

Technische Universität München  
Department für Biogene Rohstoffe und  
Technologie der Landnutzung  
Fachgebiet Technik im Pflanzenbau

# **Experimentelle Untersuchungen von Koppelortungssystemen für GPS auf der Basis von Mikrowellensensoren im landwirtschaftlichen Einsatz**

**Tiemo Schwenke**

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

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.rer.hort., Dr.rer.hort.habil. J. Meyer  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.agr., Dr.agr.habil. H. Auernhammer  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing.habil. J. Detlefsen  
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. G. Bernhardt,  
Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 29.05.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 07.08.2001 angenommen.

Diese Arbeit wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) als Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

© 2001 Technische Universität München  
Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung

ISSN 0931-6264

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks sowie jede Form der Reproduktion durch Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren oder die Vervielfältigung und Verbreitung unter Verwendung elektronischer Systeme, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

Selbstverlag im Eigenvertrieb:

Technische Universität München  
Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung  
Fachgebiet Technik im Pflanzenbau  
Am Staudengarten 2  
85354 Freising-Weihenstephan

# Vorwort

Nach Abschluss dieser Dissertation bedanke ich mich bei allen sehr herzlich, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die Überlassung des Themas möchte ich Herrn Prof. Dr. H. Auernhammer meinen besonderen Dank aussprechen. Er übernahm die Gesamtbetreuung, begleitete alle Phasen dieser Arbeit und gab wertvolle Hinweise für deren Abfassung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. J. Detlefsen und Herrn Prof. Dr. G. Bernhardt für die Übernahme der Koreferate und bei Herrn Prof. Dr. J. Meyer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Großer Dank gebührt Herrn Dr. M. Demmel für die Anregungen zur Versuchsplanung und den technischen Angestellten der Landtechnik Weihenstephan für die Hilfe bei der Realisierung der Versuchseinrichtungen. Nennen möchte ich an dieser Stelle Herrn J. Dallinger, Herrn F. Bauer, Herrn K. Stadler und die Mitarbeiter der Werkstatt.

Für die Bereitstellung der Versuchsfläche danke ich Herrn Dr. J. Rottmeier und seiner Familie. Herrn M. Peterreins † und Herrn H.-G. Brunnhuber gilt mein herzlicher Dank für die umfassende Unterstützung bei der Durchführung des Versuchsprogramms.

Danken möchte ich auch dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) als Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung des Projektes und allen beteiligten Projektpartnern für die enge und erfolgreiche Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. T. Haschka für das intensive Zusammenwirken bei der umfangreichen Versuchsdurchführung und Datenauswertung.

Meiner Familie gebührt nicht zuletzt ein großer und herzlicher Dank, ohne deren Motivation, Unterstützung und Verständnis der erfolgreiche Abschluss dieser Dissertation nicht zustande gekommen wäre.

Freising im Mai 2001

Tiemo Schwenke



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1	Satellitenortungssysteme auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen . . .	3
2.2	Korrekturdienste für die Satellitenortung . . . . .	3
2.3	Probleme bei der Satellitenortung . . . . .	4
2.4	Koppelortungssysteme . . . . .	5
2.4.1	Anforderungen an ein Koppelortungssystem . . . . .	5
2.4.2	Arten von Stützungssensoren . . . . .	6
2.4.2.1	Inertiale Sensoren und Systeme . . . . .	6
2.4.2.2	Optische Sensoren . . . . .	7
2.4.2.3	Laser-Doppler-Sensoren . . . . .	8
2.4.2.4	Mikrowellen-Doppler-Sensoren . . . . .	8
2.4.2.5	Ultraschall-Doppler-Sensoren . . . . .	8
2.4.3	Untersuchungen zu Stützungssensoren . . . . .	9
2.4.3.1	Inertiale Sensoren und Systeme . . . . .	9
2.4.3.2	Mikrowellen- und Ultraschall-Doppler-Sensoren .	10
2.4.4	Diskussion . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Theoretische Betrachtungen</b>	<b>15</b>
3.1	Messprinzip der Radarsensoren . . . . .	15
3.1.1	Physikalisches Prinzip - Dopplereffekt . . . . .	15
3.1.2	Funktionsprinzip - Aufbau . . . . .	16
3.1.3	Auswahl des Sensors und der Arbeitsfrequenz . . . . .	17
3.2	Einflussfaktoren der Messgenauigkeit . . . . .	18
3.2.1	Fahrzeugdynamik . . . . .	19
3.2.2	Untergrundeigenschaften, aufgewirbelte Teilchen und Mehrwegeausbreitung . . . . .	20
3.2.3	Temperatur- und Rauscheinflüsse . . . . .	22
3.3	Berechnungsgrundlagen . . . . .	22
3.3.1	Definitionen . . . . .	23
3.3.2	90°-Sensoranordnung . . . . .	24
3.3.3	45°-Sensoranordnung . . . . .	27
3.3.4	Y-Sensoranordnung . . . . .	31
3.3.5	Kalibrierung . . . . .	32
3.4	Referenzsystem Geodimeter System 4000 . . . . .	34
3.5	Koordinatentransformationen . . . . .	38
3.5.1	Globales Koordinatensystem und lokales Nord-Ost- Koordinatensystem . . . . .	38
3.5.2	Koordinatensystem des Geodimeter System 4000 und loka- les Nord-Ost-Koordinatensystem . . . . .	39

<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>43</b>
4.1	Messsysteme . . . . .	43
4.2	Prüfstandsuntersuchungen . . . . .	44
4.2.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	48
4.2.2	45°-Sensoranordnung . . . . .	50
4.2.3	Y-Sensoranordnung . . . . .	52
4.3	Feldversuche . . . . .	54
4.3.1	Messanordnung am Versuchsstandort 1 . . . . .	60
4.3.2	Messanordnung am Versuchsstandort 2 . . . . .	61
4.3.3	Messanordnung am Versuchsstandort 3 . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>65</b>
5.1	Untersuchungen im Prüfstand . . . . .	65
5.1.1	Fahrversuche in 90°-Sensoranordnung . . . . .	65
5.1.2	Fahrversuche in 45°-Sensoranordnung . . . . .	70
5.1.2.1	Geradeausfahrten . . . . .	70
5.1.2.2	Einfach diagonale Fahrten . . . . .	72
5.1.2.3	Zweifach diagonale Fahrten . . . . .	74
5.1.3	Fahrversuche in Y-Anordnung . . . . .	77
5.1.3.1	Geradeausfahrten . . . . .	77
5.1.3.2	Einfach diagonale Fahrten . . . . .	82
5.1.3.3	Zweifach diagonale Fahrten . . . . .	84
5.1.3.4	Simulation von Neigungswinkelfehlern . . . . .	88
5.1.4	Einordnung und Diskussion . . . . .	93
5.2	Feldversuche . . . . .	94
5.2.1	Geradeausfahrten am Versuchsstandort 1 . . . . .	94
5.2.1.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	94
5.2.1.2	Y-Sensoranordnung . . . . .	96
5.2.2	Kreisfahrten am Versuchsstandort 2 . . . . .	99
5.2.2.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	99
5.2.2.2	Y-Sensoranordnung . . . . .	100
5.2.3	Tests am Versuchsstandort 3 . . . . .	105
5.2.3.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	105
5.2.3.2	Y-Sensoranordnung . . . . .	108
5.2.4	Einordnung und Diskussion . . . . .	122
5.2.5	Beispiel eines berechneten Streckenverlaufs . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Beispielprogramm zur Prüfstandssteuerung</b>	<b>137</b>
<b>B</b>	<b>Prüfstandsversuche</b>	<b>139</b>

---

<b>C</b>	<b>Feldversuche</b>	<b>143</b>
C.1	Geradeausfahrten am Versuchsstandort 1 bei 90°-Sensoranordnung	143
C.2	Kreisfahrten am Versuchsstandort 2 . . . . .	144
C.2.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	144
C.2.2	Y-Sensoranordnung . . . . .	146
C.3	Tests am Versuchsstandort 3 . . . . .	147
C.3.1	90°-Sensoranordnung . . . . .	147
C.3.2	Y-Sensoranordnung . . . . .	147



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Abschattung und Mehrwegausbreitung bei der Satellitenortung . . .	4
3.1	Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip über Grund (Janus-Anordnung) . . . . .	15
3.2	Blockschaltbild eines 24 GHz Radarsensors (Beispiel) . . . . .	16
3.3	Schwingungen am Fahrzeug . . . . .	19
3.4	Lage der Koordinatensysteme zu den Fahrzeugachsen . . . . .	23
3.5	Lage der 90°-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen . . . . .	25
3.6	Nickwinkel am Fahrzeug . . . . .	26
3.7	Wankwinkel am Fahrzeug . . . . .	27
3.8	Lage der 45°-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen . . . . .	28
3.9	Neigungswinkel am Fahrzeug in Bezug auf Sensorachse <i>VL-HR</i> . .	29
3.10	Neigungswinkel am Fahrzeug in Bezug auf Sensorachse <i>VR-HL</i> . .	30
3.11	Lage der Y-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen . . . . .	31
3.12	Koordinatensystem des Geodimeter System 4000 . . . . .	40
3.13	Koordinatentransformation aus dem Koordinatensystem vom Geodimeter System 4000 in das lokale Nord-Ost-Koordinaten- system . . . . .	41
4.1	Radarsensorenprüfstand . . . . .	44
4.2	Messkette für Prüfstandsversuche . . . . .	47
4.3	Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei 90°-Sensoranordnung . .	48
4.4	Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei 90°-Sensor- anordnung . . . . .	49
4.5	Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei 90°-Sensor- anordnung . . . . .	50
4.6	Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei 45°-Sensoranordnung . .	50
4.7	Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei 45°-Sensor- anordnung . . . . .	51
4.8	Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei 45°-Sensor- anordnung . . . . .	52
4.9	Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei Y-Sensoranordnung . . .	53
4.10	Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei Y-Sensor- anordnung . . . . .	53
4.11	Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei Y-Sensor- anordnung . . . . .	54
4.12	Messanordnung bei Feldversuchen . . . . .	55
4.13	Traktor mit Messkabine . . . . .	56
4.14	GPS/GLONASS-Antenne und Trackerprisma . . . . .	57
4.15	Radarsensoren in Y-Anordnung . . . . .	58
4.16	Referenzsystem Geodimeter System 4000 . . . . .	59
4.17	Messkette für Feldversuche . . . . .	60
4.18	Anordnung der Messkomponenten am Versuchstandort 1 . . . . .	61

4.19	Anordnung der Messkomponenten am Versuchstandort 2 . . . . .	61
4.20	Anordnung der Messkomponenten am Versuchstandort 3 . . . . .	62
4.21	Startpunkt, 2. Wendepunkt und Startpunkt in Fahrspur 3 . . . . .	63
4.22	Anordnung der Messkomponenten bei Kreisfahrten am Versuchstandort 3 . . . . .	64
5.1	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-3 . . . . .	65
5.2	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-1 . . . . .	66
5.3	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-1 . . . . .	67
5.4	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-4 . . . . .	68
5.5	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-8 . . . . .	69
5.6	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-5 . . . . .	69
5.7	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-5 . . . . .	71
5.8	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-7 . . . . .	71
5.9	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-6 . . . . .	72
5.10	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-6 . . . . .	73
5.11	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-6 . . . . .	73
5.12	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-8 . . . . .	74
5.13	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 7-2 . . . . .	75
5.14	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 8-10 . . . . .	75
5.15	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 9-10 . . . . .	76
5.16	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-1 . . . . .	77
5.17	Streckenverlauf von Messfahrt 1-1 . . . . .	78
5.18	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-3 . . . . .	79
5.19	Streckenverlauf von Messfahrt 2-3 . . . . .	79
5.20	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-5 . . . . .	80
5.21	Streckenverlauf von Messfahrt 3-5 . . . . .	80
5.22	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-5 . . . . .	82

---

5.23	Streckenverlauf von Messfahrt 4-5 . . . . .	83
5.24	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-1 . . . . .	83
5.25	Streckenverlauf von Messfahrt 6-1 . . . . .	84
5.26	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 7-5 . . . . .	85
5.27	Streckenverlauf von Messfahrt 7-5 . . . . .	85
5.28	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 8-4 . . . . .	86
5.29	Streckenverlauf von Messfahrt 8-4 . . . . .	87
5.30	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 9-2 . . . . .	87
5.31	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 10-4 . . . . .	89
5.32	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 11-8 . . . . .	89
5.33	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 12-6 . . . . .	90
5.34	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 13-1 . . . . .	91
5.35	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 14-6 . . . . .	91
5.36	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 15-9 . . . . .	92
5.37	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 1-9 . . . . .	96
5.38	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 2-8 . . . . .	97
5.39	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 3-6 . . . . .	97
5.40	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messreihe 1 . . . . .	100
5.41	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messreihe 2 . . . . .	101
5.42	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messreihe 4 . . . . .	102
5.43	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messreihe 5 . . . . .	102
5.44	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 1-1 in Fahrspur 1 . . . . .	105
5.45	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 1-2 in Fahrspur 2 . . . . .	106
5.46	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 1-3 in Fahrspur 3 . . . . .	106
5.47	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindig- keiten bei Messfahrt 2-1 in Fahrspur 1 . . . . .	108

5.48	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-2 in Fahrspur 2 . . . . .	109
5.49	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-3 in Fahrspur 3 . . . . .	109
5.50	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-4 in Fahrspur 4 . . . . .	110
5.51	Ausschnitt der zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-4 in Fahrspur 4 . . . . .	111
5.52	Ortungsfehler bei Fahrten für Messreihe 2 . . . . .	113
5.53	Wendefahrten zwischen Fahrspuren . . . . .	113
5.54	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-5 zwischen Fahrspur 1 und 2 . . . . .	114
5.55	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-6 zwischen Fahrspur 3 und 4 . . . . .	115
5.56	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 7-3 bis 7-5 im Uhrzeigersinn . . . . .	116
5.57	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 8-2 bis 8-4 entgegen dem Uhrzeigersinn . . . . .	116
5.58	Fahrspur der Messfahrten 7-3 bis 7-5 und 8-2 bis 8-4 . . . . .	117
5.59	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 13-3 bis 13-5 im Uhrzeigersinn beginnend . . . . .	118
5.60	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 14-2 bis 14-4 entgegen dem Uhrzeigersinn beginnend . . . . .	119
5.61	Fahrspur der Messfahrten 13-3 bis 13-5 . . . . .	119
5.62	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 15-3 bis 15-5 im Uhrzeigersinn . . . . .	120
5.63	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 16-1 bis 16-3 entgegen dem Uhrzeigersinn . . . . .	121
5.64	Fahrspur der Messfahrten 15-3 bis 15-5 bei Y-Sensoranordnung . . . . .	121
5.65	Vergleich der berechneten Fahrwege aus Radarsensoren und Referenzsystem . . . . .	124
B.1	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-4 . . . . .	140
B.2	Streckenverlauf von Messfahrt 5-4 . . . . .	141
B.3	Streckenverlauf von Messfahrt 9-2 . . . . .	141
C.1	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-5 . . . . .	143
C.2	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-3 . . . . .	143
C.3	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 3-1 . . . . .	144
C.4	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 1 . . . . .	144

---

C.5	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 2 . . . . .	145
C.6	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 3-8 . . . . .	145
C.7	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 3 . . . . .	146
C.8	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 6 . . . . .	146
C.9	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 4-1, Wenden zwischen Fahrspur 2 und 3 . . . .	147
C.10	Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-4 bei in Fahrspur 4 . . . . .	147
C.11	Ausschnitt der zeitlichen Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-4 in Fahrspur 4 . . . . .	148
C.12	Ortungsfehler bei Fahrten für Messreihe 5 . . . . .	148



# Tabellenverzeichnis

2.1	Korrekturdienste in Deutschland . . . . .	4
2.2	(D)GPS-Empfänger mit integriertem Koppelortungssystem . . . . .	7
3.1	Verfügbare Radarsensoren . . . . .	18
3.2	Zuordnung der Sensorbezeichnung zur Koordinatenachse . . . . .	24
3.3	Zuordnung der Sensorbezeichnung zum Messwert . . . . .	24
3.4	Kalibrierbeispiel . . . . .	34
3.5	Mess- und Ausgabegrößen des Referenzsystems . . . . .	35
3.6	Interpolationsbeispiel . . . . .	37
4.1	Eingesetzte DGPS-Empfänger und Korrekturdatenempfänger . . . . .	43
4.2	Codes zur Ansteuerung des Drehstrommotors . . . . .	46
5.1	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	67
5.2	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung bei variierten Abstrahl- winkeln $\alpha_r$ ( $n = 10$ ) . . . . .	70
5.3	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 45°-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	72
5.4	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei einfach diagonalen Fahrten in 45°-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	74
5.5	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	81
5.6	Mittelwerte und Fehler bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	81
5.7	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei einfach diagonalen Fahrt in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	84
5.8	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung bei variierten Abstrahlwin- keln $\alpha$ ( $n = 10$ ) . . . . .	92
5.9	Neigungswinkel bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung bei variierten Abstrahlwinkeln $\alpha$ ( $n = 10$ ) . . . . .	93
5.10	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 5$ ) . . . . .	95
5.11	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 5$ ) . . . . .	96
5.12	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	98
5.13	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	98
5.14	Mittelwerte und Fehler bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	98

5.15	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	99
5.16	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	99
5.17	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	103
5.18	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ ) . . . . .	103
5.19	Mittelwerte und Abweichungen zum theoretischen Wert bei Kreisfahrten in Y-Anordnung . . . . .	103
5.20	Mittelwerte und Fehler bei Kreisfahrten in Y-Anordnung . . . . .	104
5.21	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei 90°-Anordnung in den Fahrspuren 1 bis 3 . . . . .	107
5.22	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei 90°-Anordnung in den Fahrspuren 1 bis 3 . . . . .	107
5.23	Mittelwerte und Fehler bei Y-Anordnung in verschiedenen Fahrspuren . . . . .	112
5.24	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 3$ ) . . . . .	117
5.25	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 3$ ) . . . . .	118
5.26	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten beim Abfahren einer Acht und eines Ovals in Y-Anordnung . . . . .	122
B.1	Versuchsparameter bei Messfahrten in 90°-Anordnung . . . . .	139
B.2	Versuchsparameter bei Messfahrten in 45°-Anordnung . . . . .	139
B.3	Versuchsparameter bei Messfahrten in Y-Anordnung . . . . .	140
B.4	Abstrahl- und Neigungswinkel bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung . . . . .	142
C.1	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in verschiedenen Fahrspuren . . . . .	149
C.2	Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in verschiedenen Fahrspuren . . . . .	150

# Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AHRS	Attitude and Heading Reference System
AICC	Autonomous Intelligent Cruise Control
ALF	Accurate Positioning by Low Frequency
AMDS	Amplituden Moduliertes Daten System
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
C/A Code	Coarse/Acquisition Code
DGLONASS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
DLR e.V.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
HF	Hochfrequenzbereich (100 kHz – 300 GHz)
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IMP	Isolated Measurement Pods
L1	GPS primary frequency, 1575.42 MHz
L2	GPS secondary frequency, 1227.6 MHz
LBS	Landwirtschaftliches Bus-System
LORAN-C	Long Range Navigation-C
LW	Langwelle
M-Nr.	Messreihennummer
NF	Niederfrequenzbereich ( $\leq 100$ kHz)
NMEA 0183	National Marine Electronics Association 0183 Interface Standard
PC	Personalcomputer
RASANT	Radio Aided Satellite Navigation Technique
RDS	Radio Daten System
RPU	Remote Positioning Unit
RTCM SC-104	Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee No. 104
S/N	Signal/Noise
SA	Selective Availability
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst

Sensor $H$	Sensor hinten
Sensor $HL$	Sensor hinten links
Sensor $HR$	Sensor hinten rechts
Sensor $L$	Sensor links
Sensor $R$	Sensor rechts
Sensor $V$	Sensor vorn
Sensor $VL$	Sensor vorn links
Sensor $VR$	Sensor vorn rechts
UKW	Ultrakurzwelle
UTC	Universal Time Coordinated
V-Nr.	Versuchslaufnummer

## Symbole

$\alpha$	Abstrahlwinkel des Mikrowellensensors	[°]
$\beta$	Nickwinkel des Fahrzeuges	[°]
$\eta$	Winkel bei Koordinatentransformation	[°]
$\delta$	Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor und Fahrzeuglängsrichtung	[°]
$\gamma$	Wankwinkel des Fahrzeuges	[°]
$\lambda$	Wellenlänge	[m]
$\phi$	Neigungswinkel in der Sensorachse $VR-HL$	[°]
$\pi$	Kreiszahl	
$\rho$	Neigungswinkel in der Sensorachse $VL-HR$	[°]
$\Delta \bar{f}_{vl}$	Abweichung von Sensor $VL$ zu $\bar{f}_{45^\circ}$	[%]
$\Delta \bar{f}_{vr}$	Abweichung von Sensor $VR$ zu $\bar{f}_{45^\circ}$	[%]
$c$	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit	[m/s]
$f$	Frequenz	[Hz]
$f_A$	Ausgangssignal des Mikrowellensensors	[Hz je km/h]
$f_D$	Dopplerfrequenz	[Hz]
$f_e$	Empfangsfrequenz des Mikrowellensensors	[Hz]
$f_s$	Sendefrequenz des Mikrowellensensors	[Hz]
$\bar{f}_{45^\circ}$	mittlere theoretische Frequenz bei 45° gedrehter Anordnung	[Hz]
$\bar{f}$	mittlere Frequenz	[Hz]
$G$	Fußpunkt vom Geodimeter System 4000	
$H_z$	Horizontalrichtung vom Geodimeter System 4000	[gon]
$h$	Höhe über dem Meeresspiegel im globalen Koordinatensystem	[m]
$I$	Stromstärke	[A]
$I_K$	Kalibrierfaktor	
$I_s$	Wegauflösung des Mikrowellensensors nach Herstellerangabe	[Impulse/m]
$I_W$	wahre Wegauflösung	[Impulse/m]
$I_{W45^\circ}$	wahre Wegauflösung bei 45°-Anordnung	[Impulse/m]

$I_Z$	Anzahl gezählter Impulse	[Impulse]
$I_{Z45^\circ}$	Anzahl gezählter Impulse bei $45^\circ$ -Anordnung	[Impulse]
$IH$	Instrumentenhöhe vom Geodimeter System 4000	[m]
$lat$	geographische Breite (Latitude) im globalen Koordinatensystem	[°]
$lon$	geographische Länge (Longitude) im globalen Koordinatensystem	[°]
$M-Nr.$	Messreihennummer	
$R$	Referenzpunkt	
$R_{Erde}$	Erdradius	[m]
$SD$	Schrägdistanz vom Geodimeter System 4000	[m]
$s$	Standardabweichung	
$\bar{s}$	mittlere Standardabweichung	
$T$	Traktor	
$t$	Zeit	[s]
$t_0$	Messzeit (Torzeit)	[s]
$V$	Vertikalwinkel vom Geodimeter System 4000	[gon]
$v$	Geschwindigkeit	[km/h]
$\bar{V}$	mittlerer Variationskoeffizient	[‰]
$\bar{v}$	mittlere Geschwindigkeit	[km/h]
$V-Nr.$	Versuchslaufnummer	
$X$	x-Koordinate im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]
$x$	x-Koordinate	[m]
$x'$	x-Koordinate des um $45^\circ$ gedrehten Koordinatensystems	[m]
$x_{Geo}$	x-Koordinate (manuell berechnet) im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]
$Y$	y-Koordinate im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]
$y$	y-Koordinate	[m]
$y'$	y-Koordinate des um $45^\circ$ gedrehten Koordinatensystems	[m]
$y_{Geo}$	y-Koordinate (manuell berechnet) im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]
$Z$	z-Koordinate im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]
$z$	z-Koordinate	[m]
$z'$	z-Koordinate des um $45^\circ$ gedrehten Koordinatensystems	[m]
$z_{Geo}$	z-Koordinate (manuell berechnet) im Koordinatensystem des Referenzsystems (Geodimeter System 4000)	[m]

## Indizes

$\beta$	Nickwinkel $\beta$
$\gamma$	Wankwinkel $\gamma$
<i>DGPS</i>	DGPS-Empfänger
<i>f</i>	Frequenz
<i>Geo</i>	Geodimeter System 4000 (Referenzsystem)
<i>h</i>	Sensor <i>H</i>
<i>hl</i>	Sensor <i>HL</i>
<i>hr</i>	Sensor <i>HR</i>
<i>l</i>	Sensor <i>L</i>
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>O</i>	Nullpunkt
<i>P</i>	beliebiger Punkt
<i>R</i>	Referenzpunkt
<i>r</i>	Sensor <i>R</i>
<i>T</i>	Traktor
<i>v</i>	Geschwindigkeit
<i>v</i>	Sensor <i>V</i>
<i>vl</i>	Sensor <i>VL</i>
<i>vr</i>	Sensor <i>VR</i>

# 1 Einleitung und Zielstellung

Die Informationstechnologie hält in der Landtechnik bei der Realisierung der Produktionsverfahren von morgen schrittweise Einzug. Für den lokalen Bezug der Daten sind Ortungssysteme unerlässlich. Preiswerte und mobile Ortungssysteme arbeiten auf Basis des satellitengestützten Globalen Positionierungssystems (GPS). Mit der Nutzung von GPS in der Landwirtschaft stellt sich die Frage nach der dauerhaften Verfügbarkeit und Signalqualität dieses Systems. In hügeligen Gebieten und an Waldrändern kann es zur Abschattung des Satellitensignals und damit zur Verschlechterung bzw. dem Ausfall der Positionsbestimmung des Fahrzeuges kommen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Gemeinschaftsprojekt „ESMERALDA - Entwicklung von satellitengestützten Mehrsensorsystemen zur autonomen Positionierung für landmobile Anwendungen“ mit finanzieller Unterstützung von DLR/BMBF gestartet.

Neben dem ehemaligen Institut für Landtechnik der Technischen Universität München (heute Fachgebiet Technik im Pflanzenbau am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München) bearbeiteten die MAN Technologie AG Karlsfeld, das Mathematische Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München, die Eurospace Flöha GmbH und die ViCon Engineering GmbH München jeweils ein Teilprojekt.

Das Ziel des Gesamtvorhabens war die systematische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Ortungs- und Navigationssystemen bei landmobilen Anwendungen, basierend auf der Satellitenortung und -navigation mit kombinierter Stützungssensorik.

Diese Dissertation und das am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München umgesetzte Teilprojekt hatten die experimentellen Untersuchungen der Koppelortungssysteme zur Unterstützung der Satellitenortung und -navigation im landwirtschaftlichen Einsatz zum Ziel.

In die Aufgabe der experimentellen Untersuchungen waren die Auswahl der erforderlichen Sensorik, die Planung der Versuchsprogramme, deren praktische Umsetzung und die Auswertung der Versuchsergebnisse eingeschlossen.

Daraus abgeleitet ergaben sich für die Bearbeitung der Aufgabe mehrere Teilziele. Im ersten Schritt war die Stützungssensorik basierend auf dem Stand der Technik und in Übereinstimmung mit den definierten Anforderungen festzulegen. Daneben musste die Auswahl der Datenerfassungssysteme, der (D)GPS-Systeme und des Referenzsystems erfolgen.

Die Versuchsplanung umfasste die Ausarbeitung der Versuchsabläufe in einem

Prüfstand, dessen Erweiterung für zweidimensionale Bewegungsabläufe und die Integration einer programmierbaren PC-Steuerung. Für die Beurteilung im praktischen Einsatz musste eine Feldversuchskonfiguration erstellt werden. Darin enthalten waren die Definition der Versuchsumgebung, die Konstruktion und der Bau einer mobilen Versuchsplattform, die Implementierung der einzelnen Messsysteme und die Wahl der Versuchsstandorte.

Parallel zur Aufstellung der Sensoranordnungen waren die zugehörigen und zur Auswertung notwendigen Algorithmen abzuleiten. Weiterhin mussten die Verfahren zur zeitlichen Synchronisation und örtlichen Zusammenführung der Versuchsergebnisse der Koppelortungssysteme, der (D)GPS-Systeme und des Referenzsystems erarbeitet und in die Auswerteprozeduren implementiert werden.

Nach der erfolgreichen Durchführung der Prüfstands- bzw. Feldversuche waren die Ergebnisse der eingesetzten Koppelortungssysteme, der (D)GPS-Systeme und des Referenzsystems nach den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden auszuwerten und zu beurteilen. Die Fahrspuranalyse auf Basis der Messwerte von (D)GPS und Stützungssensorik im Vergleich zum Referenzsystem übernahm das Mathematische Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Satellitenortungssysteme auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen

Satellitengestützte Ortungs- und Navigationssysteme wie GPS und GLONASS haben in den letzten Jahren nach der Einführung im militärischen Bereich, Luft- und Seeverkehr auch den landmobilen Anwendungsbereich erobert.

In der Landwirtschaft entstand mit dem Precision Farming eine zukunftsweisende Form der Landbewirtschaftung. Um teilflächenspezifische Maßnahmen realisieren zu können, ist dabei eine Ortungsgenauigkeit von  $\pm 1$  m erforderlich. Diese Präzision ist für die Anwendungsgebiete der lokalen Ertragsermittlung und Bodenbehebung sowie für die Aufgaben mit ortsspezifischer Steuerung in der Applikationstechnik und dem Pflanzenschutz notwendig. Insbesondere die flächen- und zeitbezogenen Dokumentationen zur Erfüllung der Anforderungen aus Bodenschutzgesetz, Düngeverordnung, Flächenstilllegungen und anderen Auflagen verlangen die fehlerfreie Erfassung der Position [2, 3, 7].

