdatei im Bildordner ab. Damit können bei der Bildauswertung die Positionsdaten und die ID den Bildern eindeutig zugeordnet werden.

Trotz objektorientierter Programmierung wird in Abb. 74 ein Programmablaufdiagramm zur Erläuterung der Arbeitsweise der Steuerungsapplikation gezeigt.

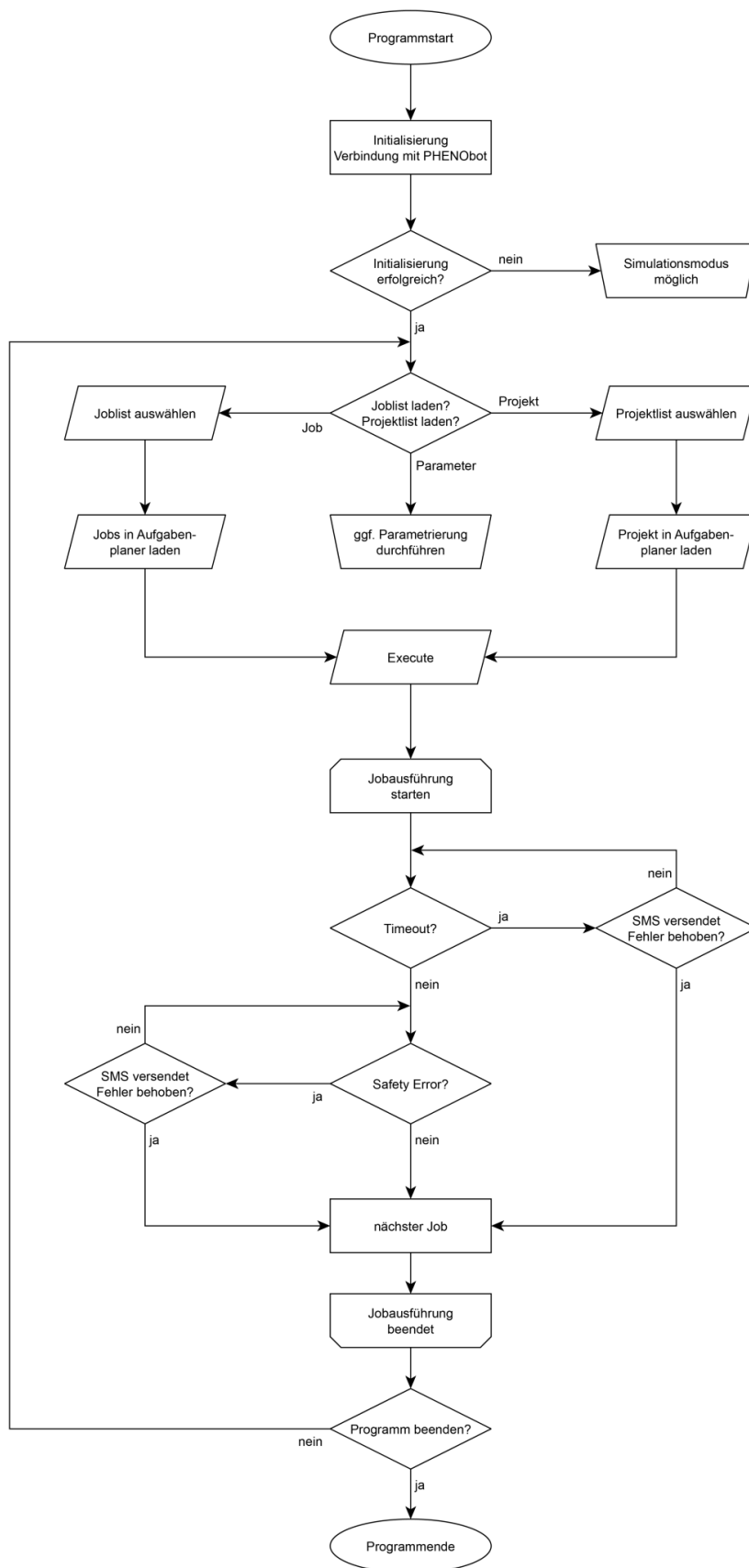


Abb. 74 Programmablauf PHENObotControl 1.0

Nach dem Programmstart werden die Verbindung zum Mikrocontroller und der Fahrzeugstatus überprüft (Abb. 75).

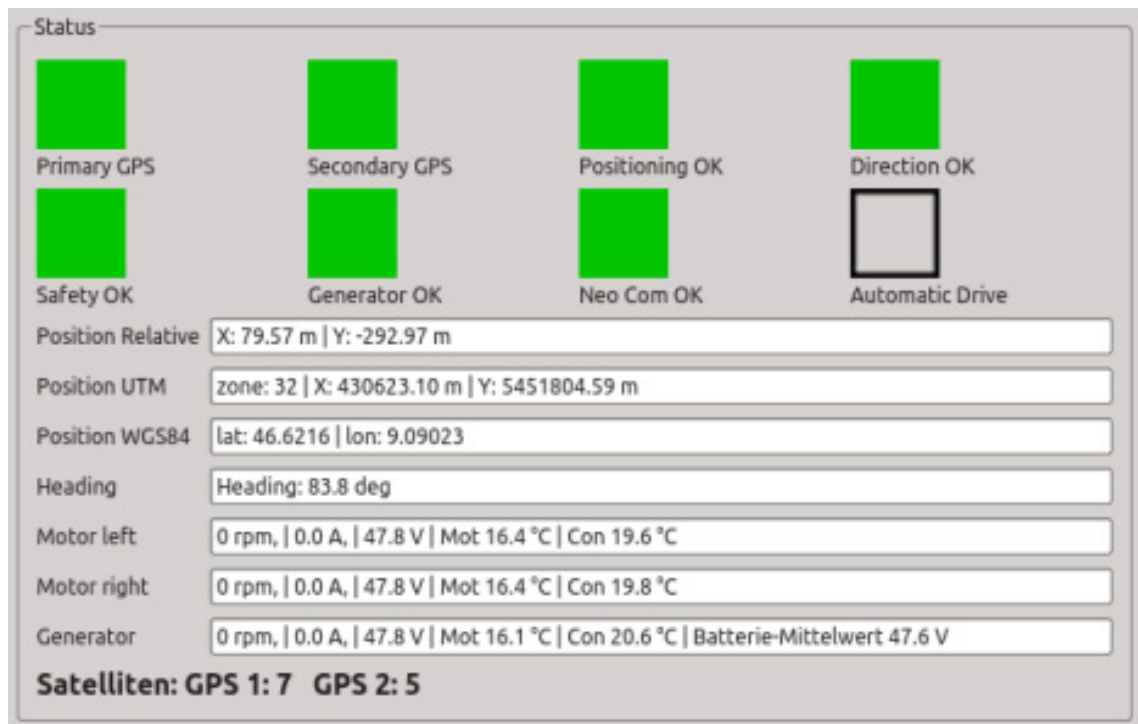


Abb. 75 Statusbereich PHENObotControl 1.0 nach erfolgreicher Initialisierung.

Ist das Ergebnis negativ, ist trotzdem ein Simulationsmodus möglich. Dazu kann im Programm eine Checkbox zum Ignorieren des Fahrzeugstatus angewählt werden. Bei erfolgreicher Initialisierung können Job- oder Projektlisten (vgl. Kap. 4.6) ausgewählt und geladen werden (Abb. 76).

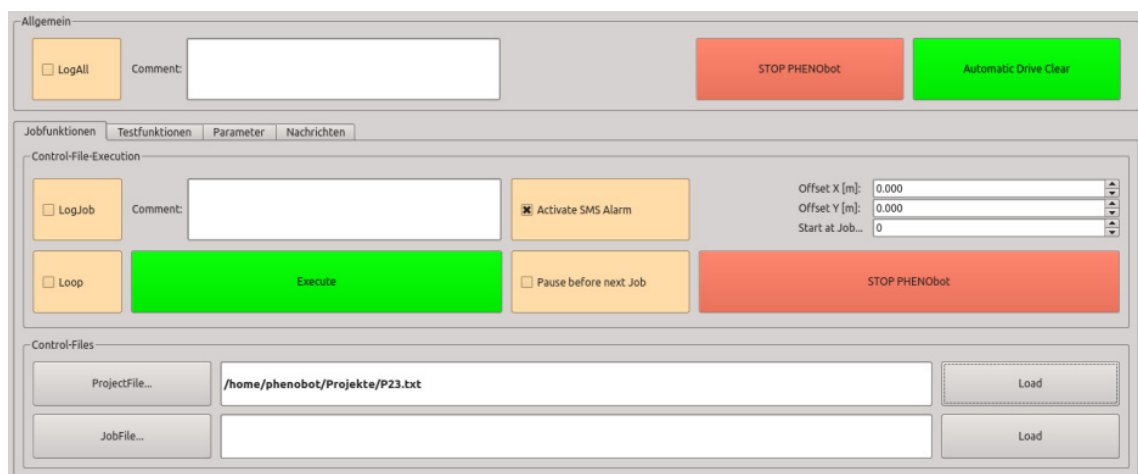


Abb. 76 Zentrales Bedienfeld mit Auswahlbereich der Job- oder Projektliste im unteren Bereich.

Diese werden durch Betätigen der Schaltfläche *Load* in den Aufgabenplaner der Applikation geladen (Abb. 77). Es können durch Anwählen von Checkboxen die Protokollfunktionen `logAll` und `logJob` sowie die Wiederholungsfunktion `Loop` aktiviert und auf Wunsch die SMS-Alarmierung deaktiviert werden. Zu den Protokollfunktionen kann ein Kommentar angegeben werden, der in den Dateinamen der Protokolldatei und den Header eingefügt wird. Durch Betätigen der Schaltfläche *Execute* wird die Jobausführung mit Quittierung gestartet. Die Schaltfläche *Stop* bricht die Ausführung ab.



Abb. 77 Aufgabenplaner, während der Ausführung wird die sequentielle Abarbeitung Schritt für Schritt dargestellt.

Bei aktivierter SMS-Alarmierung beginnt mit jedem Einzeljob ein Countdown-Timer bis zu dessen Ablauf der Job ausgeführt sein muss. Ist dies nicht der Fall, pausiert die Ausführung und es erfolgt eine SMS-Benachrichtigung an den Benutzer. Wird eine Sicherheitseinrichtung (Ultraschallsensor, Anfahrtschild oder Notausschalter) betätigt und ebenfalls die Timeout-Schwelle überschritten, kommt es wiederum zu einer Benutzerbenachrichtigung. Nach Beheben des Fehlers durch den Benutzer und Quittieren durch Abwählen der Pausenfunktion (automatische Setzung bei einem Fehler), wird die Jobausführung fortgesetzt. Nach Ausführung

des letzten Jobs der Liste bleibt das Fahrzeug an der letzten definierten Koordinate stehen und ist bereit zum Laden und Ausführen der nächsten Liste. Die Beendigung der Joblist schließt auch die Protokolldatei der `logJob`-Funktion ab. Mit der Loop-Funktion ist die endlose Ausführung einer Job- oder Projektliste (beispielsweise zur Präsentation) möglich. Die Programmoberfläche kann durch den Benutzer nach Abschluss aller Aufgaben beendet werden.

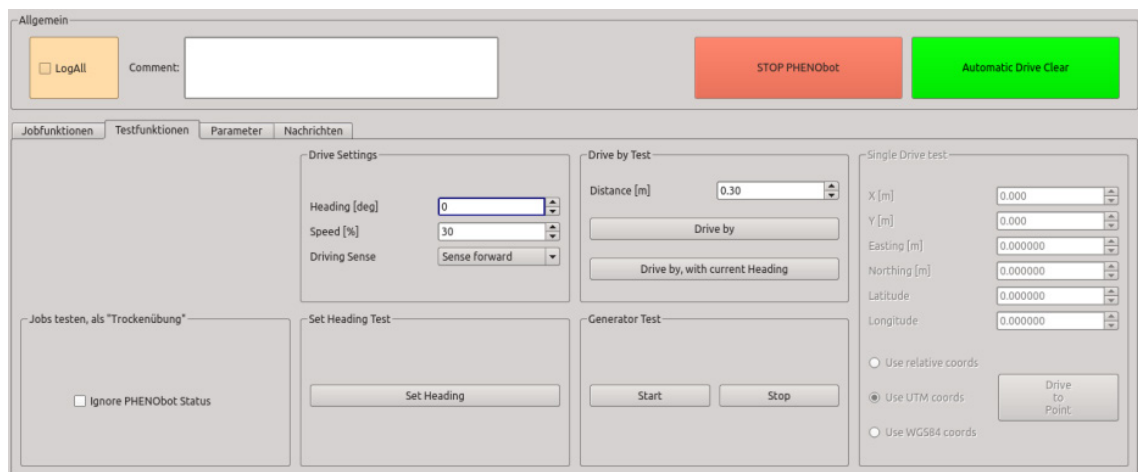


Abb. 78 Register Testfunktionen von PHENObotControl 1.0

Im Register *Testfunktionen* (Abb. 78) der Applikation können diverse Gerätfunktionen erprobt werden. Durch Aktivieren der Checkbox *Ignore PHENObot Status* kann der Simulationsmodus ohne verbundenen PHENObot oder ohne ausreichenden Satellitenempfang gewählt werden, um Job- oder Projektdateien im Vorfeld auf Konsistenz prüfen zu können. Im Bereich *Drive Settings* kann das Fahrzeug manuell in eine gewünschte Orientierung bei gegebener Drehgeschwindigkeit gebracht werden. Der Modus *Drive by Test* ermöglicht das manuelle Fahren um eine bestimmte Strecke entweder mit den Parametern aus den *Drive Settings* oder mit aktuell vorliegender Fahrzeugorientierung in Dezimalgrad. Zusätzlich kann der Generator manuell gestartet oder gestoppt werden. Der Bereich *Single Drive Test* wurde nur während der Testphase benötigt und ist deshalb in der endgültigen Version deaktiviert worden.

Abb. 79 Register Parameter zur Einstellung von Fahrzeug- und Programmparametern.

Im Register *Parameter* (Abb. 79) können vier Fahrzeugparameter konfiguriert werden. Der Wert *Einschaltswelle* definiert die Spannungsschwelle in Volt, die für die Zeit *Unterschreitungzeit* in Sekunden unterschritten sein muss, um den Generator einzuschalten. Die Felder *Antenne Position* geben den Offset der GPS-Positionsantenne in X- und Y-Richtung relativ zum Fahrzeugmittelpunkt an. Diese Fahrzeugparameter können zunächst aus dem Fahrzeug-Mikrocontroller gelesen und dann konfiguriert werden.

Im Feld *Tiefentladung Schwelle* kann eine untere Spannungsgrenze definiert werden, um im Falle einer Generatorfehlfunktion (z. B. fehlender Treibstoff) eine Tiefentladung der Akkumulatoren zu verhindern. Wird diese Schwelle unterschritten, pausiert die Jobausführung automatisch (Abb. 76) und es erfolgt ein SMS-Alarm. Die Timeout-Schwelle, nach der die Jobausführung pausiert und ein SMS-Alarm ausgelöst wird, kann im Feld *Alarmierung nach...* definiert werden. Die Telefonnummer zum Erhalt der SMS-Alarmierung kann ebenfalls in diesem Bereich angegeben werden. Bei Verwendung einer Prepaidkarte zum Versenden der SMS kann über die Schaltfläche *Guthaben abfragen* das Restguthaben der Karte überprüft werden. Zum Versenden der SMS wurde ein handelsüblicher UMTS-Internetstick an den Navigationsrechner angeschlossen und mittels udev-Regel eindeutig identifizierbar gemacht. Das Versenden der SMS erfolgt über die Kommandozeilenanwendung *Gammu* aus der Applikation PHENObotControl heraus. Die Guthabenabfrage wurde über das Senden eines USSD-Codes realisiert. Im Register *Nachrichten* werden die Status-

meldungen der SMS-Alarmierung und das Telegramm zum Auslösen des MKS als Textprotokoll angezeigt.

4.6 Navigation

Der integrierte Routenplaner des Trägerfahrzeuges wird durch die entsprechenden, vom Hersteller KMS zur Verfügung gestellten, Bibliotheken angesteuert. Die Koordinaten müssen zweidimensional als UTM-Koordinaten (vgl. Kap. 2.1 und 4.4) vorliegen. Zur reinen Navigation sind die Koordinaten mit dem zugehörigen `drvTo`-Befehl und eine Geschwindigkeitsangabe ausreichend. Im Zuge der Erprobungsfahrten erwies es sich zur weiteren Verarbeitung und Auswertung der aufgenommenen Bilder als hilfreich, eine Identifikationsnummer mitzuführen und den Bildnamen zuzuweisen. Deshalb wurde das in Kapitel 4.4 beschriebene Format der Textdateien zur Steuerung des PHENObot festgelegt.

Zu Beginn der Erprobung konnten nur sog. Relativkoordinaten vom Trägerfahrzeug interpretiert werden. Diese bezogen sich auf die Koordinaten der RTK-Basisstation und wurden als Gitterkoordinaten in der Einheit Meter in einem rechts- und hochweisenden Koordinatensystem ausgewiesen. Um die als UTM-Koordinaten vorliegenden Stockinformationen des JKI Geilweilerhof verarbeiten zu können, wurde die Fahrzeugbibliothek um diese Funktionalität (UTM) erweitert. Es war allerdings nur möglich WGS84 als Datumsformat zu wählen, weshalb eine Kalibrierung analog zur Methode in Kapitel 3.6.1 notwendig war. Mit einem externen RTK-System wurde die Position der PHENObot-Basisstation in UTM/ETRS89 eingemessen. Die ermittelten Koordinaten wurden mit einem Konfigurationstool in die Firmware der Basis übertragen. Abb. 80 zeigt den Status der Basisstation nach Anschluss an einen Rechner per USB und Aufruf des Tools. Es werden die Anzahl der empfangenen Satelliten, die Spannung der Stromversorgung, die Position Länge/Breite in Dezimalgrad und die aktuelle Elevationsmaske in Grad angezeigt. Zudem geben die beiden Status-LEDs Auskunft über den generellen GPS-Status und das Senden eines Korrektursignals. Abb. 81 zeigt den Einstellungsdialog, in dem die Referenzposition nach Bestimmung mit einem externen System eingegeben werden kann. Bei der Eingabe der

Höhe ist die Berücksichtigung der Undulation zu beachten; es wird die WGS-Höhe eingegeben. Mittels der Schaltflächen *Send* und *Save* werden der Basis die neuen Parameter mitgeteilt. Solange sich die eingegebene Position und die über das GPS-Modul ermittelte Position um weniger als 2 m unterscheiden, verwendet die Firmware die manuelle Referenzposition.

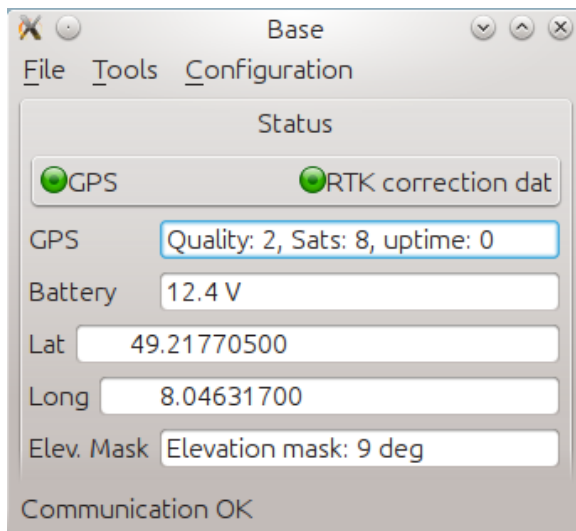


Abb. 80 Statusanzeige Firmware RTK-Basis PHENObot.

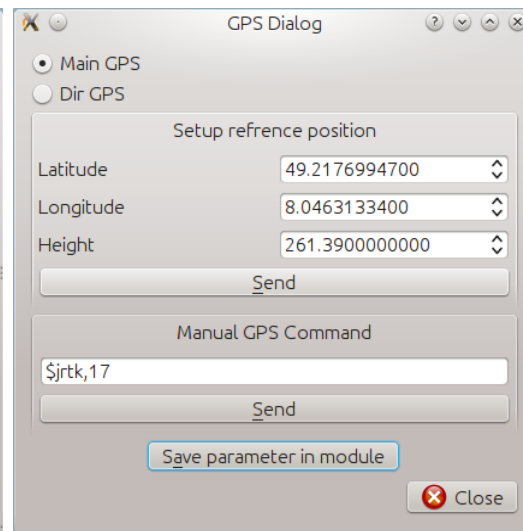


Abb. 81 Manuelles Setzen der Referenzposition der RTK-Basis PHENObot.

Bei den ersten Erprobungsfahrten im Hof des Institutes für Technik wurden die Zielpunkte manuell in der GIS-Software GRASS GIS gesetzt. Dies bot die Möglichkeit an der Attributtabelle der verknüpften Datenbank Änderungen grafisch und per Kommandozeilenbefehl durchzuführen. In diese Attributtabelle wurden Spalten gemäß der Jobdateistruktur eingefügt und mit Daten (Punktreihenfolge und Kommandos) versehen (Abb. 82).

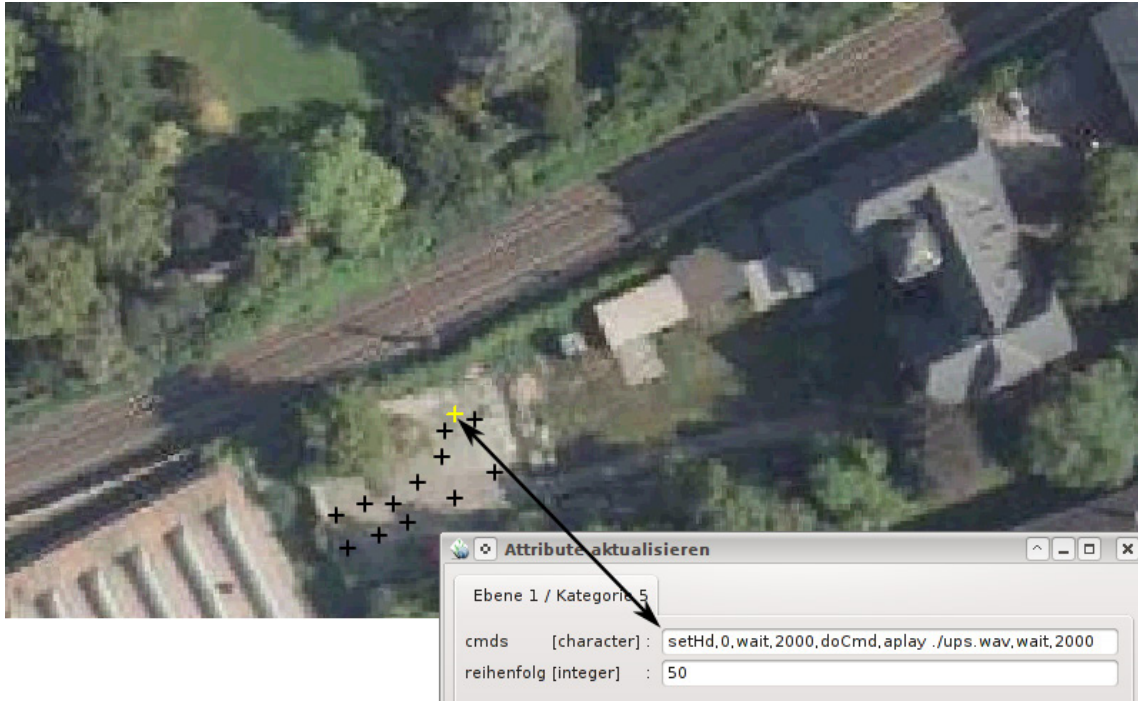


Abb. 82 Festlegung eines Testparcours während der ersten Erprobungsfahrten mit Daten der Attributtabelle: Kommandos (cmds) und Punktreihenfolge (reihenfolge).

Die Punkte wurden mit dem Digitizer-Tool von GRASS GIS gesetzt. Um diese realitätsgenau platzieren zu können, wurde ein Ausschnitt eines georeferenzierten Luftbilds aus dem Geoportal des Landes Hessen (Hessenvier) in das Projekt eingefügt. Der Koordinatenursprung wurde auf die Position der RTK-Basisstation gelegt um mit den Relativkoordinaten des Trägerfahrzeugs in Bezug zu kommen. Mit dem Kommandozeilenbefehl `v.out.ascii` wurde die auf diese Weise erzeugte Vektorkarte in eine Textdatei exportiert:

```
v.out.ascii input=vektorkarte@mapset columns=reihenfolge,cmds |  
sort -t "|" -k 4 -g > /home/phenobot/jobfiles/beispiel.txt
```

Dabei werden die Koordinaten sowie die Spalten `reihenfolge` und `cmds` mit ausgegeben und in der Datei nach der Spalte `reihenfolge` (Spalte 4) sortiert. In dieser Form ist die erzeugte Textdatei für das Steuerungsprogramm als Jobdatei les- und verwertbar.

Um die vorliegenden Stockkoordinaten in verwertbare Jobdateien zu konvertieren, wurde ein Arbeitsablauf entwickelt.

4.6.1 Import

Um textbasierte Dateiformate in GRASS GIS als Vektorkarte einlesen zu können, kann der Befehl `v.in.ascii` verwendet werden. Die Stockkoordinaten müssen demnach entweder als Textdatei oder als csv-Datei bereitgestellt werden. Gemäß dem Jobdatei-Aufbau wurde ebenfalls ein Schema zur Erstellung dieser Quelldateien erstellt. Als Format wurde der Typ csv gewählt.

Aufbau Quelldatei mit Stockkoordinaten:

1. Spalte Rechtswert (x, Easting),
2. Spalte Hochwert (y, Northing),
3. Spalte StockID (1. Punkt als Index S, Letzter Punkt als Index E),
4. Spalte Reihenfolge, durchlaufen von 0 bis n,
5. Spalte ID für Erkennung 1. (0) und letzter Punkt (1), die restlichen Stöcke bleiben leer,
6. Spalte Erkennung Biegerichtung: mit Fahrtrichtung = 1, gegen Fahrtrichtung = 2, Mitte (kein Bogen) = 0.

Weitere Vorgaben:

- Koordinaten mit 3 Dezimalstellen,
- Komma durch Punkt als Dezimaltrenner ersetzen,
- Als Trennzeichen zwischen den Spalten | verwenden,
- Bei der Spalte Easting die 32 als Zonenpräfix entfernen,
- Keine Spaltenüberschriften verwenden,
- Für jede Reihe eine Datei,
- Benennung:
P [Parzellenummer] R [Reihennummer] .csv → Bsp.: P23R1.csv.

Auszug einer Koordinatenquelldatei:

```

430471.952|5452213.893|23-001-S|0|0|0
430471.952|5452213.893|23-001-001|1||2
430472.094|5452212.648|23-001-002|2||2
430472.149|5452211.469|23-001-003|3||2
430472.215|5452210.198|23-001-004|4||2
430472.286|5452209.042|23-001-005|5||2
430472.335|5452207.825|23-001-006|6||1
430472.448|5452206.013|23-001-007|7||2
430472.556|5452204.846|23-001-008|8||2
430472.609|5452203.713|23-001-009|9||2
430472.638|5452202.425|23-001-010|10||2
...
430476.935|5452122.318|23-001-E|73|1|0

```

Beispiel für den Import-Befehl:

```

v.in.ascii
input=/home/phenobot/Koordinaten/Geilweilerhof/P23/P23R1.csv
output=P23R1 x=1 cat=0

```

Mit diesem Befehl wird die Quelldatei als Vektorkarte in GRASS GIS eingelesen und eine verbundene Datenbank mit Attributtabelle erzeugt.