GPS-Systeme sind derzeit Bestandteil von Precision Farming Systemen, wie z. B. Advanced Farming System (Case Corp.), Fieldstar®<sup>1</sup> oder GreenStar®<sup>2</sup>. Die integrierten GPS-Systeme stammen beispielsweise aus dem AgGPS®<sup>3</sup>-Programm von Trimble Navigation Limited oder aus der StarFire™<sup>4</sup>-Serie von NavCom Technology. Im dynamischen Betrieb sind seit der Abschaltung von SA im Mai 2000 Genauigkeiten von ca.  $\pm 10$  m realistisch. Eine Verbesserung der Ortungsgenauigkeit wird mit dem differentiellen GPS (DGPS) erreicht. Dazu stehen weltweit verschiedene Korrekturdienste für unterschiedliche Genauigkeiten zur Verfügung.

### 2.2 Korrekturdienste für die Satellitenortung

Die genannten GPS-Systeme verfügen zur Erhöhung der Ortungsgenauigkeit über eine Schnittstelle zur Einspeisung mindestens eines Korrekturdienstes. In der Bundesrepublik Deutschland sind die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Korrekturdienste für Genauigkeiten im Meterbereich ( $< 10$  m) bzw. im Sub-Meterbereich ( $< 1$  m) verfügbar.

Lediglich SAPOS EPS und die satellitengestützten Systeme decken Deutschland vollständig ab. Beacon DGPS ist nur in Küstennähe verfügbar. Daneben laufen weitere Dienste wie DGPS via Loran-C (EUROFIX), AMDS/dGPS und EGNOS

---

<sup>1</sup>Fieldstar® ist ein eingetragenes Warenzeichen der AGCO Corporation.

<sup>2</sup>GreenStar® ist ein eingetragenes Warenzeichen von Deere & Company.

<sup>3</sup>AgGPS® ist ein eingetragenes Warenzeichen von Trimble Navigation Limited.

<sup>4</sup>StarFire™ ist ein Warenzeichen von NavCom Technology, Inc. (eine John Deere Company).

im Testbetrieb. Die gesendeten Korrekturdaten stehen in den Formaten RTCM SC-104 Version 2.0 oder 2.1 zur Verfügung.

Tabelle 2.1: Korrekturdienste in Deutschland

<i>Korrekturdienst</i>	<i>Verbreitung</i>	<i>Genauigkeit</i>
SAPOS® <sup>a</sup> EPS (Echtzeit- Positionierungs- Service)	Rundfunkanstalten der ARD (UKW - RASANT) Deutschen Telekom AG (LW - ALF) Sender der Landesvermessung (2-m-Band)	1–3 m
SAPOS® HEPS (Hochpräziser Echtzeit- Positionierungs-Service)	Sender der Landesvermessung (2-m-Band)	1–5 cm
OmniSTAR® <sup>b</sup>	geostationäre Satelliten (L-Band)	<1 m
Racal LandStar	geostationäre Satelliten (L-Band)	<1 m
Beacon DGPS	IALA Beacon System (Seefunkfeuerband 283,5– 325,0 kHz)	<5 m

<sup>a</sup>SAPOS® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Adv.

<sup>b</sup>OmniSTAR® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Fugro Company.

Die geforderten Genauigkeiten der Ortung mit GPS in Kombination mit diesen Diensten sind jedoch nur möglich, wenn bei der Nutzung keine Fehler oder Behinderungen auftreten.

## 2.3 Probleme bei der Satellitenortung

Im Gegensatz zur Satellitenortung und -navigation bei Flugzeugen und Schiffen sind in der Landwirtschaft Probleme durch lokale spezifische Gegebenheiten zu verzeichnen (Abb. 2.1).

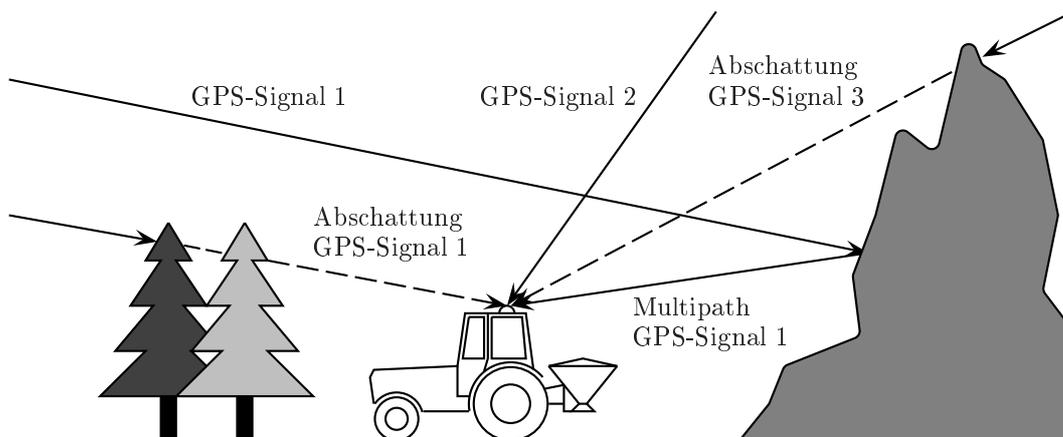


Abbildung 2.1: Abschattung und Mehrwegausbreitung bei der Satellitenortung

Abschattungs- und Mehrwegausbreitungseffekte häufen sich insbesondere an und in dichten Wäldern, im hügeligen Gelände, in engen Tälern und in der Nähe

von Gebäuden. Diese Effekte betreffen sowohl GPS wie auch Korrekturdatensignale. Beide Signale unterliegen den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, unabhängig davon, ob sie terrestrisch oder via Satellit ausgestrahlt werden. Signalausfälle mit unterschiedlicher Länge sind deshalb unvermeidlich. Sie erfordern geeignete Hilfsmittel in Form von zusätzlichen Sensoren oder Systemen.

## 2.4 Koppelortungssysteme

Koppelortungssysteme, auch als Stützungssysteme bezeichnet, enthalten zusätzliche Sensoren, deren Messwerte mittels geeigneter mathematischer Algorithmen mit den Messwerten des GPS verrechnet werden. Diese Redundanz der Messwertermittlung hat den Vorteil, dass bei Ausfall der Satellitenortung oder stark fehlerbehafteten Positionswerten, die Fehler erkannt und durch korrekte Positionsdaten aus den zusätzlichen Sensoren ersetzt werden. Damit stehen weiterhin Informationen über den aktuellen Fahrweg zur Verfügung. Der letzte gültige Messwert des Satellitenortungssystems wird als Startpunkt für eine vektorielle Berechnung des Fahrweges auf Basis der Stützungssensoren verwendet. Dieses Verfahren wird für die gesamte Zeitdauer angewendet, bis das Satellitenortungssystem wieder Messwerte in der geforderten Genauigkeit zur Verfügung stellt. Bei Verfügbarkeit des Satellitenortungssystems und der Stützungssensoren führt eine Verrechnung der Messwerte beider Systeme zu einer höheren Ortungsgenauigkeit.

### 2.4.1 Anforderungen an ein Koppelortungssystem

Ein Koppelortungssystem für den beschriebenen Einsatzzweck muss folgenden Anforderungen genügen:

- Überbrückung der auftretenden Abschattungszeiten
- gleiche oder höhere Genauigkeit wie das Satellitenortungssystem
- uneingeschränkte Funktionsfähigkeit unter rauen und wechselnden Bedingungen in der Landwirtschaft (z.B. Schmutz, Nässe und Temperaturschwankungen)
- hohe Lebensdauer
- günstiges Kosten/Nutzenverhältnis
- Erfassung von Nick- und Wankschwingungen des Fahrzeuges bei sehr hoher Anbringung der GPS-Empfangsantenne

Im Automobilbau werden Radsensoren zur Messung der Radumdrehungen in großer Stückzahl eingesetzt. Größere Reifendurchmesser und Achslasten, variable Reifeninnendrucke und der wechselnde Beladungszustand von landwirtschaftlichen Maschinen lassen einen Einsatz von Radsensoren als Stützungssensoren nicht zu. Unter diesen Bedingungen werden weder der achslast- und untergrundabhängige Schlupf der Räder noch die ständigen Verformungen des Reifens und die damit verbundenen Veränderungen des Reifendurchmessers berücksichtigt.

## 2.4.2 Arten von Stützungssensoren

Stützungssensoren arbeiten nach verschiedenen Messverfahren. Üblich sind Verfahren zur:

- Wegmessung
- Geschwindigkeitsmessung
- Beschleunigungsmessung
- Winkelmessung
- Richtungsmessung
- Entfernungsmessung
- Positionsbestimmung

Für die schlupffreie Messung muss ein Stützungssensor die berührungslose Messung über Grund beherrschen. Am Markt verfügbar sind inertielle Sensoren, optische Sensoren, Laser-Doppler-Sensoren, Mikrowellen-Doppler-Sensoren und Ultraschall-Doppler-Sensoren.

### 2.4.2.1 Inertielle Sensoren und Systeme

Mit inertialen Systemen, auch als Trägheitsnavigationssysteme bezeichnet, werden Orientierung und Position über die Messung von translatorischen und rotatorischen Bewegungen bestimmt.

Gyroskope sind Sensoren zur inertialen Messung rotatorischer Größen. In der Regel messen Gyroskope einachsige Drehgeschwindigkeiten (auch Drehraten genannt). Drehraten werden in der Einheit  $^{\circ}/s$  bzw.  $^{\circ}/h$  angegeben. Nach den Messprinzipien benannt, gliedern sich die Sensoren in mechanische und optische Gyroskope. Der rotierende, klassische Kreisel wird den mechanischen Gyroskopen zugeordnet. Faser- und Laserkreisel beruhen auf optischen Messprinzipien wie dem Sagnac-Effekt. Die Qualität der Sensoren wird nach den wichtigsten temperaturabhängigen Fehlergrößen Biasfehler, Skalenfaktorfehler und Rauschen beurteilt. Der Bias ist die Scheindrehrate, die im ruhenden Sensorzustand ausgegeben wird. Mit dem Skalenfaktorfehler wird die lineare Abweichung der gemessenen Drehrate zur tatsächlichen Drehrate angegeben. Die Fehlergröße Rauschen wird deshalb aufgeführt, da sie nach der Integration zu einem nicht-deterministischen Verhalten führt.

Bei Beschleunigungssensoren wird die translatorische Beschleunigung inertial gemessen. Das mechanisch gewonnene Messsignal wird in  $g$  mit  $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$  angegeben. Beschleunigungssensoren sind in piezoelektrischer, piezoresistiver oder kapazitiver Ausführung erhältlich. Biasfehler, Skalenfaktorfehler und Rauschen bestimmen die Güte der Sensoren.

Inertiale Systeme messen die Bewegungen an den drei orthogonalen Achsen in Form der Plattform- oder der Strap-Down-Lösung. Bei der Plattform-Lösung können die Raumwinkel an den kardanischn aufgehängten Kreiseln direkt abgelesen werden.

Im Strap-Down-System werden sowohl drei einachsige, orthogonal angeordnete Gyroskope als auch drei orthogonal angeordnete Beschleunigungssensoren verwendet. Diese Sensoren sind fest mit dem Trägerfahrzeug verbunden und messen die fahrzeugbezogenen Bewegungen. Der bei Gyroskopen und Beschleunigungssensoren anzutreffende Bias ergibt nach der Integration der Messwerte die sogenannte Drift. Die Drift geht als Fehler in die Orientierungs- und Positionsbestimmung ein, der mit zunehmender Zeit anwächst. Zur Kompensation des Driftens wird die Stützung verwendet, die intern über eine direkte Winkelmessung oder extern aus zusätzlichen Informationen über Geschwindigkeit, Kurs und Position von GPS, magnetischen Kompass, Odometer bzw. Fahrtmesser gewonnen wird [53].

Die Kombination von drei Beschleunigungs- und drei Drehratensensoren, wie der Sensor DYMO-2 der Fa. B+S, ermöglicht die Bestimmung der Beschleunigung in Längsrichtung, in Querrichtung und entlang der Hochachse sowie der Nick-, Wank- und Giergeschwindigkeit. Zusätzlich enthält dieser Sensor einen Thermofühler zur Temperaturkompensation [43].

Koppelortungssysteme, die neben dem (D)GPS-Empfänger auch inertielle Sensoren enthalten, sind in Tabelle 2.2 aufgelistet [51, 57].

Tabelle 2.2: (D)GPS-Empfänger mit integriertem Koppelortungssystem

<i>Hersteller</i>	<i>System</i>	<i>Komponenten</i>
DATA TEC CO., LTD. (Distributor Perform Tech)	Autonomes Navigationssensor- Modul	GPS-Empfänger, 2 Vibrationsgyroscope, 1 Halbleiter-Beschleunigungssensor
elektronik-labor Carls GmbH & Co. KG	NAV 846 DGPS- Empfangseinheit	GPS-Empfänger, ALF-Longwellenempfänger, UKW-Empfänger RASANT 2, 2 Vibrationsgyroscope, 1 Halbleiter-Beschleunigungssensor

#### 2.4.2.2 Optische Sensoren

Optische Sensoren ermitteln die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Wegstrecke von Objekten gegenüber einer Bezugslage. Das Messprinzip beruht auf dem Gitter-Durchlichtverfahren mit optischen Zweiphasengittern [46]. Die Genauigkeit von optischen Gittersensoren liegt beispielsweise für den CORREVIT L-CE-Sensor der Fa. CORRSYS GmbH bei  $< \pm 0,1\%$  für einen Geschwindigkeitsmessbereich von 0,5–400 km/h. Allerdings erlaubt der zulässige Arbeitsabstand von  $300 \pm 60$  mm keinen Spielraum für eine flexible Montage oder Neigungsfehler am Fahrzeug, da der Arbeitsabstand konstant gehalten werden muss. Dieses

System arbeitet im Temperaturbereich von  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $50^{\circ}\text{C}$  und bei einer relativen Feuchte von 5–80 % [45].

Die V-Sensoren-Baureihe der Fa. Datron-Messtechnik GmbH erfasst Geschwindigkeiten von 0,5–310 km/h (V1-Sensor) bzw. 0,5–250 km/h (V2-Sensor). Dabei sind Arbeitsabstände von  $520 \pm 60$  mm bzw.  $310 \pm 20$  mm zulässig. Auf trockener Asphaltoberfläche betragen bei beiden Modellen die Geschwindigkeits- und Weglinearität 0,15 %, die Reproduzierbarkeit 0,1 % [49]. Kondenswasser auf der Optik oder Verschmutzung der Optik führt zur Verfälschung oder gar zum Totalausfall der Messung.

#### 2.4.2.3 Laser-Doppler-Sensoren

Laser-Doppler-Sensoren erzeugen mit Hilfe zweier Laserstrahlen ein Streifenmuster auf dem Messuntergrund. Durch die Bewegung der streuenden Oberfläche, des Messuntergrundes also, wird das in den Detektor zurückgestreute Licht in seiner Intensität moduliert, wobei die Frequenz der Helligkeitsmodulation direkt proportional zur Geschwindigkeit der Bewegung des Messuntergrundes ist und damit zur Dopplerfrequenz. Die Genauigkeit dieser Systeme, wie beispielsweise das  $\mu\text{AWS}$  von der Fa. Visionet GmbH, liegt je nach Sensormodell bei  $\pm 0,1$ –3 %. Der Messabstand ist dabei je nach Sensorkopf auf 120 bzw. 240 mm festgelegt. In Abhängigkeit vom verwendeten Sensorkopf liegen die Geschwindigkeitsmessbereiche bei 0,005–5 m/s oder 0,01–10 m/s [63]. Nachteilig wirken sich die Anfälligkeit dieses Systems gegenüber starker Verschmutzung an der Optik und dem Detektorchip, sowie die Systemauslegung für den stationären Einsatz aus.

#### 2.4.2.4 Mikrowellen-Doppler-Sensoren

Mikrowellen-Doppler-Sensoren, auch als Radarsensoren bezeichnet, messen die Geschwindigkeit und den Weg über Grund schlupflos und präzise. Das physikalische Messprinzip beruht auf dem Dopplereffekt. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit für alle Frequenzen im Vakuum und in guter Näherung in Luft gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c = 300\,000\,000$  m/s ist. Derzeit sind Radarsensoren mit Horn- und Planarantenne Stand der Technik. Radarsensoren mit Hornantenne sind vergleichsweise voluminöser, aber billiger als Radarsensoren mit Planarantenne. Die von den Herstellern der Sensoren angegebenen Genauigkeiten sind weitgehend identisch (Tab. 3.1).

#### 2.4.2.5 Ultraschall-Doppler-Sensoren

Ultraschall-Doppler-Sensoren arbeiten ebenfalls nach dem Doppler-Prinzip. Im Unterschied zur Mikrowelle breitet sich der Ultraschall mit einer Geschwindigkeit von  $c = 340$  m/s aus. Zu beachten ist, dass das Doppler-Prinzip nur funktioniert, wenn das Verhältnis aus der Geschwindigkeit  $v$  des zu messenden Objektes zur Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Ultraschalls  $\ll 1$  ist.

## 2.4.3 Untersuchungen zu Stützungssensoren

### 2.4.3.1 Inertiale Sensoren und Systeme

Eine Genauigkeitsanalyse fahrzeugfester Sensoren auf Basis von mechanischen Beschleunigungsmessern, mechanischen Kreiseln und optischen Kreiseln wird in [32] gezeigt. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass die Trennung von kinematischer und gravitativer Beschleunigung problematisch ist. Weiterhin zeigte sich im Gegensatz zu mechanischen Sensoren die Unempfindlichkeit des Laserkreisels gegenüber äußeren Kräften und Momenten. Zugleich ist aber mit dem grundlegenden Messprinzip bei niedrigen Drehraten eine grundsätzlich andere Charakteristik der Messgröße zu verzeichnen.

Bereits 1994 fanden Untersuchungen zu Koppelortungssystemen in der Landwirtschaft statt [25]. Zum Einsatz kamen neben 6 DGPS-Empfängern von 5 Herstellern, ein DGPS-System mit integriertem 3-achsigen mechanischen Gyrosensor (AHRS), sowie ein elektronisches Kompassmodul mit 2-achsigen mechanischen Gyrosystem als Low-Cost-Alternative zum AHRS. Zusätzlich wurde jeweils ein inkrementaler Winkelencoder an beiden Rädern der Hinterachse montiert. Der elektronische Kompass konnte, wegen der magnetischen Verzerrungen, die vom Traktorumfeld herrühren, nicht absolut kalibriert werden. Unter diesen Voraussetzungen war die notwendige Stabilisierung der Gyrosensoren nicht mehr gegeben, so dass dieses preiswerte System im vorgefundenen magnetischen Umfeld eines Traktors nicht für die Koppelortung herangezogen werden kann. Das gleiche Problem tritt auf, wenn der magnetische Kompass und die beiden Radsensoren betrachtet werden. Der bei den Radsensoren nicht erfasste Schlupf des Traktors wirkt sich ebenfalls nachteilig auf die Genauigkeit aus.

Im Rahmen eines Vergleichs von öffentlichen Referenzdiensten für die DGPS-Ortung wurden 1997 Untersuchungen mit einem inertialen System als Koppelortungssystem für GPS im landwirtschaftlichen Einsatz durchgeführt [5, 6]. Ein piezoelektronisches Vibrationsgyroskop ( $< 500$  DM) lieferte die Daten zur vektoriellen Berechnung des Fahrweges. Der orthogonale Wegfehler bei einer Geradeausfahrt, hervorgerufen durch die Gyro-Drift, erreicht in den Versuchen nach 5 min eine zugelassene Querabweichung von  $\pm 2$  m bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h. Laboruntersuchungen ergaben weiterhin, dass der dem Gyro nachgeschalteten Elektronik ein erheblicher Anteil des gemessenen Fehlers zuzuordnen ist. Dabei fließen nicht nur thermoelektrische Effekte sondern auch die Nullpunktstabilität der verwendeten Analog-Digital-Umsetzer in den Winkelmessfehler des Gyro ein. Die Autoren veröffentlichten 1998/99 die Schritte zur Informationsverarbeitung aus den Messwerten der (D)GPS-Ortung und der Koppelortung sowie Ergebnisse prozessnaher Simulationsrechnungen in [7, 8]. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass Koppelortungssysteme auf Basis von Geschwindigkeits- und Richtungsauswertung ausreichend für die Überbrückung kurzzeitiger (D)GPS-Signalausfälle sind. Die Geschwindigkeitsmessung wird mit einem Radarsensor realisiert. Für die Richtungsbestimmung standen bei ausreichend hoher Präzision preiswerte und bedienungsfreundliche Sensoren wie Fluxgatekompass, Faserkeisel und Vibrationsgyroskop zur Verfügung, welche den Anforderungen jedoch

nur bedingt gewachsen sind. Ursache für den eingeschränkten Einsatz sind die in der Praxis auftretenden zeitvarianten Eigenmagnetfelder der Trägerfahrzeuge und die örtlichen Variationen im Erdmagnetfeld (Missweisung). Stillstandszeiten und Lageveränderungen des Ortungssystems erfordern die Kompensation des Eigenmagnetfeldes. Eine Datenauswertung über gerade Spurabschnitte bei der Feldbearbeitung stellt eine weitere preisgünstige Möglichkeit dar, einen Teil der (D)GPS-Ausfälle mit ausreichender Präzision zu überbrücken. Neben dem zusätzlichen Rechenaufwand wird noch ein Sensor zur Kurvendetektion und zur Kursbestimmung bei Kurvenfahrten benötigt.

#### **2.4.3.2 Mikrowellen- und Ultraschall-Doppler-Sensoren**

Frühe Erkenntnisse zum Einsatz von Mikrowellensensoren an Traktoren stammen aus dem Jahr 1982 [27]. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der wahren Fahrgeschwindigkeit über Grund. Verglichen wurden Daten von angetriebenen Rädern, nicht angetriebenen Rädern, gezogenem fünften Rad und Mikrowellensensor. Der Mikrowellensensor kam in Ein- und Zweistrahl Ausführung zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass der Mikrowellensensor mit Zweistrahltechnik Nickschwingungen kompensiert und Genauigkeiten von  $< 3\%$  erzielt. Nach Einschätzung der Autoren ist der Mikrowellensensor die einzig praktikable Lösung zur schlupffreien Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit eines Traktors. Zugleich berichten sie von der Anfälligkeit von optischen und akustischen Sensoren gegenüber Staub, Bewegungen des Bestandes und Windgeschwindigkeit. Die bei diesen Untersuchungen beteiligte Fa. TRW Inc. stellte 1985 einen für Traktoren optimierten Mikrowellensensor vor [10]. In Laboruntersuchungen und Feldversuchen erzielte der Sensor Genauigkeiten von  $2\%$ . Auch auf Gras, Sand, Asphalt und nassen Oberflächen erreichte der Sensor diese Genauigkeit.

Eine Einschätzung zu Einsatzmöglichkeiten von Mikrowellen-Doppler-Sensoren, Ultraschall-Doppler-Sensoren und optischen Sensoren in der Landwirtschaft gibt [24] 1989. Die schlupffreie Wegstrecken- und Geschwindigkeitsmessung dieser Sensoren wurde unter dem Gesichtspunkt der Prozessoptimierung an Anbaugeräten, wie Düngerstreuer und Pflanzenschutzspritze bewertet. Sowohl in Prüfstandsuntersuchungen als auch bei Feldversuchen über Getreidestoppeln, Kartoffeln, Klee gras und Asphalt erzielte der Mikrowellen-Doppler-Sensor TGSS 012 der Fa. TRW Inc. die besten Ergebnisse mit einem mittleren Fehler von  $1,5\%$ . Lediglich bei stehendem Winterweizen vergrößerte sich der relative Fehler auf  $4,0\%$ .

In [21] wird die Entwicklung eines neuen Ultraschall-Doppler-Sensors beschrieben. Untersucht wurden die Ausbreitungscharakteristik der Ultraschallwellen in Luft und die Reflektion des Sendesignals an der Fahrbahnoberfläche. Es wurde gezeigt, dass das S/N-Verhältnis des Dopplersignals äquivalent zur Empfangseffizienz, dem Produkt von Ausbreitungsverhältnis und Reflektionsvermögen ist. Die besten Ausbreitungsbedingungen wurden mit einer Wellenlänge von  $3\text{ mm}$  erzielt. Mit einer neuen Methode zur Erfassung des Dopplersignals wurden die besten Empfangsbedingungen bewerkstelligt. Die Sendefrequenz ist variabel entsprechend der Frequenzänderung, so dass die Summe aus Sendefrequenz und

Frequenzänderung immer konstant gehalten wird. Die Empfangsfrequenz hingegen ist auf die optimale Frequenz für beste Ausbreitungsbedingungen eingestellt, welche genau der Summe aus Sendefrequenz und Frequenzänderung entspricht. Unter Berücksichtigung dieses Ansatzes wurde zur Ermittlung von Geschwindigkeiten im Bereich von 0–250 km/h die Empfangsfrequenz auf 130 kHz und der Abstrahlwinkel auf  $45^\circ$  festgelegt. Der Messfehler des in der Entwicklung befindlichen Sensors beträgt 2–3 km/h gegenüber dem verwendeten Referenzsystem.

Aus [20] ist ein Mikrowellen-Doppler-System in Janus-Anordnung bekannt, welches mit einer konstanten Frequenz von 61 GHz arbeitet. Der Abstrahlwinkel beider Sensoren beträgt  $45^\circ$ . Bei dieser Arbeitsfrequenz verkleinern sich die Bauteilkomponenten entscheidend, so dass eine Montage unterhalb des Fahrzeuges möglich ist. Der Prototyp erzielte bei der Geschwindigkeitsmessung eine Standardabweichung von 0,5 %. Auf nassen Fahrbahnen steigt die Standardabweichung unwesentlich auf 0,6 %. 95 % der gemessenen Geschwindigkeitswerte weisen einen relativen Fehler  $<1\%$  auf.

Ein Vergleich eines 200 kHz Ultraschall-Doppler-Sensors mit einem Mikrowellen-Doppler-Sensor bei 24 GHz wird in [12] gezeigt. Bei einer Fahrstrecke von 1 m führen die Ergebnisse aus Simulation, Laborversuchen und Messfahrten im Kraftfahrzeug übereinstimmend zu Standardabweichungen der Geschwindigkeitsmesswerte von 1–2 % bei 24 GHz Mikrowelle und 0,5–1,2 % bei 200 kHz Ultraschall. Wegen der kleineren Wellenlänge ( $\lambda = 1,65$  mm) liefert der Ultraschall deutlich mehr Dopplerschwingungszüge je Wegstrecke als die Mikrowelle ( $\lambda = 1,25$  cm), mit dem Resultat eines kleineren Messfehlers bei gleicher Auswertung. Bei kleinen Geschwindigkeiten darf nur eine kurze Wegstrecke ausgewertet werden, da sonst Beschleunigungen des Fahrzeuges innerhalb des Auswertintervalls zu große Geschwindigkeitsänderungen hervorrufen. Bemerkbar gemacht haben sich Effekte des Ausbreitungsmediums wie Fahrtwind und Wirbelbildung auf die Ausbreitung der Ultraschallwelle. Signifikante Beeinträchtigungen treten dann auf, wenn die Windgeschwindigkeit in der Größenordnung der Fahrgeschwindigkeit liegt. Laborversuche zeigen jedoch, dass dies nicht die Regel ist. Mikrowellensensoren hingegen sind prädestiniert zur Messung hoher Geschwindigkeiten, da sie durch das Medium Luft praktisch nicht beeinflusst werden.

Zur Beurteilung eines 61 GHz Mikrowellen-Doppler-Systems für die Bestimmung der Geschwindigkeiten in Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerrichtung wurden experimentelle Daten mit der theoretischen Messgenauigkeit verglichen [16]. Das System bestand aus 2 parallel angeordneten Antennen mit jeweils 2 Strahlungskeulen (Janus-Anordnung). Der Abstrahlwinkel der Keulen betrug in Fahrzeuglängsrichtung bzw. entgegengesetzt dazu jeweils  $41^\circ$  zur Senkrechten. Gleichzeitig waren beide Antennen zueinander entgegengesetzt in Fahrzeugquerrichtung um  $30^\circ$  zur Wagerechten gekippt. Der errechnete Messfehler zeigte die starke Abhängigkeit der Genauigkeit von der Keulenanordnung und deren Geometrie. Durchgeführte Kurvenfahrten um  $90^\circ$  im und entgegen dem Uhrzeigersinn sowie eine Kreisfahrt ließen sich aus der Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung ableiten.

Entgegengesetzt zu bisherigen Betrachtungen wurde zur Geschwindigkeitsmessung die Ablösung des Radarsensors an landwirtschaftlichen Maschinen durch einen (D)GPS-Empfänger vorgeschlagen [31]. Die Autoren berichten von vergleichbaren Genauigkeiten zwischen beiden Systemen. Unter Berücksichtigung der in 2.3 beschriebenen Probleme ist die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit des GPS-Signals nicht ständig gegeben, so dass mit Ausfällen bei der Geschwindigkeitsermittlung zu rechnen ist.

Ein Experimentalsystem eines Nahbereichsradarsensors für Kraftfahrzeuge wurde in [33] vorgestellt. Das Radarsystem war in der Lage, den Abstand, die Relativgeschwindigkeit und die polarimetrische Streumatrix des Ziels zu bestimmen. Dazu war der Radarsensor mit zwei Antennenmodulen ausgestattet, die mit schräg zueinander gerichteten Hauptkeulen zur Straße blickten. Lediglich ein Modul besaß einen Sender, aber beide Antennenmodule sollten die vom Leuchtfleck diffus gestreuten Anteile empfangen. Die Radarinformationen ließen die Ermittlung der Parameter Geschwindigkeit, Bodenabstand, Fahrtrichtung, Nickwinkel und Fahrbahnzustand zu.

#### 2.4.4 Diskussion

Nachteilig erweisen sich bei optischen Sensoren und Laser-Doppler-Sensoren die Forderungen nach einem konstanten Arbeitsabstand des Sensors und der ständigen Sauberkeit der Messoptik. Beide Anforderungen können im vorliegenden Einsatzfall nicht erfüllt werden. Änderungen des Arbeitsabstandes der Sensoren, hervorgerufen durch Fahrzeugschwingungen und zusätzliche Lasten sowie Verschmutzungen der Optik bedingt durch den Einsatz im landwirtschaftlichen Umfeld, beeinträchtigen die Messung erheblich, so dass diese Sensoren für den geforderten Anwendungsfall ausscheiden.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen für diesen speziellen Anwendungsfall die auftretenden und zu erwartenden Probleme (Gyro-Drift, zeit- und ortsvariante elektromagnetische Störfelder) inertialer Sensoren im unteren Preissegment. Trotz einer verbesserten Signal- und Informationsverarbeitung bei hybriden Ortungssystemen, bestehend aus (D)GPS-Empfänger und inertialem System, lassen sich mit bisherigen Systemen nur Geradeausfahrten zuverlässig erfassen. Fahrten entlang gerader Fahrspuren berücksichtigen jedoch nur einen Teil der tatsächlichen Feldarbeit. Ein Ortungsausfall bei einem sich anschließenden Wendemanöver kann nicht wie ein Ortungsfehler bei einer Geradeausfahrt mittels geeigneter Filter überbrückt werden, da sich der Richtungsvektor ständig ändert. Zum Verhalten inertialer Systeme bei Kurvenfahrten liegen keine detaillierten Ergebnisse vor, so dass keine allgemeingültige Aussage über deren Eignung für diesen Einsatzzweck getroffen werden kann.

Bereits aus den ersten Versuchen mit Mikrowellensensoren an Traktoren ist das Potential dieser Sensoren zu erkennen. Die erzielten Ergebnisse stimmen mit denen moderner Simulationsverfahren überein. Eine Gegenüberstellung von Mikrowellensensoren und Ultraschallsensoren zeigt den geringeren Messfehler des

Ultraschallsensors bei niedrigeren Geschwindigkeiten. Demgegenüber steht die signifikante Beeinträchtigung des Messergebnisses durch Effekte des Ausbreitungsmediums, wie Fahrtwind oder Wirbelbildung. Im Gegensatz dazu existiert praktisch keine Beeinflussung durch das Medium Luft beim Mikrowellensensor. Seitdem erste Untersuchungen den Mikrowellensensoren am Traktor eine hohe Genauigkeit bestätigt haben, werden diese Sensoren zur schlupffreien Geschwindigkeitmessung an landwirtschaftlichen Fahrzeugen eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich durch eine lange Lebensdauer sowie durch Robustheit und Widerstandsfähigkeit gegenüber den rauen und wechselnden Bedingungen im landwirtschaftlichen Umfeld aus. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist den Mikrowellensensoren für den Einsatz im Koppelortungssystem der Vorzug zu geben.



## 3 Theoretische Betrachtungen

### 3.1 Messprinzip der Radarsensoren

#### 3.1.1 Physikalisches Prinzip - Dopplereffekt

Zur Messung der Geschwindigkeit  $v$  eines Fahrzeuges mit dem Dopplereffekt wird dessen Relativgeschwindigkeit über Grund berührungslos ermittelt. Dazu ist eine Antenne (z. B. Dopplersystem 1) gemäß Abbildung 3.1 unter einem bestimmten Abstrahlwinkel  $\alpha$  am Fahrzeug montiert. Diese Antenne sendet ein Signal mit der Frequenz  $f_s$  zur Fahrbahnoberfläche. Je nach Beschaffenheit der Fahrbahn wird dieses Signal z. T. diffus bzw. spiegelnd reflektiert oder absorbiert. Das von der Fahrbahnoberfläche reflektierte Signal mit der Frequenz  $f_e$  wird von derselben Antenne wieder empfangen. Zwischen Sende- und Empfangssignal tritt eine Frequenzverschiebung auf, aus der sich die Dopplerfrequenz  $f_D$  nach Gleichung 3.1 bestimmen lässt.

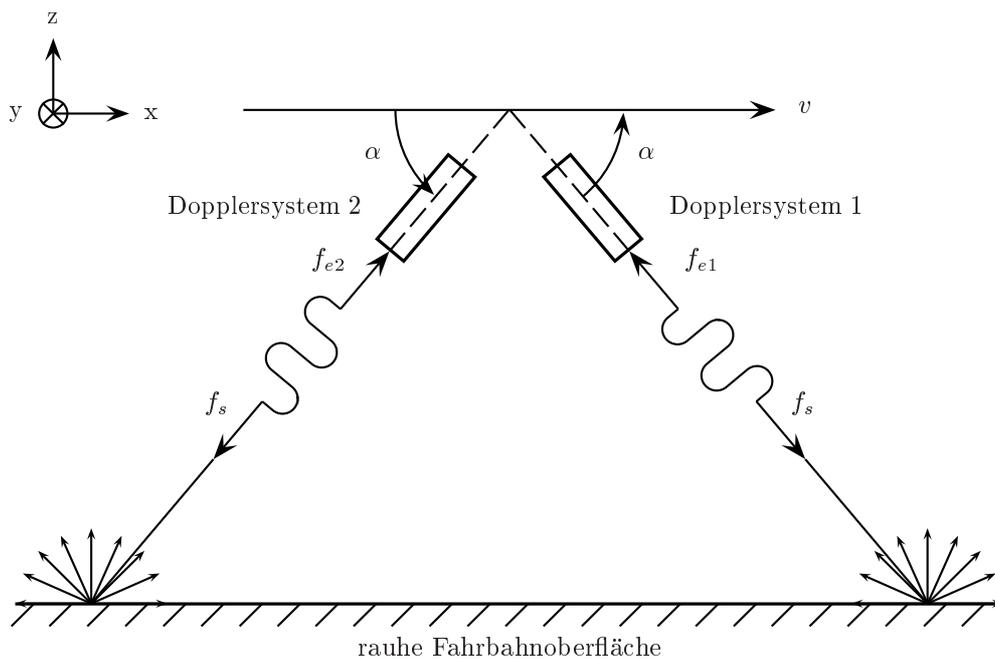


Abbildung 3.1: Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip über Grund (Janus-Anordnung)

$$f_D = f_e - f_s = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha \quad (3.1)$$

Aus dieser Gleichung ist erkennbar, dass die gemessene Dopplerfrequenz  $f_D$  von

der Geschwindigkeit  $v$  und dem Abstrahlwinkel  $\alpha$  abhängt [9, 26, 42]. Je kleiner der Abstrahlwinkel  $\alpha$  bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit, desto größer die ermittelte Dopplerverschiebung und das Signal am Sensorausgang.

Die Richtcharakteristik der verwendeten Antenne und die durch die Anordnung des Sensors resultierende Auftrefffläche des Signals auf die Fahrbahnoberfläche (Footprint) sind für die Qualität der Messung verantwortlich.

Zur Kompensation von Messfehlern, die aus Fahrzeugneigungen entstehen, wird eine Antenne in Fahrtrichtung und eine zweite Antenne entgegengesetzt zur Fahrtrichtung montiert. Diese Anordnung wird als Janus-Anordnung bezeichnet und erlaubt die Bestimmung einer mittleren Dopplerverschiebung.

### 3.1.2 Funktionsprinzip - Aufbau

Ein Radarsensor ist aus den in Abbildung 3.2 dargestellten Hauptkomponenten aufgebaut. Der HF-Oszillator erzeugt eine Sendefrequenz von 24,125 GHz.

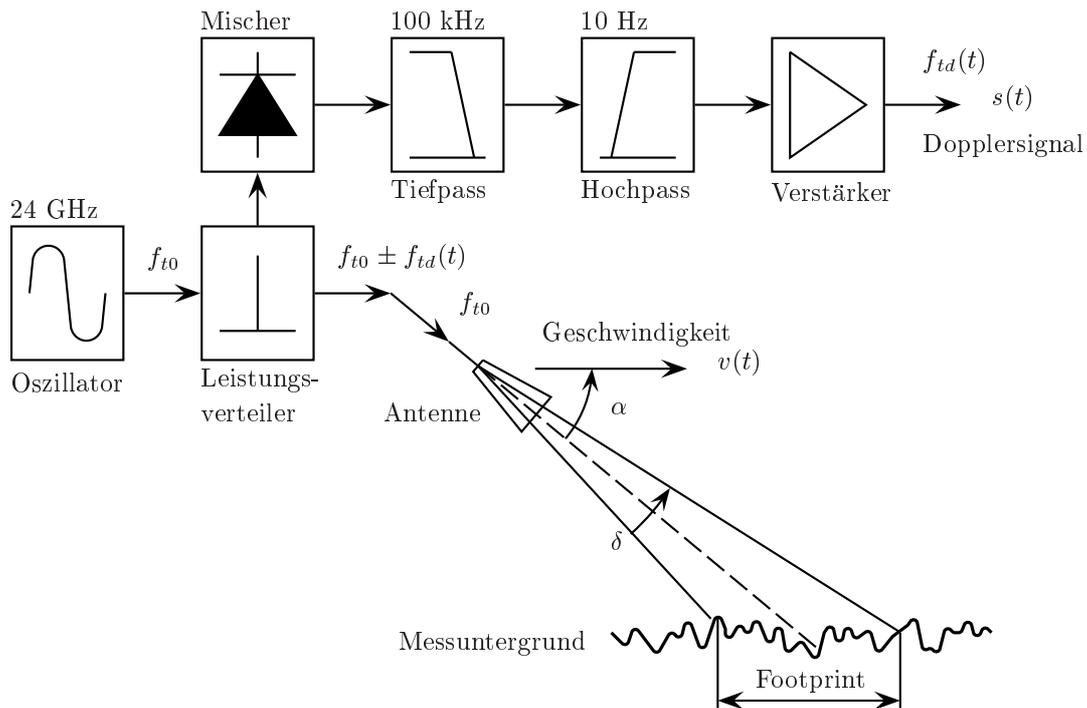


Abbildung 3.2: Blockschaftbild eines 24 GHz Radarsensors (Beispiel)

Diese Frequenz wird auf eine Horn- oder Planarantenne gegeben, die je nach Aufbau des Sensors eine oder mehrere Hauptkeulen in einem bestimmten Winkel zur Horizontalen erzeugt. Der Messuntergrund reflektiert einen Teil des Sendesignals zurück zur Antenne. Nach Gleichung 3.1 wird aus dem Sende- und Empfangssignal die Dopplerverschiebung bestimmt. Ein Mischer wandelt die ermittelten Dopplerverschiebungen in ein NF-Signal um. Stehen zwei Sensoren bzw. Hauptkeulen in Janus-Anordnung zur Verfügung, kann unter Berücksichtigung der beiden

Dopplerverschiebungen, der Neigungsfehler der gesamten Janus-Anordnung kompensiert werden. Ein nachgeschalteter Bandpassfilter sorgt dafür, dass die unrelevanten Rauschsignale ausgefiltert und mögliche Störungen unterdrückt werden.

Je nach Modell werden am Sensorausgang geschwindigkeitsabhängige Digital- und/oder Analogsignale ausgegeben [4]. Dabei steht am Analogausgang ein geschwindigkeitsproportionales Spannungssignal zur Verfügung. Bei Impulzzählung erzeugt der Sensor am Digitalausgang ein wegproportionales Signal, welches auf der sensortypischen Wegauflösung  $I_s$  in der Einheit Impulse/m basiert. Einer Frequenzmessung am gleichen Ausgang liegt das Ausgangssignal  $f_A$  in der Einheit Hz je km/h zugrunde. Die Beziehung zwischen beiden Messvarianten verdeutlicht folgendes Beispiel:

Nach Herstellerangaben verfügt der Sensor am Digitalausgang bei einem Abstrahlwinkel des Sensors  $\alpha = 35^\circ$  über eine Wegauflösung  $I_s = 130$  Impulse/m. Das bedeutet, dass nach 1 m zurückgelegter Wegstrecke der Zähler 130 Impulse gemessen hat. Führt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von  $v = 1$  m/s ( $= 3,6$  km/h) wird bei einer Frequenzmessung über  $t_0 = 1$  s (Mess- oder Torzeit) eine Frequenz  $f = 130$  Impulse/s, also  $f = 130$  Hz ermittelt. Das Ausgangssignal beträgt  $f_A = 36,1$  Hz je km/h.

Der im Beispiel dargestellte Zusammenhang wird mit der Gleichung

$$v = \frac{f}{I_s} \quad (3.2)$$

beschrieben.

### 3.1.3 Auswahl des Sensors und der Arbeitsfrequenz

Zur Wahl geeigneter Sensoren für das Koppelortungssystem stehen ausschließlich handelsübliche Modelle zur Verfügung. Das Koppelortungssystem soll unterhalb des landwirtschaftlichen Fahrzeuges montiert werden. Daraus resultiert der Anspruch an eine kompakte und flache Bauweise. Die physikalischen Abmessungen und die Kosten spielen die entscheidende Rolle für die Fahrzeugintegration und die Massenproduktion.

Sensoren mit Arbeitsfrequenzen unterhalb von 10 GHz besitzen großflächige Antennen und Leitungskomponenten bei erträglichen Kosten. Nachteilig erweist sich, wie Untersuchungen bei 10 GHz belegen, die erschwerte Dopplersignalauswertung durch Rauscheinflüsse und stark reflektierende Oberflächen. Bekannt ist weiterhin, dass sich der zur Auswertung verfügbare Dopplerfrequenzbereich mit steigender Arbeitsfrequenz vergrößert. Dabei muss beachtet werden, dass das bei höheren Arbeitsfrequenzen (36 GHz, 60 GHz, 76 GHz, 94 GHz) zunehmende Verhältnis von Rauigkeit zur Wellenlänge im Gegensatz zur sinkenden Eindringtiefe in schwierige Fahrbahnbeläge (Wasser- oder Eisflächen) steht. Aufgrund hoher Bauteil- und Fertigungskosten scheiden Sensoren mit Arbeitsfrequenzen

oberhalb von 30 GHz bei Berücksichtigung des Kostenfaktors aus [18, 19].

Einen Kompromiss stellen Sensoren mit einer Arbeitsfrequenz von 24,125 GHz dar. Mikrowellensensoren mit dieser Arbeitsfrequenz werden derzeit bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen und Schienenfahrzeugen eingesetzt. Tabelle 3.1 zeigt eine Auswahl am Markt verfügbarer Sensoren [44, 48, 50, 58, 59, 61, 62].

Tabelle 3.1: Verfügbare Radarsensoren

<i>Hersteller</i>	<i>Modell</i>	$v$ [km/h]	$\alpha$ [°]	$I_s$ [Impulse/m]	$f_A$ [Hz]	<i>Genauigkeit</i>
B+S Software und Messtechnik GmbH	Radar-Geschwindigkeits-Sensor DRS-3	3 – 200	0	250	70	$\pm 1,2$ km/h
DATRON-Messtechnik GmbH	M3-Sensor	0,3 – 400	0	100 – 600		$\pm 0,5$ %
DICKEY-john Corp.	Radar II Ground Speed Sensor	0,4 – 70,8	35	132,5	36,8	$\pm 5$ % bei 0,4 – 3,2 km/h $\pm 3$ % bei 3,2 – 70,8 km/h
RAVEN Industries	RAVEN RADAR	0,3 – 70	0	130	36,1	-
RDS Technology Ltd.	True Ground Speed Sensor 012	0,3 – 80	37	128,5	35,7	$\pm 1$ %
Vansco Electronics Ltd.	True Ground Speed Sensor Model 338000	0,3 – 70	35	131,7	36,6	$\pm 3$ % bei 0,3 – 3 km/h $\pm 1$ % bei 3 – 70 km/h
VDO Control Systems Inc. (Philips)	RGSS-201	0,8 – 40,2	45	128,5	35,7	-

Radarsensoren die mit einem Abstrahlwinkel  $\alpha = 0^\circ$  montiert werden, sind in Zweistrahlsystemen ausgeführt, d. h. in den Sensor ist bereits eine Janus-Anordnung integriert. Dieser Aufbau gestattet bereits die hardwareseitige Kompensation von Messfehlern aus Fahrzeugschwingungen, wie z. B. Nicken.

## 3.2 Einflussfaktoren der Messgenauigkeit

Der Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung mit Mikrowellen-Doppler-Sensoren sind, wie in jeder anderen Form der Messtechnik, Grenzen gesetzt. Verschiedene Fehlereinflüsse bestimmen diese Grenzen. Unter systematischen Fehlern werden Fehler verstanden, die durch die Messanordnung selbst, die verwendeten Komponenten und Auswerteverfahren im Sensor beeinflusst werden. Dazu zählen beispielsweise die begrenzte Beobachtungszeit für einen Punktstreuer, nichtideale Antennendiagramme, die Abhängigkeit des Bodenabstands vom Abstrahlwinkel und spiegelnde Reflexionen. Die Größe und das Vorzeichen dieser Fehler sind bei

Wiederholung der Messung stets gleich. Wegen des Einsatzes von handelsüblichen Sensoren kann auf einen Teil der Faktoren kein Einfluss genommen werden.

Die Hersteller von Radarsensoren tragen dieser Tatsache Rechnung, indem sie in den technischen Datenblättern der Sensoren jeweils einen größeren Messfehler für sehr geringe Geschwindigkeiten und einen Messfehler für den restlichen Geschwindigkeitsbereich angeben. Beispielsweise weist der Hersteller Vansco für sein Modell True Ground Speed Sensor 338000 im Geschwindigkeitsmessbereich von 0,3–3 km/h einen Messfehler von  $< \pm 3\%$  und für den Geschwindigkeitsmessbereich von 3–70 km/h einen Fehler von  $< \pm 1\%$  aus.

Zu den systematischen Fehlern zählt ebenfalls die montagebedingte Fehljustierung der Antenne. Dieser Effekt ist allerdings Gegenstand der Untersuchungen und wird deshalb nicht als Fehler angesehen.

In den folgenden Abschnitten werden die statistischen Fehler betrachtet und ihre Einflüsse auf die Messgenauigkeit bewertet.

### 3.2.1 Fahrzeugdynamik

Bei Landmaschinen, insbesondere bei Traktoren mit Heckanbau, treten verstärkt Drehschwingungen um die Fahrzeugquerachse (Nicken) auf (Abb. 3.3). Als Wanken werden Drehschwingungen um die Fahrzeuglängsachse bezeichnet [1]. Beide Schwingungsarten führen zu Neigungswinkelfehlern, die als Nick- oder Wankwinkelfehler bezeichnet werden. Nick- bzw. Wankbewegungen sind zeitlich begrenzte Abschnitte von Nick- bzw. Wankschwingungen.

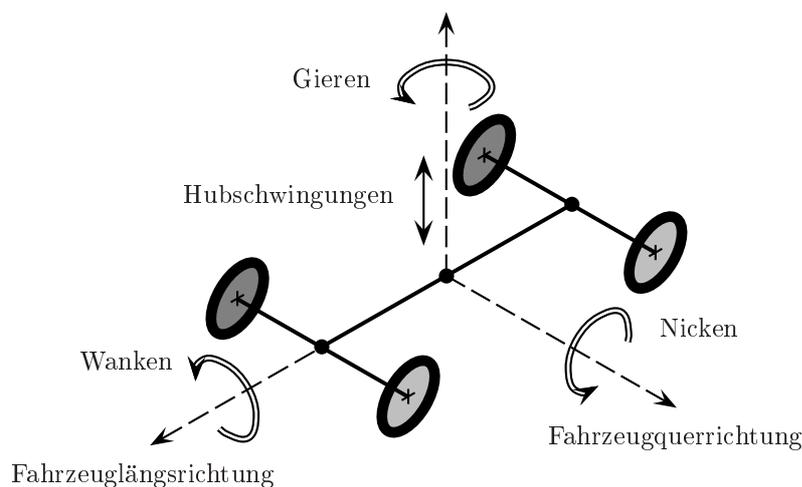


Abbildung 3.3: Schwingungen am Fahrzeug

Die Intensität der auftretenden Schwingungen ist abhängig von der Fahrzeugfederung, -dämpfung, den Reifen und der Masse des Fahrzeuges. Die feste Montage des Mikrowellensensors am Fahrzeug führt bei den genannten Schwingungen

mit radialen Abstandsänderungen von Sensor und Fahrbahn zu einer Erzeugung des Dopplersignals. Die Variation des Abstrahlwinkels verursacht dabei den wesentlichen Fehler [11]. Bei Verwendung der Janus-Anordnung, d. h. Einsatz eines weiteren Mikrowellensensors, dessen Keule in die entgegengesetzte Fahrtrichtung gerichtet ist, werden zwei unabhängige, neigungswinkelabhängige Dopplerfrequenzen gemessen. Bei symmetrischer Anordnung beider Sensoren kann durch arithmetische Mittelwertbildung der Dopplerfrequenzwerte der Neigungswinkelfehler auf weniger als 1 % reduziert werden [14, 26, 42].

Für weitere Betrachtungen am Fahrzeug sind die Schwingungen Wanken und Nicken besonders zu untersuchen, da sie für die Verschiebung des Montagepunktes der GPS-Antenne gegenüber dem Untergrund verantwortlich sind. Diese Verschiebung führt gleichzeitig zu einer fehlerbehafteten Positionsbestimmung, da sie als zufälliger Fehler bei der Ermittlung der momentanen Position eingeht. Zur Genauigkeitssteigerung ist es notwendig die Nick- und Wankschwingungen messtechnisch zu erfassen und bei der Positionsbestimmung mittels Satellitenortung zu berücksichtigen. Hubschwingungen, als geradlinige Schwingungen in Richtung der Hochachse, verursachen Fehler bei Geschwindigkeitsermittlung, haben aber keinen relevanten Einfluss auf die Position der GPS-Antenne.

### **3.2.2 Untergrundeigenschaften, aufgewirbelte Teilchen und Mehrwegeausbreitung**

Unterschiedliche Fahrbahnbeläge und Witterungseinflüsse weisen gegenüber dem Sensor stark unterschiedliche Rückstreuungseigenschaften auf. Die Bandbreite der in der Landwirtschaft anzutreffenden Messuntergründe reicht von reinem Acker, über Acker mit Bewuchs, Wiese, Feldwegen, bis zu asphaltierten und betonierten Straßen und anderen Flächen. Gegenüber den bisher untersuchten Messuntergründen wie Straße und Schiene ist der in der Landwirtschaft anzutreffende Messuntergrund viel komplexer. Straßen sind zum größten Teil sehr eben und weisen in Bezug auf die Materialeigenschaften eine gewisse Gleichförmigkeit auf. Auch bei Schienen kann von ständig gleichen Materialeigenschaften bzw. sich konstant wiederholenden Eigenschaften bei Schwellen und dem Schotterbett ausgegangen werden. Die Komplexität des in der Landwirtschaft vorherrschenden Messuntergrundes besteht nicht nur aus der Vielzahl der Materialarten des Messuntergrundes sondern auch durch seine zufällige Oberflächenstruktur. Unebenheiten im Boden, hervorgerufen durch Witterungseinflüsse, unterschiedliche Bodeneigenschaften oder Schädlinge, angelegte Fahrspuren, unterschiedliche Größe von Schollen beim Ackern, die verschiedensten Bewuchshöhen im Bestand oder Steine im Feld, gestatten keine detaillierte Betrachtung des Messuntergrundes. Durch hügeliges Gelände, eine sich verändernde Oberflächenstruktur oder Bodenzusammensetzung treten stets Messuntergründe mit variierenden Feuchtigkeiten auf. Es existieren zwar Ansätze zur Einordnung von Fahrbahnoberflächen bei Straßen [13, 17], diese sind aber zur Fehlerkorrektur im landwirtschaftlichen Anwendungsfall ungeeignet.

In [13] wurde eine aktive und passive Straßenzustandserkennung im mm-Wellenbereich untersucht, bei der Wasser oder Eis auf Asphalt und Stein detektiert werden soll. Diese Untersuchungen zeigten, dass Wasser auf Stein bzw. Asphalt deutlich gegenüber dem trockenen Fahrbahnbelag zu unterscheiden ist. Die gleiche Aussage lässt sich für Eis auf Asphalt treffen, hingegen ist Eis auf Stein nur sehr bedingt erkennbar.

Beeinträchtigungen der Signalauswertung besonders im unteren Geschwindigkeitsbereich durch Bodenwellen, große Steine und Aufbauschwingungen sind laut [23] mittels Hochpassfilter beherrschbar. Dieser Filter wird mit seiner Grenzfrequenz so nachgeführt, dass alle Frequenzen unterhalb des zu erwartenden Doppelspektrums abgeschnitten werden.

Sehr stark reflektierende, sehr stark rückstreuende oder glatte Untergründe führen zur Reduzierung der Genauigkeit des Messsystems. Dazu zählen glatte metallische Oberflächen, die den Radarstrahl nach den optischen Gesetzen reflektieren, d. h. es tritt keine diffuse Rückstreuung auf. Demzufolge wird nur ein sehr kleiner oder ein sehr großer Anteil des Sendesignals reflektiert, was die Auswertung beeinträchtigt. Entgegen den Erwartungen beeinträchtigt Flugschnee die Funktion des Sensors unmerklich [15].

Nach [42] ist zumindest für den Anwendungsfall Straße mit unterschiedlichen Fahrbahnbelägen, Witterungsverhältnissen, Fremdelementen im Straßenbett, wie Kanaldeckel und Straßenbahnschienen durch geeignete Auswahl und Dimensionierung der Antenne der Einfluss fahrbahnspezifischer Rückstreuereigenschaften vernachlässigbar. Diese Aussage bezieht sich auf das betrachtete Janussystem mit Hohlleiterschlitzzantenne bei einer Sendefrequenz von 35 GHz, einer Länge der strahlenden Apertur von 260 mm und einer Aperturzeit von 50 ms. Die Effekte aus den unterschiedlichen Rückstreuereigenschaften bewegen sich in einer Größenordnung unter dem erwarteten Gesamtfehler von 2,8 %.

Durch die Erfassung aller sich durch den Beobachtungsbereich des Sensors bewegender Teilchen kann die Messung verfälscht werden. Es werden auch solche Teilchen berücksichtigt, die eine völlig andere Geschwindigkeit und Richtung aufweisen als die des Fahrzeuges über Grund. Dabei kommen in erster Linie im Feldeinsatz aufgewirbelter Schmutz wie Erde, Kies oder Sand sowie Spritzwasser und Schnee in Betracht. Die erzeugten Signale der Teilchen weisen unterschiedliche Frequenzen auf und je nach Nähe der vorbeifliegenden Teilchen zur Antenne auch größere Amplituden als das eigentliche Messsignal, so dass starke Fehleinschätzungen der Geschwindigkeit die Folge sein können. Bei Verwendung einer Janus-Anordnung wird davon ausgegangen, dass die Teilchen sich nur durch die Keule eines Sensors bewegen. Eine intelligente Auswertung der Signale beider Sensoren kann zur Steigerung der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit benutzt werden. In jedem Fall ist der Montageort des Sensors oder der Sensoren so zu wählen, dass derartige Störeinflüsse minimiert werden. Eine Montage in unmittelbarer Nähe zum Rad kommt dabei nicht in Betracht [42].

Die Lösung dieses Problems ist eine entfernungsmaßige Kontrolle des Messbereichs. Jedoch verfügt derzeit kein herkömmlicher Doppler-Sensor über diese Möglichkeit, so dass z. B. unerwünschte Mehrwegausbreitungen durch Reflektionen rotierender Räder oder anderer Fahrzeuge in Kauf genommen werden müssen.

Ein Sensor, der die Signallaufzeit und die Dopplerverschiebung zur gleichzeitigen Entfernungs- und Geschwindigkeitsbestimmung auswertet, wird in [28] beschrieben. Dieses Sensorkonzept ist für den Einsatz in Fahrzeugen mit intelligentem Geschwindigkeitsregelsystem AICC optimiert und dient der Erfassung von Hindernissen auf der Fahrbahn und deren Relativgeschwindigkeit. Die Applikation dieses Systems in Sensoren zur Geschwindigkeitsermittlung über Grund ist wünschenswert und erlaubt die Detektion der Struktur des Messuntergrundes und die entfernungsmaßige Analyse rückstreuender Oberflächen. Damit ist die teilweise Eliminierung der in diesem Kapitel beschriebenen Fehlerquellen möglich.

### 3.2.3 Temperatur- und Rauscheinflüsse

Der Rauschpegel im Gesamtsystem wird vorwiegend durch die Beiträge von Oszillator, Mischer und analoger NF-Schaltungen bestimmt [42]. Temperaturbedingte Änderungen der Oszillatorfrequenz gehen nicht nur in die Wellenlänge linear ein, sondern führen bei Verwendung von Antennenarrays auch zur Veränderung des Abstrahlwinkels der Antenne. Variationen der Dielektrizitätszahl und der mechanischen Dimensionen des Antennenträgermaterials üben Einfluss auf den Abstrahlwinkel aus. Dopplerfrequenzfehler von bis zu 1 % sind je nach Typ und Eigenschaft der Antenne sowie der Signalquelle realistisch [11].

## 3.3 Berechnungsgrundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die zur Auswertung benötigten Formeln und Lösungsansätze hergeleitet und beschrieben. Es wird dabei nicht auf die in den Sensoren bei der Messung auftretenden physikalischen Vorgänge und Effekte eingegangen, da diese in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 sowie der Fachliteratur ausreichend beschrieben sind. In der weiteren Abhandlung wird der Radarsensor als Black-Box betrachtet, die je nach gefahrener Geschwindigkeit  $v$  und eingestelltem Abstrahlwinkel  $\alpha$  mit der sich daraus ergebenden Wegauflösung  $I_s$  bei einer Messzeit von  $t_0 = 1$  s eine Frequenz  $f$  liefert. Die Frequenz  $f$  ist proportional zu der im Sensor ausgewerteten Dopplerfrequenz  $f_D$ . Die Geschwindigkeit  $v$  ergibt sich theoretisch aus Gleichung 3.2. Mit dieser Betrachtungsweise wird der Aufgabenstellung Rechnung getragen, nur im Handel erhältliche Radarsensoren für den Einsatz in einem Koppelortungssystem zu untersuchen ohne auf den speziellen Sensoraufbau und die Signalauswertung eingehen zu müssen.

Die eingesetzten Sensoren sind nicht mit einer Fahrtrichtungserkennung ausgestattet. Demzufolge ist es nicht möglich, die aktuelle Fahrtrichtung aus den Messwerten der Sensoren zu bestimmen. Zu diesem Zweck kann auf Radsensoren oder die Getriebesteuerung zurückgegriffen werden.