4.6.2 Verarbeitung

Die eingelesenen Stockkoordinaten müssen danach weiter bearbeitet werden. Das Trägerfahrzeug kann die Koordinaten nicht direkt verwenden, da die Fahrspur in der Mitte der Gasse zwischen den Rebzeilen liegen muss. Zunächst ist es notwendig die Orientierung der Zeile zu kennen. Dazu wurde zu Beginn auf der GUI von GRASS GIS manuell eine Linie durch den ersten und letzten Punkt der betreffenden Reihe gezogen und deren Azimut abgelesen. Damit konnten trigonometrisch mit Kenntnis des Zeilenabstands Transformationsparameter zur Verschiebung der Koordinaten in die Gassenmitte errechnet werden. Auf gleiche Weise wurden auch die Verschiebungen der Wendepunkte im Vorgewende, sowie die Haltepunkte in der Bogenmitte abhängig von der Biegerichtung bestimmt.

Befehle für die Transformation (\$NAME ersetzt den Reihennamen P23R1):

```

v.transform input=$NAME@RLP output=${NAME}drv xshift=0.9986
yshift=0.0523;
v.edit map=${NAME}drv@RLP tool=move move=-0.1832,3.4952 where=check=0;
v.edit map=${NAME}drv@RLP tool=move move=0.1832,-3.4952 where=check=1;

```



```
v.edit map=${NAME}drv@RLP tool=move move=-0.0065,0.1248 where=dir=1;
v.edit map=${NAME}drv@RLP tool=move move=0.0065,-0.1248 where=dir=2;
```

Damit wird die Vektorkarte P23R1drv in der Gassenmitte unter Berücksichtigung der Biegerichtung erzeugt und die Wendepunkte in 3,5 m Abstand zum letzten Stock in das Vorgewende gelegt. Zudem sind Benennungen der Spaltennamen notwendig. Dazu wird der Befehl `v.db.renamecol` verwendet. Mit dem Befehl `v.db.addcol` wird eine Spalte für die Kommandos hinzugefügt, die mit dem Befehl `v.db.update` mit den auszuführenden Kommandos beschrieben wird.

4.6.3 Export

Die Punkte der erzeugten Vektorkarte für die betreffende Reihe werden wiederum mit dem Befehl `v.out.ascii` exportiert:

```
v.out.ascii input=${NAME}drv@RLP columns=id,reihenfolg,cmds | sort -t
|" -k 5 -g > /home/phenobot/geilweilerhof/P23/${NAME}.txt;
```

4.6.4 Workflow

Um den notwendigen manuellen Eingriff bei Verarbeitung der Stockkoordinaten zu Jobdateien und die damit verbundenen potentiellen Fehler zu minimieren, wurde im Laufe der Erprobungsphase ein bash-Skript zur automatisierten Ausgabe entwickelt. An dieser Stelle wird der grundsätzliche Ablauf dargestellt. Bei der halbautomatischen Verarbeitung wurde stets GRASS GIS mit GUI gestartet und danach wurden die einzelnen Befehle in die in GRASS laufende Kommandozeileninstanz eingegeben. Zur vollständigen Automatisierung wurde ein umgebendes Skript erstellt, welches GRASS als reine Kommandozeileninstanz und das eigentliche Transformationskript als Umgebungsvariable startet:

```
#!/bin/bash
export GRASS_BATCH_JOB=${HOME}/transform.sh
chmod u+x ${HOME}/transform.sh

grass -text ${HOME}/grassdata/UTM_Hessen_RLP/RLP

unset GRASS_BATCH_JOB
```

Damit beginnt das Transformationskript (Abb. 83) und überprüft zunächst, ob tatsächlich eine GRASS GIS Instanz läuft. Danach werden in

Benutzerdialogen Abfragen gestellt und Pfade zu Quelldateien sowie Zielordnern definiert. Während der Zwischenschritte werden etliche Dateien erzeugt, die in einem temporären Ordner gespeichert werden, dessen Inhalt nach Beendigung des Skriptes gelöscht wird. Die Arbeitsweise des Skriptes ist bewusst destruktiv, es werden alle bereits existierenden, gleichnamigen Zieldateien überschrieben.

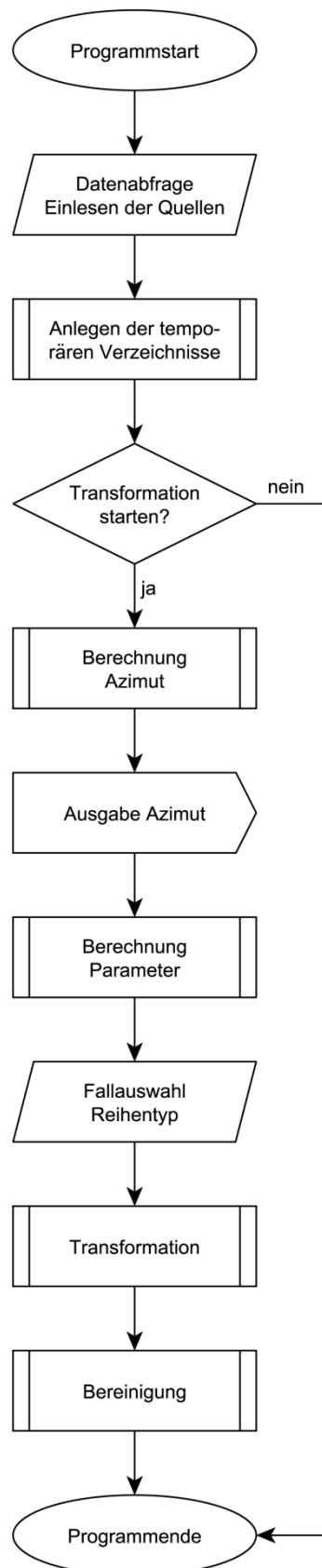


Abb. 83 Ablauf Transformationskript.

Abhängig von der Bearbeitungsrichtung und der Aufnahmeseite der Rebzeile gibt es verschiedene Transformationsszenarien. Der PHENObot kann nur, in Fahrtrichtung gesehen, Bilder auf der rechten Seite aufnehmen. In der weinbaulichen Praxis ist es durchaus üblich, die Gassen zwischen den Rebzeilen alternierend zu begrünen. Aufgrund der erhöhten Witterungsbeständigkeit der Begrünung wird oftmals nur in den begrüneten Gassen gefahren. Deshalb unterscheiden sich die Aufnahmeseiten und damit auch die Verschiebung der Stockkoordinaten in die Gassenmitte mit jeder zweiten Zeile. Es wurde in Anlehnung an das Benennungsschema am JKI Geilweilerhof die Unterscheidung in gerade und ungerade Reihen getroffen. Weiterhin sind die Richtung der Befahrung und die jeweilige Lage der zu befahrenden Gasse ausschlaggebend. Damit ergeben sich unter Berücksichtigung des Reihentyps acht mögliche Fälle zur Verschiebung der Koordinaten (Abb. 84).

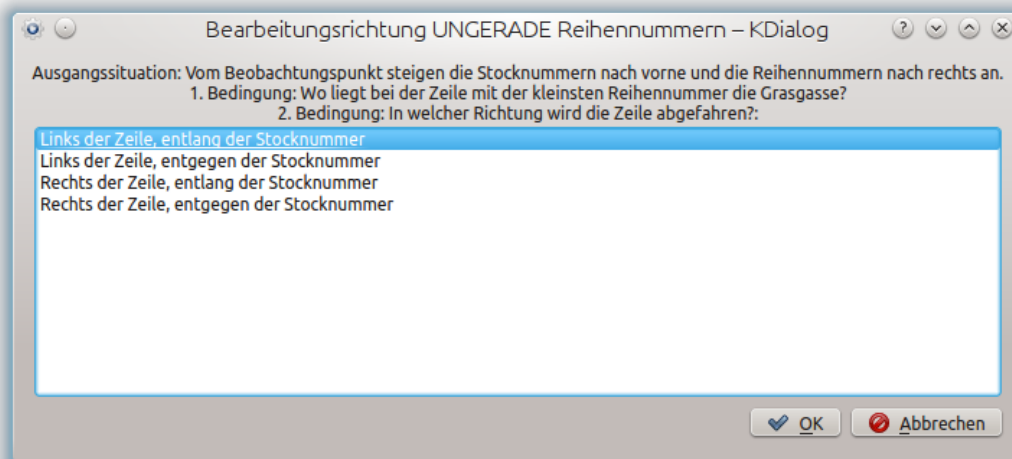
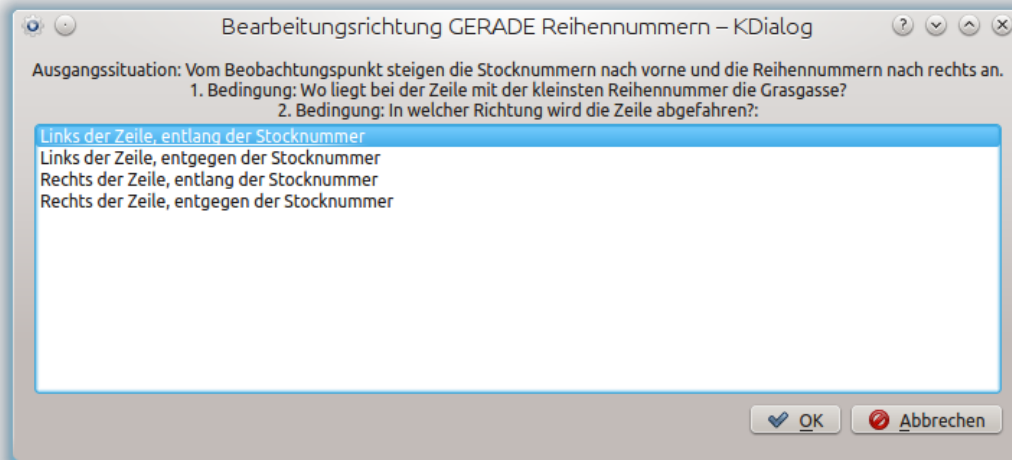


Abb. 84 Fallabfrage zur Transformation der Stockkoordinaten. Oben: Gerade Reihennummern.
Unten: Ungerade Reihennummern.

Für beide Hauptunterscheidungen, gerade und ungerade, werden jeweils vier Fälle aufgelistet. Bei der Beantwortung der Fragestellung geht der Benutzer davon aus, vor der betreffenden Parzelle zu stehen und aufsteigende Stocknummern in Sichtrichtung und aufsteigende Reihennummern zu seiner Rechten vorzufinden. Dann wird für jeden Typ abgefragt, auf welcher Seite der Reihe mit dem kleinsten Index die begrünte Gasse liegt und ob entlang oder entgegen der aufsteigenden Stocknummer gefahren werden muss.

Nach dem Einlesen der Quelldateien wird abgefragt, welche Kommandos an jedem Haltepunkt durchgeführt werden sollen (Abb. 85).



Abb. 85 Angabe der auszuführenden Kommandos (Jobs).

Während der Erprobungsphase wurde empirisch der zeitoptimale Ablauf des Bilderfassungsvorgangs mit Nivellierung ermittelt. Diese Abfolge mit Wartezeiten wurde als Vorauswahl in das Skript eingefügt, so dass der Anwender lediglich quittieren muss.

Im nächsten Schritt wird der Azimut als Mittelwert aller eingelesenen Rebzeilen vom Skript berechnet:

```
for FILENAME in `cat $DATFILE`; do
NAME=${FILENAME%.csv};
head --lines=1 ${DIR}/${FILENAME} > ${TMPDIR}/${NAME}linestart.txt;
tail --lines=1 ${DIR}/${FILENAME} > ${TMPDIR}/${NAME}linelast.txt;
paste -s ${TMPDIR}/${NAME}linestart.txt ${TMPDIR}/${NAME}linelast.txt
> ${TMPDIR}/${NAME}lines.txt;
v.in.lines input=${TMPDIR}/${NAME}lines.txt output=${NAME}lines;
v.category input=${NAME}lines@${MAPSET} output=${NAME}line@${MAPSET}
option=add;
v.db.addtable map=${NAME}line@${MAPSET};
v.db.addcol map=${NAME}line@${MAPSET} columns="azimut double
precision";
v.to.db map=${NAME}line@${MAPSET} type=line option=azimut
units=degrees columns=azimut;
db.out.ogr input=${NAME}line dsn=${DIRDIR}${NAME}line.csv format=CSV
g.remove vect=${NAME}line@${MAPSET}, ${NAME}lines@${MAPSET};
done
```

Es werden jeweils Linien durch die Anfangs- und Endpunkte gelegt und deren Winkel in einer csv-Datei ausgegeben. Diese einzelnen Dateien werden ausgelesen, der Wert für die Orientierung schrittweise an eine weitere Textdatei angehängt, aus den Einzelwerten der Mittelwert errechnet und die Differenz zur Nordrichtung ausgegeben (Abb. 86):

```
ls ${DIRDIR} > "$TMPDIR"dirdat.lst
DIRDATFILE="$TMPDIR"dirdat.lst
```

```
#Mit dieser Schleife wird der Azimut jeder Zeile aus der exportierten
csv ausgelesen und an eine Textdatei angehängt.
for FILENAME in `cat $DIRDATFILE`; do
DIRNAME=${FILENAME%.csv};
cat ${DIRDIR}${DIRNAME}.csv | head -21 | tail -11 | cut -d\, -f2 >>
${DIRDIR}/dir.txt
done

#Es wird der Mittelwert der aufgelisteten Azimut-Werte ausgerechnet
und die Differenz zur Nordrichtung (180°) berechnet
MEAN=`awk '{a = a + $1} END {print a / FNR}' ${DIRDIR}/dir.txt`
NORTH=180
GRAD=`echo "scale=2 ; $NORTH-$MEAN" | bc`
```

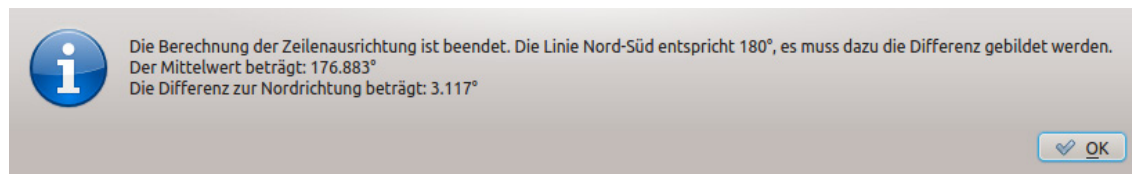


Abb. 86 Ausgabe des Azimut und der Differenz zur Nordrichtung.

Im Anschluss werden die Parameter Zeilenbreite, Korrektur des Haltepunktes in der Mitte des Bogens und der Abstand des Wendepunktes in einem Dialogfeld abgefragt (Abb. 87).

Bitte die Parameter zur Verschiebung der Koordinaten eingeben. Als Dezimaltrenner ist der Punkt zu verwenden!

Zeilenbreite in Meter

Ausgleich der Bogenlänge in Meter

Abstand Wendepunkt-Endverankerung in Meter

Cancel OK

Abb. 87 Parameterabfrage zur Berechnung der Transformationsparameter.

Diese Werte werden in Variablen gespeichert und fließen in die Berechnung der Transformationsparameter ein:

```
#Trigonometrische Berechnung der Transformationsparameter
varRAD=`echo "scale=10 ; a(1)/45" | bc -l`
HZEILE=`echo "scale=3 ; $ZEILE/2" | bc`
XSHIFT=`echo "scale=4 ; c($GRAD*$varRAD)*$HZEILE" | bc -l`
YSHIFT=`echo "scale=4 ; s($GRAD*$varRAD)*$HZEILE" | bc -l`
CXSHIFT=`echo "scale=4 ; c($GRAD*$varRAD)*$CHECK" | bc -l`
CYSHIFT=`echo "scale=4 ; s($GRAD*$varRAD)*$CHECK" | bc -l`
DXSHIFT=`echo "scale=4 ; c($GRAD*$varRAD)*$BOGEN" | bc -l`
DYSHIFT=`echo "scale=4 ; s($GRAD*$varRAD)*$BOGEN" | bc -l`
```

Aufgrund von Ungenauigkeiten beim Einmessen der Rebstöcke mit dem RTK-Vermessungssystem (z. B. GPS-Antenne nicht lotrecht über dem

Messpunkt), wurden während der Erprobungsphase stärkere Gierbewegungen um die Hochachse bei sequentieller Anfahrt mehrerer Punkte festgestellt. Diese Abweichung von der linearen Fahrspur durch die Rebasse ging mit Fehlansrichtungen des MKS zur Laubwand einher. Aus diesem Grund wird im Skript die zur Azimutberechnung erzeugte Linie als Begradigungsachse der Punktkette herangezogen. Von jedem Punkt wird der senkrechte Abstand zu dieser Linie bestimmt und als Attribut in der Datenbank gespeichert. Mit diesen Werten wird eine neue Vektorkarte erzeugt, deren Punkte nun auf der generierten Linie liegen und somit eine Glättung der Fahrspur ergeben:

```
v.distance --o to=${NAME}lines from=${NAME}@${MAPSET} out=connectors
upload=to_x,to_y col=x,y;
v.db.select -c ${NAME}@${MAPSET} col=x,y,id,reihenfolg,check,dir,a,b
file=${TMPDIR}/${NAME}select.txt;
v.in.ascii input=${TMPDIR}/${NAME}select.txt output=${NAME}l x=1
cat=0;
```

Der Transformations- und Exportvorgang wurde bei der Skriptentwicklung von der semiautomatischen Version übernommen, lediglich die Parameter wurden durch die Variablen ersetzt.

Für jeden der acht Fälle wurde eine Transformationsschleife als eigenständige Funktion geschrieben. Je nach Abfrageergebnis wird bei Ausführung des Skriptes bei den geraden und ungeraden Reihennummern die jeweilige Funktion aufgerufen:

```
#Fallauswahl und Funktionsaufruf
case "$ORIENTG" in
  0) left_along_g;;
  1) left_con_g;;
  2) right_along_g;;
  3) right_con_g;;
esac

case "$ORIENTU" in
  0) left_along_u;;
  1) left_con_u;;
  2) right_along_u;;
  3) right_con_u;;
esac
```

Vor Beendigung des Skriptes erfolgt eine Bereinigung der temporär erzeugten Dateien und Ordner.

Als Ergebnis erhält der Anwender einen Ordner mit Jobdateien für jede eingeleseene Rebzeile. An jedem Punkt, auch an den Wendepunkten, werden die identischen Einzelkommandos ausgeführt. Ist dies nicht gewünscht, müssen die einzelnen Dateien manuell geändert werden. Die erzeugten Jobdateien können über die Schaltfläche *JobFile* der Applikation PHENObotControl 1.0 in den Aufgabenplaner geladen werden.

In der Regel sind bei der Bonitur jedoch mehrere Rebzeilen sequentiell zu befahren. Zu diesem Zweck ist die Funktion *ProjectFile* in PHENObotControl vorhanden. Diese liest Textdateien aus, in denen die Pfade zu einzelnen Jobdateien aufgelistet sind. Somit können Projekte modular aus verschiedenen Reihen, Gerätefunktionen und Anfahrtswegen aufgebaut werden. Als Beispiel für eine Gerätefunktion ist die Jobdatei zum Einschalten des Generators mit dem Kommando `generator, 1` zu nennen.

Auszug der Projektdatei P23.txt

```
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R1.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R2.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R3.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R4.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/GeneratorOn.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R5.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R6.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R7.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R8.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/GeneratorOn.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R9.txt  
/home/phenobot/Projekte/geilweilerhof/P23/P23R10.txt
```

Zur Erstellung dieser Projektdateien wurde ebenfalls ein bash-Skript geschrieben:

```
#!/bin/bash  
if ! DIR=$(kdialog --title "Bitte das JobList-Verzeichnis wählen!" --  
getexistingdirectory ${HOME}/Projekte/); then  
exit;  
fi  
  
if ! PROJECT=$(kdialog --title "Projektname eingeben" --inputbox  
"Bitte den Projektnamen eingeben!"); then  
exit;  
fi  
  
if ! SORTDIR=$(kdialog --title "Sortierrichtung" --radiolist "Auswahl  
der Sortierrichtung:" 0 "Vorwärts (Ordnerreihenfolge)" on 1  
"Rückwärts" off); then  
exit;  
fi
```

```
function out_along {  
find / -path "${DIR}/*.txt" 2>/dev/null | sort -t "/" -k 5 --version-  
sort > ${HOME}/Projekte/${PROJECT}_along.txt;  
}  
  
function out_con {  
find / -path "${DIR}/*.txt" 2>/dev/null | sort -t "/" -k 5 --version-  
sort -r > ${HOME}/Projekte/${PROJECT}_reverse.txt;  
}  
  
case "$SORTDIR" in  
  0) out_along;;  
  1) out_con;;  
*)  
esac
```

Hier wird der Inhalt des Joborders ausgelesen und entweder alphabetisch oder in entgegengesetzter Richtung als Projektdatei ausgegeben.

4.6.5 Bearbeitung in QGIS

Das GIS-Programm QuantumGIS wurde eingesetzt um die Ergebnisse der Koordinatentransformation zu visualisieren und zu überprüfen. Ebenso wird es für die Auswertung der Erprobungs- und Messfahrten eingesetzt.

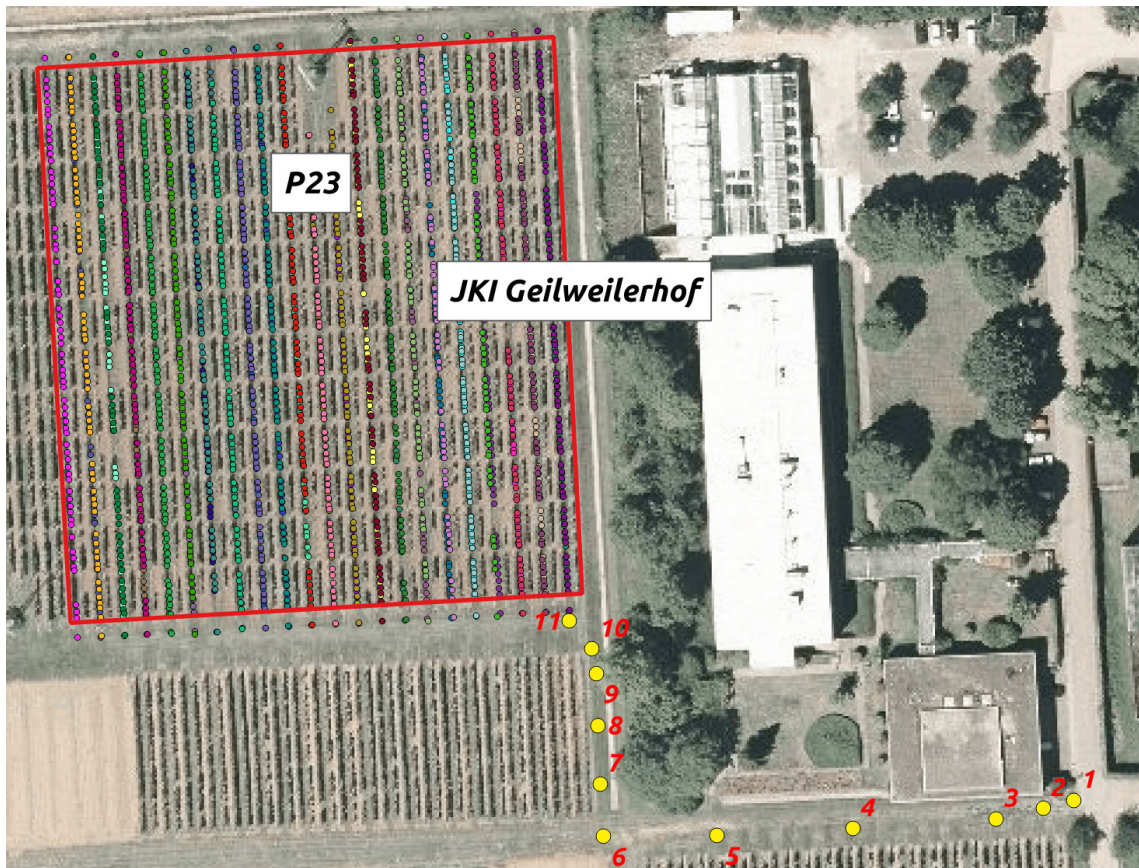


Abb. 88 Fahrpfade P23 mit Zuwegung (gelb).

Ein weiterer Anwendungsfall war die Erzeugung der Zuwegungs-Jobdateien. Abb. 88 zeigt die generierten Fahrpfade in der Parzelle 23. Die gelben Punkte wurden manuell mit dem Digitizer-Tool von QGIS in einen Vektorlayer des GRASS GIS Projektes gesetzt. Mittels eines weiteren Skripts ist es möglich diese manuell erzeugten Vektorkarten in Jobdateien zu exportieren. Dabei kann in Benutzerdialogen die Quellkartenauswahl erfolgen. Anschließend wird über den Befehl `v.out.ascii` die gewählte Karte exportiert. Es ist die Wahl der Punktreihenfolge möglich.

Die Besonderheit von QGIS liegt in der Verknüpfungsmöglichkeit mit GRASS GIS. Dies geschieht mit dem GRASS Erweiterungspaket. Hiermit können zum einen direkt sämtliche Layer eines GRASS GIS Projektes in ein QGIS Projekt eingebunden werden. Zum anderen stehen etliche GRASS GIS Werkzeuge in QGIS zur Verfügung, womit die eingebundenen GRASS-Layer extern in QGIS bearbeitet werden können.

4.7 Virtuelle Maschine

Die Verarbeitung und Transformation der Stockkoordinaten wird größtenteils mit bash-Skripten eines Linux-Systems durchgeführt. Ebenso sind die verwendeten Installationen von GRASS GIS und QGIS in diesem System beheimatet. Um unabhängig vom Betriebssystem und der Rechnerausstattung des Anwenders zu bleiben, und um weiteren Installations- und Konfigurationsaufwand zu vermeiden, wurde das eingesetzte System in einer virtuellen Maschine (VMware Player 6.0) aufgesetzt (Abb. 89). Damit ist der Einsatz in den meisten Gastsystemen unabhängig vom Betriebssystem möglich.



Abb. 89 Virtuelle Maschine zur Transformation und Konfiguration der RTK-Basisstation PHENObot

Die virtuelle Maschine wurde komplett konfiguriert und kann direkt verwendet werden. Es ist möglich eine Sicherungskopie des Ur-Zustandes zu bewahren und bei Bedarf wieder einzuspielen. Als Betriebssystem wurde Kubuntu 12.04.4 LTS verwendet. Es wurden alle notwendigen Programme und die genannten Skripte installiert und ausführlich getestet.

4.8 Versuchsfahrten

Alle beschriebenen Versuchsfahrten wurden mit dem bereits modifizierten Versuchsträger auf Basis des Neosat Alpin durchgeführt. Alle Erkenntnisse zum Neo Alpin sind dem Kapitel 4.1 zu entnehmen.