Die im weiteren Verlauf vorgestellten Anordnungen der Radarsensoren ermitteln den Fahrweg bzw. die Fahrgeschwindigkeit sowie auftretende Nick- und Wank-schwingungen des Fahrzeuges.

Zunächst bedarf es einiger Definitionen, die für Prüfstandsversuche und Feldversuche gleichermaßen gelten.

### 3.3.1 Definitionen

Dem Gesamtsystem wird das in Abbildung 3.4 dargestellte, dreidimensionale Koordinatensystem zugrundegelegt. Die x-Achse zeigt in Fahrzeuglängsrichtung, die y-Achse in Fahrzeugquerrichtung. Der Hochrichtung wird die z-Achse zugewiesen.

Die tatsächlichen Geschwindigkeiten werden in Fahrzeuglängsrichtung mit  $v_x$  und in Fahrzeugquerrichtung mit  $v_y$  bezeichnet.

Zur eindeutigen Unterscheidung werden die einzelnen Sensoren entsprechend ihrer Strahlrichtung gekennzeichnet. Ausgehend von der Fahrtrichtung strahlt Sensor  $V$  nach vorn in x-Richtung, Sensor  $H$  nach hinten, Sensor  $L$  nach links in y-Richtung und Sensor  $R$  nach rechts.

Sind die Sensoren nicht in Fahrzeuglängs- oder Fahrzeugquerrichtung angeordnet, sondern mit einem Winkel von  $45^\circ$  um die z-Achse gedreht, wird ein weiteres Koordinatensystem eingeführt. Dessen  $z'$ -Achse ist mit der z-Achse des ursprünglichen Koordinatensystems identisch. Die  $x'$ -Achse ergibt sich durch Drehung der x-Achse um  $45^\circ$  um die z-Achse in mathematisch positiver Richtung.

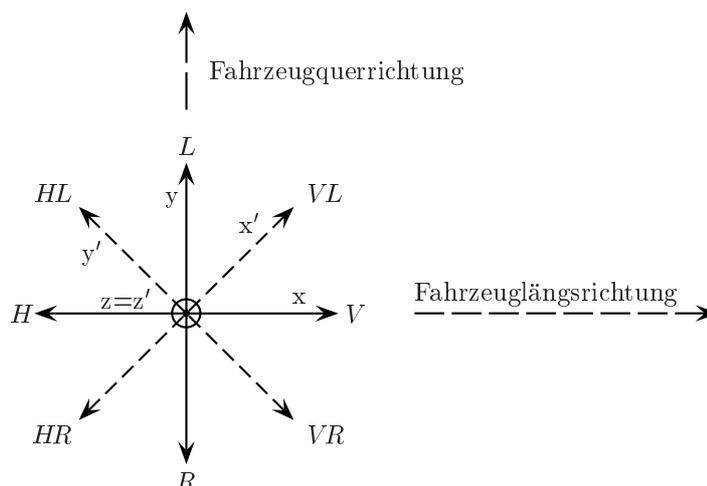


Abbildung 3.4: Lage der Koordinatensysteme zu den Fahrzeugachsen

Wird das System in Fahrtrichtung betrachtet, ist Sensor  $VL$  in  $x'$ -Richtung und Sensor  $HR$  entgegengesetzt dazu montiert. Sensor  $HL$  strahlt in  $y'$ -Richtung nach

hinten links, Sensor  $VR$  in entgegengesetzter Richtung.

Die Einführung des  $x'y'z'$ -Koordinatensystems wirkt sich vereinfachend bei der Bestimmung auftretender Neigungswinkel an den Sensorpaaren  $VL$ - $HR$  bzw.  $VR$ - $HL$  und der darauf basierenden Bestimmung des Nick- bzw. Wankwinkels im  $xyz$ -Koordinatensystem aus.

Tabelle 3.2 fasst die auftretenden Strahlrichtungen der Sensoren und ihre Einordnung in das jeweilige Koordinatensystem zusammen. Die Sensorbezeichnungen werden in Form von Indizes zur eindeutigen Zuordnung der gemessenen Frequenzen und der daraus berechneten Geschwindigkeiten entsprechend Tabelle 3.3 übernommen.

Tabelle 3.2: Zuordnung der Sensorbezeichnung zur Koordinatenachse

<i>Sensorbezeichnung</i>	<i>Sensorbeschreibung</i>	<i>Koordinatenachse</i>
Sensor $V$	Sensor vorn	$x$
Sensor $R$	Sensor rechts	$-y$
Sensor $H$	Sensor hinten	$-x$
Sensor $L$	Sensor links	$y$
Sensor $VL$	Sensor vorn links	$x'$
Sensor $VR$	Sensor vorn rechts	$-y'$
Sensor $HR$	Sensor hinten rechts	$-x'$
Sensor $HL$	Sensor hinten links	$y'$

Tabelle 3.3: Zuordnung der Sensorbezeichnung zum Messwert

<i>Sensorbezeichnung</i>	<i>Frequenz [Hz]</i>	<i>Geschwindigkeit [km/h]</i>
Sensor $V$	$f_v$	$v_v$
Sensor $R$	$f_r$	$v_r$
Sensor $H$	$f_h$	$v_h$
Sensor $L$	$f_l$	$v_l$
Sensor $VL$	$f_{vl}$	$v_{vl}$
Sensor $VR$	$f_{vr}$	$v_{vr}$
Sensor $HR$	$f_{hr}$	$v_{hr}$
Sensor $HL$	$f_{hl}$	$v_{hl}$

Mit Gleichung 3.2 wird die Geschwindigkeit aus der gemessenen Frequenz des Sensors bestimmt. Dazu bedarf es nach Art der Sensoranordnung unterschiedlicher Ansätze, die in den Kapiteln 3.3.2 bis 3.3.5 vorgestellt werden.

### 3.3.2 90°-Sensoranordnung

Sensor  $V$  in  $x$ -Richtung und Sensor  $H$  entgegengesetzt dazu montiert, bilden das erste Janus-Paar. Orthogonal dazu ist ein weiteres Paar in Janus-Anordnung, bestehend aus Sensor  $L$  in  $y$ -Richtung und Sensor  $R$  in entgegengesetzter Richtung, angebracht (Abb. 3.5). Die gezeigte Anordnung erlaubt die direkte Ermittlung

der Geschwindigkeiten  $v_v$ ,  $v_r$ ,  $v_h$  und  $v_l$  aus  $f_v$ ,  $f_r$ ,  $f_h$  und  $f_l$ .

Zur Kompensation der aus Nicken und Wanken resultierenden Neigungswinkelfehler wird eine Mittelwertbildung der Messwerte des jeweiligen Janus-Paares durchgeführt. Damit lässt sich eine näherungsweise von Nickwinkel Fehlern bereinigte Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung

$$v_x = \frac{v_v + v_h}{2} \quad (3.3)$$

bestimmen. Mit der Gleichung

$$v_y = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (3.4)$$

wird die näherungsweise von Wankwinkel Fehlern bereinigte Geschwindigkeit in Fahrzeugquerichtung ermittelt.

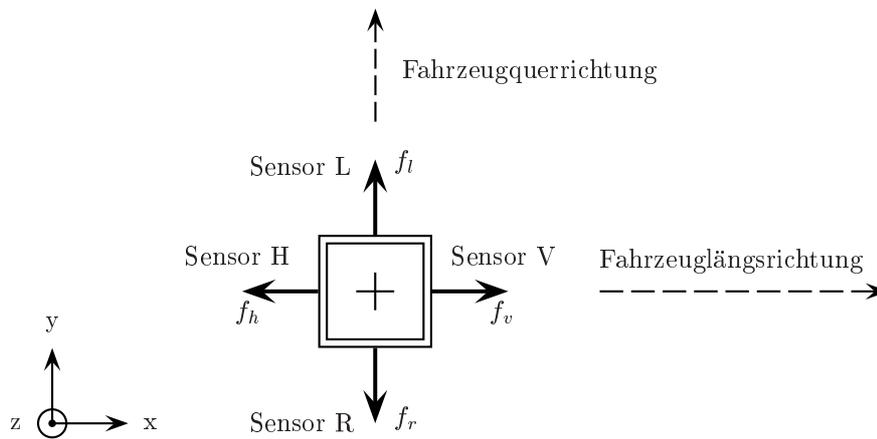


Abbildung 3.5: Lage der 90°-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen

Zur Erfassung der Fahrzeuglage gegenüber dem Messuntergrund ist es notwendig die Neigungswinkel numerisch zu bestimmen. Dazu wird auf die Abstrahlwinkel  $\alpha$  der Radarsensoren sowie deren gemessene Frequenzen  $f$  zurückgegriffen. Der Nickwinkel  $\beta$  wird, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, im mathematisch positiven Sinn definiert, d. h. er wird positiv gezählt, wenn die Front des Fahrzeuges räumlich höher liegt als dessen Heck.

Unter Berücksichtigung der Gleichung 3.1 und der Tatsache, dass die im Sensor ermittelte Dopplerfrequenz und das am Sensorausgang bei Frequenzmessung (Messzeit  $t_0 = 1$  s) abgegriffene Signal gleichermaßen von der Geschwindigkeit und dem Abstrahlwinkel abhängen, gilt der Ansatz

$$\frac{f_v}{f_h} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (3.5)$$

zur Berechnung des Nickwinkels  $\beta$ .

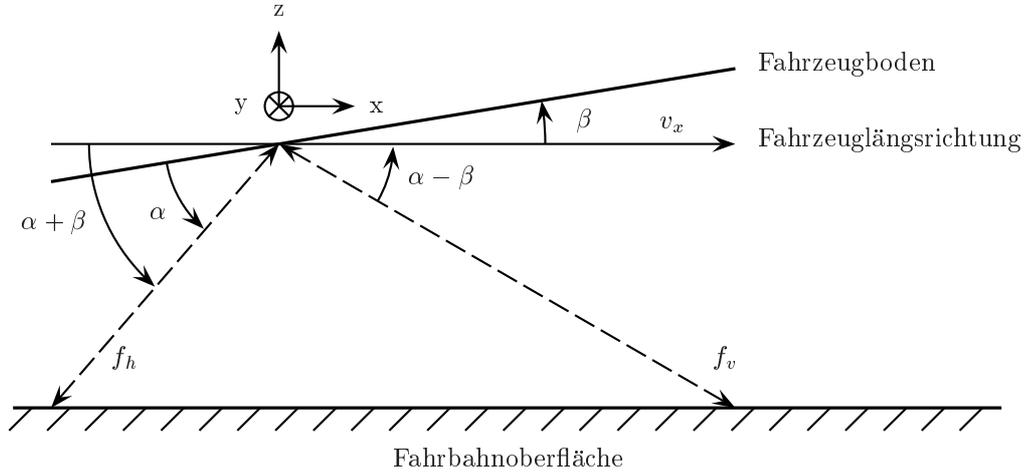


Abbildung 3.6: Nickwinkel am Fahrzeug

Mit den Umformschritten

$$(\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) f_v = (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) f_h \quad (3.6)$$

$$f_v \cos \alpha \cos \beta - f_v \sin \alpha \sin \beta = f_h \cos \alpha \cos \beta + f_h \sin \alpha \sin \beta \quad (3.7)$$

$$f_v \cos \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta} - f_v \sin \alpha = f_h \cos \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta} + f_h \sin \alpha \quad (3.8)$$

$$f_v \cos \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta} - f_h \cos \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = f_v \sin \alpha + f_h \sin \alpha \quad (3.9)$$

$$(f_v - f_h) \cos \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = (f_v + f_h) \sin \alpha \quad (3.10)$$

$$\frac{\cos \beta}{\sin \beta} = \frac{(f_v + f_h) \sin \alpha}{(f_v - f_h) \cos \alpha} \quad (3.11)$$

$$\tan \beta = \frac{1}{\tan \alpha} \frac{f_v - f_h}{f_v + f_h} \quad (3.12)$$

ergibt sich der Nickwinkel

$$\beta = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_v - f_h)}{(f_v + f_h)} \right]. \quad (3.13)$$

Der Wankwinkel  $\gamma$  des Fahrzeuges wird aus trigonometrischen Beziehungen zwischen dem Sensor  $R$  und dem Sensor  $L$  hergeleitet. Bei Blick auf das Heck des Fahrzeuges (Abb. 3.7) wird der Wankwinkel positiv gezählt, wenn sich das Fahrzeug im mathematisch positiven Sinn bewegt, d. h. die rechte Fahrzeugseite räumlich höher über der Fahrbahnoberfläche liegt, als die linke Seite.

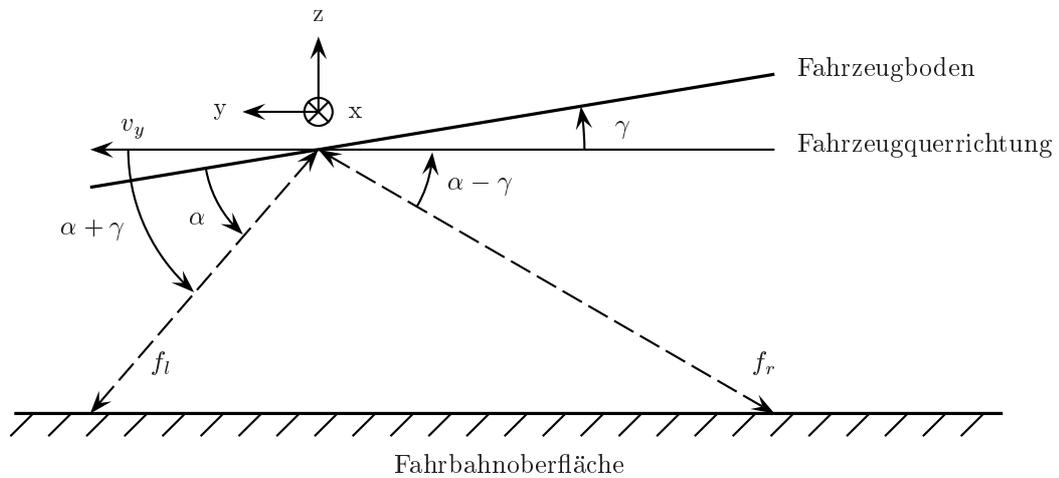


Abbildung 3.7: Wankwinkel am Fahrzeug

Zur Bestimmung von  $\gamma$  gilt der Ansatz:

$$\frac{f_r}{f_l} = \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (3.14)$$

Nach Umformungen gemäß den Gleichungen 3.6 bis 3.12 lautet der Ausdruck

$$\gamma = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_r - f_l)}{(f_r + f_l)} \right]. \quad (3.15)$$

### 3.3.3 45°-Sensoranordnung

Dieser Sensoranordnung liegt das  $x'y'z'$ -Koordinatensystem zugrunde. Die Lage der Sensoren in Bezug zu beiden Koordinatensystemen stellt Abbildung 3.8 dar. Aus der Darstellung ist erkennbar, dass die Geschwindigkeiten in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung nicht direkt gemessen werden. Unter Ausnutzung der mathematischen Zusammenhänge zwischen den Sensoren lassen sich die Geschwindigkeiten  $v_x$  und  $v_y$  aus den gemessenen Größen bestimmen.

Bei einer Kurvenfahrt messen die Sensoren *VL* und *VR* bzw. *HL* und *HR* unterschiedliche Geschwindigkeiten. Dabei ist der Geschwindigkeitsvektor für die momentane Fahrtrichtung nicht identisch mit der Fahrzeuglängsrichtung, sondern um den Winkel  $\delta$  um den Mittelpunkt der Sensoranordnung gedreht. Unter der Annahme, dass keine Neigungswinkelfehler durch Nick- und/oder Wankswingungen auftreten, sind  $v_{vl} = v_{hr}$  und  $v_{vr} = v_{hl}$ . Der Betrag des Geschwindigkeitsvektors wird mit der Gleichung

$$v = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \quad (3.16)$$

bestimmt. Der Winkel  $\delta$  im mathematisch positiven Drehsinn ergibt sich aus:

$$\delta = 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \quad (3.17)$$

Bei Geradeausfahrt ist  $\delta = 0$ , d.h. der Geschwindigkeitsvektor zeigt in Fahrzeuglängsrichtung.

Die Geschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung  $v_x$  und die Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung  $v_y$  lassen sich aus

$$v_x = v \cos \delta = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \cos \left[ 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \right] \quad (3.18)$$

$$v_y = v \sin \delta = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \sin \left[ 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \right] \quad (3.19)$$

ermitteln.

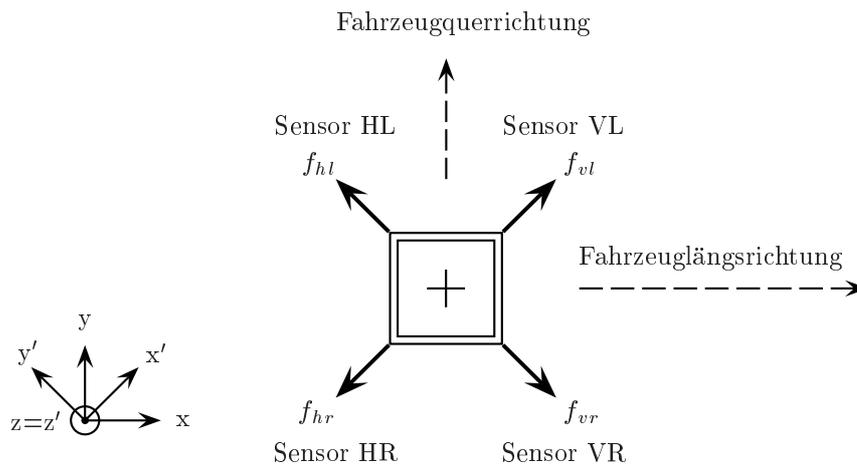


Abbildung 3.8: Lage der 45°-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen

Zur Bestimmung des Betrages des Geschwindigkeitsvektors bei näherungsweise

Eliminierung von Neigungswinkelfehlern sollte folgender Ansatz gewählt werden:

$$v = \frac{1}{2} \left( \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} + \sqrt{v_{hr}^2 + v_{hl}^2} \right) \quad (3.20)$$

Das Ergebnis lässt sich in die Gleichungen 3.18 und 3.19 einsetzen. Dieser Ansatz ist zulässig, da wegen der Steifheit der Sensoranordnung und des Fahrzeugbodens die Winkel  $\delta$  am vorderen und hinteren Sensorpaar identisch sind.

Wie bei der 90°-Sensoranordnung treten auch bei dieser Sensoranordnung Messfehler durch Fahrzeugneigungen auf. Ähnlich der Bestimmung der Geschwindigkeiten in Fahrzeuginnen- und Fahrzeugaußenrichtung werden Nick- und Wankwinkel nach folgender Vorgehensweise aus den Messwerten hergeleitet. Zunächst wird der Neigungswinkel  $\rho$  des ersten Janus-Paares in  $x'$ -Richtung, bestehend aus Sensor  $VL$  und Sensor  $HR$ , ermittelt. Sensor  $VR$  und Sensor  $HL$  bilden das zweite Janus-Paar in  $y'$ -Richtung, mit dem Neigungswinkel  $\phi$ .

Der Winkel  $\rho$  wird dann positiv gezählt, wenn Sensor  $HR$  räumlich höher über Fahrbahnoberfläche liegt als Sensor  $VL$  (Abb. 3.9).

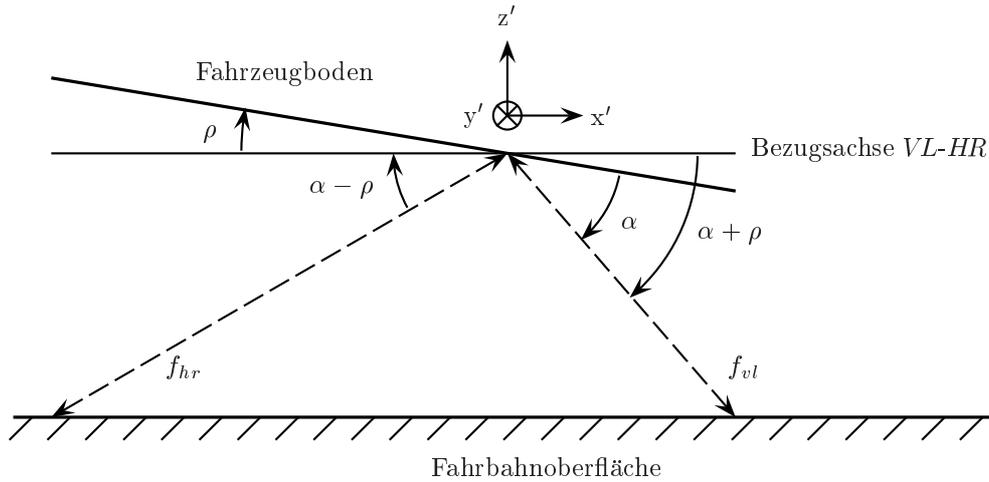


Abbildung 3.9: Neigungswinkel am Fahrzeug in Bezug auf Sensorachse  $VL$ - $HR$

Daraus wird der Ansatz

$$\frac{f_{hr}}{f_{vl}} = \frac{\cos(\alpha - \rho)}{\cos(\alpha + \rho)} \quad (3.21)$$

abgeleitet. Der Neigungswinkel an den Sensoren  $VL$  bzw.  $HR$  ergibt sich unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.6 bis 3.12 aus

$$\rho = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{hr} - f_{vl})}{(f_{hr} + f_{vl})} \right]. \quad (3.22)$$

Zur Bestimmung des Neigungswinkels  $\phi$  wird festgelegt, dass  $\phi$  positiv gezählt

wird, wenn Sensor  $VR$ , wie in Abbildung 3.10 gezeigt, räumlich höher über der Fahrbahnoberfläche liegt als Sensor  $HL$ . Für dieses Janus-Paar gilt die Beziehung

$$\frac{f_{vr}}{f_{hl}} = \frac{\cos(\alpha - \phi)}{\cos(\alpha + \phi)}. \quad (3.23)$$

Nach den Umformungen gemäß den Gleichungen 3.6 bis 3.12 lautet die Lösung für den Neigungswinkel in der Achse  $VR-HL$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{vr} - f_{hl})}{(f_{vr} + f_{hl})} \right]. \quad (3.24)$$

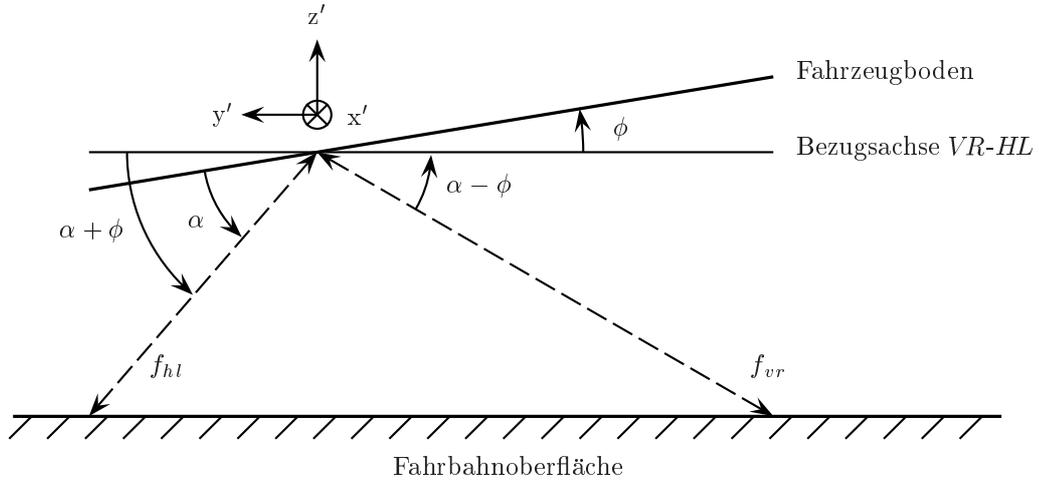


Abbildung 3.10: Neigungswinkel am Fahrzeug in Bezug auf Sensorachse  $VR-HL$

Der Nickwinkel  $\beta$  und der Wankwinkel  $\gamma$  ergeben sich aus:

$$\beta = \frac{\phi - \rho}{\sqrt{2}} \quad (3.25)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \arctan \left( \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{vr} - f_{hl})}{(f_{vr} + f_{hl})} \right) - \arctan \left( \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{hr} - f_{vl})}{(f_{hr} + f_{vl})} \right) \right] \quad (3.26)$$

$$\gamma = \frac{\phi + \rho}{\sqrt{2}} \quad (3.27)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \arctan \left( \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{vr} - f_{hl})}{(f_{vr} + f_{hl})} \right) + \arctan \left( \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{hr} - f_{vl})}{(f_{hr} + f_{vl})} \right) \right] \quad (3.28)$$

Mit den Gleichungen 3.26 und 3.28 lassen sich Nickwinkel und Wankwinkel des Fahrzeuges direkt aus den gemessenen Frequenzen der Sensoren bestimmen. Es ist keine Transformation der Frequenzen in x- bzw. y-Richtung notwendig.

### 3.3.4 Y-Sensoranordnung

Die Y-Anordnung ist aus drei Sensoren aufgebaut, wobei die Konfiguration von Sensor  $VL$  und  $VR$  der  $45^\circ$ -Anordnung und Sensor  $H$  der  $90^\circ$ -Sensoranordnung entstammen (Abb. 3.11). Direkt gemessen werden in der Y-Anordnung die Frequenzen  $f_{vl}$ ,  $f_{vr}$  sowie  $f_h$  und damit die Geschwindigkeiten  $v_{vl}$ ,  $v_{vr}$  und  $v_h$ .

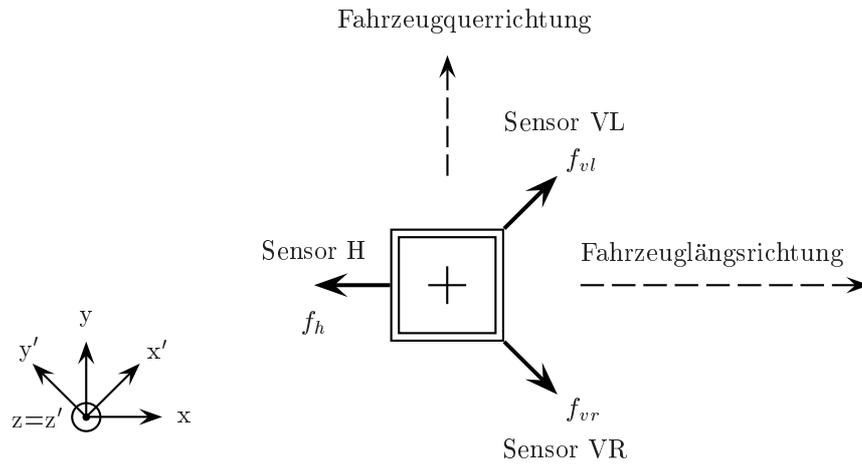


Abbildung 3.11: Lage der Y-Sensoranordnung zu den Fahrzeugachsen

Unter der Annahme, dass weder Nick- noch Wankswingungen auftreten, wird der Betrag des Geschwindigkeitsvektors mit der Gleichung

$$v = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \quad (3.29)$$

bestimmt. Der Winkel  $\delta$  zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und der Fahrzeuglängsrichtung im mathematisch positiven Drehsinn ergibt sich aus:

$$\delta = 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \quad (3.30)$$

Damit lautet die Gleichung zur Bestimmung der Geschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung:

$$v_x = v \cos \delta = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \cos \left[ 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \right] \quad (3.31)$$

Zur Berechnung der Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung gilt folgender Ansatz:

$$v_y = v \sin \delta = \sqrt{v_{vr}^2 + v_{vl}^2} \sin \left[ 45^\circ - \arctan\left(\frac{v_{vr}}{v_{vl}}\right) \right] \quad (3.32)$$

Näherungsweise lässt sich die von Nickwinkelfehlern bereinigte Geschwindigkeit

in Fahrzeuglängsrichtung mit

$$v_x = \frac{1}{2} (v \cos \delta + v_h) \quad (3.33)$$

ermitteln.

Der Nickwinkel  $\beta$  wird für Geradeausfahrten unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.3.2 aufgestellten Definitionen aus

$$\frac{\frac{f_{vr} + f_{vl}}{\sqrt{2}}}{f_h} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (3.34)$$

bestimmt. Die Frequenz  $f_v$  berechnet sich aus Beziehungen zwischen  $f_{vl}$  und  $f_{vr}$ . Bei Verwendung der Umformungen gemäß den Gleichungen 3.6 bis 3.12 ergibt sich  $\beta$  direkt aus den gemessenen Frequenzen der drei Sensoren:

$$\beta = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{\left( \frac{f_{vr} + f_{vl}}{\sqrt{2}} - f_h \right)}{\left( \frac{f_{vr} + f_{vl}}{\sqrt{2}} + f_h \right)} \right] \quad (3.35)$$

Der Wankwinkel  $\gamma$  des Fahrzeuges wird über trigonometrische Beziehungen zwischen dem Sensor  $VL$  und dem Sensor  $VR$  hergeleitet. Es gelten die in Kapitel 3.3.2 getroffenen Festlegungen für  $\gamma$ . Ein Nickwinkel  $\beta \neq 0$  hat keinen Einfluss auf das Verhältnis zwischen Sensor  $VL$  und Sensor  $VR$ , da dieser die Messwerte beider Sensoren um den gleichen Betrag verändert. Daraus ableitend lässt sich der Wankwinkel  $\gamma$  für Geradeausfahrten aus folgender Beziehung bestimmen:

$$\gamma = \arctan \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \frac{(f_{vr} - f_{vl})}{(f_{vr} + f_{vl})} \right] \quad (3.36)$$

Es muss jedoch hinzugefügt werden, dass im Hinblick auf die Eindeutigkeit der Messergebnisse nicht definitiv ermittelt werden kann, ob der quantitative Unterschied der Messwerte von Sensor  $VL$  und Sensor  $VR$  aus einer Wankschwingung herrührt oder etwa durch eine Kurvenfahrt herbeigeführt wurde. Diesem Problem ist noch genauer nachzugehen. In einer  $45^\circ$ -Sensoranordnung löst ein Vergleich zwischen Sensor  $VL$  und  $HR$  bzw.  $VR$  und  $HL$  diese Fragestellung. Treten keine Unterschiede innerhalb der Janus-Paare auf, ist die Differenz zwischen den Messwerten von Sensor  $VL$  und  $VR$  auf eine Kurvenfahrt zurückzuführen. Bestehen jedoch Unterschiede innerhalb der Janus-Paare, so kann der betragsmäßige Unterschied zwischen Sensor  $VR$  und Sensor  $VL$  den Schluss zulassen, dass entweder eine Wankschwingung aufgetreten ist oder eine Wankschwingung und eine Kurvenfahrt ausgeführt worden ist.