4.8.1 Erprobungsfahrten Geisenheim

Mit Verfügbarkeit der satellitengestützten Navigation im Frühjahr 2013 wurden erste Versuche mit dem Trägerfahrzeug durchgeführt

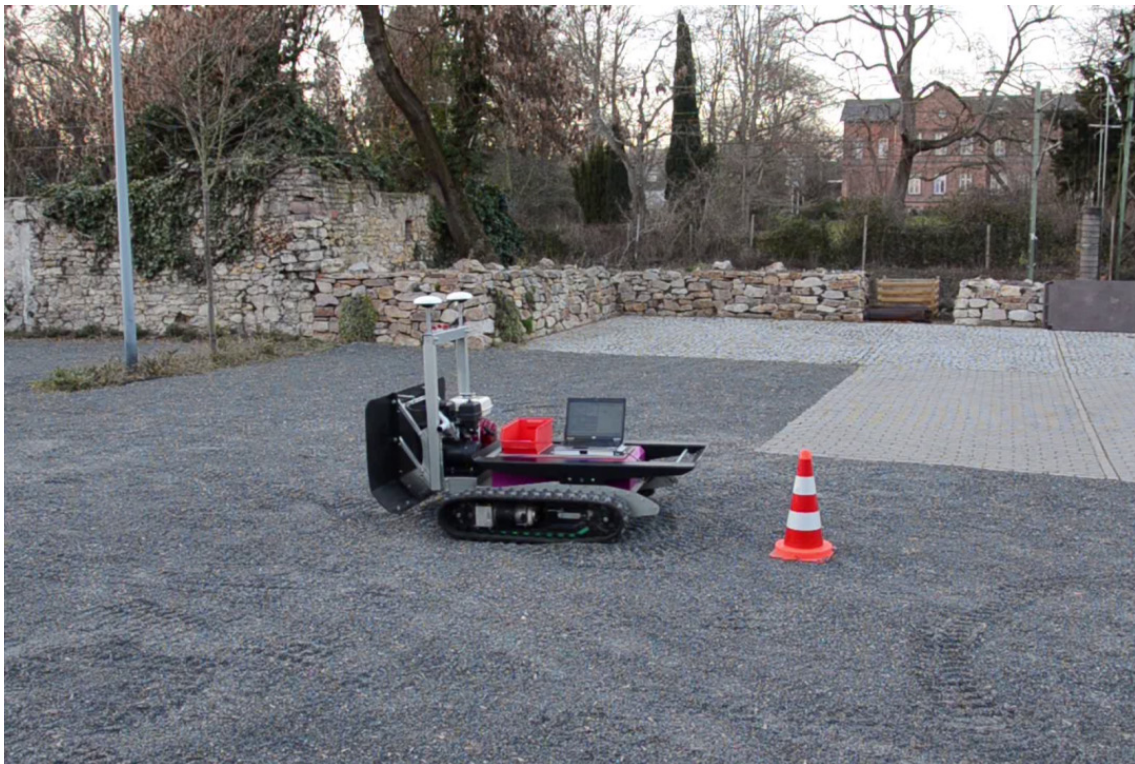


Abb. 90 Erste Erprobungsfahrten mit Neosat Alpin im Hof des Institutes für Technik.

Abb. 90 zeigt den Neosat Alpin im Hof des Institutes für Technik der Hochschule Geisenheim. Es wurde ein Testparcours (Abb. 82) festgelegt und unter Verwendung von Relativkoordinaten abgefahren. Die Wendepunkte wurden bei der ersten Fahrt mit Pylonen im Drehpunkt seitlich am jeweils inneren Kettenlaufwerk markiert. Die absolute Abweichung lag bei fünf Überfahrten, gemessen zu den Pylonen, unter 50 mm.



Abb. 91 Erste Erprobungsfahrten mit Neosat Alpin im Hof des Institutes für Technik. Rote Markierung: Position der RTK-Basis.

Die RTK-Basisstation wurde zur Erprobung auf dem Dach des Institutsgebäudes montiert (Abb. 91). Bei Tests waren im Hof Abschattungseffekte und Abhängigkeiten vom Tagesgang bei Satellitenverfügbarkeit feststellbar. Die Anzahl empfangener Satelliten (SV) lag am Rover auf offenem Gelände zu Zeiten mit der größten Verfügbarkeit zwischen acht und zehn SV pro Modul. An Fahrpositionen, wie sie Abb. 91 zeigt, wurden zu normalen Empfangszeiten zwischen sechs und sieben SV empfangen. In Zeiten geringer Verfügbarkeit lag die Anzahl der SV teilweise unter fünf. Dabei wurde die Fahrt unterbrochen. In der Fahrzeugbibliothek wurde eine untere Schwelle von mindestens fünf verfügbaren SV zum automatischen Fahrbetrieb definiert. Zur Planung der Erprobungs- und Messfahrten wurde die Planungsanwendung PlanningOnline der Firma Trimble eingesetzt (Abb. 92). Zum Aufnahmezeitpunkt (7. März 2013, 13:35 Uhr) von Abb. 91 waren nach PlanningOnline (Abb. 92) neun SV bei einer Elevation von 10° am Standort Geisenheim sichtbar. Es liegen für diese Fahrt keine automatisch protokollierten Zahlen von verfügbaren SV vor, da diese Funktion zu diesem Zeitpunkt noch nicht in der Steuerungsapplikation implementiert

war. Nach manuellen Aufzeichnungen lag die Zahl im gezeigten Bereich zwischen sechs und sieben SV.

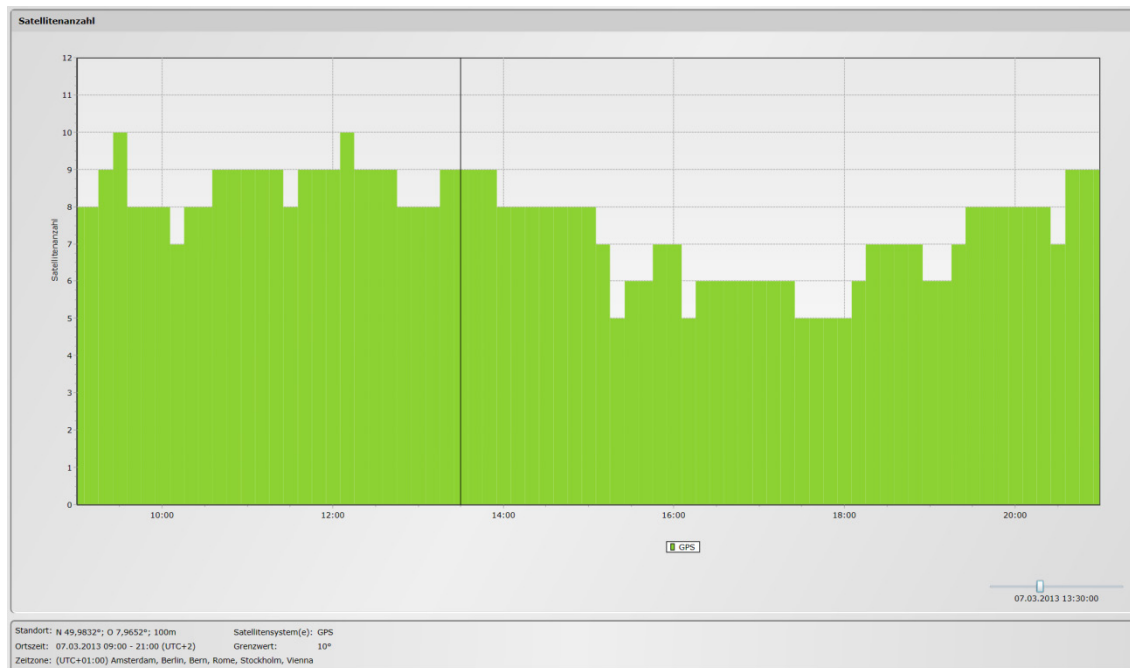


Abb. 92 Vorhergesagte Sichtbarkeit der GPS SV in Geisenheim am 7. März 2013, 9:00-21:00 Uhr mit PlanningOnline (<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

In Zeiten sehr guter Verfügbarkeit kam es während der Erprobungsfahrten einige Male zum Verlust des Korrektursignals. Dokumentierte Beispiele hierfür sind der 31. August (16:46 Uhr) und der 1. September 2013 (16:41 Uhr). Zu diesen Zeitpunkten blieb das Trägerfahrzeug unvermittelt bei der Fahrt stehen. Die Protokolldatei der Steuerungsapplikation gibt für den Rover neun verfügbare SV an. Für das GNSS-Modul der Basisstation war eine solche automatische Ausgabe mit Dokumentation nicht verfügbar. Bei Betrachtung der sichtbaren SV in PlanningOnline zeigt sich für diesen Zeitraum ein Anstieg auf zehn SV (Abb. 93). Die Anzahl der verfügbaren SV konnte jedoch auf dem Display der Basisstation abgelesen und manuell dokumentiert werden. Die Anzahl lag größtenteils bei zehn, kurzzeitig auch bei elf SV.

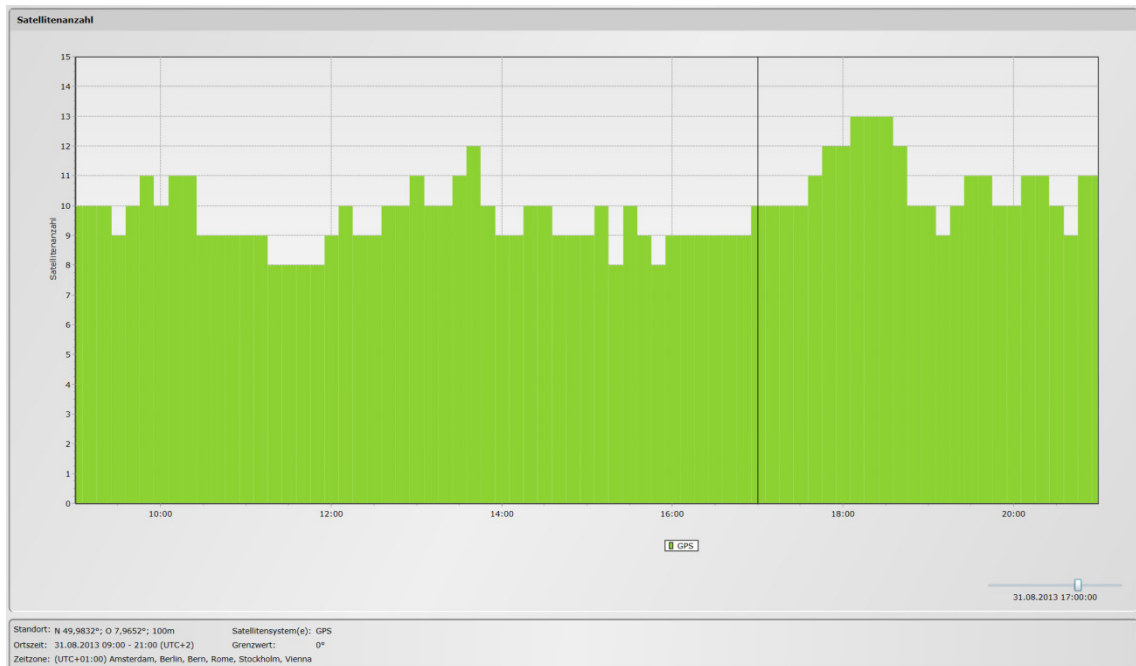


Abb. 93 Vorhergesagte Sichtbarkeit der GPS SV in Geisenheim am 31. August 2013, 9:00-21:00 Uhr. Elevation auf 0° gesetzt, da die Basis keine sichtbaren Abschattungen hatte. PlanningOnline (<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Die Erprobungsfahrten in den Jahren 2013 und 2014 dienten hauptsächlich der Überprüfung, dem Debugging und der Optimierung der Steuerungsapplikation, der Navigation und dem Arbeitsablauf. Für die Steuerungsapplikation PHENObotControl sind bis zum endgültigen Release 1.0 28 größere Versionsänderungen dokumentiert (siehe Versionsgeschichte PHENObotControl im elektronischen Anhang). Im August 2013 war die Überarbeitung der Fahrzeugbibliothek zur Verwendung von UTM-Koordinaten abgeschlossen. Der Versatz zwischen den Datumsformaten ETRS89 und WGS84 wurde bis zur Wiederinbetriebnahme des externen RTK-Vermessungssystems der Firma Trimble im Frühjahr 2014 manuell über zwei Offsetparameter in der Steuerungsapplikation ausgeglichen. Mit der Kalibrierung des Standorts der RTK-Basisstation auf das Datumsformat ETRS89 war diese manuelle Verschiebung obsolet.



Abb. 94 Fahrspuren vor (gelb) und nach (rot) der Kalibrierung mit dem Datumsformat ETRS89 (identische Jobdatei).

Abb. 94 zeigt die Verschiebung der Fahrspur nach der Kalibrierung. In den folgenden Erprobungsfahrten konnte dies in der Versuchsanlage des Instituts für Rebenzüchtung überprüft und nachvollzogen werden. Die Einmessung der Stockkoordinaten und die Kalibrierung der RTK-Basis wurden mit dem gleichen Vermessungssystem durchgeführt. In der Folge konnte der Versuchsträger nach der Transformation der Stockkoordinaten mit Nutzung der korrekten Gassenbreite exakt mittig in die Gasse einfahren (Abb. 95).



Abb. 95 PHENObot in der Versuchsanlage des Instituts für Rebenzüchtung, Hochschule Geisenheim. Korrekte Fahrspur nach Kalibrierung der Position der RTK-Basisstation.

Im Zuge dieser Versuche wurden auch erste Tests in der Dämmerung durchgeführt. Bei diesen Fahrten kamen die Kamerabeleuchtungsbalken zum Einsatz (Abb. 96). Es wurde eine grobe Ermittlung der reinen elektrischen Reichweite angestellt. Bei einer mittleren Reihenlänge von 65 m konnten im Durchschnitt sechs vollständige Reihen mit Beleuchtung abgefahren werden, bevor der Generator bei 42 V Systemspannung automatisch zugeschaltet wurde. Daraus ergibt sich eine Boniturleistung von 300 Stöcken oder 702 m² pro Akkuladung.

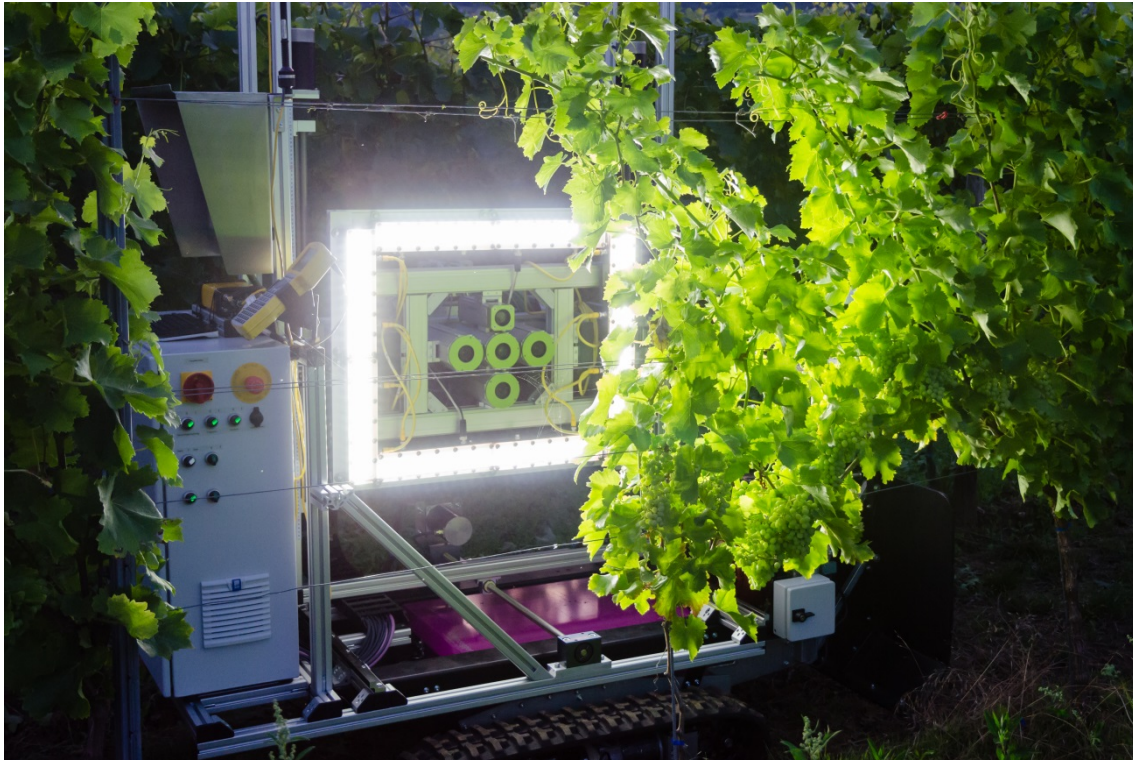


Abb. 96 PHENobot bei Bildaufnahme mit LED-Beleuchtungsbalken.

4.8.2 Messfahrten Geisenheim

In Abb. 97 wird die Anzahl der verfügbaren Satelliten in Abhängigkeit von der GPS-Antenneneinstellung dargestellt. Die Messungen wurden in dreifacher Wiederholung in den Reihen 33 (linke Teilabbildungen) und 34 (rechte Teilabbildungen) der Versuchsparzelle „Rebenzüchtung“ erhoben. Bei allen Fahrten war eine höhere Verfügbarkeit in der Antenneneinstellung `ant_oben` im Vergleich zur niedrigen Einstellung `ant_unten` zu verzeichnen. In der oberen Einstellung war die Anzahl der verfügbaren SV über den Messzeitraum gleichmäßig und stabil. Zu jedem Zeitpunkt der Messung wurden vom Fahrzeug acht oder mehr SV zur Navigation verwendet. Im Gegensatz dazu zeigt die untere Einstellung deutliche Schwankungen von bis zu vier SV. Während der zweiten Wiederholung in Reihe 33 wurde die untere Schwelle von fünf verfügbaren SV erreicht. Alle Verteilungen sind nach statistischer Überprüfung mit dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen hoch signifikant verschieden (Abb. 97).

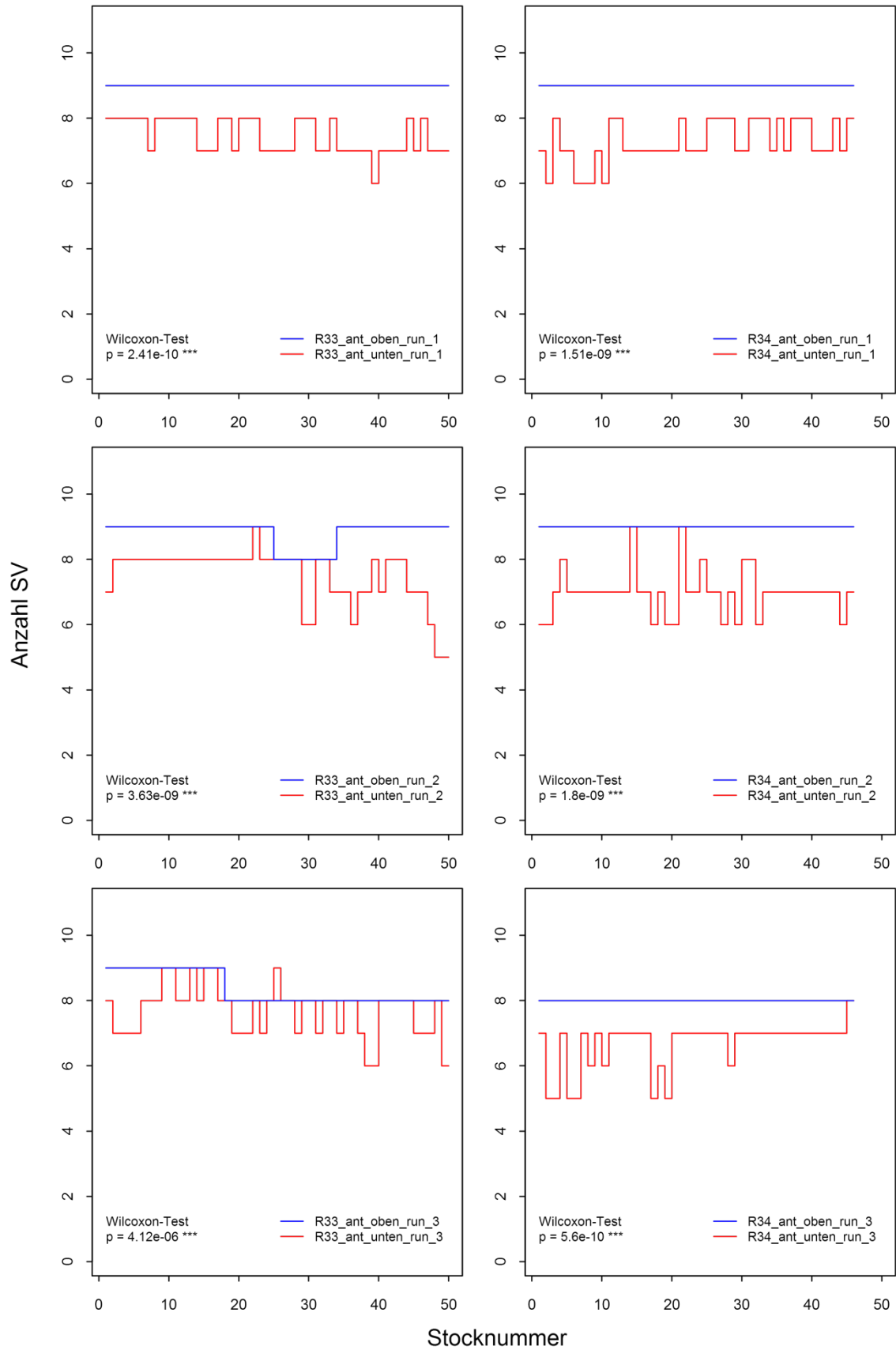


Abb. 97 Messung der SV-Verfügbarkeit in der Versuchsanlage Rebenzüchtung, HS Geisenheim am 10. September 2014. Links: Wiederholungen 1-3 in Reihe 33, Rechts: Wiederholungen 1-3 in Reihe 34. Versuchszeitraum 15:07-17:08 Uhr.



Abb. 98 Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in Reihe 33, Versuchsanlage Rebenzüchtung HS Geisenheim am 10. September 2014. Links: Einstellung GPS-Antennen 1280 mm über Grund (*ant_unten*); Rechts: Einstellung GPS-Antennen 2000 mm über Grund (*ant_oben*).

Zur Visualisierung der unterschiedlichen Verfügbarkeit abhängig von der Einstellung der GPS-Antennenhöhe wurde eine Choroplethenkarte angefertigt. Abb. 98 zeigt die Verfügbarkeit begrenzt auf die Gasse zwischen den Reihen 33 und 34, bei der Fahrt Richtung Süden mit den Koordinaten der Stöcke der Reihe 33 am 10. September 2014. Aus den Messdaten der Protokolldatei wurde für die Gassenflächen eine Interpolation der Verfügbarkeit erstellt. Im linken Teil der Abbildung ist die Messung während der Versuchsfahrt mit Einstellung *ant_unten* gezeigt. Die Verfügbarkeit lag schwankend zwischen sechs und acht SV. Im nördlichen Teil der Versuchsfeldfläche zeigt die Darstellung eine etwas höhere Verfügbarkeit, wohingegen im südlichen Bereich eine geringere Zahl an SV empfangen wurde. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die Verfügbarkeit während der Fahrt mit Einstellung *ant_oben*. Hier lag die Verfügbarkeit durchweg bei neun SV.

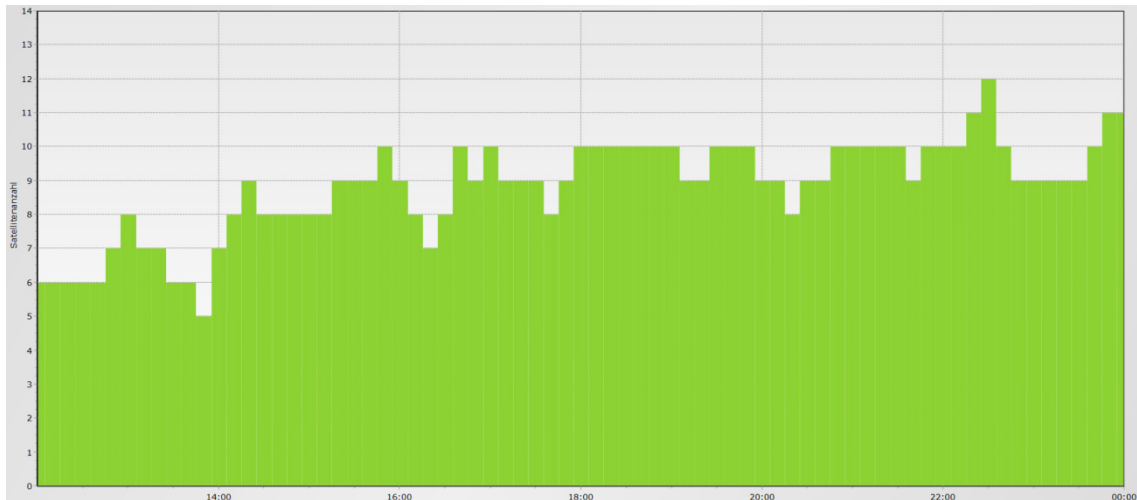


Abb. 99 Vorhersage der SV Verfügbarkeit in Geisenheim am 10. September 2014, 12:00-0:00 Uhr.
Versuchszeitraum 15:07-17:08 Uhr mit PlanningOnline
(<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Zur Beurteilung der potentiellen Verfügbarkeit an SV wurde eine Vorhersage der Konstellation mit dem Planungstool PlanningOnline durchgeführt (Abb. 99). Für den Versuchszeitraum von ca. 15:00-17:00 Uhr zeigte sich eine tendenzielle Zunahme der empfangbaren SV. Der vorhergesagte Schwankungsbereich lag in diesem Zeitraum bei sechs bis zehn SV. Die Versuche mit der Einstellung `ant_oben` wurden zu Beginn des Zeitraums durchgeführt.

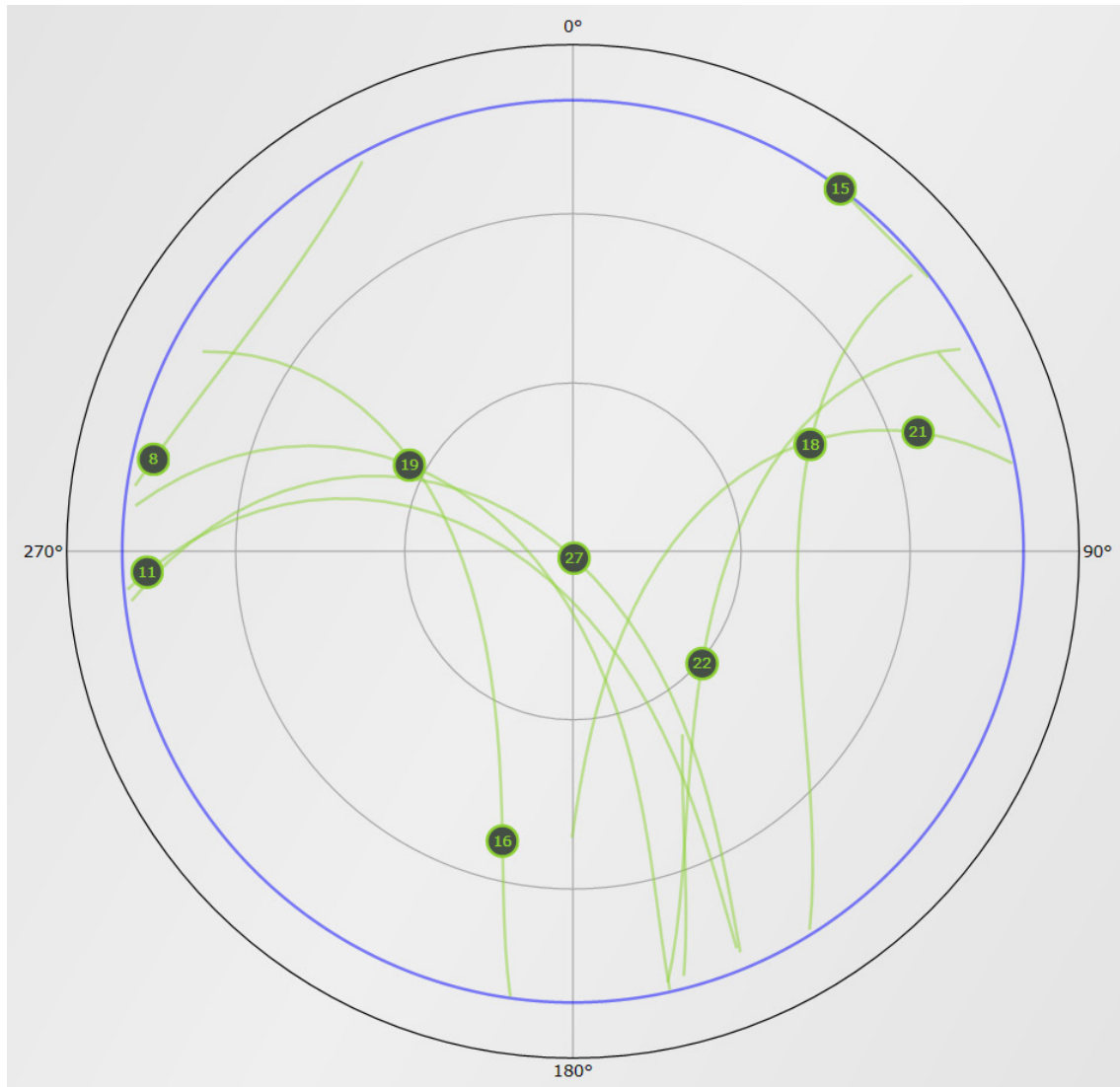


Abb. 100 Darstellung der SV-Konstellation am 10. September in Geisenheim um 16:00 Uhr mit PlanningOnline (<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Zur Charakterisierung der potentiellen Abschattungseffekte durch Bebauung, Vegetation oder Geländeprofil wurde die SV-Konstellation zum Versuchszeitpunkt am Horizont untersucht. Die neun verfügbaren SV waren zu diesem Zeitpunkt vor allem am westlichen, südlichen und östlichen Horizont verteilt. Im nördlichen Sektor befand sich lediglich der Satellit 15 für kurze Zeit im Empfangsbereich (Abb. 100).

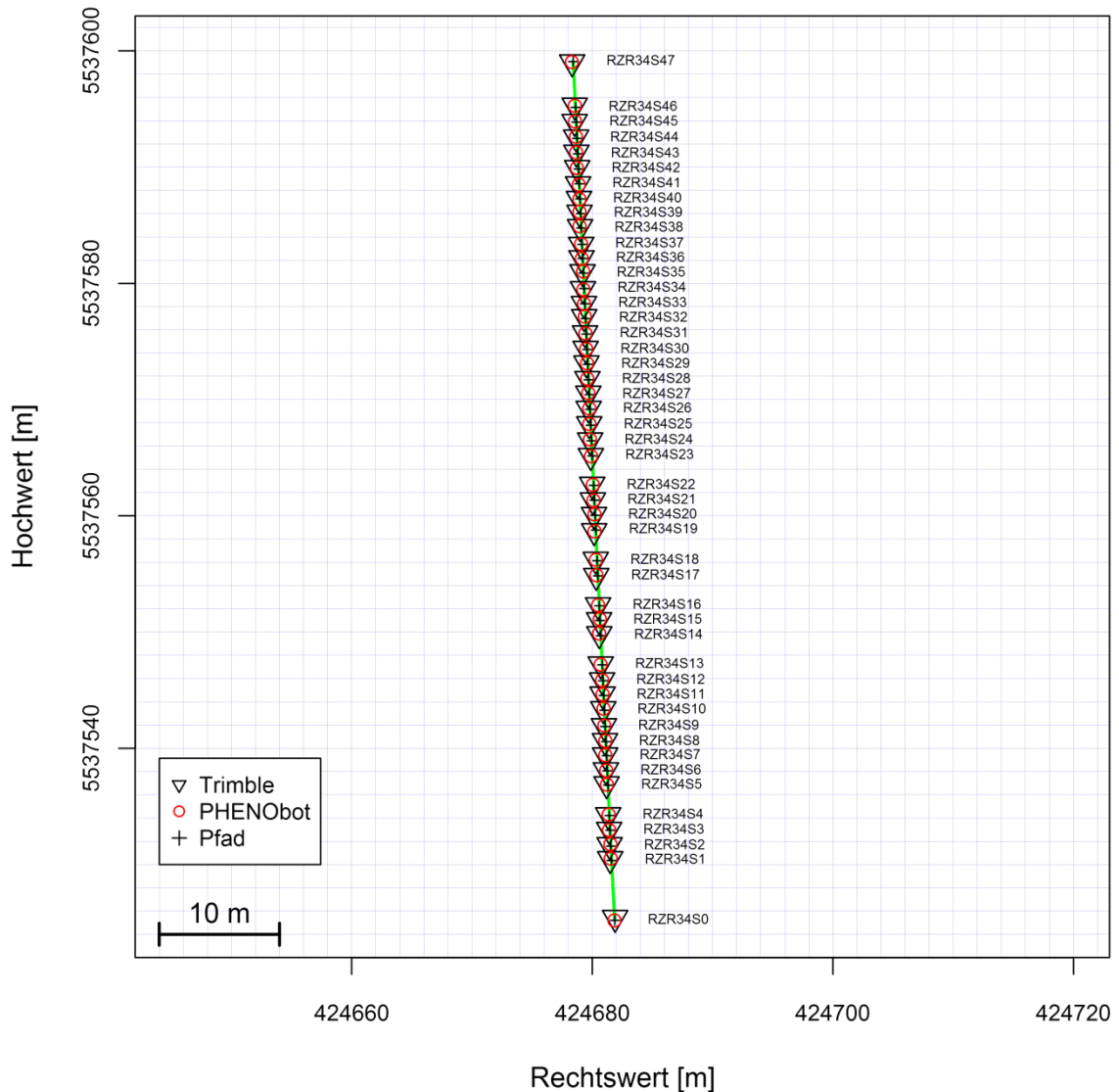


Abb. 101 Übersicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 34, Wiederholung 4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.

Die Messwerte der Genauigkeitsbestimmung am Beispiel Parzelle „Rebenzüchtung“, HS Geisenheim, vierte Wiederholung, Durchführung am 2. Dezember 2014 werden in Abb. 101 als Übersicht dargestellt. Es werden die Zielpunkte des Pfades als schwarze Kreuze, die korrespondierenden Positionen aufgenommen über das interne GNSS-System des PHENObots (rote Kreise), sowie das RTK-Vermessungssystem Trimble (schwarze Dreiecke) im UTM-Koordinatensystem gezeigt. In dieser Übersicht sind die Abweichungen zwischen den Messwerten nicht zu erkennen.

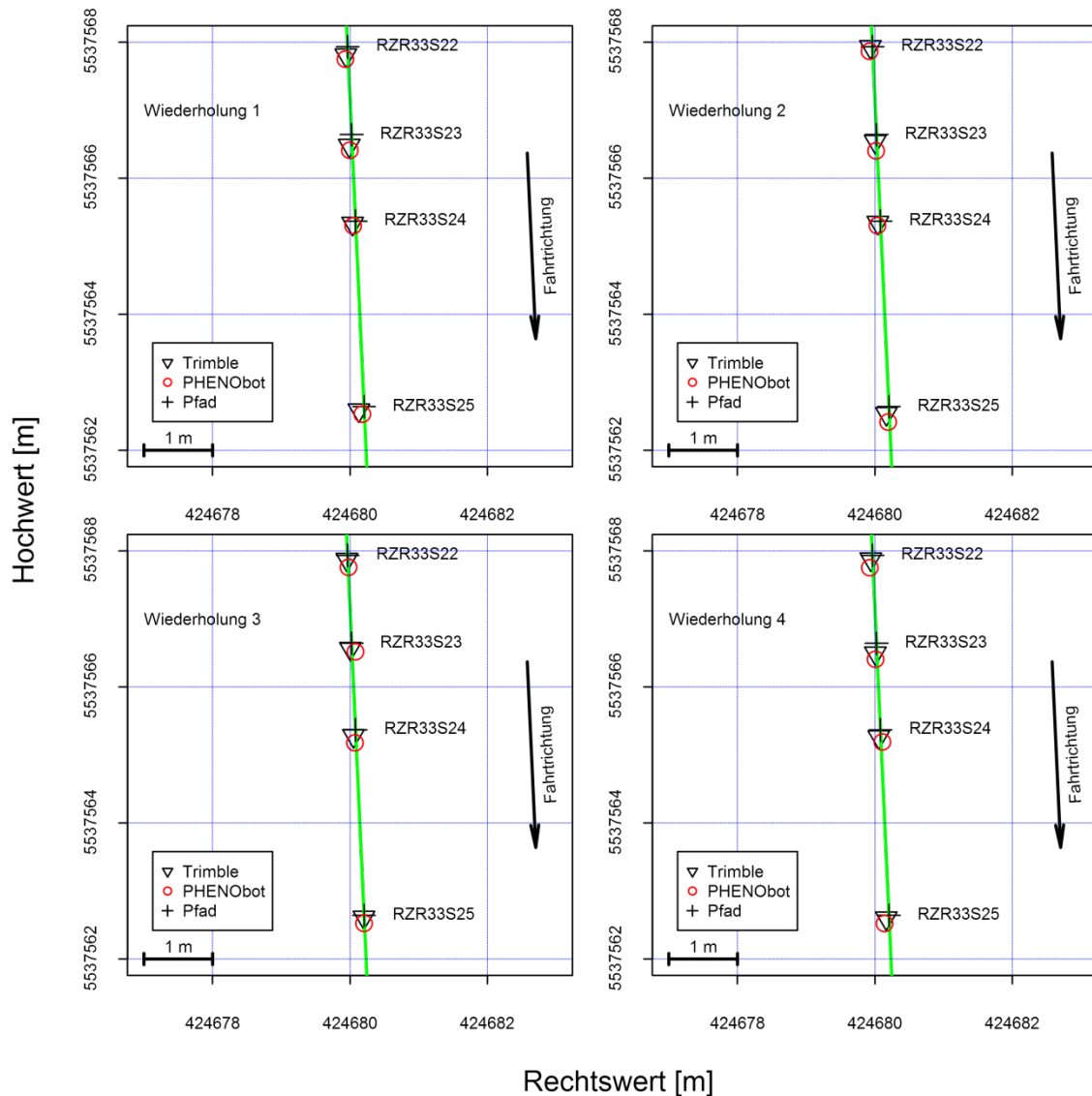


Abb. 102 Detailansicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 33, Wiederholungen 1-4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.

Die Detailansichten der einzelnen Wiederholungen für die Punkte RZR33S22-25 sind in Abb. 102 abgebildet. Zur Auswertung werden im Folgenden jeweils die mittleren Fehler aus den vier Wiederholungen pro Reihe untersucht.

In transversaler Richtung senkrecht zur Fahrtrichtung waren bei beiden Messsystemen die Abweichungen gering. Ausgedrückt als RMS-Fehler betrug die absolute Positionsgenauigkeit im Mittel 42 mm (Trimble), bzw. 37 mm (PHENObot). In longitudinaler Richtung waren die Abweichungen deutlich größer. Das Fahrzeug ist, gemessen mit beiden Systemen, im Mittel

107 bzw. 108 mm über den theoretischen Anhaltepunkt hinausgefahren. Die Mittelwerte beider Messsysteme haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tab. 7).

Tab. 7 Deskriptive Statistik zum Vergleich der absoluten Positionsgenauigkeit des PHENObot in Reihe 33. Datengrundlage sind die mittleren RMS-Fehler aus 4 Fahrten gemessen mit dem RTK-System von Trimble und dem internen System. Positive Prüfung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test.

	<i>Transversal</i>		<i>Longitudinal</i>	
	Trimble	PHENObot	Trimble	PHENObot
Mittelwert (\bar{x}) [m]	0,041	0,035	0,095	0,096
Standardabweichung (s_x)	0,005	0,002	0,010	0,010
Variationskoeffizient (cv)	0,132	0,061	0,108	0,107
Anzahl (n)	4			
Minimum [m]	0,036	0,032	0,086	0,087
Maximum [m]	0,047	0,037	0,105	0,105
P	0,1175		0,9148	
Signifikanz	H ₀ - nicht signifikant		H ₀ - nicht signifikant	

Die sonstigen beschreibenden statistischen Kennzahlen sind bei beiden Varianten vergleichbar. Der Variationskoeffizient zeigt bei der transversalen Abweichung eine etwas größere Streuung in der Datengrundlage des Trimble-Systems an. Diese größere Variation wird auch durch die größere Box des Box-Whisker-Plots in Abb. 103 gezeigt.

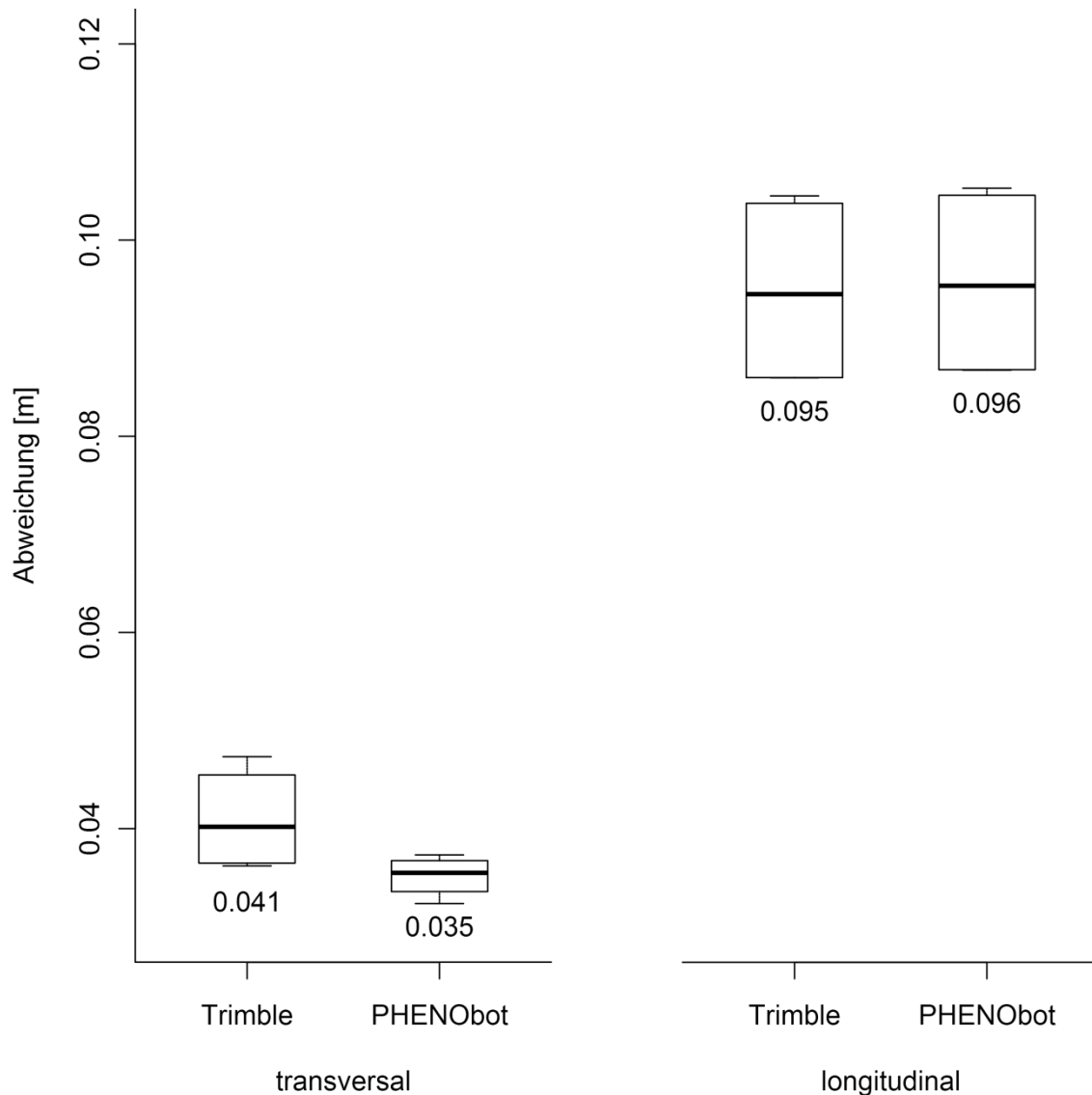


Abb. 103 Darstellung der absoluten Genauigkeit als mittlerer RMS-Fehler in Reihe 33, erfasst mit 2 RTK-Systemen. Links: Transversaler Versatz zur Fahrspur; Rechts: Longitudinaler Versatz des Anhaltepunktes.

Bei Betrachtung der Detailansicht der Haltepunkte RZR34S22-25 bei der Fahrt in entgegengesetzter Orientierung zeigen sich Positionsfehler, die etwa um den Faktor zwei größer als in Reihe 33 sind. Auch in dieser Reihe ist das Fahrzeug über den Haltepunkt in longitudinaler Richtung hinausgefahren.

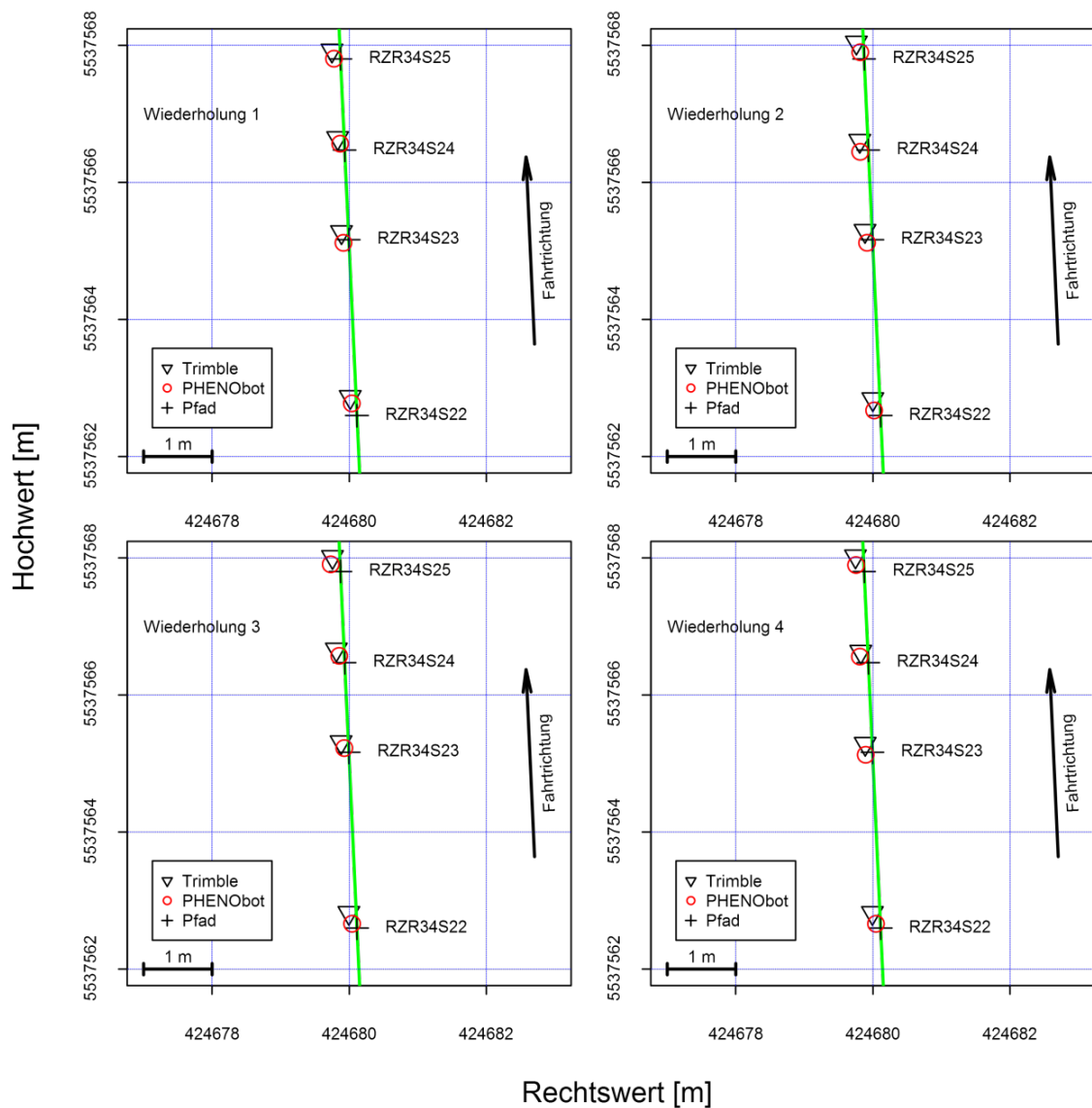


Abb. 104 Detailansicht der verschiedenen Positionen, Messfahrt am 2. Dezember 2014, Reihe 34, Wiederholungen 1-4. Messwerte Vermessungssystem Trimble, Protokolldatei PHENObot und Pfaddatei.

Die beschreibende Statistik (Tab. 8) belegt die Beobachtungen der Detailansicht. Bei dem RTK-System Trimble lagen die mittlere transversale Abweichung von der Fahrspur bei 97 mm, und 188 mm in longitudinaler Richtung. Aus den intern aufgezeichneten Messwerten wurde eine Abweichung von 81 mm quer, und 187 mm längs zur Fahrtrichtung ermittelt.

Tab. 8 Deskriptive Statistik zum Vergleich der absoluten Positionsgenauigkeit des PHENObot in Reihe 34. Datengrundlage sind die mittleren RMS-Fehler aus 4 Fahrten, gemessen mit dem RTK-System von Trimble und dem internen System. Positive Prüfung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test.

	<i>Transversal</i>		<i>Longitudinal</i>	
	Trimble	PHENObot	Trimble	PHENObot
Mittelwert (\bar{x}) [m]	0,097	0,081	0,188	0,187
Standardabweichung (s_x)	0,004	0,004	0,009	0,009
Variationskoeffizient (cv)	0,042	0,054	0,049	0,049
Anzahl (n)	4			
Minimum [m]	0,091	0,075	0,179	0,178
Maximum [m]	0,101	0,085	0,201	0,200
P	0,0019		0,9016	
Signifikanz	H ₁ – signifikant **		H ₀ - nicht signifikant	

Die Stichproben der RMS-Fehler weisen in Reihe 34 identische Standardabweichungen auf. Der Variationskoeffizient zeigt lediglich beim Fehler in transversaler Richtung in der Messreihe PHENObot eine geringfügig größere Streuung auf (Abb. 105). Die statistische Überprüfung der Mittelwerte zeigt allerdings einen signifikanten Unterschied. Der mittlere Fehler, berechnet nach den internen Messwerten des PHENObot, ist kleiner als der des RTK-Systems von Trimble.

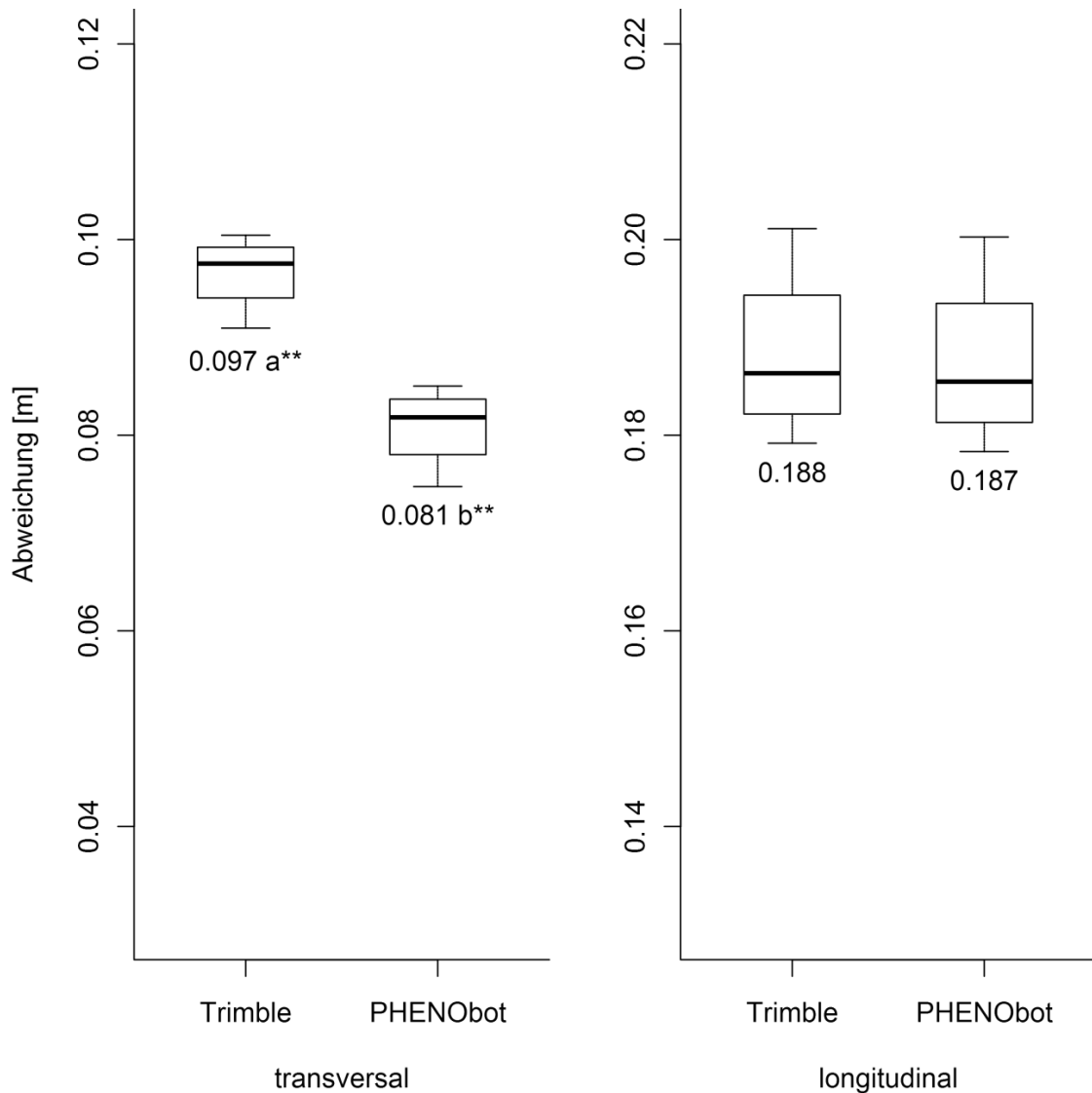


Abb. 105 Darstellung der absoluten Genauigkeit als mittlerer RMS-Fehler in Reihe 34, erfasst mit 2 RTK-Systemen. Links: Transversaler Versatz zur Fahrspur; Rechts: Longitudinaler Versatz des Anhaltepunktes.

Zur Beurteilung der relativen Positionsgenauigkeit wurden die mittleren RMS-Fehler aus vier Wiederholungen in jeweils einer Reihe (R33 und R34) miteinander verglichen (Abb. 106). Zur Fehlerermittlung wurden jeweils die euklidischen Distanzen zwischen den Positionsdaten des internen RTK-Systems in transversaler und longitudinaler Richtung bestimmt. Nach der Kombinatorik wird hier von einer Variation ohne Wiederholung mit den einzelnen Positionen als Objekte (n) sowie Minuend und Subtrahend als verfügbare Plätze (k) ausgegangen: $n = 4$; $k = 2$; es gilt

$$\frac{n!}{(n-k)!}$$

Gl. 4-1

Daraus ergeben sich zwölf Variationen für Minuend und Subtrahend und somit sechs Differenzen, die als Datengrundlage statistisch untersucht wurden.

Tab. 9 Deskriptive Statistik zum Vergleich der relativen Positionsgenauigkeit (transversal/longitudinal) des PHENObot. Datengrundlage sind die RMS-Fehler aus 4 Fahrten in 2 Reihen (R33/R34).