### 3.3.5 Kalibrierung

Für die Kompensation von montagebedingten Schwankungen des Abstrahlwinkels  $\alpha$ , der Anbauposition bzw. der Anbaurichtung wird der Kalibrierfaktor  $I_K$

eingeführt. Eine Änderung der genannten Größen führt zum Unter- bzw. Überschreiten der vom Hersteller angegebenen Wegauflösung von beispielsweise  $I_s = 130$  Impulse/m. Eine Berechnung der Geschwindigkeit  $v$  auf Basis der falschen Wegauflösung  $I_s$  führt zu einem fehlerbehafteten Ergebnis.

Für die Bestimmung der wahren Wegauflösung  $I_W$  wird für den aktuellen Versuchsaufbau eine definierte Strecke  $s$  im Prüfstand in x-Richtung zurückgelegt und die Anzahl der ausgegebenen Impulse  $I_Z$  des Sensors durch Zählung erfasst. Dieser Vorgang wird mit  $n = 20$  Wiederholungen ausgeführt.  $I_W$  errechnet sich aus:

$$I_W = \frac{\sum_{i=1}^n I_Z}{n s} \quad (3.37)$$

Aus der Beziehung

$$I_K = \frac{I_s}{I_W} \quad (3.38)$$

wird der Kalibrierfaktor bestimmt. Üblicherweise ist die Bestimmung von  $I_W$  für die Berechnung der Geschwindigkeit  $v$  aus der Frequenz  $f$  ausreichend:

$$v = \frac{f}{I_W} \quad (3.39)$$

Werden jedoch Vergleiche zwischen  $f$  und  $v$  bei verschiedenen Sensoren und Anordnungen angestellt, so ist es notwendig, eine feste Wegauflösung  $I_s$  einer Geschwindigkeit  $v$  zuzuordnen. Dazu wurde das von den Herstellern bevorzugte Verhältnis von

$I = 130$  Impulse/m entsprechen  $v = 1$  m/s übernommen.

Ist der zu betrachtende Sensor in einer  $45^\circ$ -Anordnung oder Y-Anordnung gedreht montiert, gelten für die Bestimmung des Kalibrierfaktor  $I_{K45^\circ}$  die Beziehungen:

$$I_{W45^\circ} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{Z45^\circ}}{n s} \quad (3.40)$$

$$I_{K45^\circ} = \frac{I_s}{I_{W45^\circ}} \quad (3.41)$$

Unter Berücksichtigung der trigonometrischen Verhältnisse zwischen einem Sensor in Fahrtrichtung (z. B. Sensor  $V$  bei  $90^\circ$ -Sensoranordnung) und einem Sensor in Fahrtrichtung um  $45^\circ$  gedreht (z. B. Sensor  $VR$  bei  $45^\circ$ -Sensoranordnung) gilt

die Gleichung:

$$I_{W45^\circ} = I_W \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (3.42)$$

Diese Gleichung wird durch die in Tabelle 3.4 aufgelisteten Versuchsergebnisse bestätigt. Die Versuche fanden bei identischen Geschwindigkeiten im Prüfstand statt. Die zurückgelegte Wegstrecke wurde für jede Testreihe variiert. Dargestellt sind zwei zufällig ausgewählte Versuchsreihen mit je  $n = 5$  Wiederholungen.

Wird  $I_W = 128,6$  Impulse/m in die Gleichung 3.42 eingesetzt, so ergibt sich für  $I_{W45^\circ} = 90,9$  Impulse/m. Der berechnete Wert stimmt trotz Streuung der Einzelmesswerte mit dem daraus ermittelten  $I_{W45^\circ}$  überein.

Tabelle 3.4: Kalibrierbeispiel

$n$	$I_Z$ [Impulse]	$I_{Z45^\circ}$ [Impulse]
1	2011	1463
2	2015	1465
3	1995	1472
4	2020	1459
5	2006	1468
$\Sigma$	10332	7327
	$s$ [m]	$s$ [m]
	15,60	16,12
	$I_W$ [Impulse/m]	$I_{W45^\circ}$ [Impulse/m]
	128,6	90,9

Um eine einheitliche Basis für alle zu untersuchenden Sensoren zu erhalten, wurde festgelegt, dass eine gemessene Frequenz von  $f = 130$  Hz einer gefahrenen Geschwindigkeit von  $v = 1$  m/s ( $= 3,6$  km/h) entspricht. Nach Herstellerangaben ist beim verwendeten Sensormodell Vansco True Ground Speed Sensor Model 338000 unter einem Abstrahlwinkel von  $\alpha = 35^\circ$  eine gemessene Frequenz  $f = 131,7$  Hz einer Geschwindigkeit von  $v = 1$  m/s zugeordnet. Minimale Abweichungen von den einzustellenden geometrischen Parametern bei der Montage müssen, wie bereits erwähnt, durch Kalibrierfaktoren eliminiert werden. In diesem Vorgang fand gleichzeitig die Normierung von  $f = 131,7$  Hz auf  $f = 130$  Hz für  $v = 1$  m/s statt. Diese Vorgehensweise gestattet die Einbeziehung weiterer Sensoren, welche verschiedene Ausgangsfrequenzen je gefahrener Geschwindigkeit  $v = 1$  m/s liefern.

### 3.4 Referenzsystem Geodimeter System 4000

Beim Geodimeter®<sup>1</sup> System 4000 handelt es sich um ein Tachymeter-Messsystem in Form eines Ein-Mann-Messsystems. Hauptbestandteil dieses Systems ist ein

<sup>1</sup>Geodimeter® ist ein eingetragenes Warenzeichen von Trimble Navigation Limited (Trimble AB, vorher Spectra Precision AB bzw. Geotronics AB).

elektronischer Theodolit mit integriertem elektrooptischen Distanzmesser, der über eine Onlineverbindung mit einem Controller (z. B. PC) kommuniziert. Elektronische Theodoliten sind je nach Automatisierungsgrad mit motorischen Achsantrieben zur Drehpositionierung und mit CCD-Arrays in den Fernrohren zur Zielerfassung ausgestattet. Sie messen Horizontal- und Vertikalwinkel zum Objekt. Ein reines Theodolit-Messsystem besteht aus mindestens zwei elektronischen Theodoliten, aus deren Messdaten auf einem PC oder Controller mittels Triangulation im räumlichen Vorwärtsschnitt die dreidimensionalen Koordinaten im Theodolit-Koordinatensystem berechnet werden. Im Gegensatz dazu wird bei einem Tachymeter-Messsystem nur ein Tachymeter benötigt, da dieser zusätzlich zu einem elektronischen Theodoliten einen elektronischen Distanzmesser enthält. Das Tachymeter-Messsystem ermittelt die räumlichen Objektkoordinaten mittels Triangulation nach dem Polarverfahren. Zur Bestimmung des Objektpunktes werden vom bekannten Tachymeterstandpunkt neben der Horizontalrichtung (Horizontalwinkel) und dem Vertikalwinkel wie beim Theodolit auch die Schrägdistanz (Raumstrecke) zum Objekt bestimmt. Ein Computer berechnet bei der Online-Zuführung der Daten dreidimensionale Koordinaten im Tachymeter-Koordinatensystem [30].

Das Messobjekt ist beim Geodimeter System 400 ein aktives Prisma, welches ein mit 2 kHz modulierte Lichtsignal als Kennungssignal im infraroten Bereich sendet. Dieses Kennungssignal ermöglicht dem Tachymeter das Auffinden des Prismas und beugt Verwechslungen gegenüber anderen Prismen oder stark reflektierenden Objekten vor. Der vorhandene Trackingmodus erlaubt dem Tachymeter eine automatische Zielverfolgung des Prismas zu tätigen. Diese Eigenschaft des Geodimeter System 4000 wurde bei den Untersuchungen im Prüfstand und bei den Feldversuchen benutzt, um den Fahrverlauf mit hoher Genauigkeit zu verfolgen und aufzuzeichnen. Die Genauigkeiten des Systems liegen im Fast-Tracking-Modus für die Entfernungsmessung bei  $\pm (10 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$  und für die Winkelmessung bei 0,6 mgon.

Das Referenzsystem misst direkt die in Tabelle 3.5 dargestellten Größen mit dem Label  $H_z$ ,  $V$  und  $SD$ . Bei der Instrumentenhöhe  $IH$  handelt es sich um eine manuell ermittelte und im Referenzsystem gespeicherte Messgröße [54].

Tabelle 3.5: Mess- und Ausgabegrößen des Referenzsystems

<i>Größe</i>	<i>Label</i>	<i>Nr.</i>	<i>Einheit</i>
Instrumentenhöhe	$IH$	3	m
Horizontalrichtung	$H_z$	7	gon
Vertikalwinkel	$V$	8	gon
Schrägdistanz	$SD$	9	m
Horizontale Entfernung	$HD$	11	m
X-Koordinate	$X$	37	m
Y-Koordinate	$Y$	38	m
Z-Koordinate	$Z$	39	m

Aus den gemessenen Größen bestimmt das Referenzsystem die Koordinaten  $X$ ,  $Y$ , und  $Z$  für ein lokales Koordinatensystem sowie weitere Größen (z. B.  $HD$ ).

Die Auswertung zeigte Unstimmigkeiten zwischen den vom Geodimeter gemessenen Werten und den daraus berechneten Koordinaten. Daraufhin wurden die Koordinaten nach den folgenden Gleichungen manuell aus den Messwerten bestimmt.

$$x_{Geo} = SD \sin\left(V \frac{\pi}{200^\circ}\right) \cos\left(Hz \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.43)$$

$$y_{Geo} = SD \sin\left(V \frac{\pi}{200^\circ}\right) \sin\left(Hz \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.44)$$

$$z_{Geo} = SD \cos\left(V \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.45)$$

Da die Messwerte  $Hz$  und  $V$  in der Winkelmessseinheit Neugrad vorliegen, werden beide Werte mit dem Multiplikator  $(\pi/200)$  in das Bogenmaß umgerechnet.

Die Berechnung der Koordinaten im Postprozessing bestätigte den Verdacht, dass der implementierte Algorithmus fehlerbehaftete Koordinaten liefert. Ursache dafür ist die zeitlich versetzte Messung der eigenständigen Subsysteme für Winkel- und Distanzmessung im Geodimeter. Dadurch entstehen Schwierigkeiten bei der Synchronisation und Verrechnung der Messwerte beider Subsysteme. Es existiert eine sogenannte Delayzeit zwischen der Winkel- und Streckenmessung. Zum gleichen Ergebnis kamen die Autoren in [34]. Sie untersuchten zwei zielverfolgende Tachymeter und ermittelten deren Delayzeiten zwischen Winkel- und Distanzmessung. Der dabei vorgestellte mathematische Lösungsansatz ist ebenfalls auf das Geodimeter System 4000 anwendbar. Zur Bestimmung der Delayzeit wurde das Geodimeter System 4000 unter identischen Bedingungen am gleichen Standort wie die beiden zielverfolgenden Tachymeter untersucht. Im Tracking-Modus bei eingeschaltetem Kompensator ergab sich ein Zeitdelay von  $\delta t = -0,232$  s. Aus dem negativen Vorzeichen lässt sich schlussfolgern, dass beim Geodimeter System 4000 die Winkelmessung vor der Streckenmessung erfolgt.

Zusätzliche Auswertungen dieser Vergleichsuntersuchungen deckten einen weiteren Fehler im Berechnungsalgorithmus des Geodimeters auf. Die Koordinaten werden nicht nach den Gleichungen 3.43, 3.44 und 3.45 ermittelt, sondern fälschlicherweise nach folgenden Formeln bestimmt:

$$X = SD(i-1) \sin\left(V(i) \frac{\pi}{200^\circ}\right) \cos\left(Hz(i) \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.46)$$

$$Y = SD(i-1) \sin\left(V(i) \frac{\pi}{200^\circ}\right) \sin\left(Hz(i) \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.47)$$

$$Z = SD(i - 1) \cos \left( V(i) \frac{\pi}{200^\circ} \right) \quad (3.48)$$

mit  $i = \text{Nr. der Messung}$ . Aus den Gleichungen 3.46, 3.47 und 3.48 geht hervor, dass zur Berechnung der aktuellen Koordinaten die Schrägdistanz  $SD$  der vorherigen Messung verwendet wird. Bei statischen Messungen ist dieser Fehler vernachlässigbar, bei dynamischen Messungen führt er zu einem systematischen Fehler und fehlerhaften Positionen.

Demzufolge wurde die Bestimmung der Koordinaten  $x_{Geo}$ ,  $y_{Geo}$ , und  $z_{Geo}$  gemäß den Gleichungen 3.43, 3.44 und 3.45 im Postprocessing vorgenommen, um die fehlerbehafteten Berechnungsalgorithmen des Geodimeters zu umgehen. Die mathematische Kompensation des Zeitdelays ist nicht in die Auswertung eingeflossen. Damit wäre der Umfang und das Ziel der Arbeit bei weitem überschritten worden. Dennoch wird bei der Darstellung der Versuchsergebnisse gezielt auf das Problem eingegangen.

Die Zeitsynchronisation der Messwerte des Referenzsystems und der Radarsensoren wird, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, über die im GPS-Datenstring mitgelieferte Zeit realisiert. Die Messwerterfassung des Tachymeters erfolgt in einem Abstand von 0,44 s, was einer Frequenz von 2,27 Hz entspricht. Die verwendeten (D)GPS-Empfänger arbeiten mit einer Frequenz von 1 Hz. Folglich müssen die Messwerte des Referenzsystems auf die des (D)GPS-Empfängers interpoliert werden. Bei der Datenaufzeichnung wird jeweils der Datenstring des (D)GPS-Empfängers und der Datenstring des Referenzsystems mit dem aktuellen Zeitstempel des PC versehen. Die Vorgehensweise der Interpolation zeigt das folgende Beispiel:

Tabelle 3.6: Interpolationsbeispiel

Zeit [hh:mm:ss,00]	$H_z(t)$ [gon]	$V(t)$ [gon]	$SD(t)$ [m]	GPS-Zeit [hh:mm:ss,00]
$t_1 = 09:42:34,36$	388,4970	100,136	6,98	
$t_2 = 09:42:34,47$				07:48:17,00
$t_3 = 09:42:34,80$	388,4965	100,134	6,99	

Die zu interpolierenden Größen ergeben sich wie folgt:

$$H_z(t_2) = \frac{H_z(t_3) - H_z(t_1)}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) + H_z(t_1) \quad (3.49)$$

$$V(t_2) = \frac{V(t_3) - V(t_1)}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) + V(t_1) \quad (3.50)$$

$$SD(t_2) = \frac{SD(t_3) - SD(t_1)}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) + SD(t_1) \quad (3.51)$$

## 3.5 Koordinatentransformationen

### 3.5.1 Globales Koordinatensystem und lokales Nord-Ost-Koordinatensystem

Zum Vergleich der (D)GPS-Daten vom Traktor mit Messkabine und den Messwerten vom Geodimeter System 4000 zum Traktor ist es notwendig die Daten des globalen Koordinatensystems in ein lokales Koordinatensystem umzurechnen. Voraussetzung dafür sind die Betrachtung der Erde als Kugel und die Angabe des Erdradius in Bezug auf den Meeresspiegel. Bei den anzustellenden Berechnungen für Entfernungen von maximal 1 km fällt die Erdkrümmung nicht ins Gewicht.

Das globale Koordinatensystem ist gegeben durch die geographische Breite, die geographische Länge und die Höhe über dem Meeresspiegel. Der Datenstring \$GPGGA des Satellitenortungssystems enthält genau diese Angaben:

```
$GPGGA,074241.00,4824.0245,N,01143.9606,E,1,07,1.3,552.0,M,-46.8,M,*,*4F
```

Aus dem Beispiel ergeben sich für die geographische Breite 4824.0245 N (nördliche Breite) und für die geographische Länge 1143.9606 E (östliche Länge).

Die Angaben liegen im Format  $ggmm.mmmm$ =GradMinute.Dezimalbruchteile der Minute vor. Die Anzahl der Dezimalbruchteile ist dabei vom verwendeten (D)GPS-Empfänger abhängig. Zur weiteren Verwendung müssen die Messwerte in dezimale Grad umgewandelt werden:

$$ggmm.mmmm \rightarrow gg + \frac{mm.mmmm}{60^\circ} \quad (3.52)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird vorausgesetzt, dass geographische Breite und Länge immer dezimal in Grad angegeben werden.

Mit der Festlegung eines Nullpunktes O wird vom globalen Koordinatensystem ausgehend in der Umgebung des Nullpunktes ein lokales Nord-Ost-Koordinatensystem unter Vernachlässigung der Erdkrümmung definiert.

Der Nullpunkt O ist gegeben durch  $(lat_O, lon_O, h_O)$ , mit der geographischen Breite  $lat_O$ , der geographischen Länge  $lon_O$  und der Höhe über dem Meeresspiegel  $h_O$ . Dabei wird festgelegt, dass die Breite N nördlich ist und die Länge E östlich ist.

Die z-Achse des lokalen Nord-Ost-Koordinatensystems ist die Verbindung vom Erdmittelpunkt und dem Nullpunkt. Sie steht damit im Nullpunkt senkrecht auf der Tangentialfläche an die Kugel, die den Erdmittelpunkt als Mittelpunkt hat und als Radius den Erdradius zuzüglich der Höhe des Nullpunktes über dem Meeresspiegel. Die x-Achse zeigt nach Osten entlang des Breitenkreises zur Breite  $lat_O$ , die y-Achse nach Norden entlang des Längenkreeses zur Länge  $lon_O$ .

Ein beliebiger Punkt P, der so nah an O liegen soll, dass die Erdkrümmung keine Rolle spielt, ist durch die Koordinaten  $(lat_P, lon_P, h_P)$  gegeben. P hat im lokalen Nord-Ost-Koordinatensystem bezüglich O die Koordinaten  $(x_P, y_P, z_P)$ . Der Nullpunkt O liegt in diesem Koordinatensystem bei  $(0, 0, 0)$ . Der Erdradius sei der Näherungswert  $R_{Erde} = 6366738$  m und  $\pi$  die Kreiszahl.

Die Koordinaten von Punkt P ergeben sich aus

$$x_P = R_{Erde} \frac{lon_P - lon_O}{180^\circ} \pi \cos \left( \frac{lat_O}{180^\circ} \pi \right) \quad (3.53)$$

$$y_P = R_{Erde} \frac{lat_P - lat_O}{180^\circ} \pi \quad (3.54)$$

$$z_P = h_P - h_O \quad (3.55)$$

unter Vernachlässigung der Erdkrümmung und Annäherung der euklidischen Entfernung durch die Länge des Kreisbogens.

Zur Bestimmung des Nullpunktes O wird dieser mit DGPS über einen Zeitraum von mindestens 30 min eingemessen. Anschließend werden die Mittelwerte der gemessenen Koordinaten gebildet. Für weitere Berechnungen werden die Mittelwerte als Koordinaten für den Nullpunkt  $(lat_O, lon_O, h_O)$  verwendet. Zur Bestimmung der Abweichung der Messwerte für den Nullpunkt zum mittleren berechneten Nullpunkt werden die Gleichungen 3.53, 3.54 und 3.55 herangezogen, wobei für  $lat_O$ ,  $lon_O$  und  $h_O$  die berechneten Mittelwerte und für  $lat_P$ ,  $lon_P$  und  $h_P$  die tatsächlichen Messwerte eingesetzt werden. Das Ergebnis ist die Streuung der Messwerte zum berechneten mittleren Nullpunkt O.

### 3.5.2 Koordinatensystem des Geodimeter System 4000 und lokales Nord-Ost-Koordinatensystem

Das Geodimeter System 4000 gibt die in Tabelle 3.5 aufgelisteten Messwerte und Größen aus. Im verwendeten Messmodus ist die x-Achse

- die Projektionslinie der Verbindungslinie vom Fußpunktes des Geodimeters G zum Referenzpunkt R
- auf die Tangentialebene an die Kugel mit dem Erdmittelpunkt als Mittelpunkt und dem Erdradius zuzüglich der Höhe des Fußpunktes des Geodimeters über dem Meeresspiegel als Radius im Fußpunkt des Geodimeters
- mit Richtung vom Geodimeter zum Projektionspunkt des Referenzpunktes.

Die y-Achse steht in der genannten Tangentialebene senkrecht auf der x-Achse. Senkrecht zur Tangentialebene verläuft die z-Achse durch den Fußpunkt des Geodimeters.

Für das in Abbildung 3.12 gezeigte dreidimensionale Koordinatensystem vom Geodimeter System 4000 gelten die Beziehungen

$$x_{T,Geo} = HD \cos \left( Hz \frac{\pi}{200^\circ} \right) \quad (3.56)$$

$$y_{T,Geo} = HD \sin \left( Hz \frac{\pi}{200^\circ} \right) \quad (3.57)$$

$$z_{T,Geo} = SD \cos \left( V \frac{\pi}{200^\circ} \right) \quad (3.58)$$

$$HD = SD \sin \left( V \frac{\pi}{200^\circ} \right) \quad (3.59)$$

unter Beachtung der Winkelmaßeinheit Neugrad bei  $Hz$  und  $V$ .

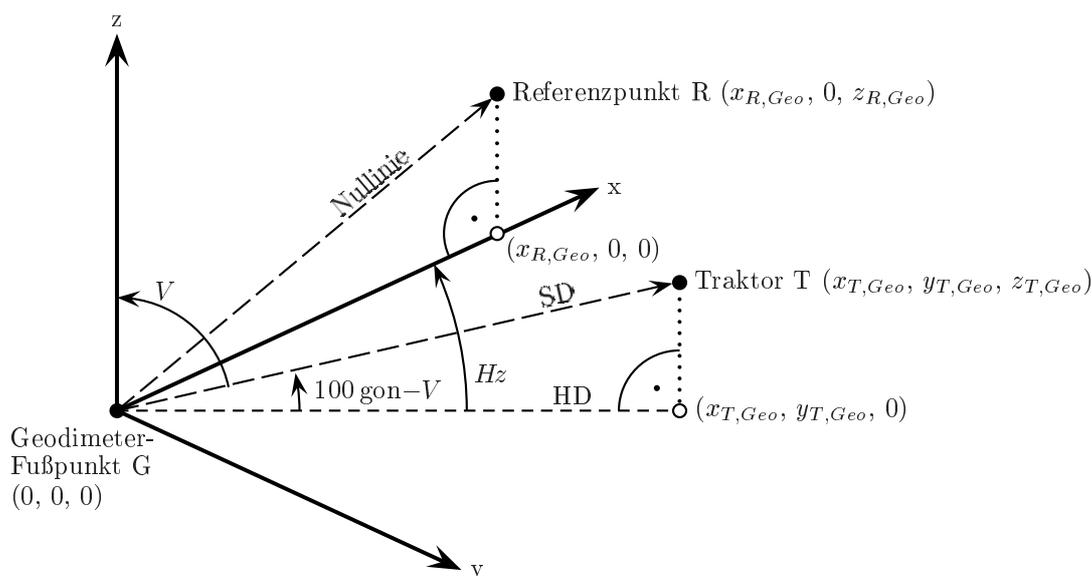


Abbildung 3.12: Koordinatensystem des Geodimeter System 4000

Der Fußpunkt des Geodimeters G wird für das lokale Nord-Ost-Koordinatensystem als Ursprung gewählt. Voraussetzung ist die Einmessung dieses Punktes mit DGPS. Der eingemessene Punkt hat im globalen Koordinatensystem die Koordinaten  $(lat_O, lon_O, h_O)$ . Analog dazu wird der Referenzpunkt R mit DGPS eingemessen und hat die globalen Koordinaten  $(lat_R, lon_R, h_R)$ . Die Koordinaten des Referenzpunktes  $(x_R, y_R, z_R)$  im lokalen Nord-Ost-Koordinatensystem mit dem Geodimeter-Fußpunkt als Ursprung ergeben sich gemäß den Formeln 3.53, 3.54 und 3.55.

Zur Ermittlung der Koordinaten eines angepeilten Punktes T (Traktor mit Messkabine)  $(x_T, y_T, z_T)$  im lokalen Nord-Ost-Koordinatensystem aus den vom Geodimeter zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  ausgegebenen Werten  $H_{z_T}$ ,  $V_T$  und  $SD_T$  wird die Lage der sogenannten Nulllinie, der Projektion der Verbindungslinie vom Fußpunkt des Geodimeters zum Referenzpunkt auf die Tangentialebene (x-y-Ebene) des Geodimeters, benötigt (Abb. 3.13). Diese Tangentialebene hat die gleiche Höhe über dem Meeresspiegel wie der Fußpunkt des Geodimeters, so dass der Winkel  $\eta$  die Lage der Nulllinie zur Lage der x-Achse des lokalen Nord-Ost-Koordinatensystems bestimmt. Die x-Achse des lokalen Nord-Ost-Koordinatensystems zeigt die Ostrichtung, die y-Achse die Nordrichtung an. Nach Darstellung 3.13 berechnet sich der Winkel  $\eta$  für  $x_R \neq 0$  aus:

$$\eta = \arctan\left(\frac{y_R}{x_R}\right) \quad (3.60)$$

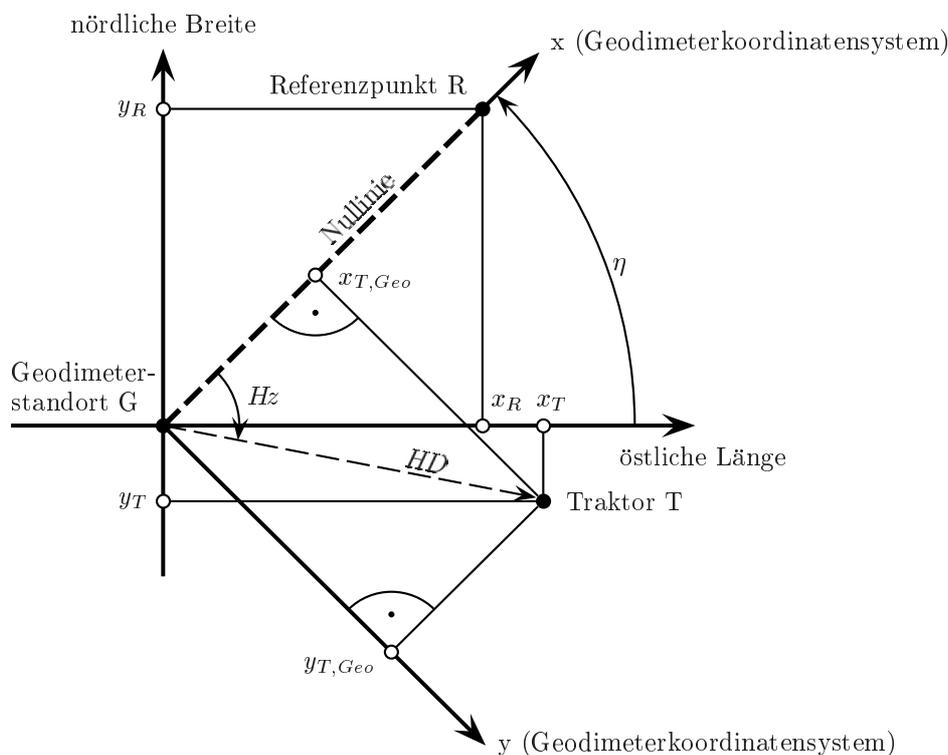


Abbildung 3.13: Koordinatentransformation aus dem Koordinatensystem vom Geodimeter System 4000 in das lokale Nord-Ost-Koordinatensystem

Damit ergeben sich die Koordinaten des Punktes T  $(x_T, y_T, z_T)$  im lokalen Nord-Ost-Koordinatensystem mit dem Geodimeterstandort als Ursprung aus den Geodimeter-Werten  $H_{z_T}$ ,  $V_T$ ,  $SD_T$  und  $HD_T$ :

$$x_T = HD_T \cos\left(\eta - Hz_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) = SD \sin\left(V_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \cos\left(\eta - Hz_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.61)$$

$$y_T = HD_T \sin\left(\eta - Hz_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) = SD \sin\left(V_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \sin\left(\eta - Hz_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.62)$$

$$z_T = SD_T \cos\left(V_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \cos\left(\eta - Hz_T \frac{\pi}{200^\circ}\right) \quad (3.63)$$

Die in Abbildung 3.13 eingezeichnete Horizontalentfernung  $HD$  diene nur der Veranschaulichung und ist für die Berechnung der Koordinaten nicht notwendig, so dass die Koordinaten unmittelbar aus dem Messwerten errechnet werden.