	<i>Transversal</i>		<i>Longitudinal</i>	
	R33	R34	R33	R34
Mittelwert (\bar{x}) [m]	0,038	0,038	0,073	0,074
Standardabweichung (s_x)	0,005	0,003	0,005	0,007
Variationskoeffizient (cv)	0,129	0,08	0,065	0,095
Anzahl (n)	6			
Minimum [m]	0,034	0,033	0,064	0,067
Maximum [m]	0,047	0,041	0,077	0,086
P	0,7853		0,7463	
Signifikanz	H ₀ - nicht signifikant			

Die Mittelwerte der Stichproben sind nicht signifikant verschieden. Damit wird die Nullhypothese beibehalten, die transversalen und longitudinalen Abweichungen in beiden Reihen sind nicht zu unterscheiden. Der PHENObot war zum Versuchszeitpunkt mit einer Positionsgenauigkeit vom 38 mm quer und 73 bzw. 74 mm längs zur Fahrtrichtung in den Reihen unterwegs. Dabei unterlagen die transversalen Werte in Reihe 33 einer etwas größeren Streuung als in Reihe 34, wohingegen das Gegenteil in longitudinaler Richtung der Fall war (Abb. 106 und Tab. 9).

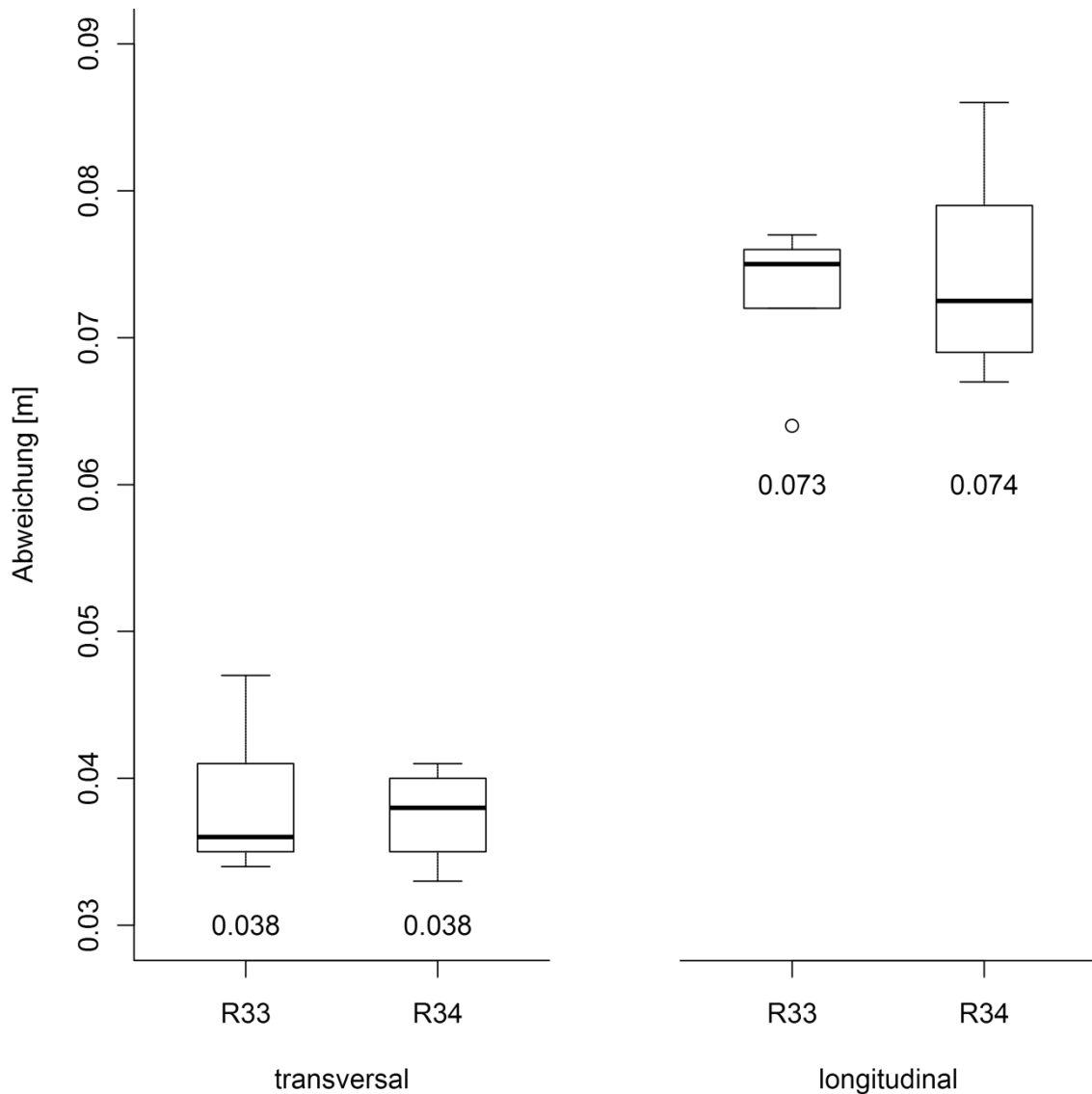


Abb. 106 Relative Positionsgenauigkeit als RMS-Fehler der Mittelwerte in transversaler (links) und longitudinaler (rechts) Richtung bei den Versuchsfahrten am 2. Dezember 2014 ($n=4$). Die Mittelwerte der Abweichungen, bezogen auf die Reihen 33 und 34, unterscheiden sich nicht signifikant (transversal, $P=0,7853$; longitudinal, $P=0,7463$).

4.8.3 Erprobungsfahrten Siebeldingen

Bei den Tests am JKI Geilweilerhof in Siebeldingen standen vor allem die Verknüpfung und Zusammenarbeit von Trägerfahrzeug und MKS sowie die Verarbeitung und korrekte Interpretation der übergebenen Stockkoordinaten im Vordergrund. Die ersten Versuchsfahrten mit statisch montiertem MKS wurden im Juni 2013 durchgeführt (Abb. 107).



Abb. 107 Versuchsträger Neosat Alpin mit statisch montiertem MKS in Parzelle 19 während der ersten Erprobung am JKI.

Die Versuche wurden mit Relativkoordinaten durchgeführt. Dazu wurden Referenzkoordinaten auf dem Gelände des JKI mit dem Versuchsträger und dem externen RTK-Vermessungssystem (weiß-gelbe GNSS-Antenne) der Firma Trimble des JKI erhoben. Mit diesen Referenzwerten konnten die Stockkoordinaten in das Referenzsystem (relativ) des Neosat Alpin transformiert und genutzt werden. Während der ersten Versuche wurde die Bildaufnahme des MKS manuell getriggert. Dazu war ein weiterer Rechner auf dem Fahrzeug vorhanden.

Im Zuge dieser Erprobungsfahrten ereignete sich ein Defekt an einem der Getriebe für den Fahrantrieb (Abb. 108). Im Folgenden wurden beide Getriebe vom Hersteller ausgetauscht und durch standfestere Bauarten mit geänderter Übersetzung ersetzt.



Abb. 108 Getriebedefekt am Fahrtrieb durch Abscheren der Zahnradflanken.

Nach der Fertigstellung und Implementierung des PHENObots wurden während der Vegetationsphase 2014 weitere Erprobungsfahrten unternommen. Dabei wurden die softwaregesteuerte Bildauslösung, die Navigation und die Koordinatenverarbeitung untersucht und optimiert. Zum Angleich der verschiedenen Datumsformate fand auch am JKI eine Kalibrierungsmessung der RTK-Basisstation des PHENObot mit dem externen RTK-Vermessungssystem statt. Auch in diesem Fall waren keine Offset-Einstellungen zur Korrektur des Fahrweges notwendig. In Parzellen mit größerem Seitenhang konnte ein Versatz der Fahrspur in der Größenordnung 100-150 mm zur Gassenmitte festgestellt werden. Abb. 109 zeigt den PHENObot in einer Gasse der Parzelle 23 mit Seitenhang. Ein Versatz der Fahrspur ergab sich bei dieser Größenordnung der Neigung nicht. Die nivellierende Wirkung der Kameralageregelung ist in der Abbildung jedoch deutlich zu erkennen. Das MKS wurde damit parallel zur Laubwand ausgerichtet. Bei diesen Versuchen erwies sich der horizontale Abstand zur Laubwandebene als unkritische Größe ohne allzu große Wirkung auf die Bildschärfe.



Abb. 109 PHENObot während der Erprobung in der Parzelle 23.

Abb. 109 zeigt zudem die bereits beschriebene, vom JKI festgestellte Problematik unterschiedlicher Beleuchtung durch die Sonneneinstrahlung. Die linke Laubwand liegt in direkter Besonnung, wohingegen sich die rechte Seite im Schatten befindet. Daher wurden bei diesen Fahrten auch Tests in Dunkelheit durchgeführt um die geplanten Messfahrten vorzubereiten (Abb. 110). Bei diesen Versuchen zeigte sich die Notwendigkeit einer Beleuchtungseinheit an der Front des PHENObot. Deshalb wurde ein lichtstarker und gleichzeitig effizienter LED-Scheinwerfer zur Ausleuchtung der Zuwegungen angebaut.



Abb. 110 Erprobungsfahrt in völliger Dunkelheit in Parzelle 23.

Durch die in dieser Vegetationsphase (BBCH 75-85) voll entwickelte Laubwand konnten Abschattungen beim Satellitenempfang festgestellt werden, wenn sich die beiden GPS-Antennen in der unteren Position auf 1 280 mm über Grund befanden. In der oberen Position (2 000 mm) war dies nicht feststellbar.

4.8.4 Messfahrten Siebeldingen

Die Auswertung der Anzahl an verfügbaren SV in Abhängigkeit der GPS-Antenneneinstellung wurde in Siebeldingen analog zur Methode in Geisenheim durchgeführt. Dazu wurden in Parzelle 23 die ersten beiden Reihen am 29. August 2014 untersucht. Abb. 111 zeigt die Ergebnisse. In beiden Reihen war die Verfügbarkeit in der Einstellung ant_oben signifikant größer als in der Einstellung ant_unten. Das Verfügbarkeitsniveau lag im unteren Bereich zwischen vier und acht SV, wobei zwischen den Stöcken 1-25 ein etwas höheres Niveau und zwischen den Stöcken 26-71 ein niedrigeres Niveau vorlag.

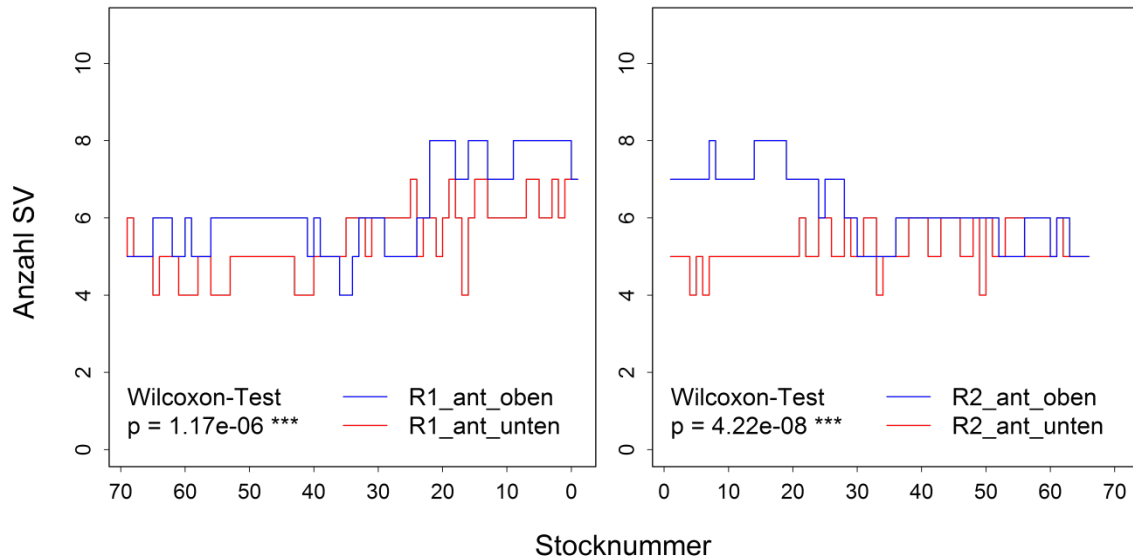


Abb. 111 Messung der SV-Verfügbarkeit in der Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 29. August 2014. Links: Reihe 1, Rechts: Reihe 2. Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr.

Abb. 112 stellt dieses Muster in Form einer Choroplethenkarte dar. Im nördlichen Teil der Anlage mit den Stocknummern 1-25 ist die Verfügbarkeit mittel bis gut mit 5-7 SV (orange-hellgrün) in der Einstellung ant_unten, bzw. 6-8 SV (hellorange-grün) in der Einstellung ant_oben.

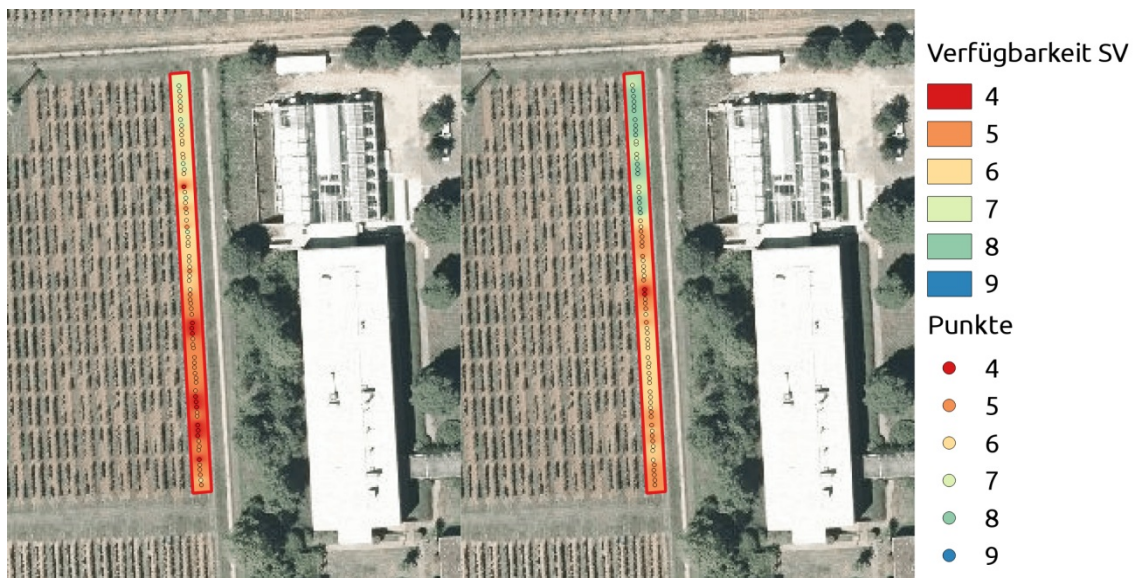


Abb. 112 Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in Reihe 1, Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 29. August 2014. Versuchszeitraum: 11:30-13:00 Uhr. Links: Einstellung GPS-Antennen 1280 mm über Grund; Rechts: Einstellung GPS-Antennen 2000 mm über Grund.

Bemerkenswert ist der Gebäudekomplex mit Baumbestand im südöstlichen Bereich. Bei Betrachtung der SV-Konstellation in Abb. 113 waren zum

Versuchszeitpunkt vier SV (SV2, SV6, SV15, SV17) in niedriger Elevation (10° - 20°) am südöstlichen Horizont unterwegs.

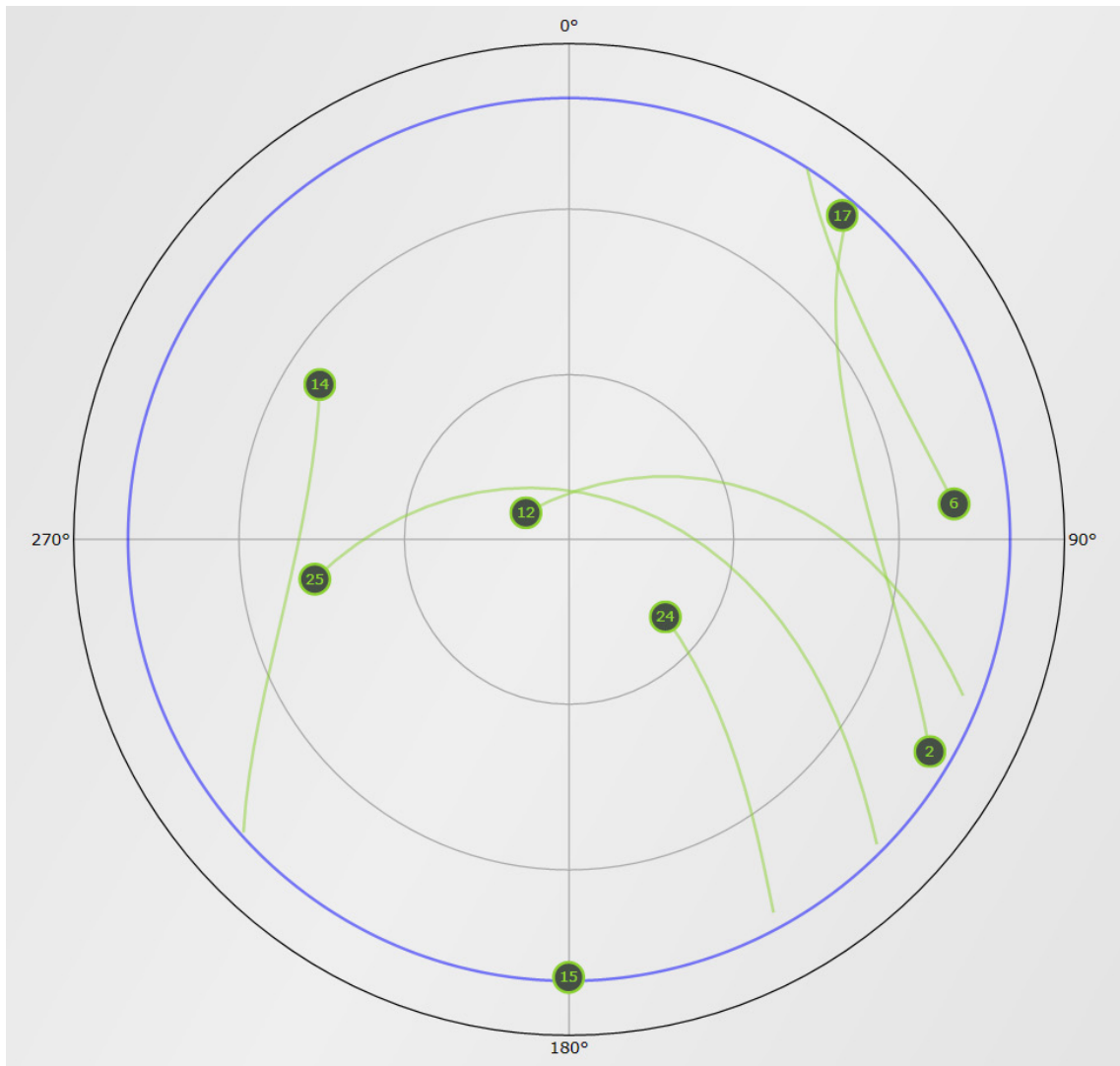


Abb. 113 Darstellung der SV-Konstellation in Siebeldingen am 29. August 2014, 09:00-15:00 Uhr.
Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr mit PlanningOnline
(<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Im Versuchszeitraum (11:30-13:00 Uhr) war eine Verfügbarkeit von sechs bis sieben SV bei einer Elevationsmaske von 10° vorhergesagt (Abb. 114).

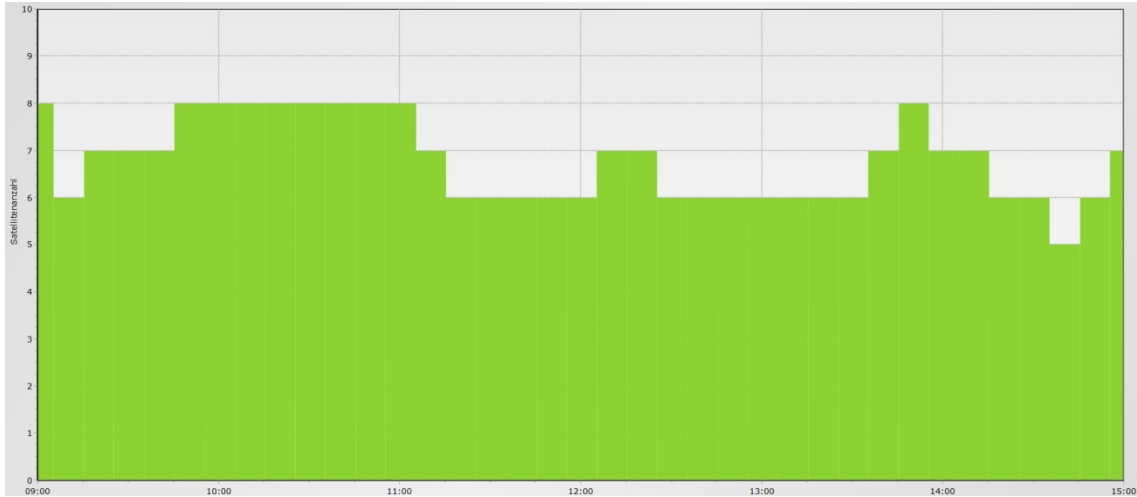


Abb. 114 Vorhersage der SV Verfügbarkeit in Siebeldingen am 29. August 2014, 09:00-15:00 Uhr.
Versuchszeitraum 11:30-13:00 Uhr mit PlanningOnline
(<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Im Zuge des Anwendungsversuches wurde die SV-Verfügbarkeit erfasst. Abb. 115 stellt die Ergebnisse grafisch als Choroplethenkarte in den Reihen 7-43 dar. Es sei angemerkt, dass die Karte aus Daten von zwei Nachtfahrten erstellt wurde. In der Nacht vom 16. auf den 17. September wurden die Reihen 1-25 und in der darauffolgenden Nacht die Reihen 26-43 bonitiert.



Abb. 115 Choroplethenkarte zur Visualisierung der SV-Verfügbarkeit in den Reihen 7-43, Versuchsanlage P23, JKI Geilweilerhof am 16. und 17. September 2014.
Versuchszeitraum: jeweils 20:00-02:00 Uhr.

Im Versuchszeitraum lag durchweg eine gute bis sehr gute Verfügbarkeit (gelb-blau, 8-10 SV) vor. Lediglich an einigen Positionen (rot-orange)

wurden 6 (n=4) bzw. 7 (n=84) SV empfangen. Insgesamt wurde in den Reihen 7-43 die SV-Verfügbarkeit an 2 279 Positionen protokolliert und ausgewertet.

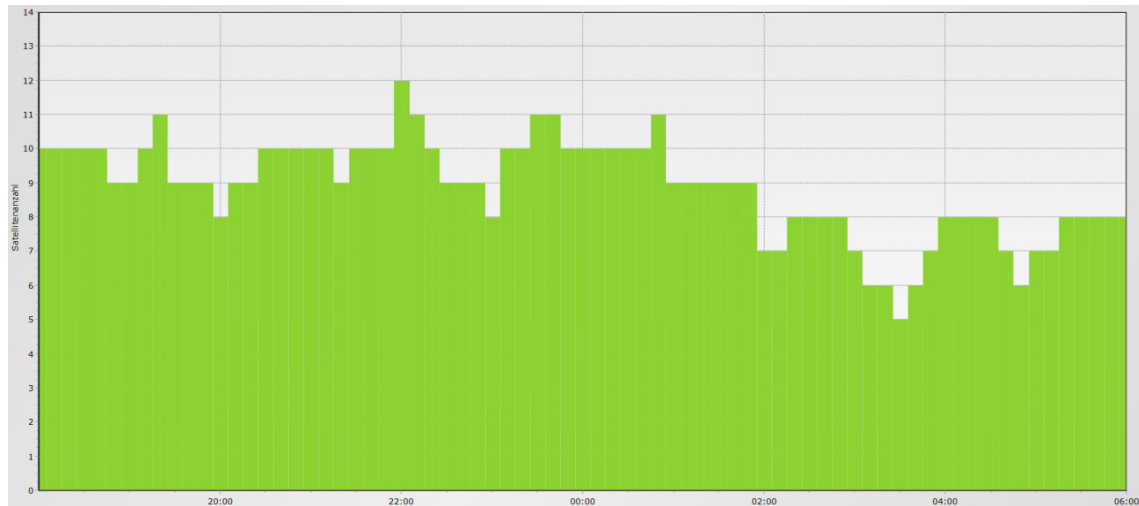


Abb. 116 Vorhersage der SV-Verfügbarkeit in Siebeldingen am 16. September 2014, 18:00-06:00 Uhr. Versuchszeitraum 20:00-02:00 Uhr mit PlanningOnline (<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/NumSats>).

Abb. 116 zeigt die vorhergesagte SV-Verfügbarkeit für den 16. September im Versuchszeitraum bis zum Morgen des 17. Septembers. Aufgrund der zyklisch besseren Verfügbarkeit (8-12 SV) während der Nacht im Sommer 2014 wurden die Versuche vorrangig in diesen Zeiten durchgeführt. Für die darauffolgende Nacht wurde die gleiche Konstellation (Daten nicht gezeigt) um ca. vier Minuten früher vorhergesagt.

Die Varianten ant_unten sowie ant_oben wurden auf mögliche Auswirkungen auf die relative Positionsgenauigkeit untersucht. Dazu wurden in jeweils dreifacher Wiederholung die Reihen 1 und 2 der Parzelle 23 mit der entsprechenden Antenneneinstellung abgefahren und die Genauigkeit in transversaler und longitudinaler Richtung basierend auf den Positionsdaten des internen RTK-Systems bestimmt. Im Folgenden werden einige ausgewählte Datenreihen gezeigt.

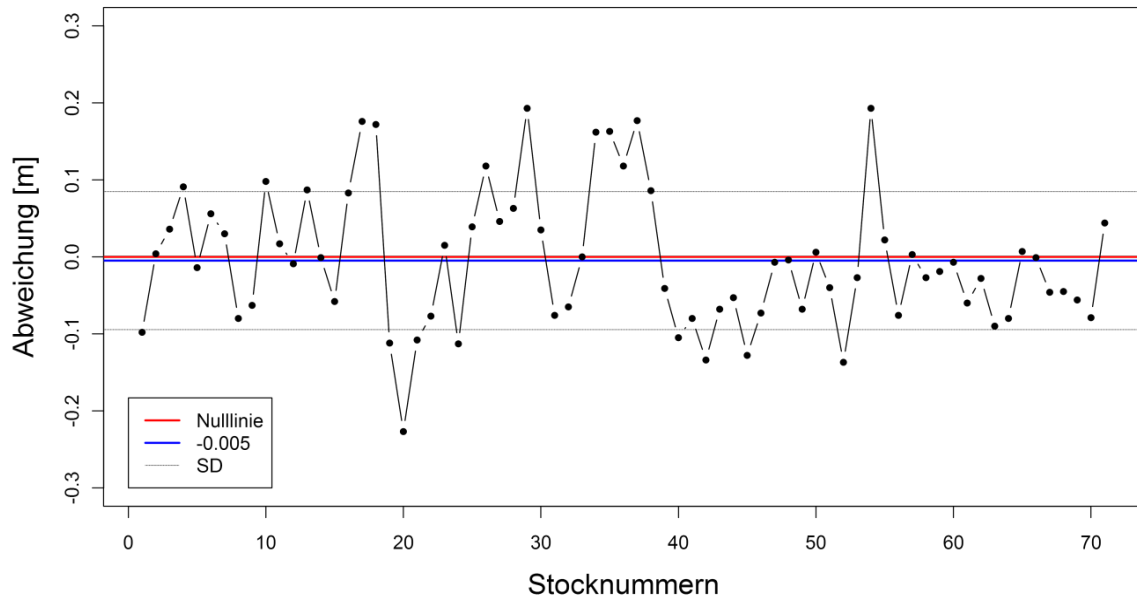


Abb. 117 Relative Abweichungen in transversaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_unten, 29. August 2014.