Für den Fall, dass das Geodimeter gültige, nicht fehlerbehaftete Koordinaten  $(x_{T,Geo}, y_{T,Geo}, z_{T,Geo})$  aus den Messwerten  $Hz_{T,Geo}$ ,  $V_{T,Geo}$  und  $SD_{T,Geo}$  eines bestimmten Zeitpunktes ermittelt, die sich auf das Koordinatensystem des Geodimeters beziehen, ist es zur Berechnung der Koordinaten des Punktes  $(x_T, y_T, z_T)$  im lokalen Nord-Ost-Koordinatensystem mit dem Geodimeterstandort als Ursprung notwendig, die Einheitsvektoren  $e_{x,Geo}$  der x-Achse und  $e_{y,Geo}$  der y-Achse zu bestimmen. Für die in Abbildung 3.13 gezeigte Anordnung gilt:

$$e_{x,Geo} = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \\ \sin(\eta) \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

$$e_{y,Geo} = \begin{pmatrix} \sin(\eta) \\ -\cos(\eta) \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

Damit werden zur Berechnung von  $(x_T, y_T, z_T)$  aus  $(x_{T,Geo}, y_{T,Geo}, z_{T,Geo})$  folgende Gleichungen herangezogen:

$$x_T = x_{T,Geo} \cos(\eta) + y_{T,Geo} \sin(\eta) \quad (3.66)$$

$$y_T = x_{T,Geo} \sin(\eta) + y_{T,Geo} (-\cos(\eta)) \quad (3.67)$$

$$z_T = z_{T,Geo} \quad (3.68)$$

## 4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

### 4.1 Messsysteme

Während der Versuche kamen unterschiedliche DGPS-Empfänger und Korrekturdatenempfänger zum Einsatz. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht aller Modelle inkl. Spezifikationen [47, 52, 55, 60]. Alle DGPS-Empfänger verfügen über mindestens eine RS-232-Schnittstelle für die Datenausgabe nach dem Standard NMEA 0183.

Tabelle 4.1: Eingesetzte DGPS-Empfänger und Korrekturdatenempfänger

<i>Modell</i>	<i>Daten</i>
Ashtech® <sup>a</sup> GG24™ <sup>b</sup> DGPS-Empfänger	12 GPS-Kanäle L1, 12 GLONASS-Kanäle L1, kombinierte GPS/GLONASS-Antenne, RTCM SC-104-Eingang/Ausgang
Motorola Oncore DGPS-Empfänger	8 GPS-Kanäle, RTCM SC-104-Eingang
ertec RDS66 UKW-RDS/RASANT-Empfänger für DGPS-Korrekturdaten	Korrekturdienst SAPOS EPS via RASANT, RTCM SC-104-Ausgang
COMMUNICATION TECHNOLOGY STAR TRACK® <sup>c</sup> DGPS-Empfänger für ALF	6 GPS-Kanäle L1, C/A Code, Trimble CM3-DGPS, STAR TRACK LWRX, kombinierte GPS/Langwelle-Antenne, Korrekturdienst SAPOS EPS via ALF
Trimble AgGPS 132 DGPS-Empfänger	12 GPS-Kanäle L1, C/A Code, satellitengestützte Korrekturdienste (OmniSTAR, Racal LandStar) oder Beacon DGPS, kombinierte GPS/DGPS-Antenne, RTCM SC-104 Eingang

<sup>a</sup>Ashtech® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Magellan Corporation.

<sup>b</sup>GG24™ ist ein Warenzeichen der Magellan Corporation.

<sup>c</sup>STAR TRACK® ist ein eingetragenes Warenzeichen der CT COMMUNICATION TECHNOLOGY GmbH.

Das Modell STAR TRACK DGPS verwendet den Korrekturdienst SAPOS EPS via ALF, das Modell Trimble AgGPS 132 ist für OmniSTAR konfiguriert. Hingegen verfügt der Motorola Oncore DGPS-Empfänger über keinen integrierten Korrekturdatenempfänger. Stattdessen lieferte der RDS66 UKW-RDS/RASANT-Empfänger die Korrekturdaten über den RTCM SC-104-Eingang. Der Ashtech GG24 DGPS-Empfänger stand in zweifacher Ausführung zur Verfügung. In der ESMERALDA-Station (GPS/GLONASS Reference Station NR-R124) arbeitete ein Modul als Remote Station [56]. Das zweite Modul war als lokale Referenzstation (Base Station) konfiguriert und sendete die erzeugten Korrekturdaten via Funkmodem zum RTCM SC-104-Eingang der ESMERALDA-Station.

Die in dieser Arbeit veröffentlichten Ergebnisse basieren ausschließlich auf Untersuchungen der Sensoren Vansco True Ground Speed Sensor Model 338000.

## 4.2 Prüfstandsuntersuchungen

Die Radarsensoren wurden in grundlegenden Untersuchungen in einem Prüfstand (Länge 20 m, Breite 3 m) hinsichtlich ihrer Eignung für das Koppelortungssystem und zur Kalibrierung getestet. Die Prüfstandsuntersuchungen bieten gegenüber den Feldversuchen folgende Vorteile:

- identische Rahmenbedingungen für alle Versuche
- exakte Definition des Fahrverlaufs mit hoher Reproduzierbarkeit
- Genauigkeit in x-Richtung 1 cm, in y-Richtung 1 mm
- programmierbare Schnittstelle zur Steuerung des Versuchsablaufs (Startpunkt, Endpunkt, Anzahl der Wiederholungen, Geschwindigkeit)
- Programmierung der Fahrstrecke (Geradausfahrt, einfache bzw. mehrfache Diagonalfahrt)
- Eliminierung von Nick-, Wank- und Hubschwingungen
- Ausschaltung zufälliger Fehlergrößen und Störeinflüsse

Die Hauptkomponenten des Prüfstandes mit einer 90°-Sensoranordnung zeigt Abbildung 4.1.

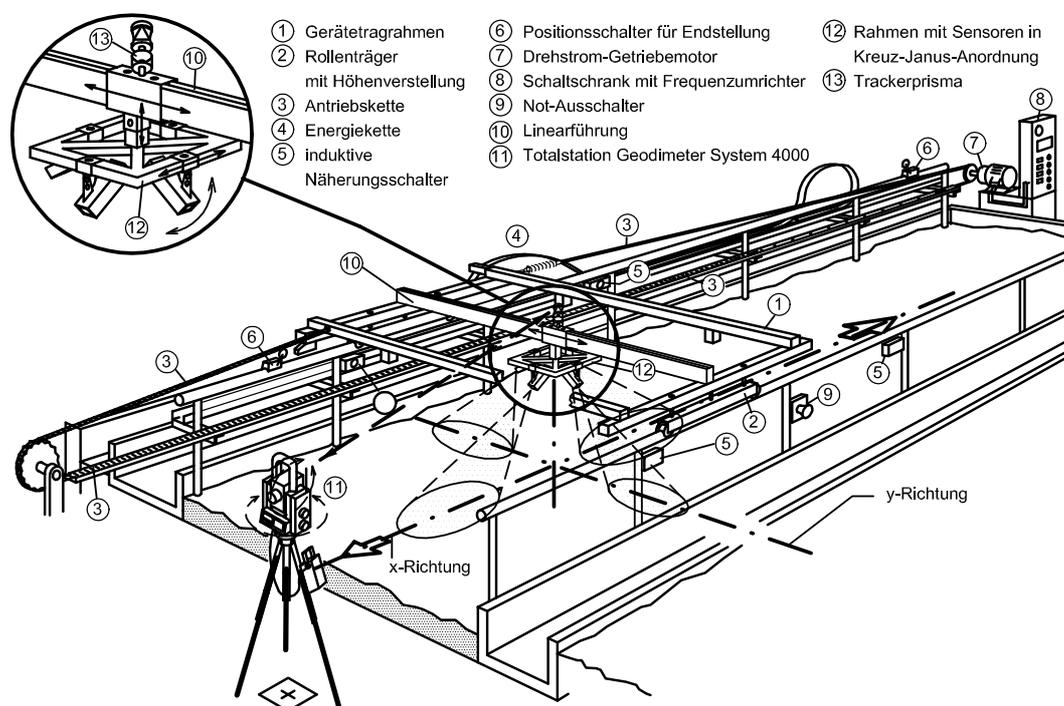


Abbildung 4.1: Radarsensorenprüfstand

Das Prüfstandskordinatensystem hat seinen Ursprung an dem Eckpunkt des Prüfstandes, an welchem sich der Drehstrommotor befindet. Die Ansteuerung

des Prüfstandes wurde mit einem PC realisiert. Über zwei serielle Schnittstellen des Steuerungs-PC wurden der Drehstrommotor mittels Frequenzumrichter und die Linearführung angesprochen.

Gesteuert werden im Prüfstand translatorische Bewegungen in x- und y-Richtung. Die Bewegung in x-Richtung wird durch den mit dem Getriebemotor angetriebenen Gerätetragrahmen vollführt. Die Linearführung ermöglicht die Bewegung in y-Richtung. Zu den Stellgrößen in x-Richtung zählen:

- Fahrt in x- bzw. -x-Richtung
- Rangierfahrt in x- bzw. -x-Richtung
- Start/Stop
- Geschwindigkeit

In y-Richtung werden durch die Ansteuerung des in der Linearführung befindlichen Schrittmotors die Stellgrößen

- Fahrt in y- bzw. -y-Richtung
- Start/Stop
- Geschwindigkeit

geregelt.

Das Programm für den Steuerungs-PC wurde in der Sprache BASIC programmiert und angewendet. Eine zweifach diagonale Fahrt, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, mit der höchsten im Prüfstand zulässigen Geschwindigkeit (ca. 9 km/h) und 20 Wiederholungen wird mit dem in Anhang A gelisteten Programmcode umgesetzt.

Der Drehstrommotor wurde über die RS-232-Schnittstelle COM1 und die Linearführung über die RS-232-Schnittstelle COM2 angesteuert.

Die Drehstrommotorsteuerung über den Frequenzumrichter ist mit Schaltmodulen der Fa. Analog Devices realisiert worden. Die Syntax eines gesendeten Befehls für die Digitalmodule wie z. B. #0A0A00 lässt sich von links beginnend aufschlüsseln in 0A-Hex-Adresse, 0A-Port A und 00-Art der Fahrt bzw. Zustand des Systems. Die Codes für Art bzw. Zustand zeigt Tabelle 4.2.

Zur Ansteuerung des Analogmoduls, welches die Geschwindigkeit regelt, wird der Befehl #0120.000 gesendet. Dabei ist das Byte 01 die Hex-Adresse des Analogmoduls und die dezimale Angabe 20.000 die Geschwindigkeitsangabe in mA. Der Regelbereich der Geschwindigkeit liegt bei 4–20 mA. In den Versuchen wurden neben der Höchstgeschwindigkeit mit einem Regelstrom von 20 mA auch geringere Geschwindigkeiten mit Stromstärken von 10 und 15 mA realisiert.

Tabelle 4.2: Codes zur Ansteuerung des Drehstrommotors

<i>Befehl</i>	<i>Hexcode</i>
Antrieb aus	01
Antrieb ein	02
schnelle Fahrt vorwärts	06
schnelle Fahrt rückwärts	0A
Rangierfahrt vorwärts	12
Rangierfahrt rückwärts	22
Stop	00

Die Steuerung der Linearführung der Fa. isel-automation beruht auf dem isel-CNC-Betriebssystem 5.0. Bei der Initialisierung des isel-1-Achs-Controllers IT 142-C wird zuerst der Befehl *Achsenzahl setzen* mit dem Code @01 ausgeführt. Im Prüfstand stand nur eine zu steuernde Achse zur Verfügung. Die Fahrt und die Geschwindigkeit des Schlittens der Linearführung werden mit dem Befehl *Bewegung relativ* (z. B. @0A22000,5400) programmiert. Dabei gilt folgender Syntax von links gesehen, @0–Adressierung der Prozessorkarte, A–Befehl zur Bewegung, 22000–Schrittzahl des Schrittmotors und 5400–Geschwindigkeit.

Gegenüber einer einfachen Geradeausfahrt ist das exakte Timing zwischen Bewegung in x-Richtung und y-Richtung bei Diagonalfahrten schwierig umzusetzen. Für die drei in x-Richtung zur Verfügung stehenden Geschwindigkeiten mussten bei den Diagonalfahrten äquivalente Geschwindigkeiten in y-Richtung ermittelt werden. Ziel war es, dass die Bewegung in beide Richtungen gleichzeitig startet, bei zweifach diagonalen Fahrt zusätzlich in der Mitte des Prüfstandes der Wendepunkt für die Bewegung in y-Richtung liegt und die Bewegungen in beide Richtungen exakt an einem Punkt enden. Der Endpunkt der Messfahrt ist dabei von der gefahrenen Geschwindigkeit im Prüfstand abhängig. Je höher die gefahrene Geschwindigkeit, desto größer die in x-Richtung zurückgelegte Strecke. Grund für dieses Verhalten ist die Abschaltung des Antriebes in x-Richtung durch die induktiven Näherungsschalter. Sie lösen beim Überfahren des Gerätetragrahmens den Bremsvorgang am Drehstrommotor aus. Je höher dessen Drehzahl und demzufolge die Geschwindigkeit des Gerätetragrahmens, desto länger der Bremsweg. Manuell ermittelte Zwischen- und Endpunkte ermöglichen eine Programmierung von insgesamt neun verschiedenen Fahrabläufen, bestehend aus drei verschiedenen Geschwindigkeiten und drei verschiedenen Streckenverläufen.

Abbildung 4.2 zeigt die Messkonfiguration und den Informationsfluss der gemessenen Werte. Die von den Radarsensoren ermittelten Fahrwege werden als Impulsfolge an den IMP 3595 Data Logger gesendet. Der IMP 3595 erfasst diese Impulse und gibt sie als Frequenz  $f$  an die S-NET Interface Card 3595 4B zum Abruf weiter. Vom DGPS-Empfänger wird der Datenstring \$GPGGA im Format NMEA 0183 an der RS-232-Schnittstelle COM1 des PC zur Verfügung gestellt. Das Aufzeichnungsprogramm fragt in einer Schleife die COM1 wiederholt ab. Sobald der vollständige \$GPGGA-Datenstring an der Schnittstelle vorliegt, wird er

gespeichert und die Daten der S-Net Interface Card ausgelesen. Die Messdaten der Radarsensoren werden beim Abspeichern genau dem \$GPGGA-String zugeordnet, nach welchem sie unmittelbar ausgelesen wurden. Der \$GPGGA-String enthält die Zeit auf UTC-Basis (Universal Time Coordinated).

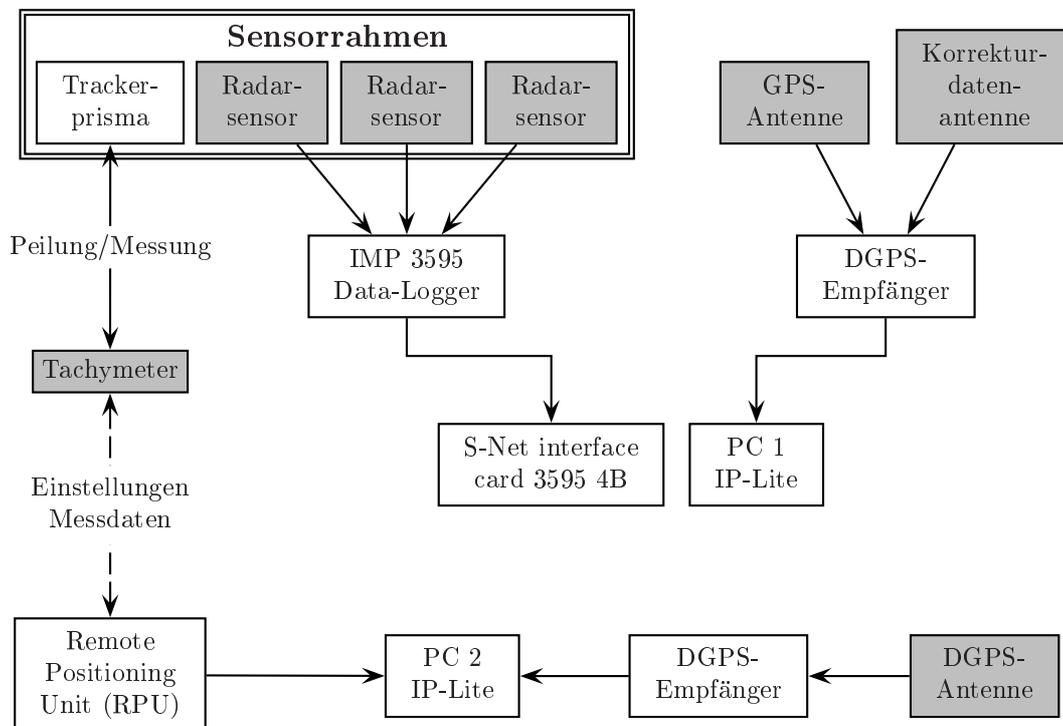


Abbildung 4.2: Messkette für Prüfstandsversuche

Zur Referenzmessung des Fahrverlaufes kommt das Geodimeter System 4000 zum Einsatz. Dieses Messsystem besteht aus einem Tachymeter und einer Reflektoreinheit (Trackerprisma). Das Prisma wird auf dem Rahmen mit den Sensoren montiert. Das Tachymeter ermittelt im Trackingmodus die Schrägentfernung  $SD$ , die Horizontalrichtung  $H_z$  und den Vertikalwinkel  $V$  zum Prisma. Über eine Funkmodemverbindung werden die Daten des Tachymeters an die RPU übertragen und an der RS-232-Schnittstelle COM1 des PC 2 bereitgestellt. Der PC 2 ist über seine RS-232-Schnittstelle COM2 mit einem GPS-Empfänger verbunden, so dass der \$GPGGA-Datenstring inkl. UTC zur Verfügung steht. Das Messprogramm ist so konfiguriert, dass es ständig die Daten an beiden RS-232-Schnittstellen abfragt, mit der aktuellen PC-Uhrzeit versieht und abspeichert. Eine gezielt Abfrage des Tachymeters im Trackingbetrieb ist nicht sinnvoll, da es im Abfragemodus nicht aktuelle, sondern ältere Daten aus dem internen Speicher liefert. Grund dafür ist der automatische Trackingmodus, welcher keine Eingriffe in das Timing bei der Messung und Auswertung erlaubt. Deshalb wurde das Tachymeter so konfiguriert, dass es selbstständig die aktuellen Daten an den PC sendet. Mit dieser Konfiguration wird gewährleistet, dass ständig die für die aktuelle Zeit gültigen Messwerte aufgezeichnet werden.

Der Datenstring hat den im folgenden Beispiel dargestellten Aufbau:

```
9:36:58:49; $GPGGA,074241.00,4824.0245,N,01143.9606,E,1,07,1.3,552.0,M,-46.8,M,,*4F
9:36:58:82; 0; 7;394.7705; 8;100.0370; 9;19.61; 11;19.61; 37;19.55; 38;-1.60; 39;1.688;
9:36:59:26; 0; 7;394.7705; 8;100.0370; 9;19.62; 11;19.62; 37;19.55; 38;-1.60; 39;1.688;
9:36:59:48; $GPGGA,074242.00,4824.0244,N,01143.9607,E,1,07,1.3,552.0,M,-46.8,M,,*4C
```

In der ersten Zeile steht die aktuelle PC-Uhrzeit gefolgt von den GPS-Daten. Die zweite und die dritte Zeile beinhalten neben der PC-Uhrzeit jeweils eine vollständige Messung des Tachymeters. Die Zahlen vor dem Semikolon sind die Nummern der Label gemäß Tabelle 3.5, der Wert danach liefert den Messwert bzw. den ermittelten Wert. Die letzte Zeile enthält wiederum einen Datenstring des GPS-Empfängers.

Anhand der UTC aus dem GPS-Datenstring in den Logdateien beider PC's werden die Messwerte der Radarsensoren mit denen des Tachymeters verglichen und Auswertungen durchgeführt.

Im Prüfstand fanden die Untersuchungen zu den in 3.3.2, 3.3.3 und 3.3.4 vorgestellten Konfigurationen statt.

#### 4.2.1 90°-Sensoranordnung

Zu Beginn der Versuchsreihen wurde die 90°-Sensoranordnung am Sensorrahmen montiert und untersucht. Die Tests konzentrierten sich auf die Absolvierung von Fahrten mit unterschiedlichen Streckenverläufen bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Programmiert wurden die in den Abbildungen 4.3, 4.4 und 4.5 gezeigten Streckenverläufe. Die Messfahrten wurden nur in einer Richtung ausgeführt, d. h. die Rückfahrt vom Endpunkt zum Startpunkt wurde nicht in die Messung einbezogen.

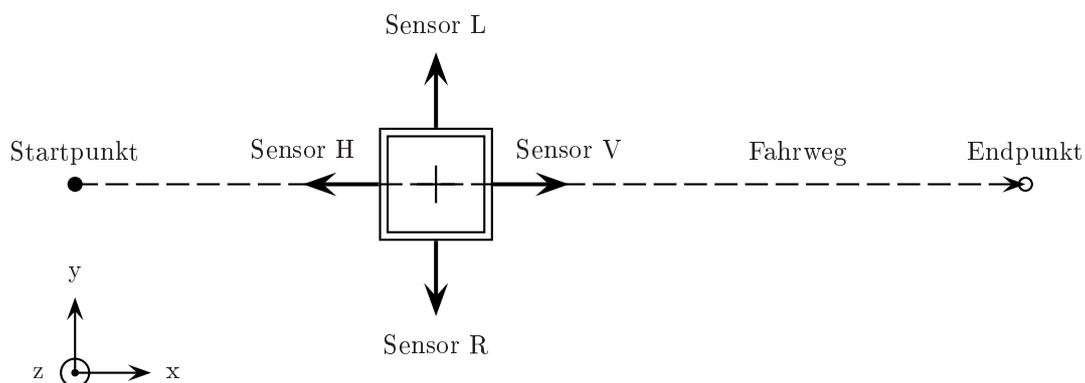


Abbildung 4.3: Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei 90°-Sensoranordnung

Die angebrachten Sensoren *V* und *H* wurden in der vom Hersteller geforderten Lage zu ihrer Messrichtung montiert. Beide Sensoren sollen die Geschwindigkeit

in Fahrzeuginnenrichtung ermitteln. Mit der gleichen Maßgabe wurden Sensor  $L$  und Sensor  $R$  montiert. Ihre Aufgabe war die Bestimmung der Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung.

Ausgehend von der Geradeausfahrt ergaben die theoretischen Überlegungen, dass in Fahrzeuginnenrichtung keine Geschwindigkeit gemessen werden durfte, da sich der Sensorrahmen nur in der Fahrzeuginnenrichtung (x-Richtung) bewegt. Weiterhin durften, die korrekte Montage der Sensorpaare vorausgesetzt, keine Unterschiede in den Messwerten von Sensor  $V$  und Sensor  $H$  bzw. Sensor  $L$  und Sensor  $R$  erkennbar sein, da im Prüfstand weder Nicken noch Wanken auftreten konnten.

Wird die einfach diagonale Fahrt betrachtet, so erfolgen Bewegungen in x- und y-Richtung. Folglich müssen durch alle vier Sensoren Geschwindigkeiten ermittelt werden. Aufgrund der größeren Länge des Prüfstandes gegenüber seiner Breite ist die Geschwindigkeit in x-Richtung um ein Vielfaches höher als in y-Richtung. Sensor  $V$  und Sensor  $H$  sollten demzufolge größere Geschwindigkeiten messen, als Sensor  $L$  und Sensor  $R$ .

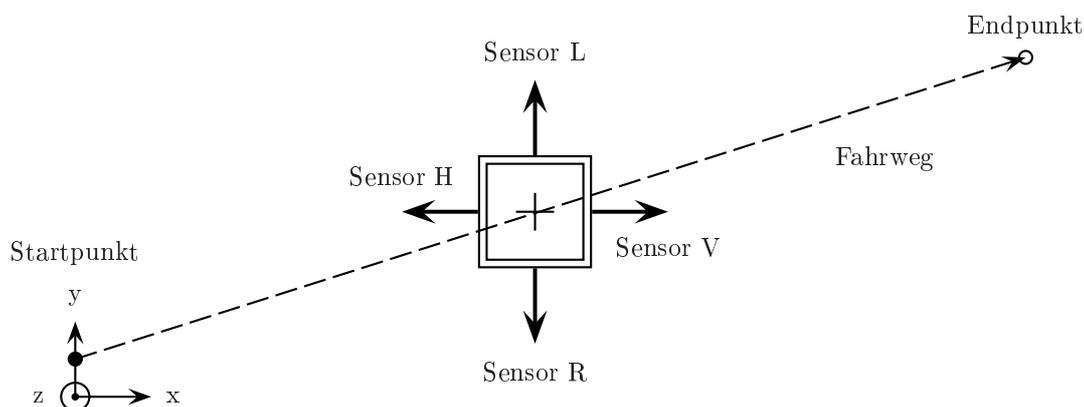


Abbildung 4.4: Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei 90°-Sensoranordnung

Der dritte Streckenverlauf diente der Simulation einer Kurvenfahrt. Sie wird als zweifach diagonale Fahrt bezeichnet. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich bei der Montage am Fahrzeug der gesamte Sensorrahmen mit dem Fahrzeug bei einer Kurvenfahrt dreht. Diese Tatsache trifft im Prüfstand nicht zu, da eine synchrone Drehung des Sensorrahmens einen ungleich höheren Aufwand bei der Konstruktion des Prüfstandes und der Programmierung der Fahrverläufe erfordert hätte. Da die Sensoren nicht über eine Fahrtrichtungserkennung verfügen, war es nur möglich, den Wendepunkt im Streckenverlauf anhand des kurzzeitigen Stops in y-Richtung zu erkennen. Dieser Stop musste von der Linearführung eingelegt werden, um die Richtungsumkehr des Schrittmotors zu ermöglichen. Theoretisch sollte ein Abfallen der Messwerte von Sensor  $L$  und Sensor  $R$  zu verzeichnen sein, was auf den Wendepunkt schließen lässt.

Die dargestellten Streckenverläufe wurden mit jeweils drei Geschwindigkeiten

gefahren. Je Streckenverlauf und Geschwindigkeit wurden 20 Wiederholungen ausgeführt.

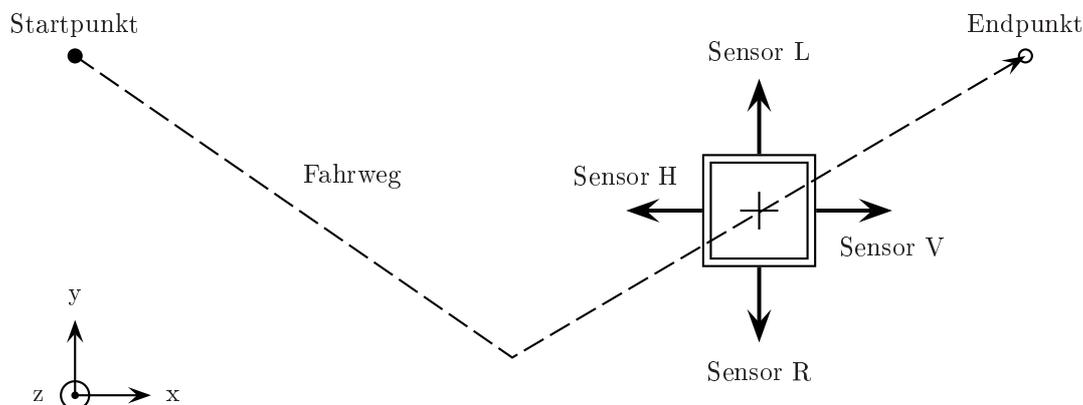


Abbildung 4.5: Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei  $90^\circ$ -Sensoranordnung

Die resultierenden Messergebnisse zeigten nur in der Fahrzeuginnenrichtung eine Übereinstimmung mit den theoretischen Annahmen. In Fahrzeuguerrichtung traten Verfälschungen mit unterschiedlichen Ursachen auf, die in 5.1.1 näher beleuchtet werden.

Daraus ergab sich die Notwendigkeit andere Konfigurationen zusammenzustellen und zu untersuchen. Dabei musste von der Vorstellung Abstand genommen werden, dass nur direkt in Fahrzeuginnen- und -querrichtung gemessen werden sollte.

#### 4.2.2 $45^\circ$ -Sensoranordnung

Wie die  $90^\circ$ -Sensoranordnung wurde auch diese Konfiguration bei den drei bekannten Streckenverläufen Geradeausfahrt (Abb. 4.6), einfach diagonale Fahrt (Abb. 4.7) und zweifach diagonale Fahrt (Abb. 4.8) getestet.

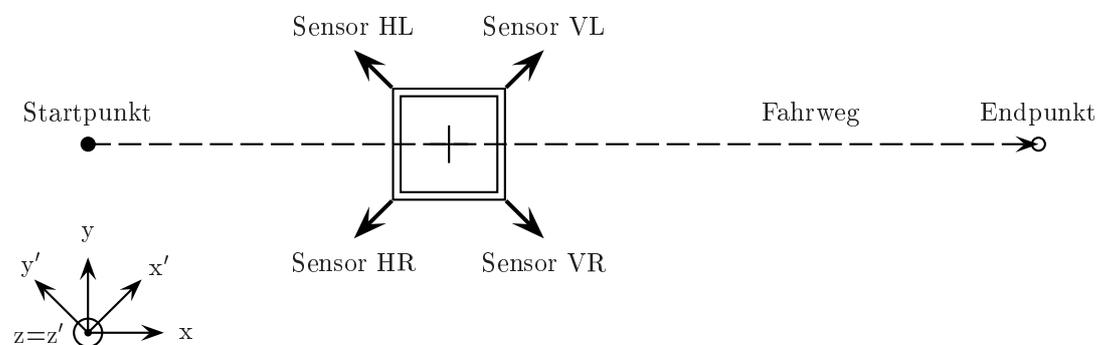


Abbildung 4.6: Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei  $45^\circ$ -Sensoranordnung

Aus diesen Abbildungen ist ersichtlich, dass die Anordnung der Radarsensoren nicht mehr der Spezifikation des Herstellers genügt, da die Sensoren nicht in Fahrzeugs- bzw. -querrichtung justiert sind. Demzufolge müssen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten aus den gemessenen Frequenzen andere Wegauflösungen, wie in 3.3.5 beschrieben, zugrundegelegt werden.

Bei der Geradeausfahrt ist davon auszugehen, dass alle vier montierten Sensoren identische Geschwindigkeiten ermitteln. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass keine Schwingungen wie Nicken und Wanken auftreten. Die Sensoren messen zwar in vier verschiedenen Richtungen, bei reiner Geradeausfahrt tritt aber nur eine Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung auf, zu der alle Sensoren in einem horizontalen Winkel von  $45^\circ$  montiert sind.