Abb. 117 zeigt die relativen Abweichungen als Funktion über der jeweiligen Stockposition in der Variante ant_unten. Bei dieser Betrachtung wurde der Mittelwert aus den tatsächlichen Daten unter Berücksichtigung des Vorzeichens berechnet. Das Vorzeichen gibt Auskunft über die Richtung der Abweichung bezogen auf die Fahrtrichtung und Bezug auf das UTM-Koordinatensystem.

Im Mittel wich die tatsächliche Fahrspur (Nulllinie) um -5 mm von der theoretischen Spur ab (Richtung Westen). Die Streuung der Einzelwerte ist recht hoch, die Standardabweichung beträgt $\pm 0,089$ m (Tab. 10). Der maximale Schwankungsbereich beträgt 420 mm.

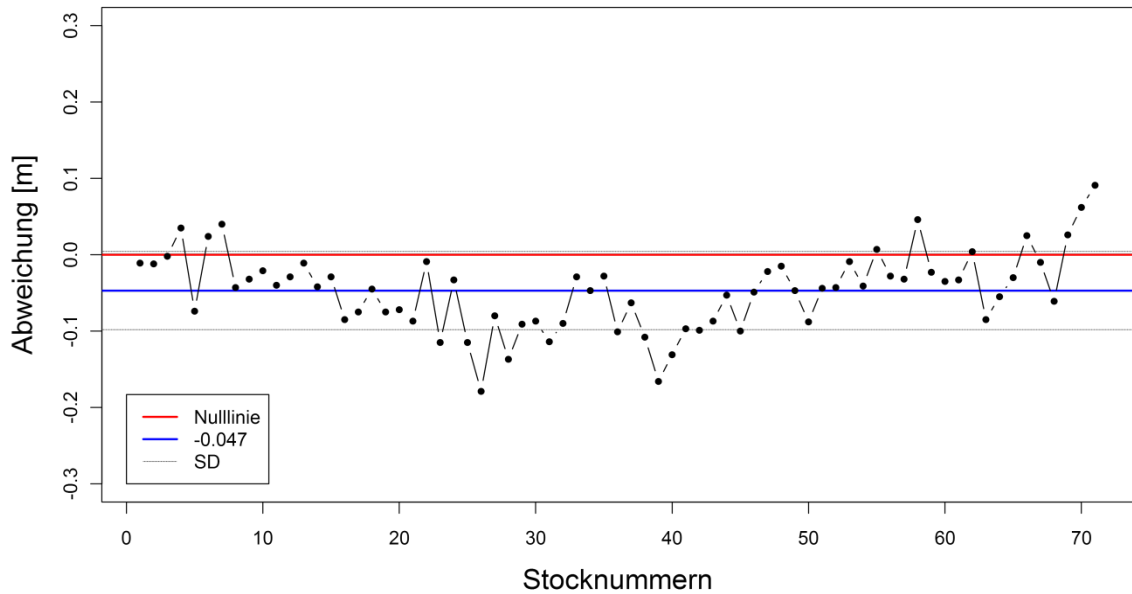


Abb. 118 Relative Abweichungen in transversaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_oben, 29. August 2014.

In der Einstellung ant_oben lag die mittlere transversale Abweichung von der Fahrspur bei 47 mm (Richtung Westen) (Abb. 118). Die Streuung wurde deutlich reduziert, der Wert für die Standardabweichung verringerte sich um den Faktor 2. Ähnliches zeigte sich für die Streuung der Einzelwerte, diese betrug 270 mm (Tab. 10).

Tab. 10 Deskriptive Statistik der relativen Abweichungen in transversaler und longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, Varianten ant_unten/ant_oben.

	<i>Transversal</i>		<i>Longitudinal</i>	
	ant_unten	ant_oben	ant_unten	ant_oben
Mittelwert (\bar{x}) [m]	-0,005	-0,047	0,1226	0,120
Standardabweichung (s_x)	0,089	0,051	0,083	0,097
Minimum [m]	-0,227	-0,179	-0,091	-0,188
Maximum [m]	0,193	0,091	0,308	0,301

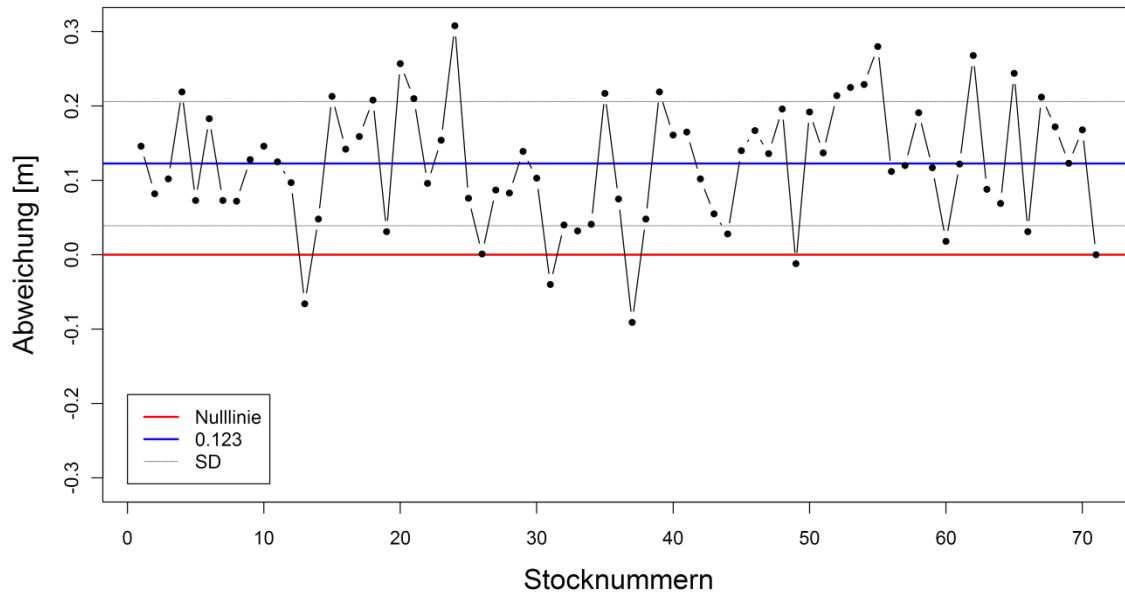


Abb. 119 Relative Abweichungen in longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_unten, 29. August 2014.

In longitudinaler Richtung waren die Abweichungen erwartungsgemäß höher als quer zur Fahrtrichtung. Der Mittelwert für die Einstellung ant_unten lag bei 123 mm (Abb. 119). Damit fuhr das Fahrzeug um diesen Wert über den Haltpunkt in Richtung Norden hinaus. Die Standardabweichung betrug 83 mm und die Streuung der Einzelwerte lag bei 399 mm.

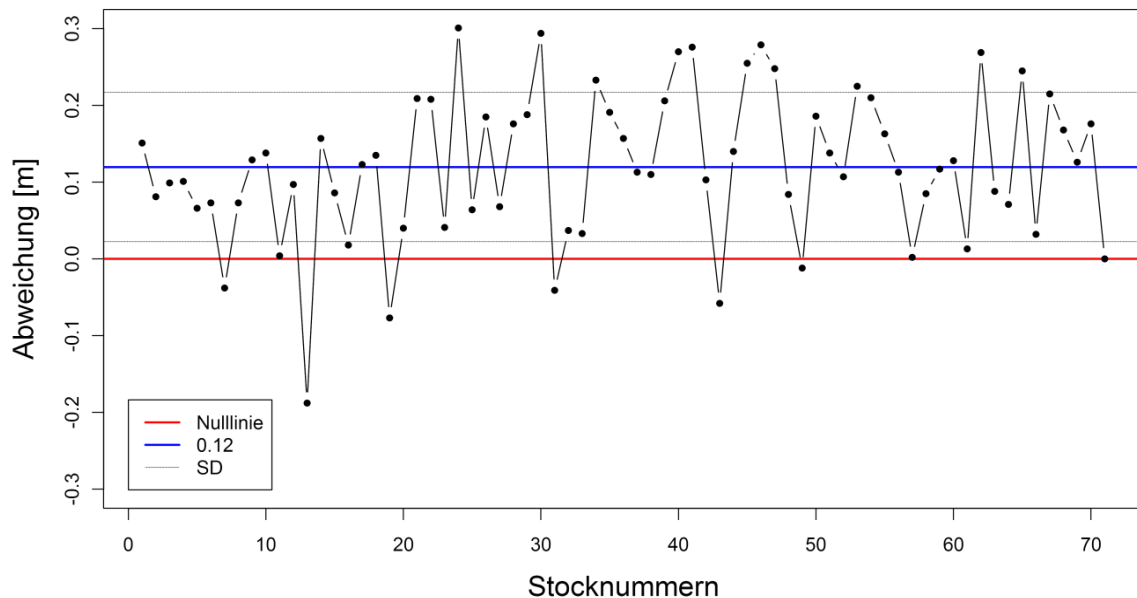


Abb. 120 Relative Abweichungen in longitudinaler Richtung von der Fahrspur in P23, Reihe 1, ant_oben, 29. August 2014.

Die relativen Abweichungen in der Einstellung ant_oben wurden in longitudinaler Richtung entgegen der Erwartungen größer (Abb. 120). Der Mittelwert reduzierte sich zwar auf 120 mm, die Streuung wurde jedoch größer. Die Standardabweichung lag bei 97 mm, die Einzelwertstreuung bei 489 mm.

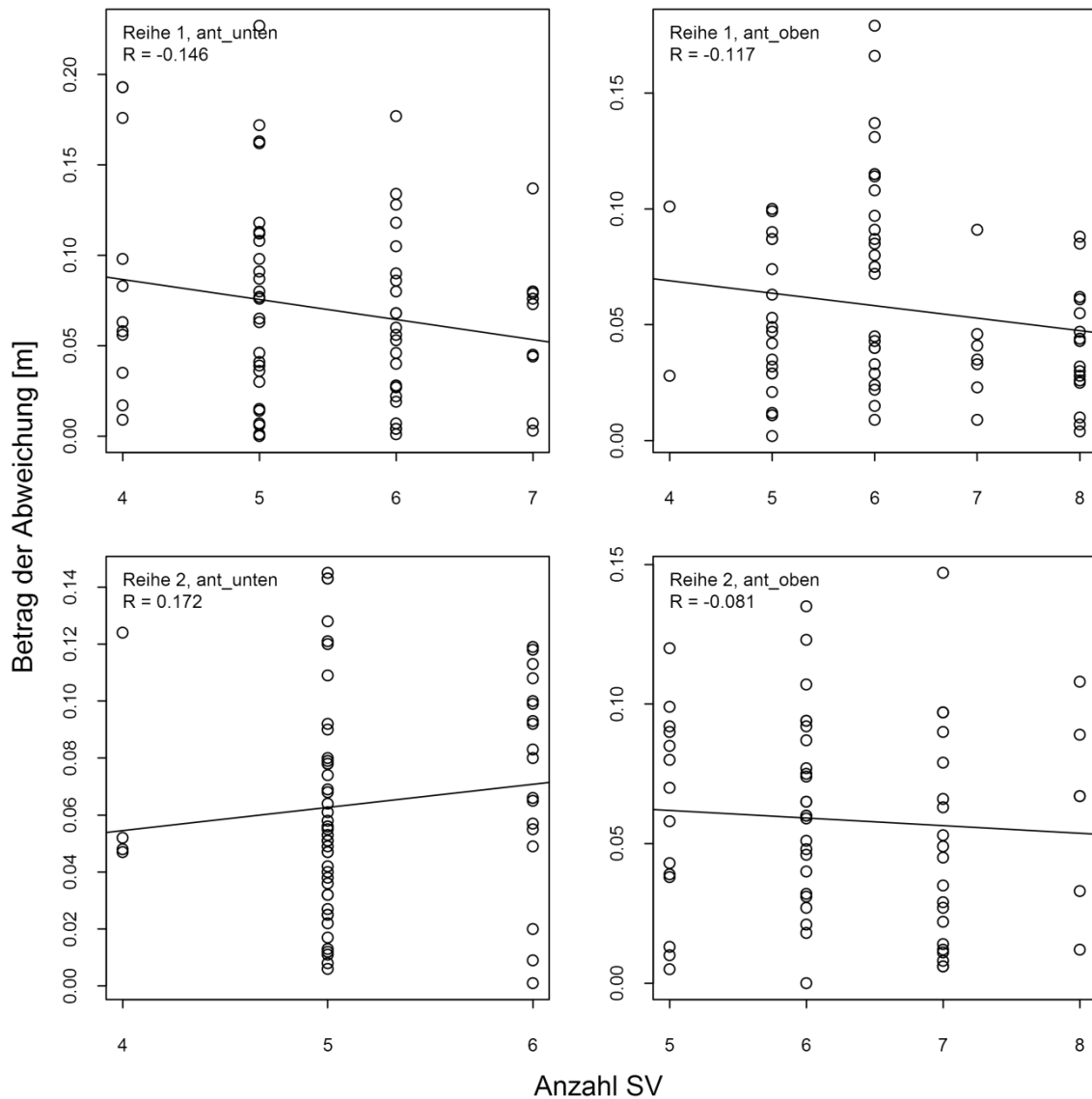


Abb. 121 Beträge der relativen Positionsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl verfügbarer SV in P23, Reihe 1 (oben) und 2 (unten), in den Varianten ant_unten (links) und ant_oben (rechts). Versuchszeitraum: 29. August 2014, 11:30-13:00 Uhr.

Abschließend wurde eine mögliche Abhängigkeit der relativen Positionsgenauigkeit von der Anzahl verfügbarer SV untersucht. Dazu wurden die oben aufgeführten Abweichungen von der Nulllinie als absolute Beträge der Anzahl empfangener SV gegenübergestellt (Abb. 121). Die Regressionsgera-

den zeigen für die Varianten Reihe 1 ant_unten, Reihe 1 ant_oben sowie Reihe 2 ant_unten einen schwachen Zusammenhang zwischen sinkenden relativen Abweichungen bei höherer Zahl an verfügbaren SV. Der negative Korrelationskoeffizient nach Spearman bestätigt diesen schwachen Zusammenhang. In der Variante Reihe 2 ant_unten ist dagegen eine schwach positive Korrelation zwischen steigenden Abweichungen und größerer SV-Anzahl festzustellen.

Schlagkraftberechnung

Anhand der Daten des Anwendungsversuches am 16. und 17. September 2014 fand eine Untersuchung der Einsatzzeiten und somit der Schlagkraft statt. Die Bonituraufgabe setzt sich zusammen aus:

- Anfahrt zum Punkt (Zeit abhängig von der Strecke),
- Wartezeit zur Beruhigung der Fahrzeugschwankung (200 ms),
- Lageausrichtung des MKS (4 500 ms),
- Bildauslösung,
- Wartezeit auf Antwort des Fotorechners (bis zu 6 000 ms),
- Wartezeit (500 ms).

So ergibt sich eine maximale Verweildauer an der Halteposition ohne Berücksichtigung der Fahrtzeit zwischen den Stöcken von 11 200 ms. Die Auswertung der Protokolldateien einiger ausgewählter Reihen zeigte, dass bei erfolgreicher Bildauslösung die Antwort des Bildrechners innerhalb von 100 ms erfolgte. Danach wurde der nächste Job (Wartezeit 500 ms) gestartet. Bei Überschreitung des Timeouts von 6 000 ms unterbrach die Anwendungssoftware PHENObotControl die Jobausführung bis zur Beseitigung des vorliegenden Fehlers. Vor der Implementierung der SMS-Alarmierung hing die Zeit bis zur weiteren Ausführung von der Reaktionszeit des Anwenders (Bemerkten des Fehlers, Aufsuchen des PHENObot, Fehlerbeseitigung) ab. Die Variation der Reaktionszeit liegt nach Auswertung der Protokolle im Bereich von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten. Im Falle der erfolgreichen Bildauslösung bleibt nach Abzug der nicht benötigten Wartezeit eine theoretische Verweildauer von 5 300 ms pro Stock. Zur Ermittlung der tatsächlichen Zeit zur Bonitur eines Stockes wurde die Zeit

von der Beendigung der Wartezeit an der Position des vorhergehenden Stockes bis zum Beginn der Anfahrt des darauffolgenden Stockes bestimmt. Damit wird nach Abzug der theoretischen Verweildauer die benötigte Anfahrtszeit ermittelt. Beispielhaft werden im Folgenden die Daten der Reihe 9 in Parzelle 23 dargestellt (Tab. 11).

Tab. 11 Auswertung der Einsatzzeiten bei der Bonitur in Parzelle 23, Reihe 9 am 16. September 2014.

P23 Reihe 9	
Minimum [ms]	9 000
Maximum [ms]	15 000
Standardabweichung (s_x)	1,214
Mittelwert (\bar{x}) [ms]	11 750
Theoretische Verweildauer [ms]	5 300
Mittlere Anfahrtszeit [ms]	6 450

Durch die Verschiebung der Anhalteposition in die Mitte der Boglebe, den variablen Stockabstand bei Fehlstellen, bzw. ausgelassenen Stöcken und Reihenöffnungen zum Quergehen, wird diese Schwankung der benötigten Zeit von 6 000 ms erreicht. Bei einer Gesamtzahl zu bonitierender Stöcke von 2 726 war eine Gesamtzeit von 534 Minuten nur zur Bonitur zu erwarten. Hinzu kam die Zeit zur Anfahrt der nächsten Reihe. Hier wurde etwa 1 Minute pro Wendevorgang gebraucht. Damit resultiert eine Gesamtzeit zum Befahren und Bonitieren der Parzelle 23 mit 43 Reihen (42 Wendevorgänge) von 576 Minuten, bzw. 9,6 Stunden (9 Stunden 36 Minuten). Bei einer zu bonitierenden Fläche von 0,5725 ha resultiert eine Flächenleistung von 0,0596 ha h⁻¹ bzw. 16,77 h ha⁻¹ ausgehend von den Gegebenheiten in Parzelle 23.

Diese Seite wurde absichtlich frei gelassen.

5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert sowie interpretiert und die Gültigkeit der eingangs formulierten Thesen bewertet.

5.1 Trägerfahrzeug

Das Konzept des elektrisch angetriebenen Kettenfahrzeuges hat sich unter Berücksichtigung aller Ergebnisse aus der Konstruktionsphase und den Erprobungsfahrten als durchaus tauglich erwiesen. Durch den Einsatz der Kettenlaufwerke konnten eine stabile Lage und ruhige Fahreigenschaften des fertigen Bonitursystems erreicht werden. Das Konzept der Panzerlenkung reduzierte den Konstruktions- und Steuerungsaufwand deutlich. Die Herstellung einer Achsschenkellenkung war nicht nötig, zumal größtenteils rein lineare Fahrbewegungen mit lediglich geringen Winkelkorrekturen erfolgten. Bei den Wendevorgängen an den Reihenenden wird nach aktueller Konfiguration auf der Stelle durch gegenläufiges Drehen der Kettenlaufwerke gewendet. Es sei dabei jedoch der Einfluss auf die Grasnarbe und die natürliche Begrünung im Bereich des Vorgewendes angemerkt. Im Rahmen normaler Boniturvorgänge, beispielsweise im Wochenabstand, sind nur geringe Auswirkungen auf die Begrünung festzustellen. Gerade bei den Erprobungs- und Messfahrten wurden jedoch einzelne Reihen und Gassen in mehrmaliger Wiederholung bei sehr kurzen Zeitabständen befahren. Dadurch war eine fast vollständige Zerstörung des Oberflächenbewuchses im Drehbereich der Ketten die Folge (Abb. 122).

Beim alternativ möglichen Einsatz von Radlaufwerken wäre die niedrige Ausführung des Trägerfahrzeuges in dieser Form und der damit verbundenen Laufruhe nicht zu realisieren. Um eine vergleichbare Stabilität zu erreichen müsste der Raddurchmesser entsprechend groß gewählt werden, wodurch das Fahrgestell gleichzeitig höher liegen würde (BLUMENTHAL 1985).



Abb. 122 PHENObot bei Erprobungsfahrt in der Parzelle Rebenzüchtung. Deutliche Zerstörung der Grasnarbe im Wendebereich nach mehrmaliger Überfahrt.

Der Aufbau der Kettenlaufwerke erwies sich während der Erprobung als nicht unproblematisch, hier insbesondere die beiden Getriebe. Der erste Defekt mit totalem Abscheren der Zahnflanken ist auf Konstruktionsmängel zurückzuführen. Bauartbedingt war der Platz im Getriebe begrenzt. Dadurch wurde das Endabtriebszahnrad dünner als das eingreifende Zahnrad ausgelegt. Die Kontaktfläche reichte allem Anschein nach nicht aus, um die großen Kräfte am Endantrieb angemessen zu übertragen. In der Folge trat der Defekt nach einer Erprobungsdauer von rund vier Monaten ein. Als Konsequenz wurde der Getriebetyp vom Hersteller Windegger ausgetauscht, wodurch zum einen die übertragene Kraft reduziert werden konnte und zum anderen die Stärke des Zahnrads erhöht wurde. Ein zweiter Getriebedefekt kam durch ein unglückliches Auftreffen des Antriebsrades auf eine Betonkante bei gleichzeitig zu hoher Fahrgeschwindigkeit zustande. Dadurch wurden in beiden Getrieben die Flanken der Zahnräder beschädigt. Es folgte ein weiterer Austausch. Im Zuge dieser und eines weiteren Defektes an der Steuerungsplatine zeigten sich die Grenzen bei der Zusammenarbeit mit den beiden Firmen in Südtirol. Durch die große räumliche Distanz kam es verständlicherweise zu zeitlichen Verzögerungen in der Abwicklung der Ersatzteilbeschaffung. Probleme mit den Fahrzeugbiblio-

theiken konnten zudem nur telefonisch besprochen und gelöst werden. Ansonsten zeigte sich die Zusammenarbeit als durchaus fruchtbar und erfolgreich.

Die Energiekapazität der Akkumulatoren erwies sich als praxistauglich. Bedingt durch eine Tiefentladung während der Messfahrten reduzierte sich die Kapazität allerdings gegen Ende der Projektzeit. Nach Projektabschluss wurde dem Fahrzeugeigner JKI deshalb ein Austausch empfohlen. Im Rahmen dieser Anschaffung wäre eine Erhöhung der Gesamtkapazität einerseits durch die Wahl von Akkumulatoren mit größerer Einzelkapazität oder durch eine höhere Anzahl an Akkumulatoren sinnvoll, um die Reichweite des PHENObots ohne zusätzliches Aufladen durch den Generator zu steigern (vgl. Kap. 4.8.1).

Der Aufbau und die Struktur des Navigationssystems waren ebenfalls für die untersuchten Anwendungen zweckdienlich und funktionsfähig. Mit Verweis auf die Diskussion der Messergebnisse aus den Versuchsfahrten sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass die Positionsgenauigkeit durch die Kompensation der Fahrzeugneigung deutlich zu erhöhen wäre. Im Zuge der Weiterentwicklung hat die Firma KMS bei den neuen Plattformen zudem das zweite GNSS-Modul durch ein Inertialsystem zur Erkennung der Orientierung ersetzt (KOFLER 2015). Der Mikrocontroller wird dabei durch ein Embedded-System ausgetauscht. Prinzipiell wäre dadurch ein separater Navigationsrechner bei entsprechender Schnittstellenausstattung des Embedded-Systems überflüssig.

5.2 Kameralageregelung

Während der Versuchs- und Projektphase kam es zu einer stetigen Weiterentwicklung des Multikamerasystems (MKS) seitens des Projektpartners JKI. Durch die Erprobungsfahrten konnten Erkenntnisse zur Ausgestaltung und Konfiguration der Kamera- sowie Beleuchtungseinstellungen gewonnen werden. Damit einhergehend vergrößerte sich der benötigte Bauraum auf der Plattform zusehends. Diesem trägt letztlich der Entwurf III der Kameralageregelung Rechnung, welcher konstruktiv in die Praxis umgesetzt wurde. Aufgrund der endgültigen Größe des MKS war es nicht möglich das

zu Beginn gesetzte Ziel, zukünftig zwei Kamerasysteme auf der Plattform unterzubringen, beibehalten zu können. Sehr vorteilhaft war die Wahl der Aluminiumprofile zum flexiblen Aufbau des Grundrahmens. Dadurch konnten Abweichungen vom Entwurf und nachträgliche Optimierungen, sowie zusätzliche Anbauten einfach umgesetzt werden. Im Falle des Einsatzes der zugeschnittenen Aluminiumbleche aus Entwurf II wären nachträgliche Änderungen stets mit zusätzlichen Bohrungen verbunden gewesen.

Die Wahl der angesetzten Dimensionen, Fahrwege und Schwenkwinkel konnte durch die Erkenntnisse und Ergebnisse der Erprobungs- bzw. Messfahrten bestätigt werden. Es zeigte sich, dass der vierte Freiheitsgrad „Schwenkachse II“ bei der auszuführenden Bonituraufgabe nicht notwendig ist. Durch den Schwenk des MKS um die Bildachse würde sogar ein nachteiliger Effekt entstehen. In konventionellen Spalieranlagen ist die Laubwand der Rebzeile unabhängig von der Hangneigung stets parallel zum Boden ausgerichtet. Bei der Fahrt und Nullstellung der Kameralageregelung wird das MKS parallel zur Plattform und damit parallel zum Boden geführt. Sollte jedoch eine lageabhängige Nivellierung des MKS in Schwenkachse II ausgeführt werden, könnte es mit größer werdender Hangneigung zur Verschiebung des Bildausschnittes und damit zum Verlust von Bildinformationen in den Rand- und Eckenbereichen kommen. Deshalb wurde auf die Nivellierung um Schwenkachse II verzichtet. Ein positiver Nebeneffekt ist zudem in der Einsparung von Energie beim Verzicht der Positionierung um den vierten Freiheitsgrad zu sehen.

Die automatische Nivellierung der Schwenkachse I nach den Daten des Neigungssensors funktionierte während der Versuche sehr zuverlässig. Eine Korrektur der Höheneinstellung bei großen Schwenkwinkeln war nach den Auswertungen der Bilddaten nicht notwendig. Es traten keine Verluste von Bildinformationen aufgrund abgeschnittener Laubwandbereiche auf. Die Einstellung des horizontalen Abstandes zur Laubwand und die Aufnahmehöhe werden nach aktueller Konfiguration manuell über das Steuerkreuz vorgewählt. Eine Automatisierung ist mit geringem Programmieraufwand realisierbar. Dazu müssten zusätzliche Abstands- und Höheninformationen in der Koordinatendatenbank implementiert und von den

Transformationsskripten weiterverarbeitet werden. Mittelfristig ist jedoch die Beibehaltung der manuellen Lösung geplant, da die Einstellungen lediglich einmalig pro zu bonitierender Parzelle vorgenommen werden müssen.

5.3 PHENObot

Der modulare Aufbau durch Plattformbauweise und absetzbarem Kameralageregelungssystem hat sich während der Versuchsphase bewährt. Vor allem bei Wartungs- und Reparaturarbeiten kann der komplette Aufbau innerhalb weniger Minuten von der Trägerplattform getrennt werden. Dazu sind lediglich ein Innensechskantschlüssel sowie ein Gabelstapler oder ein Hubwagen notwendig. Während der Reparaturphase des zweiten Getriebedefektes konnte so am abgesetzten Lageregelungssystem weiter gearbeitet und optimiert werden (Abb. 53 und Abb. 54).