Bei einfach diagonaler Streckenführung (Abb. 4.7) verschieben sich aufgrund der Geschwindigkeitskomponenten in x- bzw. y-Richtung die Messwerte der Sensoren paarweise. Damit misst das Janus-Paar aus Sensor *VL* und Sensor *HR* eine betragsmäßig höhere Geschwindigkeit als das Janus-Paar Sensor *VR* und Sensor *HL*. Diese Überlegung basiert auf der Annahme, dass Sensor *VL* und Sensor *HR* unter einem geringeren horizontalen Winkel zum Fahrweg montiert sind. Diese Anordnung ist näherungsweise vergleichbar mit dem Janus-Paar Sensor *V* und Sensor *H* der  $90^\circ$ -Sensoranordnung bei Geradeausfahrt (Abb. 4.3). Hingegen ist das Paar von Sensor *VR* und Sensor *HL* in einem vergleichsweise ungünstigerem Winkel zur tatsächlichen Fahrtrichtung angeordnet und annähernd vergleichbar mit Sensor *L* und Sensor *R* der  $90^\circ$ -Anordnung bei Geradeausfahrt.

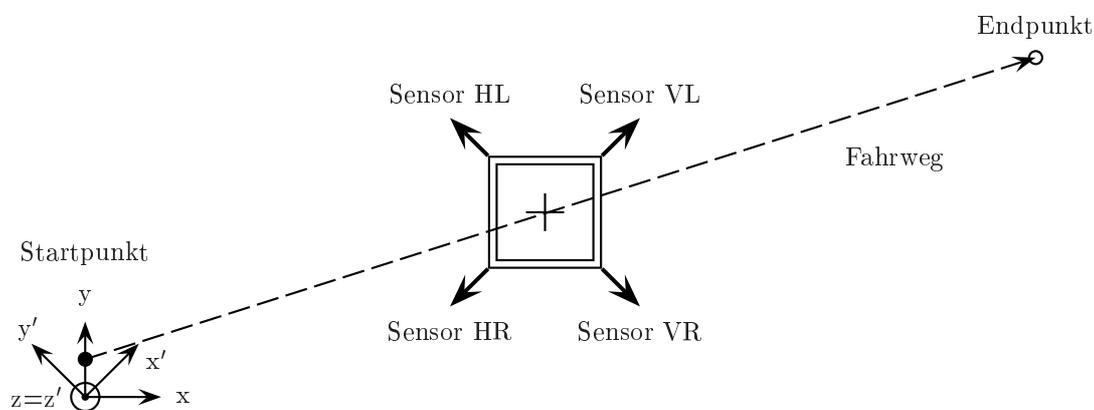


Abbildung 4.7: Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei  $45^\circ$ -Sensoranordnung

Erfolgt eine zweifach diagonale Fahrt (Abb. 4.8), so wechseln die Beziehungen zwischen den Sensorpaaren *VL* und *HR* bzw. *VR* und *HL* je nach befahrenem Streckenabschnitt. Im ersten Abschnitt ermittelt das Janus-Paar *VR-HL* gegenüber dem Janus-Paar *VL-HR* eine höhere Geschwindigkeit. Im zweiten Abschnitt kehrt sich das Verhältnis um. Am Wendepunkt messen alle Sensoren eine identische Geschwindigkeit, da hier die Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung 0 ist.

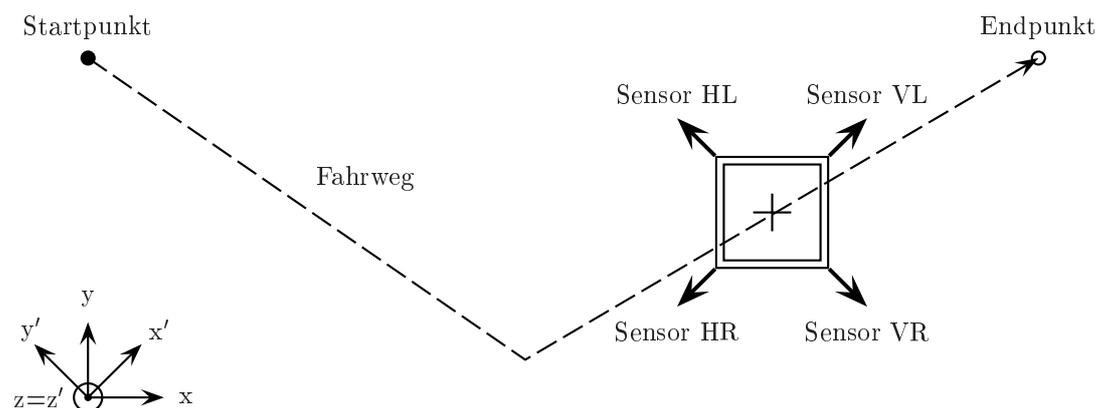


Abbildung 4.8: Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei 45°-Sensoranordnung

Die theoretischen Annahmen wurden durch die Versuche bestätigt. Der Wendepunkt in der zweifach diagonalen Messfahrt wurde zuverlässig erkannt. Die Bestimmung der jeweiligen Fahrtrichtung aus den Messwerten ist möglich. In Kapitel 5.1.2 werden die Ergebnisse detailliert dargestellt und erläutert.

Bei Einsatz dieser Konfiguration an einem Fahrzeug im Feld ist davon auszugehen, dass die in 3.2.2 gemachten Vorhersagen, das Messergebnis verfälschen können. Insbesondere der unruhige Bewuchs unterhalb des Fahrzeuges kann zu einer Beeinflussung der ermittelten Werte führen. Die Footprints der Sensoren liegen in dem Bereich des Messuntergrundes, der entweder teilweise oder vollständig von Bewuchs überzogen ist. Aus diesem Grund ist es ratsam zumindest einen Sensor zur Bestimmung der Geschwindigkeit so zu platzieren, dass diese Effekte nicht auftreten und damit beispielsweise in Fahrgassen eine wahre Fahrgeschwindigkeitsmessung für die Regelung von Applikationsgeräten zu ermöglichen. Vor dem Hintergrund der Kostenreduzierung ist auch eine Verringerung der Sensoranzahl erstrebenswert. Beruhend auf diesen zwei Aspekten wurde die Y-Sensoranordnung ausgewählt.

### 4.2.3 Y-Sensoranordnung

Gegenüber den bisherigen Konfigurationen wurde ein Sensor eingespart. Aus der 45°-Sensorkonfiguration wurden die Sensoren *VL* und *VR* übernommen. Sensor *H* entstammt der 90°-Anordnung. Wie bei den zuvor behandelten Konfigurationen fanden identische Versuche mit den Streckenverläufen Geradeausfahrt (Abb. 4.9), einfach diagonale Fahrt (Abb. 4.10) und zweifach diagonale Fahrt (Abb. 4.11) statt.

Bei einer Geradeausfahrt bestimmt Sensor *H* direkt die Geschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung. Diese lässt sich ebenfalls aus den Messwerten der Sensoren *VL* und *VR* mit Gleichung 3.31 bestimmen. Beide Geschwindigkeiten sind vom Betrag identisch.

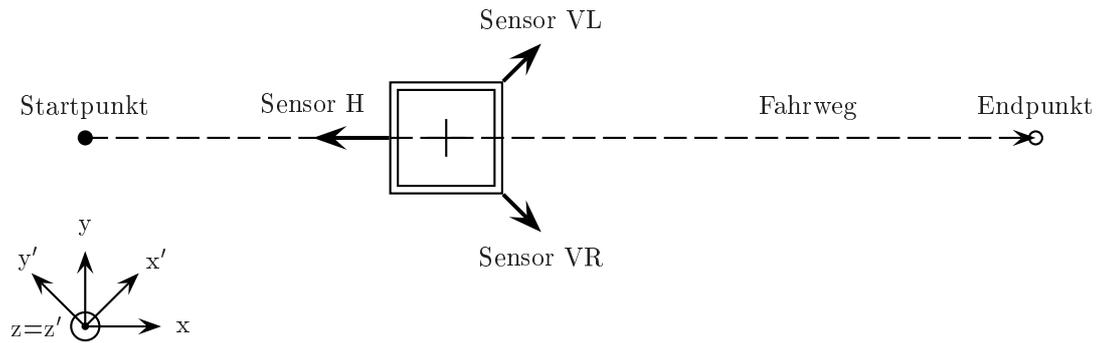


Abbildung 4.9: Streckenverlauf einer Geradeausfahrt bei Y-Sensoranordnung

Zur Bestimmung der Fahrzeugquergeschwindigkeit bei einer einfach diagonalen Fahrt (Abb. 4.10) werden nur die Sensoren *VL* und *VR* herangezogen. Sensor *H* bestimmt direkt die Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung. Die Bestimmung der Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung beruht auf dem betragsmäßigen Unterschied der Messwerte der beiden vorderen Sensoren. Da im Prüfstand keine Nick- und Wankschwingungen auftreten, die den Abstrahlwinkel  $\alpha$  der Sensoren verändern, ist das Fehlen der beiden hinteren Sensoren unerheblich für die Geschwindigkeitsermittlung.

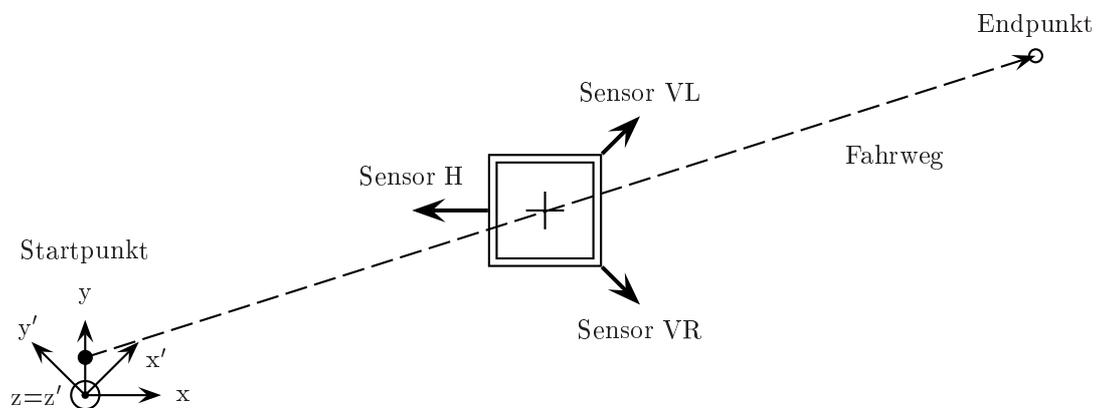


Abbildung 4.10: Streckenverlauf einer einfach diagonalen Fahrt bei Y-Sensoranordnung

Die zur einfach diagonalen Fahrt getätigten Äußerungen lassen sich auf die zweifach diagonale Fahrt (Abb. 4.11) übertragen. Der Richtungswechsel am Wendepunkt führt wie bereits bei der  $45^\circ$ -Sensoranordnung dazu, dass gegenüber dem ersten Streckenabschnitt, in dem Sensor *VR* gegenüber Sensor *VL* höhere Messwerte liefert, sich im zweiten Streckenabschnitt das Verhältnis beider Sensoren umkehrt. Damit ist die Bestimmung des Fahrweges und der Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung gewährleistet.

Die Tests bestätigten die getroffenen Annahmen unter idealen Bedingungen im

Prüfstand. Hingegen müssen in Feldversuchen die durch den Wegfall der Sensoren  $HL$  und  $HR$  auftretenden Nachteile bei der Berücksichtigung von Nicken und Wanken näher untersucht werden.

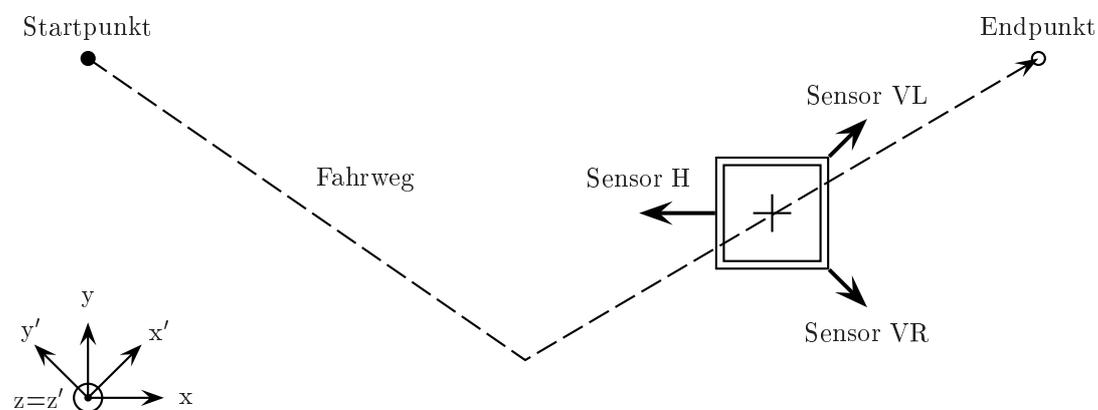


Abbildung 4.11: Streckenverlauf einer zweifach diagonalen Fahrt bei Y-Sensoranordnung

### 4.3 Feldversuche

Zur Verifizierung der im Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse und der Erprobung der einzelnen Sensoranordnungen im praktischen Einsatz auf dem Feld und der Straße dienten Feldversuche. Weitere Bestandteile dieser Versuche waren der Test einzelner über den Projektzeitraum entwickelter Komponenten sowie der Test des Gesamtsystems.

Die Feldversuche wurden mit der in Abbildung 4.12 gezeigten Messanordnung an drei Versuchsstandorten mit folgenden Vorgaben durchgeführt:

- Versuchsstandort 1: Untersuchung der Sensoren bei Geradeausfahrten auf Asphalt
- Versuchsstandort 2: Sensoranalyse bei Kreisfahrten auf Asphalt
- Versuchsstandort 3: Untersuchung der Sensoren über bewachsenem Grund bei verschiedenen Streckenverläufen und GPS-Abschattung

Zur erfolgreichen Verifizierung und Erprobung musste eine vom Traktor autonome Lösung konstruiert werden. Folgende Kriterien wurden bei der Konstruktion und Umsetzung der Lösung berücksichtigt:

- Geschlossenes System für den Allwettereinsatz mit Stauraum für Sensoren und Messgeräte
- Unabhängigkeit vom verwendeten Traktor
- Anbaumöglichkeit in der Dreipunkt-Heckhydraulik des Traktors

- Anschluss an die LBS-Steckdose des Traktors für die Stromzufuhr
- zusätzliche Möglichkeit der Stromversorgung durch ein Notstromaggregat
- Spannungsversorgung für 12V-Geräte (Radarsensoren, Trackerprisma) und 220V-Geräte (ESMERALDA-Station, Monitor)
- Mitfahrgelegenheit zur Überwachung der Messanordnung und der Datenaufzeichnung
- festgelegte Montagepunkte für (D)GPS-Antenne und Trackerprisma

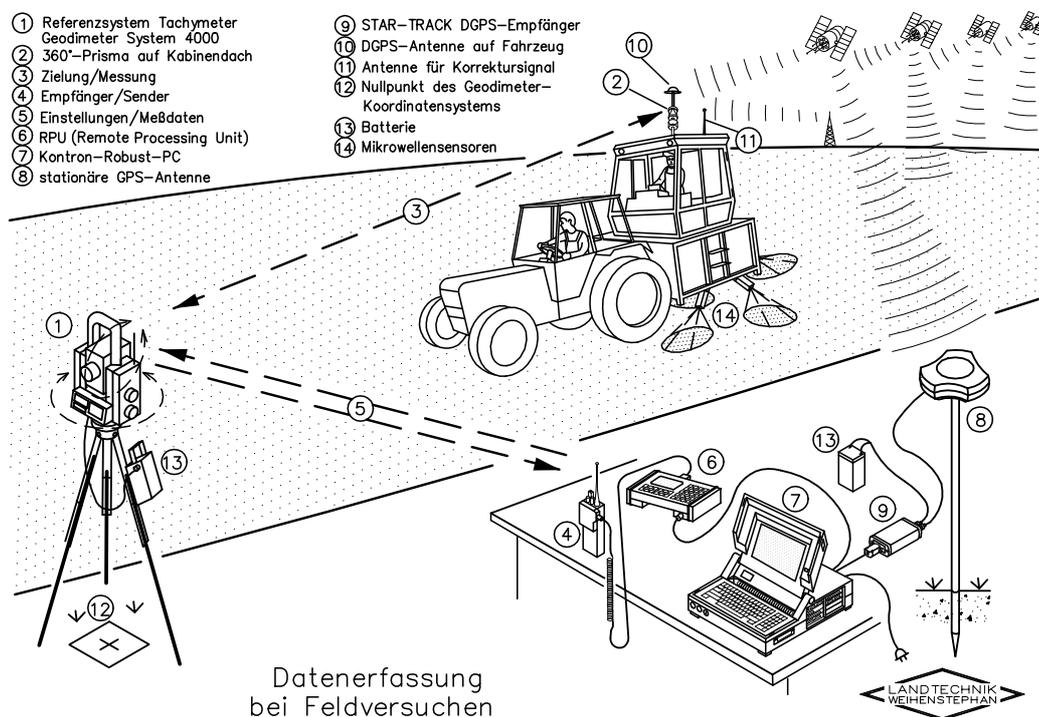


Abbildung 4.12: Messanordnung bei Feldversuchen

Als Lösung wurde eine Messkabine entworfen und gebaut, bestehend aus einem Unterbau und einer MB-Trac-Fahrerkabine, die eigens für dieses Vorhaben beschafft wurde (Abb. 4.13).

Der Unterbau dient als Träger für den Sensorrahmen und die Fahrerkabine. Gleichzeitig bietet er die Möglichkeiten der Aufnahme eines Notstromaggregates, falls die vom Traktor zur Verfügung gestellte Spannung nicht ausreichend ist, sowie Stauraum für weitere Sensoren und Messgeräte für den Transport zum Versuchsstandort. Die Messkabine ist vom Traktor in ihrer Anbauhöhe und Lage zum Grund einstellbar. Dadurch kann der Abstand der Sensoren über Grund auf ein vom Hersteller vorgegebenes optimales Maß justiert und das gesamte System im Lot ausgerichtet werden.



Abbildung 4.13: Traktor mit Messkabine

Die GPS/GLONASS-Antenne der ESMERALDA-Station wurde direkt über dem Trackerprisma vom Geodimeter System 4000 auf dem Messkabinendach montiert (Abb. 4.14). Damit befanden sich das Trackerprisma mit der aufgesetzten GPS/GLONASS-Antenne und der Mittelpunkt des Sensorrahmens an der Unterseite der Messkabine auf einer Achse. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass kein räumlicher Versatz in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung zwischen dem eingehenden Satellitenortungssignal, den Messwerten vom Geodimeter System 4000 und den Signalen der Radarsensoren berücksichtigt werden muss. Im Vordergrund ist die DGPS-Antenne eines Trimble AgGPS 132 DGPS-Empfängers zu sehen.

Unterhalb der Messkabine war der aus dem Prüfstand bekannte Rahmen mit den zu untersuchenden Radarsensoren befestigt. Abbildung 4.15 zeigt die Y-Anordnung. Der Rahmen zur Aufnahme der Sensoren ist so ausgelegt, dass an allen 4 Eckpunkten des Rahmens ( $45^\circ$ -Anordnung) und den Mittelpunkten jeder Rahmenseite ( $90^\circ$ -Anordnung) Radarsensoren montiert werden können, wobei der horizontale Montagewinkel zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  und der vertikale Montagewinkel zwischen  $10^\circ$  und  $70^\circ$  frei wählbar ist. Eine Kombination der Montagepunkte kommt bei der Y-Anordnung zur Anwendung.



Abbildung 4.14: GPS/GLONASS-Antenne und Trackerprisma

Die ESMERALDA-Station mit Monitor und Eingabegeräten sowie das Funkmodem zum Empfang der von der lokalen GPS/GLONASS-Referenzstation generierten Korrekturdaten befanden sich in der Messkabine. Die aktuellen Positionsdaten und die Signale der Radarsensoren wurden auf dem Monitor zur Überwachung online dargestellt und auf der ESMERALDA-Station gespeichert. In die ESMERALDA-Station sind ein differentieller GPS/GLONASS-Empfänger und eine Datenerfassungskarte für die Signale der Radarsensoren integriert. Die Spannungsversorgung der Station und des Monitors übernahm einen Spannungswandler 12V/220V.

Auf dem Versuchsfeld wurde durch den Einsatz einer lokalen GPS/GLONASS-Referenzstation eine hohe Ortungsgenauigkeit erzielt. Deren Antenne war an einem vermessenen Punkt auf dem Versuchsfeld aufgebaut. Die Koordinaten für die Antennenposition der lokalen Referenzstation wurden in einem Initialisierungsfile gespeichert. Damit wurde sichergestellt, dass auch nach dem Wechsel der Versuchstandorte gleiche Rahmenbedingungen für Versuchswiederholungen vorlagen. Die Korrekturdaten der lokalen GPS/GLONASS-Referenzstation wurden über eine Funkmodemverbindung zur ESMERALDA-Station in der Messkabine gesendet.



Abbildung 4.15: Radarsensoren in Y-Anordnung

Bei der Wahl des in Abbildung 4.16 gezeigten Aufstellortes für das Geodimeter System 4000 mussten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- keine Lageänderung während der Messung und darüber hinaus durch Umwelteinflüsse wie Regen oder direkte Sonneneinstrahlung
- direkte Sichtverbindung zum Trackerprisma auf der Messkabine
- einmalige Einmessung des Standortes mit DGPS und Markierung des Punktes

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde eine betonierte Aufstellfläche, welche die Anbringung einer dauerhafter Markierung erlaubt, als Standort ausgewählt.

Wechselnde Eigenschaften des Untergrundes während der Messungen führen zu räumlichen Veränderungen der Tachymeterlage. Größere Lageverschiebungen haben den automatischen Abbruch der Messung zur Folge, da der interne Kompensator des Tachymeters die Neigungsfehler nicht mehr ausgleichen kann.

Die Messwerte vom Geodimeter System 4000 wurden über eine Telemetrieverbindung zu einem PC gesendet und zusammen mit den eingehenden Daten eines angeschlossenen (D)GPS-Empfängers gespeichert. Anhand des GPS-Zeitstempels

wurden die Messwerte des Tachymeters und die in der Messkabine aufgezeichneten Werte synchronisiert. Erst dieser Schritt ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen Radarsensoren, differentiellem GPS/GLONASS-System und Geodimeter System 4000.



Abbildung 4.16: Referenzsystem Geodimeter System 4000

Vor Beginn einer Messung muss dem Referenzsystem (Geodimeter System 4000) ein lokales Koordinatensystem zugeordnet werden. Der Nullpunkt dieses Koordinatensystems liegt dabei immer auf der Markierung des Tachymeterstandortes G. Die Lage der Achsen des Koordinatensystems wird durch die Vorgabe eines zweiten Punktes (Referenzpunkt R) festgelegt. Dieser Punkt befindet sich ebenfalls auf dem Versuchsfeld und liegt außerhalb des Fahrbereiches. Er ist ebenfalls fest markiert und mit DGPS eingemessen. Die Verbindungslinie vom Standort des Tachymeters zum Referenzpunkt legt eine Achse des Tachymeterkoordinatensystems fest. Die senkrechte Achse des räumlichen Koordinatensystems vom Geodimeter System 4000 stellt dieses selbst zur Verfügung. Die Einmessung des Tachymeterstandortes und des Referenzpunktes mit DGPS ermöglicht bei der Datenauswertung die Konvertierung der in der Messkabine gewonnenen differentiellen GPS/GLONASS-Daten in das lokale metrische Nord-Ost-Koordinatensystem.

Den Feldversuchen liegt damit die in Abbildung 4.17 gezeigte Messkette zugrunde. Die innerhalb des eingezeichneten Rahmens liegenden Komponenten befanden sich am Fahrzeug und waren mobil. Alle anderen Teile der Versuchsanordnung waren stationär auf dem Versuchsfeld angeordnet.

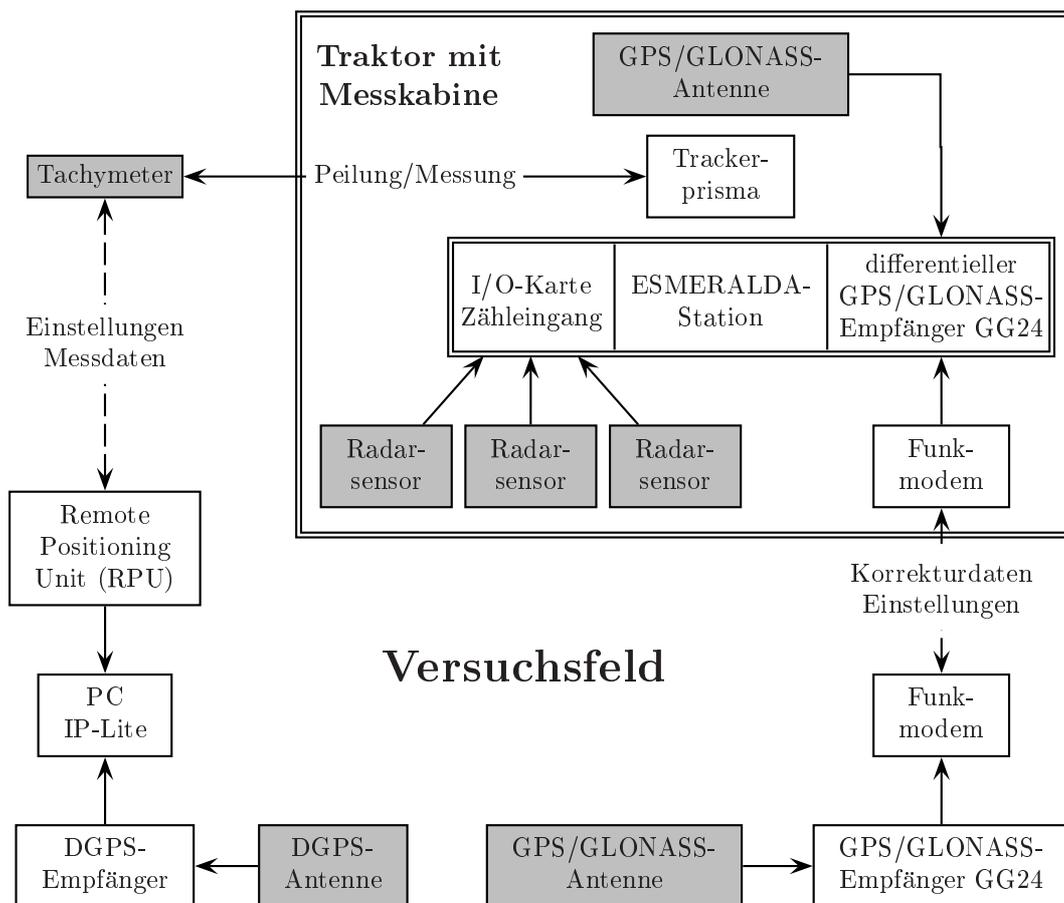


Abbildung 4.17: Messkette für Feldversuche

### 4.3.1 Messanordnung am Versuchsstandort 1

Am Versuchsstandort 1 fanden die ersten Tests außerhalb des Prüfstandes statt. Der Versuchsaufbau entsprach der in Abbildung 4.12 gezeigten Messanordnung. Als Messuntergrund diente eine ebene geteerte Straße, auf der Geradeausfahrten in einer Richtung durchgeführt wurden. Die zur fehlerfreien DGPS-Ortung notwendige freie Sicht war jederzeit gegeben. Abschattungseffekte oder Mehrwegausbreitung können ausgeschlossen werden.

Abbildung 4.18 stellt die Anordnung der Komponenten dar. Die Fahrspur verläuft geradlinig vom Startpunkt zum Endpunkt in Richtung Tachymeter. Startpunkt, Endpunkt, Standort des Tachymeters und Referenzpunkt des Tachymeters wurden mit DGPS vermessen und markiert. Die GPS/GLONASS-Referenzstation wurde an einem vorhandenen ortsfesten Punkt aufgestellt. Dessen Koordinaten wurden in einer Initialisierungsdatei auf der ESMERALDA-Station gespeichert. Zu Beginn der Versuchsreihen wurde die GPS/GLONASS-Referenzstation über eine Telemetrierbindung von der ESMERALDA-Station konfiguriert und auf die Koordinaten des Versuchsstandortes 1 eingestellt. Anschließend stand sie für

die Korrekturdatenermittlung zur Verfügung.

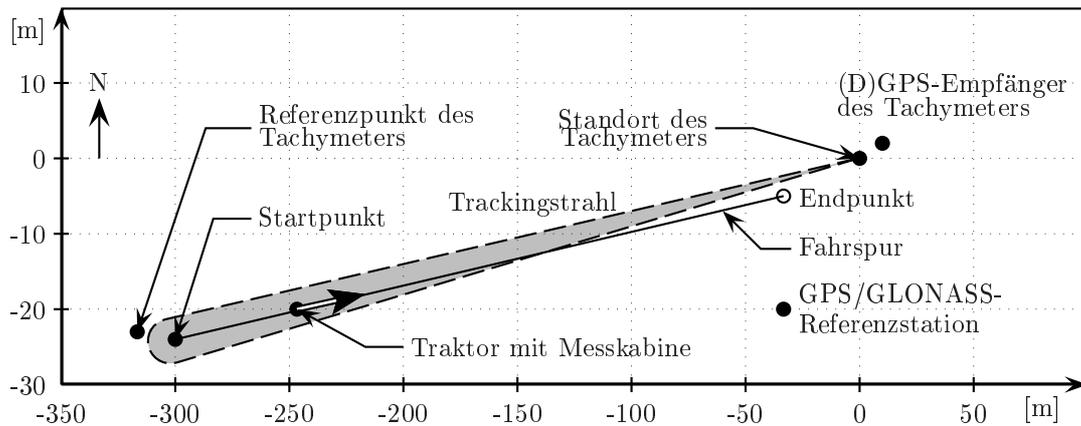


Abbildung 4.18: Anordnung der Messkomponenten am Versuchstandort 1

Der Startpunkt des Traktors mit Messkabine wurde zu Beginn jeder Messfahrt mit DGPS eingemessen. Die Versuchsfahrten gliederten sich in Gruppen mit verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten von 5 bis 15 km/h.