Die Bedienbarkeit des gesamten Systems über die beiden Bedienbereiche wurde von allen Anwendern positiv bewertet. Alle Konfigurationsbereiche sind klar getrennt voneinander bedienbar. Zur manuellen Lageeinstellung des MKS muss beispielsweise keine Benutzereingabe über den Rechner erfolgen. Sämtliche Eingaben können über eindeutig beschriftete Schaltelemente am Schaltschrank vorgenommen werden.

Durch die Gliederung in zwei Teilprojekte kam es folglich zur Nutzung zweier separater Rechner mit unterschiedlichem Betriebssystem. Zur Optimierung des Systemlayouts wäre hier eine Portierung auf einen Rechner, auch unter Berücksichtigung eines Embedded-Systems auf der Fahrzeugplattform, denkbar. Während der Versuchsphase war dies allerdings aufgrund der räumlichen Distanz der beiden Projektgruppen nicht realisierbar.

Die eingesetzte hochwertige Schrittmotor- und Steuerungstechnik hat sich, gerade bei schlechter Witterung, als äußerst robust erwiesen. So können im Anwendungsbetrieb auch Bonituren während Schlechtwetterperioden durchgeführt werden. Hierbei wirkt sich der Einsatz von Kettenlaufwerken ebenfalls positiv aus (BLUMENTHAL 1985).

5.4 Softwareentwicklung

Ein bedeutender Teil der Projektphase wurde zur Entwicklung verschiedener Software- und Steuerungsanwendungen verwendet. Während der Erprobung erfolgte eine intensive Evaluierung der benötigten Komponenten. Die Entwicklung verlief mehrstufig. Zum einen wurde das Verhalten des Trägerfahrzeuges mit Basisfunktionen einer Entwicklungsvariante von PHENObotControl analysiert und optimiert. Zum anderen verlief parallel dazu der Aufbau des Kameralageregelungssystems unter Nutzung der mitgelieferten Steuerungsalgorithmen des Herstellers und Implementierung weiterer Funktionen, wie die automatische Nivellierung mit zusätzlicher Sensorik. Der letzte zentrale Baustein des Gesamtsystems war der Aufbau und die Verfeinerung der Aufgabenabarbeitung.

Gerade im Bereich der Anwendungsentwicklung PHENObotControl ergab sich eine steile Lernkurve, auch mit Implementierung etlicher Komfortfunktionen, welche über die Anforderungen der Basisfunktionen deutlich hinausgehen. Zu nennen wären hier beispielsweise Protokoll- und Alarmfunktionen. Das Zusammenwirken der Funktionsbereiche Navigation und Lageregelung konnte zudem ohne weiteres realisiert werden.

Aus den Erfahrungen der ersten Vorversuche wurde die Struktur einer Stockinformationsdatenbank erstellt. Darauf aufbauend entstand der Workflow zur Generierung der Job- und Projektdateien. Durch die Erkenntnisse in der frühen Erprobungsphase kam es zum intensiven Einsatz der GIS-Anwendungen GRASS GIS und QGIS, deren jeweilige Vorteile (BILL 2010, STEINIGER & HAY 2009) gezielt kombiniert wurden. Die Nutzung der bash-Skripte zur Steuerung und Abwicklung der Transformation, sowie der Jobdateiausgabe erwiesen sich als flexibel und im vorliegenden Ausmaß als noch effizient. Bei Zunahme der Anforderungen und steigender Komplexität der Arbeitsaufträge wäre an dieser Stelle eventuell die Erstellung einer separaten Anwendung in einer höheren Sprache, z. B. C++ mit Nutzung der IDE Qt, denkbar.

5.5 Auswertung der Versuchsphase

Die Erkenntnisse der Erprobungsfahrten, vor allem diejenigen auf der Testfläche im Hof des Institutes für Technik, zeigen die Notwendigkeit einer zuverlässigen Verfügbarkeit von Satelliten während des automatischen Fahrbetriebes. Durch die untere Schwelle von mindestens fünf SV sollte prinzipiell die Sicherstellung des ausreichend genauen Fahrbetriebes gewährleistet sein. In einigen Fällen, insbesondere unter kritischen Bedingungen hinsichtlich Verfügbarkeit, traten zeitweise Ungenauigkeiten und unvorhersehbare Reaktionen der Trägerplattform auf. So kam es beispielsweise, gerade im Schwellenbereich, zum unkontrollierten Drehen um die Fahrzeugachse bei der Initialisierung eines neuen Fahrauftrages, das auf fehlerhafte Parameter in der Fahrzeugbibliothek zurückgeführt wurde. Im Zuge eines Firmwareupdates der Trägerplattform sollte dieser Fehler beseitigt werden. Danach ist das Verhalten bis zum Projektabschluss nicht mehr aufgetreten. Die Problematik des Korrektursignalverlustes bei sehr hoher SV-Verfügbarkeit konnte leider nicht kausal gelöst werden. Als Ursache wird entweder ein Fehler in der Firmware des GNSS-Moduls der Basisstation oder der darauf aufbauenden Anwendung vermutet. Diese Teilbereiche unterliegen der Verantwortlichkeit und den Interessen der zuliefernden Unternehmen und sind deshalb geschützt. Es konnte keine Analyse des Quelltextes zur Fehlersuche vorgenommen werden. Die Kontaktaufnahme und der Lösungsversuch mit der Herstellerfirma der Module waren nicht erfolgreich. Als Workaround wurde eine variable Elevationsmaske in der Basisstationssoftware implementiert. Tritt eine Verfügbarkeit von mehr als neun SV auf, wird die Maske so lange erhöht bis die Schwelle nicht mehr überschritten wird. Diese Lösung hat sich im Zuge der weiteren Anwendung als praktikabel erwiesen. Es konnten keine negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit bzw. die Standfestigkeit des Korrektursignals unter Berücksichtigung der allgemeinen Definition der Ortungsgenauigkeit nach DODEL (2010) festgestellt werden.

Die Kalibrationen der RTK-Systeme zur Datumstransformation von WGS84 zu ETRS89 (BECKER & HEHL 2012) zeigten sich praxistauglich und ausreichend genau.

Aus den Erfahrungen mit schlechter Verfügbarkeit auf der Versuchsfläche Technik wurde ein möglicher Einfluss der vollausgebildeten Laubwand auf die Empfangsstärke abgeleitet. Zu Zeiten voller Belaubung befindet sich die Antenneneinheit in der Ausgangssituation etwa in halber Höhe der Laubwand. Daraus folgen Elevationswinkel $>45^\circ$ und damit zwangsläufig Abschattungs- und Multipatheffekte an den Blättern. Deshalb wurde eine Höhenverstellung für die Antenneneinheit konzipiert, die beide GNSS-Antennen in den Bereich der Gipfelzone bringt. Dadurch resultieren je nach Höhe der Laubwand Elevationen $<15^\circ$. Die durchgeführten Versuche in Geisenheim und Siebeldingen mit unterschiedlicher Höheneinstellung zeigen konsequent einen positiven Effekt auf die Verfügbarkeit bei der oberen Einstellung `ant_oben`. Darüber hinaus ergab sich eine Reduzierung der Streuung in transversaler Richtung bei Einstellung `ant_oben`. Allerdings wird durch die höhere Position der GNSS-Antenne der Einfluss der Geländeneigung auf die absolute Positionierung größer. Prinzipiell wird von allen GNSS-Systemen die Position senkrecht unter der Antenne angenommen. Ohne Kompensation der Fahrzeugneigung verschiebt sich diese auf Grundlage der Trigonometrie bei Schrägstellung der Hochachse. Im Navigationssystem des PHENObot ist die Neigungskompensation in der aktuellen Ausbaustufe nicht vorgesehen. Daraus entstehen durch moderaten Seitenhang in Parzelle 23 die Fahrspurverschiebungen in transversaler Richtung (Abb. 118). Ähnliches gilt für die Abweichungen in longitudinaler Richtung, wobei dieser Fehler zusätzlich von der Fahrbewegung und Fahrtrichtung abhängig ist. Entlang der Fahrtrichtung ist die Positionierung anfällig für die Dynamik der Fahrgeschwindigkeit. In allen Auswertungen ist das Fahrzeug über den theoretischen Haltepunkt hinausgefahren und erst danach stehengeblieben. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von NØRREMARK et al. (2007). Zusätzlich entsteht durch die höhere Antennenposition ein größerer Einfluss durch Wankbewegungen des Fahrzeugs beim Anhalten. Es war optisch ein Nachwippen der Plattform beim Erreichen des Punktes und Stoppen zu erkennen. Begünstigt wurde dieses Verhalten durch ungünstige Geländeeigenschaften (z. B. Fahrbahnerhebungen).

Um zu untersuchen, ob durch die verbesserte Verfügbarkeit bei Einstellung `ant_oben` positive Auswirkungen auf die Positionsgenauigkeit folgten, wurden deren Beträge in Bezug zur Anzahl empfangener SV gesetzt. Es zeigte sich nur eine schwache Korrelation, wobei sich tendenziell eine Verbesserung der Genauigkeit ergab (Abb. 121).

Die absolute Genauigkeit bei der wiederholten Fahrt hat sich im Bereich der aus der Literatur bekannten Werte bewegt (GAN-MOR et al. 2007, NØRREMARK et al. 2007, SUN et al. 2010, PEREZ-RUIZ et al. 2012). Dabei ist der Einfluss der fehlenden Neigungskompensation zu berücksichtigen. NØRREMARK et al. (2007) fanden bis zu 59-fach größere Positionsfehler bei unterlassener Neigungskompensation. Es war feststellbar, dass der absolute Fehler in transversaler Richtung etwa doppelt so groß wie die herstellerseitig angegebene Genauigkeit der GNSS-Module ist. Dieses Erkenntnis deckt sich ebenfalls mit den o. g. Untersuchungen. Die Diskrepanz ist auf Fehlerquellen bei der GNSS-basierten Ortung zurückzuführen. Dabei konnte nicht endgültig geklärt werden, ob das eingesetzte RTK-System für die Fehlerentstehung allein verantwortlich ist. In einer der beiden untersuchten Messreihen konnte kein signifikanter Mittelwertunterschied zwischen Navigationssystem und Referenzsystem gefunden werden. Im Fall des zweiten Mittelwertpaares, dessen Unterschied statistisch signifikant war, lag ein um den Faktor zwei größerer Fehler im Vergleich zum ersten Mittelwertpaar. Es ist hierbei nochmals die Rolle der fehlenden Neigungskompensation zu unterstreichen. Um die absolute Genauigkeit abschließend zu untersuchen, wäre eine Referenzmessung mit einem tachymetrischen Verfahren denkbar, dessen Genauigkeit um den Faktor zehn größer ist. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen konnte diese Methode im Rahmen dieser Arbeit nicht angewandt werden. Nach Ansicht des Autors ist die gefundene absolute Genauigkeit im Rahmen der Mess- und Erprobungsfahrten für die Anforderungen der Bonituraufgabe durchaus ausreichend. Aus diesem Grund wurden zusätzlich der relative Positionsfehler und dessen Schwankung untersucht. Dabei konnte keine signifikante Abweichung zwischen den befahrenen Reihen während der vier Wiederholungen gefunden werden. Der Positionsfehler (38 mm transversal; 73 bzw. 74 mm longitudinal)

(Abb. 106) liegt wiederum in den aus der Literatur bekannten Größenordnungen. Unter Berücksichtigung der Bonituranforderungen ist eine relative Genauigkeit von <50 mm erstrebenswert. Nach dieser Definition ist der transversal gefundene Fehler positiv, die longitudinale Abweichung eher negativ zu bewerten. Trotzdem wurde gemessen an den Boniturergebnissen durch die Bilddaten die Aufgabe zufriedenstellend erfüllt, da die Variabilität der Rebstöcke (Anhalteposition in Bogrebenmitte) diesen longitudinalen Positionsfehler etwa um den Faktor zwei übersteigt.

Die genutzten Stockkoordinaten wurden im Vorfeld nach der Pflanzung der Versuchspartellen mit einem RTK-Vermessungssystem erfasst (vgl. Abb. 29). Dabei ist die lotrechte Ausrichtung der GNSS-Antennen über der Pflanzposition zu beachten. Gerade während der Vegetationsphase war dies durch die ausgebildete Laubwand nicht durchgängig möglich. Daraus resultierten Verschiebungen in transversaler und longitudinaler Richtung vom tatsächlichen Standort der Rebe. Bemerkbar wurden diese Diskrepanzen bei den ersten Erprobungsfahrten durch oszillierende und schlingernde Fahrbewegungen des PHENObot, vor allem in transversaler Richtung. Zur Beseitigung erfolgte die Implementierung einer Glättungsfunktion in das Transformationsskript zur Ausgabe der Jobdateien. Bei Vergleichsfahrten in einer Reihe vor und nach der Glättung zeigte sich ein deutlich wahrnehmbares, ruhigeres Fahrverhalten ohne größere Korrekturbewegungen. Hervorzuheben ist dabei nicht nur die Energieeinsparung durch in der Summe kürzere Fahrwege und Korrekturbewegungen, sondern auch die exaktere Ausrichtung des MKS quasi senkrecht zur Laubwand.

Die Auswertung der Daten zur Evaluierung der potentiellen Schlagkraft und Leistungsfähigkeit des Bonitursystems ergab sehr positive Ergebnisse. Inklusive aller Wege- und Wendezeiten wurden für die Bonitur der Parzelle 23 hochgerechnet rund 580 Minuten benötigt. Bei einer Stockanzahl von 2 726 ergibt dies eine durchschnittliche Boniturzeit von 12,8 Sekunden pro Stock. ROSCHER et al. (2014) benötigten bei der manuellen Bonitur der Barendurchmesser mit einem Messschieber etwa vier Minuten pro Pflanze (ROSCHER et al. 2014). Damit wird die benötigte Zeit zur Erfassung des phänotypischen Merkmals *Ertrag* um knapp das 19-fache reduziert. Bei

beiden Verfahren ist noch die im Nachgang stattfindende Datenaufbereitung zu berücksichtigen. Durch die automatische Bildaufnahme können die Daten für die Untersuchung weiterer Parameter, wie *Krankheitsbefall*, genutzt werden. Es ist keine zusätzliche Bonitur von Nöten. Zudem unterliegt die automatisierte Bonitur keinerlei subjektiven Einflüssen und kann unabhängig von der Ermüdung humaner Anwender durchgeführt werden. Es ist lediglich die ausreichende Versorgung der Plattform mit Energie zu gewährleisten. Eine weitere Beschleunigung der Bonitur könnte durch die Bildaufnahme während der Fahrt ohne Halt erreicht werden. Zum aktuellen Zeitpunkt ist das Stehenbleiben zur Sicherung einer optimalen Bildqualität allerdings noch notwendig.

5.6 Beurteilung der Thesen

Die eingangs formulierten Thesen können nach Auswertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des aktuellen Wissensstandes wie folgt beurteilt werden:

- I. Unter Beachtung der definierten Aufgabenanforderungen ist es gelungen mit dem PHENObot eine automatisch fahrende Plattform zu konstruieren, die in den Größenordnungen eines Rebbestandes uneingeschränkt eingesetzt werden kann.
- II. Die erzielte Genauigkeit wurde mit Literaturangaben ins Verhältnis gesetzt und liegt bei Betrachtung der absoluten Größen in transversaler Richtung unterhalb der definierten Schwelle. Entlang der Fahrtrichtung traten zwar höhere Fehler auf, diese waren jedoch bei Betrachtung der allgemeinen Variabilität der Rebanlagen praxisrelevant nicht schädigend.
- III. Die automatisierte Aufbereitung der vorhandenen Stockkoordinaten konnte erfolgreich realisiert werden. Das Bonitursystem kann die exportierten Auftragslisten direkt und unmittelbar auslesen und verarbeiten. Bei Erweiterung des Funktionsumfanges ist eine Portierung in eine komplexere Softwareumgebung denkbar.

- IV. Das Multikamerasystem mit integrierter Beleuchtungseinheit wurde in ein Kameralageregelungssystem mit vier (momentan genutzt: drei) möglichen Freiheitsgraden implementiert. Die Höhen- und Abstandseinstellung wird nach Anwenderwunsch manuell vorgenommen. Vorhandene transversale Geländeneigungen werden vor jeder Bildaufnahme adaptiv ausgeglichen, um eine parallele Ausrichtung der Bild- zur Laubwandebene herstellen zu können.
- V. Die Leistungsfähigkeit des Bonitursystems übersteigt das Potential einer manuell ausgeführten Phänotypisierung erheblich. Das geforderte Niveau von 250 Rebstöcken pro Stunde kann sogar mit Berücksichtigung der Wege- und Wendezeiten noch übertroffen werden. Die Datenerfassung verläuft vollständig objektiv ohne jegliche Einflüsse humaner Ermüdung.

5.7 Ausblick

Das Bonitursystem (Abb. 123) könnte in der aktuellen Konfiguration nicht nur in der Rebenzüchtung, sondern auch im Ertragsweinbau eingesetzt werden. Denkbar ist die Nutzung in großen traubenerzeugenden Betrieben oder Genossenschaften, als Baustein des qualitätsorientierten Auszahlungssystems. Weiterhin ist der Anbau neuer und zusätzlicher Sensoren zur Datengewinnung möglich.

Das satellitengesteuerte Trägerfahrzeug kann zudem mit anderen Aufbauten zu Pflegearbeiten im Weinbau, sowie weiteren Sonder- und Raumkulturen eingesetzt werden. Das Antriebs- und Steuerungskonzept könnte auch auf neue selbstfahrende und automatisch, bzw. autonom auszuführende Anwendungen übertragen werden.



Abb. 123 PHENObot in der finalen Version bei den Vorversuchen zum Anwendungsversuch.

Diese Seite wurde absichtlich frei gelassen.

6 Zusammenfassung

Der Anbau von Weinreben blickt auf eine lange Tradition zurück, die jedoch gleichzeitig im Zeichen der stetigen Weiterentwicklung steht. Bei der Züchtung neuer Rebsorten wird der Pilzwiderstandsfähigkeit eine große Bedeutung beigemessen. In der Bewirtschaftung der Rebanlagen kommen zunehmend Methoden der präzisen Landwirtschaft in Adaption zum Einsatz. Das Forschungsprojekt PHENOvines versuchte diese beiden Bereiche miteinander zu verknüpfen. Um die während der Rebenzüchtung notwendigen Phänotypisierungen zu beschleunigen und zu objektivieren, wurde die automatisierte, selbstfahrende Boniturplattform PHENObot entwickelt.

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit stehen die konzeptionellen und konstruktiven Arbeiten zur Erstellung dieser Boniturplattform, deren Navigation, sowie die Führung des Sensorsystems zur Bilddatenerfassung. Ein weiterer Bestandteil ist zudem die experimentelle Erprobungs- und Versuchsphase. Zu Beginn der Projektlaufzeit wurden Antriebskonzepte evaluiert und schließlich ein bereits auf dem Markt befindlicher, mit elektrischen Bandlaufwerken betriebener Großkistentransporter als Trägerfahrzeug ausgewählt. Die automatische Spurführung entlang, mittels NAVSTAR GPS erfasster Stockkoordinaten, konnte durch die Ausrüstung mit einem RTK-Navigationssystem sichergestellt werden. Allein die Positionsdaten werden zur Navigation genutzt. Daneben kommen Ultraschallsensoren, sowie ein mechanisches Anfahrsschild zur Hindernisabtastung als Sicherheitseinrichtungen zum Einsatz. Bedient wird das Bonitursystem über die eigens entwickelte Steuerungsapplikation PHENObotControl 1.0. Dazu sind textbasierte Jobdateien notwendig, deren Erzeugung anhand der Stockkoordinaten mittels skriptbasierter Transformation und Verarbeitung in der GIS-Anwendung GRASS GIS erfolgt. Der Boniturvorgang ist gegliedert in Anfahrt zum Haltepunkt direkt vor dem Rebstock, Nivellierung des Multi-Kamerasystem (MKS), Bildauslösung, Bildspeicherung und Weiterfahrt zum nächsten Stock. Die Nivellierung wird anhand der Daten eines Neigungssensors in einem Lageregelungssystem mit vier möglichen Freiheitsgraden durchgeführt. Bei Erreichen der vorgegebenen Position sendet das Navigationssystem einen Auslösebefehl mit Positions- und Identifikations-

daten an das Bilderfassungssystem, das neben fünf Kameras unterschiedlicher Wellenlängenbereiche auch ein LED-Beleuchtungssystem enthält. Zur Gewährleistung der Objektivität und gleichbleibender Bildqualität findet die Bonitur vornehmlich bei Dunkelheit oder neutralen Lichtbedingungen statt. Die Energie für den elektrischen Antrieb wird in einem Akkumulatorenpaket bereitgehalten, das zusätzlich über einen Generator nach dem Prinzip des Hybridantriebs wiederaufgeladen werden kann.

In der Erprobungsphase wurden alle Funktionen des PHENObot getestet und weiterentwickelt. Messfahrten dienten zur Feststellung und Quantifizierung der auftretenden Positionsfehler und deren Quellen. Im Mittel waren die transversalen Positionsabweichungen quer zur Fahrtrichtung bei der Bonitur kleiner als 50 mm. Dies ist ausreichend genau genug, um das MKS optimal zur Bildaufnahme vor einem Rebstock ausrichten zu können. Ein Anwendungsversuch in zwei aufeinanderfolgenden Nächten beendete die Versuchsphase am Standort Siebeldingen. Dabei wurden Bildinformationen von 2 726 Rebstöcken bei einer Boniturleistung von gut 280 Stöcken pro Stunde oder knapp $600 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ erhoben. Im Vergleich zur manuellen Bonitur des Parameters Ertrag konnte somit die Leistung um das knapp 19-fache gesteigert werden. Darüber hinaus liegen durch die aufgenommenen Bilder weitere Informationen zur Beurteilung anderer Parameter vor. In der zusätzlich zur Verfügung stehenden Zeit kann sich der Anwender der Auswertung und Interpretation der gewonnenen phänotypischen Daten widmen. Somit kann ein Beitrag zur Reduzierung der Zuchtdauer einer neuen Rebsorte geleistet werden.

7 Summary

The cultivation of grape vines has a long tradition, whilst at the same time being subject to continuous development. When developing new strains of grape vines, great importance is attached to fungal resistance. Vineyard management is also making increased use of adapted precision agriculture methods. The PHENOvines research project was an attempt to link these two trends. The PHENObot automated, self-propelled plant assessment platform was developed for the purpose of accelerating and objectifying the phenotyping required in vine cultivation.

The focus of the current work is the design and construction of the assessment platform, its navigation, and the guidance of the sensor system used for image data acquisition. Another element is the experimental trial and testing phase. Drive system designs were evaluated at the beginning of the project. From these, a commercially available bulk bin transporter with electrically propelled caterpillar tracks was selected as the carrier vehicle. The equipment included an RTK navigation system to ensure reliable automatic tracking along the vine coordinates determined by NAVSTAR GPS. Navigation is based solely on the position data. The equipment also includes safety features such as ultrasound sensors and a mechanical, obstacle-sensing collision protector. The plant assessment system is operated via the PHENObotControl 1.0 purpose-designed control software. The software works with text-based job files, which are created using the vine coordinates via script-based transformation and processing in the GIS application, GRASS GIS. The plant assessment procedure is structured as follows: the machine travels to a point directly in front of the vine; the multi-camera system (MKS) is levelled; the image is captured and saved; the machine continues to the next vine. The levelling process is carried out using data from a tilt sensor in a position control system with four possible degrees of freedom. Once the machine has reached the specified position, the navigation system sends a signal (including position and identification data) that triggers the image acquisition system. In addition to five cameras with different wavelength ranges, this system is equipped with LED lighting. In order to ensure objectivity and consistent image quality, the plant

assessment procedure usually takes place either in the dark or in neutral lighting conditions. The power for the electric drive system is stored in a battery pack, which can also be recharged via a generator that works on the same principle as a hybrid drive system.

All of the PHENObot's functions were tested and refined during the trial phase. Test runs were used to assess and quantify positioning errors and their causes. During the plant assessment, the transversal positioning deviations perpendicular to the direction of travel were on average under 50 mm. This is sufficiently precise to enable the multi-camera system to be positioned accurately in front of a grape vine for image capturing purposes. Tests carried out on two consecutive nights completed the trial phase at the Siebeldingen site. During the tests, 2,726 images of grape vines were collected at a rate of at least 280 vines per hour, or approximately 600 m² h⁻¹. In comparison with the manual alternative, this represents an approximately 19-fold increase in speed in assessing the grapes. The images also provide additional information that can be used to evaluate other parameters. Not only that, but users can devote the time they saved to evaluating and interpreting the phenotypical data collected. The process can thus help to reduce the time taken to cultivate new grape varieties.

8 Literaturverzeichnis

Monografien und Artikel

- ADAM, J., AUGATH, W., BOUCHER, C., BRUYNINX, C., DUNKLEY, P., GUBLER, E., GURTNER, W., HORNIK, H., MAREL, H., SCHLÜTER, W. (2000): The European reference system coming of age, *Geodesy Beyond 2000*, Springer, pp. 47–54.
- ADRIAN, A., NORWOOD, S., MASK, P. (2005): Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. *Computers and Electronics in Agriculture* 48, (3), pp. 256–271.
- ALBERTZ, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, *Wiss. Buchges.*, Darmstadt. 4. Aufl.
- AQEEL-UR-REHMAN, ABBASI, A., ISLAM, N., SHAIKH, Z. (2014): A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces* 36, (2), pp. 263–270.
- ARNÓ, J., CASASNOVAS, J., DASI, M., ROSELL, JR (2009): Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7, (4), pp. 779–790.
- AUERNHAMMER, H. (1994): Introduction. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1). p. 1.
- AUERNHAMMER, H. (2000): Das Landwirtschaftliche BUS-System LBS und die Satellitenortung GPS als Schlüsseltechnologien für die Prozesssteuerung im Pflanzenbau – Referate der 21. GIL-Jahrestagung in Freising-Weißenstephan 2000 (Band 13). GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK IN DER LAND-, FORST- UND ERNÄHRUNGSWIRTSCHAFT, HRSG.
- AUERNHAMMER, H. (2001): Precision farming — the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture* 30, (1-3), pp. 31–43.
- AUERNHAMMER, H. (2002): Automatische Betriebsdatenerfassung im Ackerbau und seine Nutzenanwendung. *Ackerbau der Zukunft*, 45.
- AUERNHAMMER, H., DEMMEL, M., MUHR, T., ROTTMEIER, J., WILD, K. (1994): GPS for yield mapping on combines. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 53–68.
- AUERNHAMMER, H., DEMMEL, M., SPANGLER, J. (1999): Betriebsdatendokumentation mit LBS und GPS für Traktor-Gerätekombinationen – Tagung Landtechnik.
- AUTOVIMATION, unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2014): 3D-CAD-Entwurf des Multi-Kamera-System II. Persönliche Mitteilung.
- BANGERT, W., KIELHORN, A., RAHE, F., ALBERT, A., BIBER, P., GRZONKA, S., HAUG, S., MICHAELS, A., MENTRUP, D., HÄNSEL, M. (2013): Field-Robot-Based Agriculture: RemoteFarming. 1 and BoniRob-Apps. *VDI-Berichte*, (2193), pp. 439–446.
- BASTIAANSEN, W., MOLDEN, D., MAKIN, I. (2000): Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, (2), pp. 137–155.