### 4.3.2 Messanordnung am Versuchstandort 2

Zur Überprüfung der im Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse zu den Diagonalfahrten mussten Kreisfahrten in der Praxis absolviert werden. Dazu wurde der Versuchstandort 2 ausgewählt. Die Fahrbahn ist geteert und kreisförmig angelegt. Abschattungseffekte und Mehrwegausbreitung treten an diesem Standort nicht auf, da weder hohe Gebäude, Berge noch Wald die Sicht versperren. Die in Abbildung 4.19 dargestellten Standorte des Tachymeters, des Referenzpunktes des Tachymeters und der lokalen GPS/GLONASS-Referenzstation wurden mit DGPS eingemessen und dauerhaft markiert.

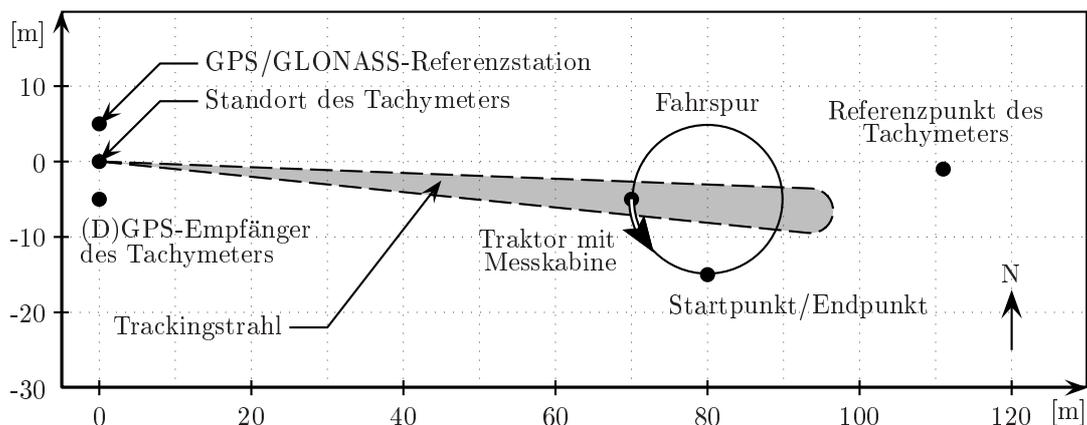


Abbildung 4.19: Anordnung der Messkomponenten am Versuchstandort 2

Zu Beginn jeder Messung wurde der Startpunkt, der zugleich Endpunkt war, mit DGPS eingemessen. Die Messfahrten fanden entlang der dargestellten Kreisbahn

im Uhrzeigersinn und entgegengesetzt dazu bei Geschwindigkeiten von 5, 10 und 15 km/h statt. Eine Messreihe beinhaltete mindestens 10 Kreisfahrten in eine Richtung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit.

### 4.3.3 Messanordnung am Versuchsstandort 3

Am Versuchsstandort 3 stand eine Wiese mit angrenzendem Wald als Versuchsfläche zur Verfügung. Auf der Wiese wurden drei parallel laufende Fahrspuren gemäß Abbildung 4.20 angelegt und fest markiert, so dass identische Bedingungen für Anschlussversuche vorlagen. Der Abstand zwischen den Fahrspuren betrug 7,5 m. Die erste Fahrspur verlief geradlinig am Waldrand entlang. Mittels DGPS wurde der Startpunkt über einen Zeitraum von 5 min eingemessen. Gleichzeitig ermittelte das Tachymeter die Lage des Standortes von Traktor mit Messkabine. Damit stand ein definierter Startpunkt zur Verfügung. Die Wahl des Startpunktes erfolgte unter der Maßgabe, dass keine Beeinträchtigungen bei der DGPS-Ortung durch Abschattung oder Mehrwegausbreitung auftreten. Im Gegensatz dazu ist aus dem Verlauf der Fahrspur 1 entlang des Waldrandes die Annahme abzuleiten, dass in dieser Fahrspur mit der größten Abschattung zu rechnen ist.

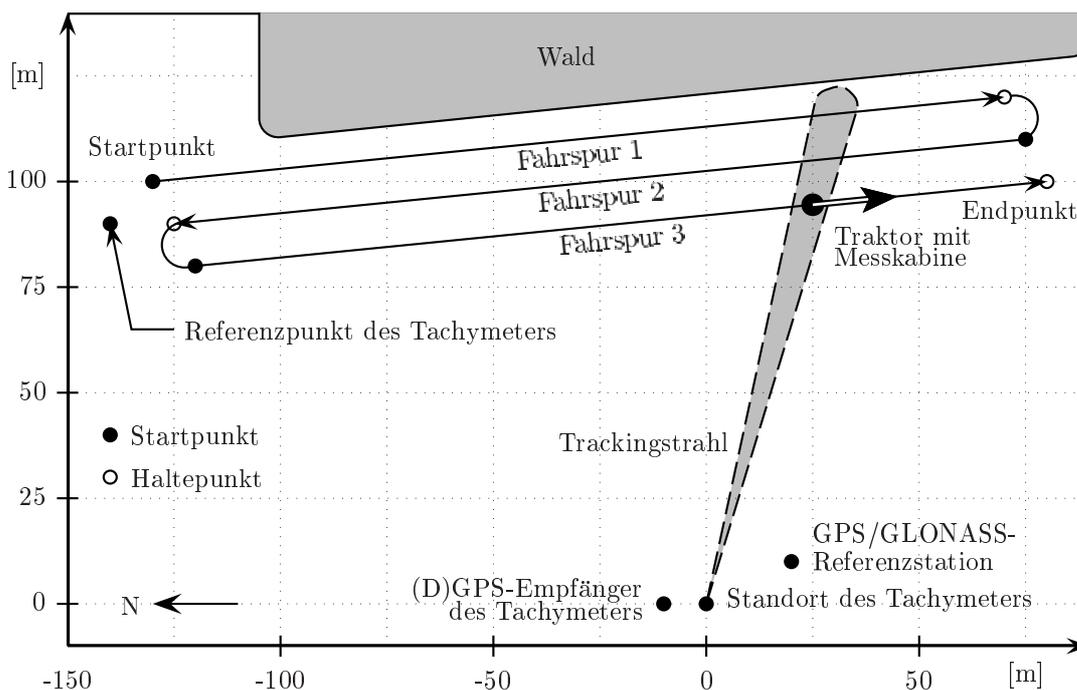


Abbildung 4.20: Anordnung der Messkomponenten am Versuchsstandort 3

Abbildung 4.21 zeigt einen Teil des Versuchsaufbaus im Original. Zu sehen ist der Traktor mit Messkabine am Beginn der Fahrspur 1. Die weißen Stäbe kennzeichnen von hinten nach vorn gesehen den Startpunkt in Fahrspur 1, den Haltepunkt am Ende der Fahrspur 2 und den Startpunkt der 3. Fahrspur. Links neben dem Traktor ist ein zweites, auf einem Dreifuß befestigtes Prisma zu sehen, welches den Referenzpunkt des Tachymeters markiert.

Während der gesamten Fahrt verfolgte das Tachymeter das Prisma auf der Messkabine und erfasste die Schrägdistanz, die Horizontalrichtung sowie den Vertikalwinkel. Am Ende der Fahrspur 1 stoppt der Traktor für den Zeitraum von 1 min. Der Haltepunkt wurde wiederum mit DGPS und dem Geodimeter System 4000 eingemessen. Anschließend wendete der Traktor, hielt zur Einmessung am Startpunkt der Fahrspur 2, fuhr die Fahrspur 2 zurück und stoppte zur Einmessung des Haltepunktes am Ende der Fahrspur 2. Das zweite Wendemanöver, der Stopp, die Fahrt in Fahrspur 3 mit einem Abstand von ca. 15 m zur Fahrspur 1 und der Halt am Ende der Fahrspur 3 beendeten einen Versuchsdurchlauf. Das gezielte Einmessen jedes Start- und Haltepunktes einer Fahrspur diente der Verbesserung der Ortungsgenauigkeit mit DGPS. Der beschriebene Versuchsablauf wurde bei Geschwindigkeiten von 5, 10 und 15 km/h in mehrfacher Wiederholung durchgeführt.

Zusätzlich fuhr der Traktor in einer 4. Fahrspur unmittelbar die Kontur des Waldrandes ab. Diese Fahrspur war nicht geradlinig und verlief zwischen der Fahrspur 1 und dem Wald. Bei dieser Fahrt ist mit der maximalen Abschattung des Satellitensignals zu rechnen.



Abbildung 4.21: Startpunkt, 2. Wendepunkt und Startpunkt in Fahrspur 3

Neben den Tests in festgelegten Fahrgassen bedurfte es einer gezielten Untersuchung von Kurvenfahrten. Dazu wurden am Versuchstandort 3 verschiedene Streckenverläufe angelegt (Abb. 4.22). Kreisfahrten im und entgegen dem Uhrzeigersinn, das Abfahren eines Ovals im und entgegen dem Uhrzeigersinn sowie

das Abfahren einer Acht gehörten zum Versuchsprogramm.

Der Aufbau der Messanordnung entsprach den Versuchen bei Geradeausfahrten in den 3 angelegten Fahrgassen. Jede Figur wurde in mindestens 5-facher Wiederholung und ohne Unterbrechung bei verschiedenen Geschwindigkeiten abgefahren.

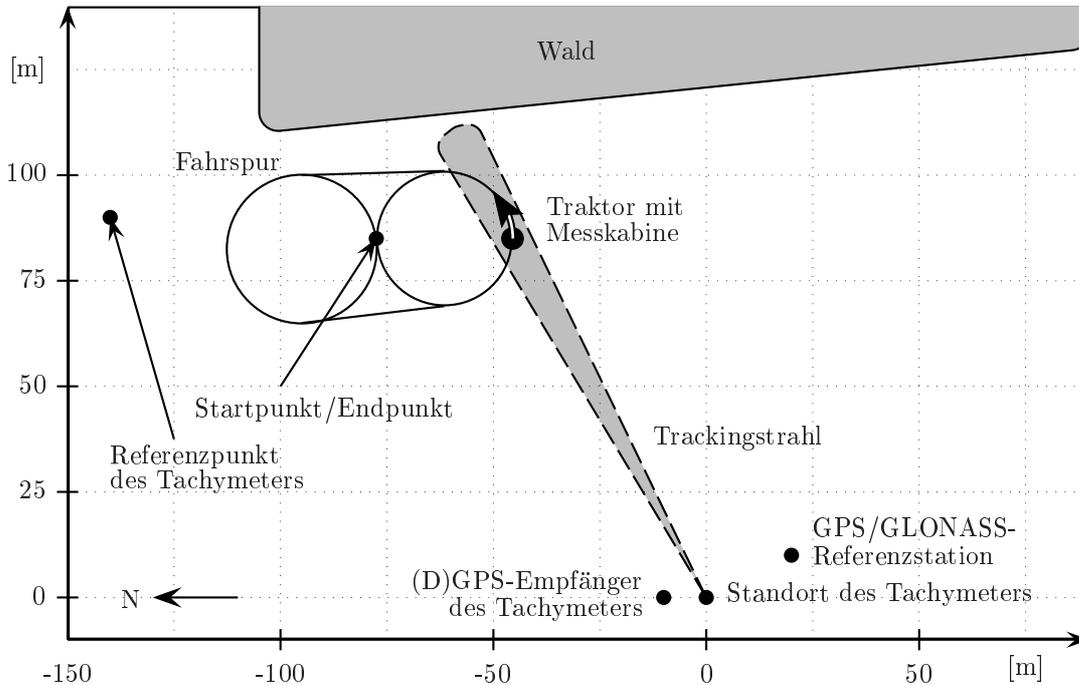


Abbildung 4.22: Anordnung der Messkomponenten bei Kreisfahrten am Versuchstandort 3

Neben den Untersuchungen der unterschiedlichen Anordnungen von Radarsensoren dienten die Kreisfahrten zugleich als Test der eingesetzten DGPS-Empfänger hinsichtlich ihres Verhaltens bei wechselnden Fahrtrichtungen. Hierbei spielt der im DGPS-Empfänger integrierte Auswertalgorithmus eine entscheidende Rolle. Im Rahmen dieser Arbeit werden bei der Ergebnisvorstellung bestimmte Verhaltensmuster der DGPS-Empfänger aufgezeigt.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Untersuchungen im Prüfstand

#### 5.1.1 Fahrversuche in 90°-Sensoranordnung

Die Basis für erste Versuche bildete die 90°-Sensoranordnung mit vorerst nur 2 Radarsensoren. Davon wurde ein Sensor in Fahrtrichtung und ein weiterer Sensor nach rechts strahlend montiert. Zur Ermittlung der Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung ist diese Konfiguration ausreichend. Auftretende Neigungswinkel werden mit dieser Anordnung nicht erfasst.

An erster Stelle stand die Durchführung von Geradeausfahrten. Beide Sensoren wurden mit dem herstellereitig vorgegebenen Abstrahlwinkel  $\alpha = 35^\circ$  an den Sensorrahmen angebaut. Die Geschwindigkeit in x-Richtung wurde durch die Stromaufnahme eines Stellmoduls variiert. Bereitgestellt wurden Stromstärken von  $I = 10 \text{ mA}$ ,  $I = 15 \text{ mA}$  und  $I = 20 \text{ mA}$ . Die Geschwindigkeit  $v$  steigt proportional zur Stromstärke  $I$ . Alle Versuche gliedern sich in Messreihen und Versuchsläufe. Anhand der Messreihennummer ( $M\text{-Nr.}$ ) sind die spezifischen Versuchparameter ablesbar. Innerhalb jeder Messreihe fanden  $n = 10$  Wiederholungen statt, die jeweils mit einer Versuchslaufnummer ( $V\text{-Nr.}$ ) gekennzeichnet wurden. Tabelle B.1 enthält alle Versuchparameter zu dieser Anordnung.

Die Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 zeigen jeweils einen repräsentativen Versuchslauf aus den Messreihen 1 bis 3.

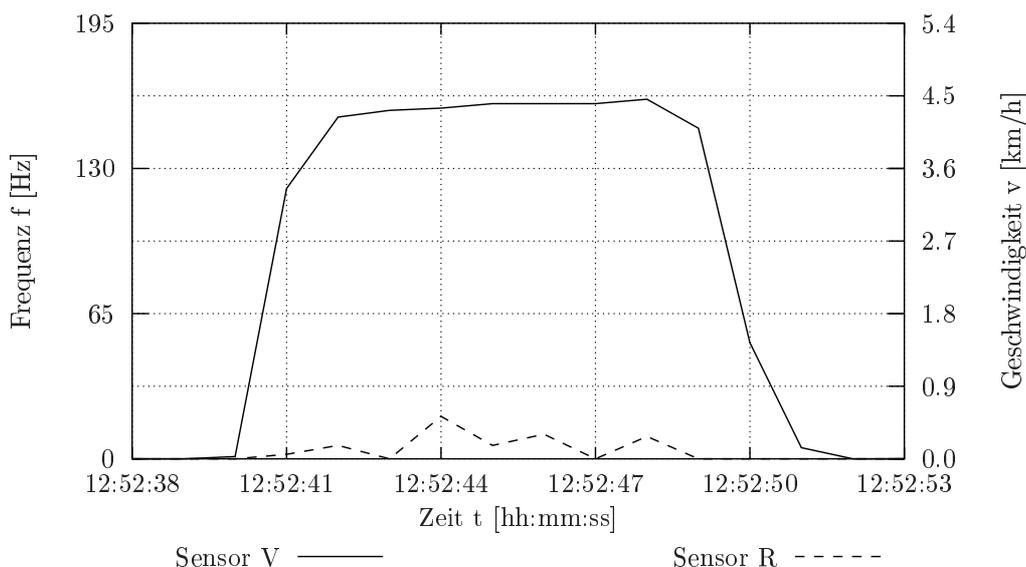


Abbildung 5.1: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-3

In diesen Diagrammen sind der zeitliche Verlauf der von Sensor *V* und Sensor *R* ermittelten Frequenzen sowie die zugehörigen Geschwindigkeiten dargestellt. Für diese Fahrten wurden die korrekte Bestimmung der Geschwindigkeit in x-Richtung durch Sensor *V* und die Messung der Geschwindigkeit  $v = 0$  km/h in y-Richtung durch Sensor *R* erwartet. Auffallend ist der schwankende Verlauf der Messwerte von Sensor *R*, obwohl in dessen Messrichtung keine Bewegung stattgefunden hat.

Steigt die Fahrgeschwindigkeit an, so verringern sich die Schwankungen in den Messwerten des rechten Sensors. Die gemessene Geschwindigkeit dieses Sensors hält sich jetzt auf einem konstanten Niveau (Abb. 5.2). Die Messkurve von Sensor *R* steigt im Vergleich zu Sensor *V* verspätet an. Es ist davon auszugehen, dass die Fehlmessung in Querrichtung durch die Geschwindigkeit in Längsrichtung hervorgerufen wird.

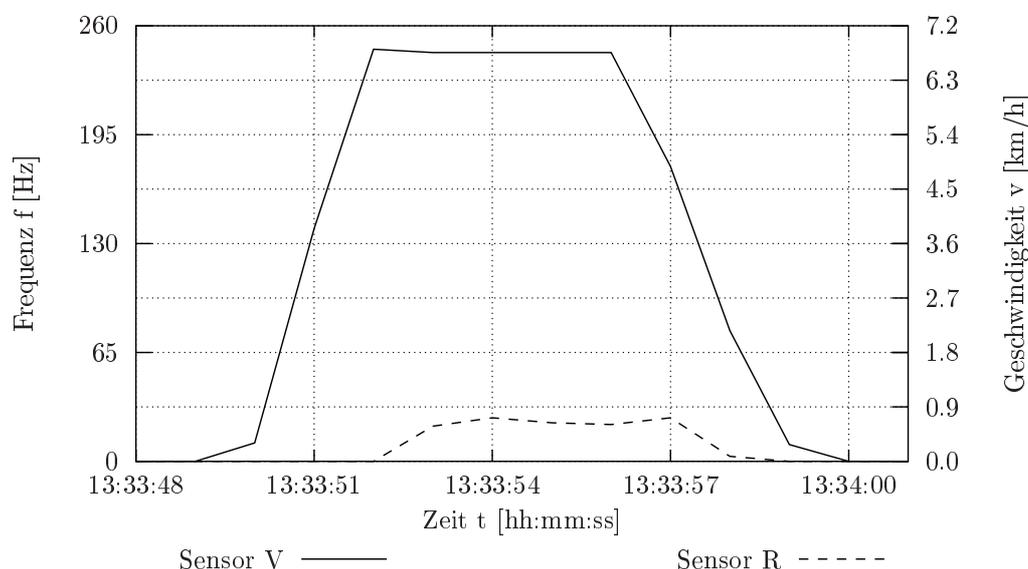


Abbildung 5.2: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-1

Bei Messfahrt 3-1 mit der höchsten im Prüfstand zulässigen Fahrgeschwindigkeit setzt sich dieses Verhalten fort. Der rechte Sensor ermittelt nun Geschwindigkeiten, die denen von Sensor *V* folgen. Sie bewegen sich jedoch auf einem niedrigeren Niveau.

Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der 3 behandelten Messreihen sowie der Minima und Maxima von Sensor *R* zeigt Tabelle 5.1. Den Werten ist der jeweilige Bereich mit konstanter Fahrgeschwindigkeit bei  $n = 10$  Wiederholungen zugrunde gelegt. Beschleunigungsvorgang und Abbremsvorgang wurden nicht berücksichtigt.

Auffallend sind die hohen Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für

die Messwerte des rechten Sensors. Diese resultieren aus dem sporadischen Abfall des Messwertes auf 0. Bei Messreihe 3 tritt dieser Fall nicht ein, so dass Standardabweichung und Variationskoeffizient deutlich geringer ausfallen. Der Wert  $\bar{f}_{r_{min}} = 11\text{Hz}$  besitzt nur eine geringe Aussagekraft, da innerhalb der 2. Messreihe bei 5 Versuchsläufen  $f_{r_{min}} = 0\text{Hz}$  und bei den weiteren Versuchsläufen  $f_{r_{min}} \geq 18\text{Hz}$  gemessen wurden.

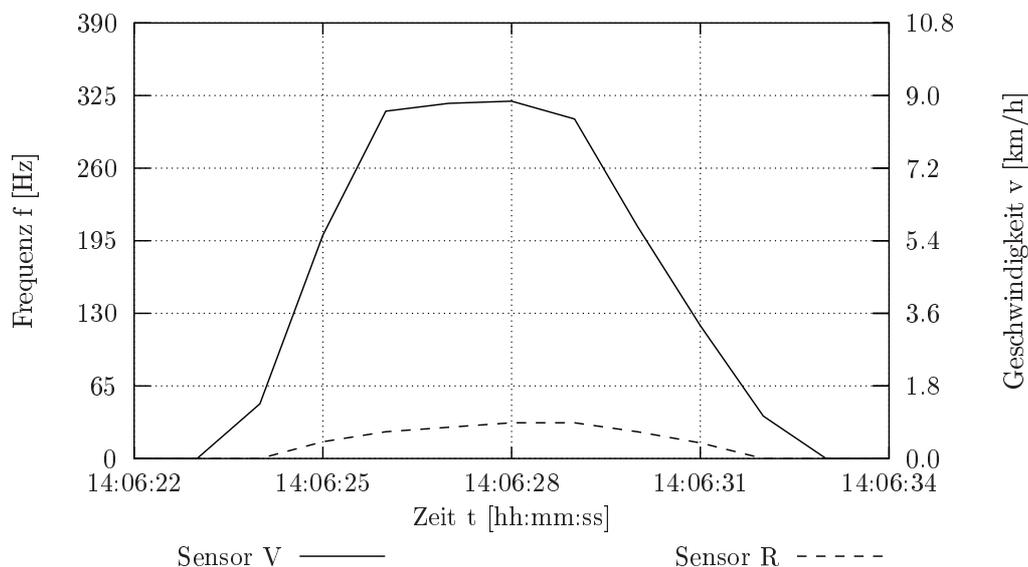


Abbildung 5.3: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-1

Tabelle 5.1: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{f}_v$ [Hz]	$\bar{s}_{f_v}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_v}$ [%]	$\bar{f}_r$ [Hz]	$\bar{s}_{f_r}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_r}$ [%]	$\bar{f}_{r_{min}}$ [Hz]	$\bar{f}_{r_{max}}$ [Hz]
1	159	1,4	0,9	9	7,6	84,4	0	21
2	244	1,0	0,4	20	6,0	30,0	11	26
3	318	2,3	0,7	25	4,0	16,0	21	30

Die gezeigten Ergebnisse entsprechen den Erwartungen nur zum Teil. Die durch Sensor  $R$  erzielten Messwerte sind unbefriedigend, da sie ein erhebliches Fehlerpotential beinhalten, welches erst bei Kurvenfahrten zum Tragen kommt. Zwar verringert sich der Fehler bei steigender Geschwindigkeit, kann aber nicht eliminiert werden. Zudem entsprechen die in den Versuchen gefahrenen Geschwindigkeiten den in der Praxis üblichen Arbeitsgeschwindigkeiten. Als Ursache für die Messfehler erweist sich die Empfindlichkeit des Radarsensors quer zu seiner Messrichtung. Im vorliegenden Fall wird das durch Sensor  $R$  erzielte Messergebnis maßgeblich durch die Fahrgeschwindigkeit in x-Richtung beeinflusst.

Zur Minimierung der Messfehler von Sensor  $R$  werden deshalb Veränderungen an der Messanordnung vorgenommen. Diese betreffen den Abstrahlwinkel  $\alpha_r$ , der in den folgenden Versuchen variiert wird. Gemäß der in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Messanordnung und der Gleichung 3.1 zur Bestimmung der Dopplerfrequenz führt eine Verkleinerung von  $\alpha_r$  zu einer Vergrößerung der gemessenen Geschwindigkeit und umgekehrt. Herausgegriffen wurde jeweils ein Beispiel aus den Messreihen 4 bis 6, welche mit den in Tabelle B.1 gelisteten Versuchsparametern absolviert wurden.

Die in den Abbildungen 5.4, 5.5 und 5.6 gezeigten Geschwindigkeitsverläufe sind mit dem in Abbildung 5.2 gezeigten Kurvenverlauf vergleichbar, da es sich um identische Fahrverläufe handelt. Die Verringerung des Abstrahlwinkels auf  $\alpha_r = 25^\circ$  zeigt im Vergleich zur Messfahrt 2-1 keine Veränderung in Bezug auf Minimalwert, Maximalwert oder Verlauf. Es kommt weiterhin zum sporadischen Abfall des Messsignals auf den Wert 0. Der Maximalwert hat sich nicht wie erwartet erhöht und befindet sich auf gleichem Niveau. Die fehlerhaft gemessene Geschwindigkeit in der Querrichtung hat sich nur unwesentlich verändert. Der damit verfolgte Ansatz, die Fehlmessung auf ein höheres, konstantes Geschwindigkeitsniveau zu heben, um sie anschließend als Konstante zu eliminieren, lässt sich somit nicht umsetzen.

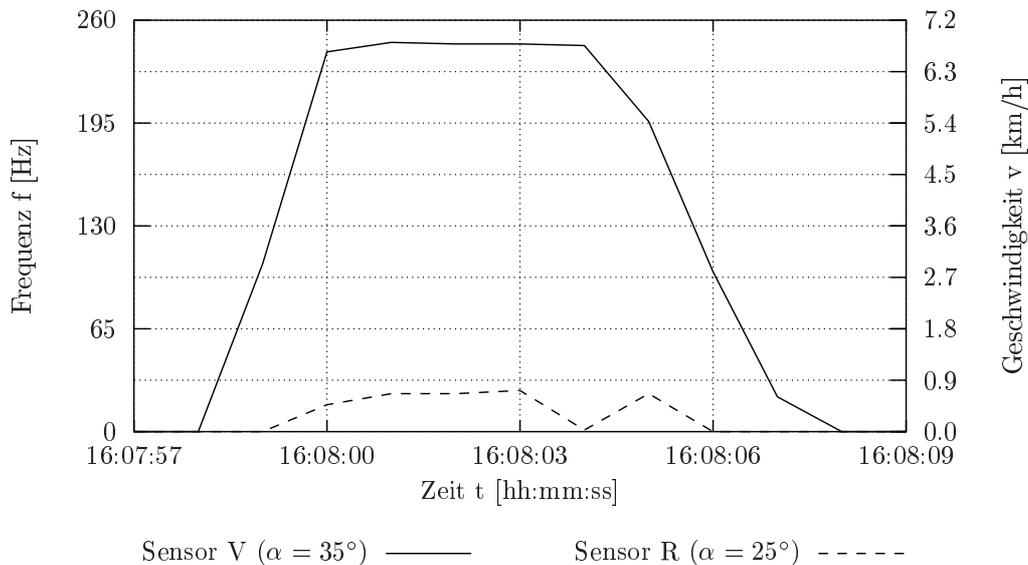


Abbildung 5.4: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-4

Die zweite Möglichkeit zur Beeinflussung des Messfehlers ist die Vergrößerung des Abstrahlwinkels  $\alpha_r$ , was zu einer Verringerung der erfassten Geschwindigkeit führen soll. Die beiden dargestellten Varianten mit  $\alpha_r = 60^\circ$  und  $\alpha_r = 86^\circ$  zeigen jedoch keine Absenkung der gemessenen Maximalgeschwindigkeit durch Sensor  $R$ . Trotz des fast senkrecht stehenden Sensor  $R$  bei  $\alpha_r = 86^\circ$  verändert sich der gemessene Fehlbetrag gegenüber kleineren Abstrahlwinkeln nur unwesentlich.

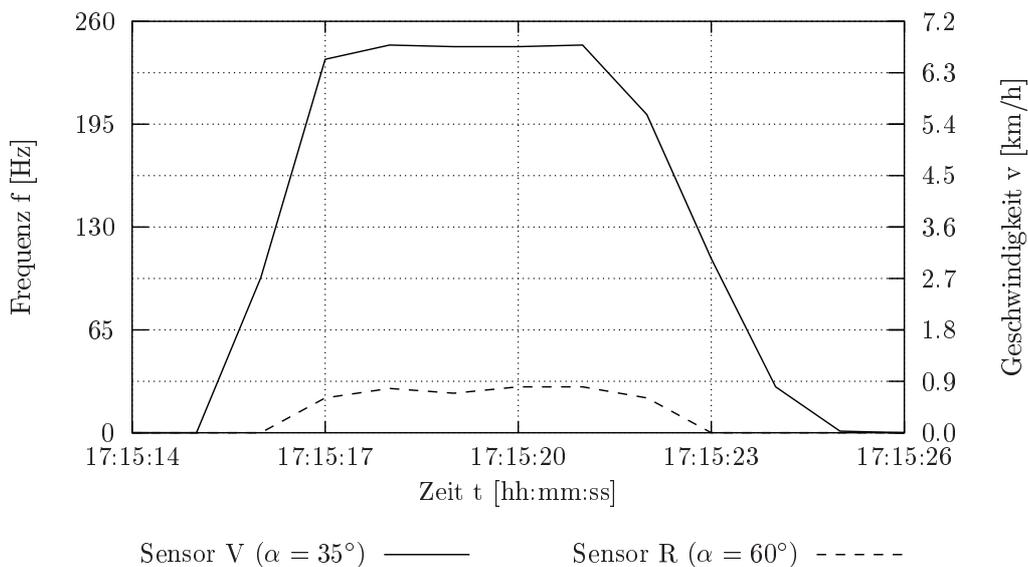


Abbildung 5.5: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-8