- BATTE, M., EHSANI, M. (2006): The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 53, (1), pp. 28–44.
- BAUER, M. (2011): Vermessung und Ortung mit Satelliten – Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, Wichmann, Berlin [u.a.]. 6. Aufl.
- BBA (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen – BBCH Monografie.
- BECKER, M., HEHL, K. (2012): Geodäsie, WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), [S.l.].
- BIBER, P., WEISS, U., DORNA, M., ALBERT, A., Hrsg. (2012): Navigation system of the autonomous agricultural robot Bonirob.
- BILL, R. (2010): Grundlagen der Geoinformationssysteme, Wichmann, Berlin.
- BLACKMORE, B., FOUNTAS, S., GEMTOS, T., GRIEPENTROG, H. (2009): A Specification for an Autonomous Crop Production Mechanization System. *Acta Hort. (ISHS)*, (824), pp. 201–216.
- BLOSS, R. (2014): Robot innovation brings to agriculture efficiency, safety, labor savings and accuracy by plowing, milking, harvesting, crop tending/picking and monitoring. *Industrial Robot* 41, (6), pp. 493–499.
- BLUMENTHAL, R. (1985): Technisches Handbuch Traktoren, VEB Verlag Technik.
- BOGUE, R. (2013): Can robots help to feed the world? *Industrial Robot* 40, (1), pp. 4–9.
- BÖHRNSEN, A. (2009): Mit Spuranzeige fahren oder automatisch lenken. *Profi*, (7), pp. 74–77.
- BÖTTINGER, S. (2010a): Informationstechnik für den Einsatz auf Landmaschinen – Referate der 30. GIL-Jahrestagung in Hohenheim 2010 - Precision Agriculture Reloaded - informationsgestützte Landwirtschaft. GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK IN DER LAND-, FORST- UND ERNÄHRUNGSWIRTSCHAFT, HRSG.
- BÖTTINGER, S. (2010b): Roboter und Automatisierung für das Maschinenmanagement. KTBL, Hrsg.
- BRUNNER, D., unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2014): Geoidundulation für den Bereich Geisenheim. Persönliche Mitteilung.
- BVV (2009): UTM-Abbildung und UTM-Koordinaten. LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG, BREITBAND UND VERMESSUNG, BAYERN, HRSG.
- CALDEWEYHER, D., ZHANG, J., PHAM, B. (2006): OpenCIS—Open Source GIS-based web community information system. *International Journal of Geographical Information Science* 20, (8), pp. 885–898.
- CHEN, D., SHAMS, S., CARMONA-MORENO, C., LEONE, A. (2010): Assessment of open source GIS software for water resources management in developing countries. *Journal of Hydro-environment Research* 4, (3), pp. 253–264.
- CIEPLUCH, B., JACOB, R., MOONEY, P., WINSTANLEY, A., Hrsg. (2010): Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps, University of Leicester.

- COX, S. (2002): Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, (2-3), pp. 93–111.
- CUBERO, S., ALEIXOS, N., ALBERT, F., TORREGROSA, A., ORTIZ, C., GARCÍA-NAVARRETE, O., BLASCO, J. (2014): Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agric* 15, (1), pp. 80–94.
- DE-AN, Z., JIDONG, L., WEI, J., YING, Z., YU, C. (2011): Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering* 110, (2), pp. 112–122.
- DEERY, D., JIMENEZ-BERNI, J., JONES, H., SIRAUT, X., FURBANK, R. (2014): Proximal Remote Sensing Buggies and Potential Applications for Field-Based Phenotyping. *Agronomy* 4, (3), pp. 349–379.
- DELCOURT, H., BAERDEMAEKER, J. DE (1994): Soil nutrient mapping implications using GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 37–51.
- DIN (2007): DIN EN ISO 19111:2007-10 – Geoinformation - Koordinatenreferenzsysteme (ISO 19111:2007), Beuth.
- DODEL, H., HÄUPLER, D. (2010): *Satellitenavigation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1 online resource (Online-Ressource.).
- EHRL, M., AUERNHAMMER, H. (2007): X-by-wire via ISOBUS communication network. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- EMMI, L., PAREDES-MADRID, L., RIBEIRO, A., PAJARES, G., GONZALEZ-DE-SANTOS, P. (2013): Fleets of robots for precision agriculture: a simulation environment. *Industrial Robot* 40, (1), pp. 41–58.
- European Union (2012): Primary and secondary descriptors used in Genres-Projects (Genres081/GrapeGen06).
- FERNÁNDEZ, R., MONTES, H., SALINAS, C., SARRIA, J., ARMADA, M. (2013): Combination of RGB and multispectral imagery for discrimination of cabernet sauvignon grapevine elements. *Sensors (Basel, Switzerland)* 13, (6), pp. 7838–7859.
- FRITZ, S., MCCALLUM, I., SCHILL, C., PERGER, C., SEE, L., SCHEPASCHENKO, D., VAN DER VELDE, MARIJN, KRAXNER, F., OBERSTEINER, M. (2012): Geo-Wiki: An online platform for improving global land cover. *Environmental Modelling & Software* 31, pp. 110–123.
- GAN-MOR, S., CLARK, R., UPCHURCH, B. (2007): Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computers and Electronics in Agriculture* 59, (1-2), pp. 31–38.
- GEO-KONZEPT (2014): *Vorführung geo-konzept Octocopter*. Präsentation, Geisenheim.
- GODFRAY, C., BEDDINGTON, J., CRUTE, I., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J., PRETTY, J., ROBINSON, S., THOMAS, S., TOULMIN, C. (2010): Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science (New York, N.Y.)* 327, (5967), pp. 812–818.
- GOODCHILD, M. (1992): Geographical data modeling. *Computers & Geosciences* 18, (4), pp. 401–408.

- GÖRRES, B., MAYER, M., NOTHNAGEL, A., HECK, B. (2012): Bezugssysteme für GNSS – DVW-Merkblatt 5-2012. DVW - GESELLSCHAFT FÜR GEODÄSIE, GEOINFORMATION UND LANDMANAGEMENT E.V., HRSG.
- GRIEPENTROG, H. (2010): Automatisierung in der Außenwirtschaft. KTBL, Hrsg.
- GRUBER, F., JOECKEL, R. (2014): Formelsammlung für das Vermessungswesen, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden. 17. Aufl.
- HALL, A., LAMB, D., HOLZAPFEL, B., LOUIS, J. (2002): Optical remote sensing applications in viticulture-a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 8, (1), pp. 36–47.
- HALL, A., LOUIS, J., LAMB, D. (2003): Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images. *Computers & Geosciences* 29, (7), pp. 813–822.
- HARZER, C. (2014): GIS-Report 2014/15.
- HAYASHI, S., SHIGEMATSU, K., YAMAMOTO, S., KOBAYASHI, K., KOHNO, Y., KAMATA, J., KURITA, M. (2010): Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. *Biosystems Engineering* 105, (2), pp. 160–171.
- HEMISPHERE (2012): EclipseII_Data_Sheet_WEB_2.2012 – Datenblatt.
- JI, W., ZHAO, D., CHENG, F., XU, B., ZHANG, Y., WANG, J. (2012): Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot. *Computers & Electrical Engineering* 38, (5), pp. 1186–1195.
- JOHNSON, L., BOSCH, D., WILLIAMS, D., LOBITZ, B. (2001): Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture* 17, (4), pp. 557–560.
- Kadisch, E., Müller, E., Lipps, H.-P. (2008): *Weinbau – Der Winzer*, Ulmer, Stuttgart.
- KEICHER, R. (2002): Bestandsorientierte automatische Nachführung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen in Reihenkulturen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung. Dissertation INSTITUT FÜR LANDTECHNIK GIEßEN, JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT, HRSG.
- KEICHER, R., SEUFERT, H. (2000): Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture* 25, (1-2), pp. 169–194.
- KICHERER, A., unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2013a): Auswertungsergebnisse Bilderfassung mit Multikamerasystem ohne künstliche Beleuchtung. Persönliche Mitteilung.
- KICHERER, A., unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2013b): Bildmaterial zum Forschungsprojekt PHENOvines. Persönliche Mitteilung.
- KICHERER, A., HERZOG, K., PFLANZ, M., WIELAND, M., RÜGER, P., KECKE, S., KUHLMANN, H., TÖPFER, R. (2015): An Automated Field Phenotyping Pipeline for Application in Grapevine Research. *Sensors* 15, (3), pp. 4823–4836.
- KICHERER, A., ROSCHER, R., HERZOG, K., ŠIMON, S., FÖRSTNER, W., TÖPFER, R. (2013): BAT (Berry Analysis Tool): a high-throughput image interpretation tool to acquire the number, diameter, and volume of grapevine berries. *Vitis* 52, (3), pp. 129–135.

- KOFLER, A., unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2015): Funktionsweise der Fahrzeugsteuerung und Bibliothek. Persönliche Mitteilung.
- KONDO, N., MONTA, M., FUJIURA, T. (1996): Fruit harvesting robots in Japan. *Advances in Space Research* 18, (1-2), pp. 181–184.
- KONRAD, H., unter Mitarbeit von RÜGER, P. (2015): Informationen zum Versuchsweinberg Rebenzüchtung Hochschule Geisenheim. Persönliche Mitteilung.
- KRÜGER, G., SPRINGER, R., LECHNER, W. (1994): Global Navigation Satellite Systems (GNSS). *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 3–21.
- KRUIZE, J., ROBBEMOND, R., SCHOLTEN, H., WOLFERT, J., BEULENS, A. (2013): Improving arable farm enterprise integration – Review of existing technologies and practices from a farmer’s perspective. *Computers and Electronics in Agriculture* 96, pp. 75–89.
- KTBL (2013): Weinbau und Kellerwirtschaft, KTBL, Darmstadt. 15. Aufl.
- KÜBLER, H. (2010): Perspektiven für Farmmanagement-Informationssysteme. KTBL, Hrsg.
- LAMB, D., BRAMLEY, R., HALL, A. (2002): Precision viticulture-an Australian perspective. XXVI International Horticultural Congress: Viticulture-Living with Limitations 640, pp. 15–25.
- LAMB, D., FRAZIER, P., ADAMS, P. (2008): Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, (1), pp. 4–9.
- LAMB, D., WEEDON, M., BRAMLEY, R. (2004): Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10, (1), pp. 46–54.
- LARSEN, W., NIELSEN, G., TYLER, D. (1994): Precision navigation with GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 85–95.
- LECHNER, W., BAUMANN, S. (2000): Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 25, (1-2), pp. 67–85.
- LEE, W., ALCHANATIS, V., YANG, C., HIRAFUJI, M., MOSHOU, D., LI, C. (2010): Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, (1), pp. 2–33.
- LENZ, T., OTTO, M. (2013): Praxisratgeber Maschinensicherheit: Fallbezogene Handlungsanleitungen nach der neuen Maschinenrichtlinie, Forum Verlag Herkert, Merching.
- LINZ, A., BRUNNER, D., FEHRMAN, J., GRIMSEL, M., HERLITZIUS, T., KEICHER, R., RUCKELSHAUSEN, A., SCHWARZ, H.-P., WUNDER, E. (2014a): "e1WObot"- A Diesel-Electric Autonomous Sensor Controlled Service-Robot for Orchards and Vineyards. 4th Conference on Machine Control & Guidance, March 19-20, (2014) Proceedings, pp. 16–23.
- LINZ, A., RUCKELSHAUSEN, A., WUNDER, E., HERTZBERG, J. (2014b): Autonomous Service Robots for Orchards and Vineyards: 3D Simulation Environment of Multi Sensor-Based Navigation and Applications.

- LONGO, D., MUSCATO, G. (2013): Design and Simulation of Two Robotic Systems for Automatic Artichoke Harvesting. *Robotics* 2, (4), pp. 217–230.
- LONGO, D., MUSCATO, G., CARUSO, L., CONTI, A., SCHILLACI, G., Hrsg. (2012): Design of a remotely operable sprayer for precision farming application.
- LONGO, D., PENNISI, A., BONSIGNORE, R., MUSCATO, G., SCHILLACI, G., Hrsg. (2010): A Multifunctional Tracked Vehicle Able to Operate in Vineyards Using GPS and Laser Range-finder Technology.
- MANSFELD, W. (2010): Satellitenortung und Navigation – Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme ; mit 65 Tabellen, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. 3. Aufl.
- MAOHUA, W. (2001): Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium. *Computers and Electronics in Agriculture* 30, (1-3), pp. 45–50.
- MIELE, A., FLORES, C., FILIPPINI ALBA, JOSÉ MARIA, AURAND, J.-M. (2014): Precision viticulture in Brazil: Current research status on wine grape. *BIO Web of Conferences* 3, 01013.
- MITASOVA, H., MITAS, L., HARMON, R. (2005): Simultaneous Spline Approximation and Topographic Analysis for Lidar Elevation Data in Open-Source GIS. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 2, (4), pp. 375–379.
- MÖSER, M., MÜLLER, G., SCHLEMMER, H. (2012): *Handbuch Ingenieurgeodäsie*, Wichmann, Heidelberg. 4. Aufl.
- NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P., PECZE, Z., STÉPÁN, Z. (2003): The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 40, (1-3), pp. 45–55.
- NETELER, M., BOWMAN, M., LANDA, M., METZ, M. (2012): GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software* 31, pp. 124–130.
- NICOLAÏ, B., BEULLENS, K., BOBELYN, E., PEIRS, A., SAEYS, W., THERON, K., LAMMERTYN, J. (2007): Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology* 46, (2), pp. 99–118.
- NIKKILÄ, R., SEILONEN, I., KOSKINEN, K. (2010): Software architecture for farm management information systems in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 70, (2), pp. 328–336.
- NOACK, P. O. (2006): Entwicklung fahrspurbasierter Algorithmen zur Korrektur von Ertragsdaten im precision farming. Dissertation. DEPARTMENT FÜR BIOGENE ROHSTOFFE UND TECHNOLOGIE DER LANDNUTZUNG, FACHGEBIET TECHNIK IM PFLANZENBAU, TU MÜNCHEN-WEIHENSTEPHAN, HRSG.
- NOACK, P. O., GEIMER, M., EHRL, M., GRANDL, L., Hrsg. (2010): Virtuelle Kopplung von Fahrzeugen: Elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen.
- NØRREMARK, M., SØGAARD, H., GRIEPENTROG, H., NIELSEN, H. (2007): Instrumentation and method for high accuracy geo-referencing of sugar beet plants. *Computers and Electronics in Agriculture* 56, (2), pp. 130–146.
- PEREZ-RUIZ, M., SLAUGHTER, D., GLIEVER, C., UPADHYAYA, S. (2012): Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for

- geospatial mapping of row crop transplant. *Biosystems Engineering* 111, (1), pp. 64–71.
- PHYTRON (2014): phyMOTION - Modulare Viel-Achsen-Steuerung für Schrittmotoren – Produktinformation.
- REICHARDT, M., JÜRGENS, C. (2009): Adoption and future perspective of precision farming in Germany: results of several surveys among different agricultural target groups. *Precision Agric* 10, (1), pp. 73–94.
- ROSCHER, R., HERZOG, K., KUNKEL, A., KICHERER, A., TÖPFER, R., FÖRSTNER, W. (2014): Automated image analysis framework for high-throughput determination of grapevine berry sizes using conditional random fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 100, pp. 148–158.
- ROTHMUND, M., WODOK, M. (2010): ISOBUS-Eine systematische Betrachtung der Norm ISO 11783 – Referate der 30. GIL-Jahrestagung in Hohenheim 2010 - Precision Agriculture Reloaded - informationsgestützte Landwirtschaft. GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK IN DER LAND-, FORST- UND ERNÄHRUNGSWIRTSCHAFT, HRSG.
- RUCKELSHAUSEN, A. (2010): Autonome Feldroboter. KTBL, Hrsg.
- RUCKELSHAUSEN, A., BIBER, P., DORNA, M., GREMMES, H., KLOSE, R., LINZ, A., RAHE, F., RESCH, R., THIEL, M., TRAUTZ, D. (2009): BoniRob—an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. *Precision agriculture* 9, (841), p. 1.
- RUIZ-ALTISENT, M., RUIZ-GARCIA, L., MOREDA, G., LU, R., HERNANDEZ-SANCHEZ, N., CORREA, E., DIEZMA, B., NICOLAÏ, B., GARCÍA-RAMOS, J. (2010): Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, (2), pp. 176–194.
- SANKARAN, S., MISHRA, A., EHSANI, R., DAVIS, C. (2010): A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture* 72, (1), pp. 1–13.
- SAXTON, V., BOTTERILL, T., GREEN, R., AURAND, J.-M. (2014): First steps in translating human cognitive processes of cane pruning grapevines into AI rules for automated robotic pruning. *BIO Web of Conferences* 3, 01016.
- SCHUELLER, J., WANG, M.-W. (1994): Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 69–83.
- SCHWARZ, H.-P., HEGE, D. (2014): GPS-gestützte Beikrautregulierung im Freilandgemüsebau. *Landtechnik* 69, (2), pp. 68–71.
- SEELAN, S., LAGUETTE, S., CASADY, G., SEIELSTAD, G. (2003): Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment* 88, (1-2), pp. 157–169.
- SEITZ, M., ANGERMANN, D., BLOBFELD, M., DREWES, H., GERSTL, M. (2012): The 2008 DGFII realization of the ITRS: DTRF2008. *Journal of Geodesy* 86, (12), pp. 1097–1123.
- STAFFORD, J. (2000): Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76, (3), pp. 267–275.

- STAFFORD, J., AMBLER, B. (1994): In-field location using GPS for spatially variable field operations. *Computers and Electronics in Agriculture* 11, (1), pp. 23–36.
- STEINIGER, S., HAY, G. (2009): Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics* 4, (4), pp. 183–195.
- STEINIGER, S., HUNTER, A. (2012): Free and Open Source GIS Software for Building a Spatial Data Infrastructure. In: BOCHER, E., NETELER, M., Hrsg., *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 247–261.
- STEINIGER, S., HUNTER, A. (2013): The 2012 free and open source GIS software map – A guide to facilitate research, development, and adoption. *Computers, Environment and Urban Systems* 39, pp. 136–150.
- STEINIGER, S., WEIBEL, R. (2009): GIS software—a description in 1000 words. *Encyclopaedia of Geography*, 1–2.
- SUN, H., SLAUGHTER, D., RUIZ, M., GLIEVER, C., UPADHYAYA, S., SMITH, R. (2010): RTK GPS mapping of transplanted row crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 71, (1), pp. 32–37.
- TANIGAKI, K., FUJIURA, T., AKASE, A., IMAGAWA, J. (2008): Cherry-harvesting robot. *Computers and Electronics in Agriculture* 63, (1), pp. 65–72.
- TILLET, N. (1991): Automatic guidance sensors for agricultural field machines: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research* 50, pp. 167–187.
- TOZER, P. (2009): Uncertainty and investment in precision agriculture – Is it worth the money? *Agricultural Systems* 100, (1-3), pp. 80–87.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (1998): 4700 Receiver – Operation Manual, Sunnyvale.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED (2001): Trimble Survey Controller – Reference Manual Volume 1, Sunnyvale.
- VANNUCCI, D., CINI, E., CIONI, A., VIERI, M. (1990): A prototype for the fully mechanized winter pruning of grape vines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 46, pp. 1–11.
- VÖGELE, T. (2010): Mobile Roboter in der Landwirtschaft - Perspektiven und Grenzen. KTBL, Hrsg.
- VOSS, K. (2012): Was ist eigentlich... Fernerkundung? – Für Fortgeschrittene.
- WINDEGGER (2012): Neo Alpin – Betriebs- und Wartungshandbuch. WINDEGGER MASCHINEN S.R.L., HRSG.
- WINDEGGER (2015): Neo Alpin – Produktbroschüre.
- WUNDER, E., KIELHORN, A., KLOSE, R., THIEL, M., RUCKELSHAUSEN, A. (2012): GIS- and sensor-based technologies for individual plant agriculture. *Landtechnik* 67, (1), pp. 37–41.
- ZARAGOZÍ, B., BELDA, A., LINARES, J., MARTÍNEZ-PÉREZ, J., NAVARRO, J., ESPARZA, J. (2012): A free and open source programming library for landscape metrics calculations. *Environmental Modelling & Software* 31, pp. 131–140.
- ZHANG, N., WANG, M., WANG, N. (2002): Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, (2-3), pp. 113–132.

ZHENG, L., ZHANG, J., WANG, Q. (2009): Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation. *Computers and Electronics in Agriculture* 65, (1), pp. 93–98.

Internetquellen

ADV (1995): Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen - AdV-Online – Universale-Transversale-Mercator-Projektion, <http://www.adv-online.de/Geodaetische-Grundlagen/UTM-Abbildung/>. (02.01.2015).

ADV (2014): Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen - AdV-Online – Universale-Transversale-Mercator-Projektion, <http://www.adv-online.de/Geodaetische-Grundlagen/UTM-Abbildung/>. (02.01.2015).

ADV (2015): Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen - AdV-Online – Die Gauß-Krüger-Abbildung, <http://www.adv-online.de/Geodaetische-Grundlagen/GK-Abbildung/>. (02.01.2015).

AMAZONEN-WERKE (29.09.2011): BoniRob – Robots, <http://go.amazone.de/?lang=1&news=26>. (18.02.2015).

BKG (2014a): Geoportal.de - Geodaten aus Deutschland - Geoportal. BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE, HRSG., <http://www.geoportal.de/DE/Geoportal/geoportal.html?lang=de>. (21.12.2014).

BKG (2014b): Zusammenhänge zwischen ellipsoidischer Höhe, Normalhöhe und Quasigeoid. BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE, HRSG., <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/giderlaeuter.php>. (31.12.2014).

BORK, S. (2008): Aktueller Stand bei Freien und Open-Source Desktop-GIS, http://www2.htw-dresden.de/~fegis/DA/DA_BORK_2008/Vergleich.html. (21.12.2014).

BSO-GMBH (2014): Gesamtkatalog 2014.

ESA (2013): The Earth's gravity field (geoid) as it will be seen by GOCE. EUROPEAN SPACE AGENCY, HRSG., http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2004/10/The_Earth_s_gravity_field_geoid_as_it_will_be_seen_by_GOCE. (30.12.2014).

GDI SERVICE (2014): kvwmap Wiki, http://www.kvwmap.de/index.php/kvwmap_-_Open_Source_WebGIS. (21.12.2014).

GEO SN (2014): Grundlagen und Begriffe. STAATSBETRIEB GEOBASISINFORMATION UND VERMESSUNG SACHSEN, HRSG., <http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/etrs/grund/grund.html>. (02.01.2015).

HOCHSCHULE OSNABRÜCK (2014): GIS-Software. FAKULTÄT AGRARWISSENSCHAFTEN UND LANDSCHAFTSARCHITEKTUR, HRSG., <https://www.al.hs-osnabrueck.de/11900.html>. (21.12.2014).

HONDA (2015): Honda Engines | GX200 4-Stroke Engine | Features, Specs, and Model Info, <http://engines.honda.com/models/model-detail/gx200>. (27.02.2015).

MARTINET, A., BLAAUW, S. (2014): Field Robot Event Website, <http://www.fieldrobot.nl/>. (12.02.2015).

- NCO (2015a): GPS.gov: Control Segment. NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING, HRSG., <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>. (05.01.2015).
- NCO (2015b): GPS.gov: Selective Availability. NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING, HRSG., <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/>. (04.01.2015).
- NCO (2015c): GPS.gov: Space Segment. NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING, HRSG., <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>. (04.01.2015).
- NEUMAIR, S.-M., HAAS, H.-D.: Fernerkundung, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9652/fernerkundung-v7.html>. (18.02.2015).
- NGA (2014): NGA GPS Ephemeris/Station/Antenna Offset Documentation. NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY, HRSG., http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/gpsdoc2014_12a.html. (04.01.2015).
- STALLMAN, R. (2014): gnu.org, <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>. (21.12.2014).
- UNIVERSITÄT ROSTOCK (2012): Geoinformatik Service, http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/produkte_systemtyp.asp?ID_System=665081138. (21.12.2014).
- VINE ROBOT (2015): VineRobot » Project, <http://www.vinerobot.eu/project/>. (12.02.2015).
- VISION ROBOTICS (2015): Agriculture - Agriculture, http://www.visionrobotics.com/vrc/index.php?option=com_phocagallery&view=category&id=2:agriculture&Itemid=139. (12.02.2015).

9 Danksagung

Mit dem Abschluss dieser Arbeit möchte ich allen danken, die zu deren Gelingen außerordentlich beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. habil. Hans-Peter Schwarz, dem Leiter des Instituts für Technik der Hochschule Geisenheim für die Überlassung des Projektes und dessen Bearbeitung. Dabei konnte ich tief in den sehr interessanten und auch zukünftig wichtigen Themenbereich der Robotik, speziell im Weinbau, einsteigen. Ich möchte mich darüber hinaus bei Prof. Dr. Schwarz für die großartige fachliche Unterstützung und persönliche Betreuung während meiner Zugehörigkeit zum Institut und der Bearbeitungszeit bedanken.

Daneben gilt mein Dank ebenso Herrn Prof. Dr. habil. Bernd Honermeier, dem Leiter des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I der Justus-Liebig-Universität Gießen, für die Begutachtung der vorliegenden Dissertation.

Ganz herzlich danken möchte ich dem gesamten Team des Instituts für Technik für die einzigartige Unterstützung während der letzten drei Jahre, allen voran...

... Frau Gisela Berger als gute Seele des Instituts für die Organisation und Abwicklung aller Formalitäten und ihre herzliche, menschliche Persönlichkeit.

... Herrn Dr. Rainer Keicher, als Projektkoordinator, für die fachliche sowie persönliche Betreuung und sein stets offenes Ohr.

... Herrn Reinhold Müller für die Unterstützung bei den messtechnischen Fragestellungen und der Vorbereitung der eingesetzten Technik.

... Herrn Marcel Scherber für die technische und persönliche Unterstützung bei den konstruktiven Arbeiten und Versuchen.

... Herrn Hans Störtländer, Herrn Gunther Schrauth und Herrn Sandor Hum für ihre Hilfe und die gute Zusammenarbeit.

... und ganz besonders Herrn David Brunner, ohne den die Steuerung des PHENObots in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Herr Brunner hatte sehr großen Anteil am erfolgreichen Gelingen des Projekts. Er stand mir mit seiner selbstlosen Art und seinem offenen Ohr bei vielen Problemen, auch zu später Stunde, immer zur Seite. Vielen Dank David!

Weiter gilt mein Dank den Kollegen des Julius-Kühn-Instituts für Rebenzüchtung Geilweilerhof, hier stellvertretend Frau Anna Kicherer, für die konstruktive Projektarbeit und erfolgreiche Bewältigung der Versuche. Daneben möchte ich allen weiteren Partnern des Forschungsprojekts PHENOVINES, der Firma Heinrich Mayer, der Winzergenossenschaft Deutsches Weintor und der Firma Reichhardt danken. Gleiches gilt für das Bundesministerium für Bildung und Forschung, sowie den Projektträger Jülich für die Finanzierung des Projekts.

Ebenso danke ich Herrn Andreas Kofler, KMS Mechatronics, und Herrn Stefan Schiefer, Firma Windegger für die technische und menschliche Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, meiner Familie, meinen Freunden, aber vor allem meiner Frau Susanne und unserer Tochter Emma, die mich während meiner Ausbildungszeit und darüber hinaus immer unterstützt und motiviert haben. Vielen Dank für Eure Geduld!

Eimsheim

Philipp Rüger

10 Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Philipp Rüger

Diese Seite wurde absichtlich frei gelassen.

11 Anhang

Aufgrund des großen Umfangs wird auf den Abdruck der einzelnen Inhalte verzichtet. Stattdessen sind alle zusätzlichen Dokumente, Messdaten, Auswertungen, usw. als digitaler Anhang auf dem beiliegenden Datenträger und in Form eines ZIP-Archivs auf dem Server der Gießener Elektronischen Bibliothek (GEB) vorliegend:

<http://geb.uni-giessen.de/geb>

Eine detaillierte Liste mit Pfad- und Dateiangaben findet sich im Archiv in der Datei `Anhang_Inhalt.pdf` und in folgender Liste:

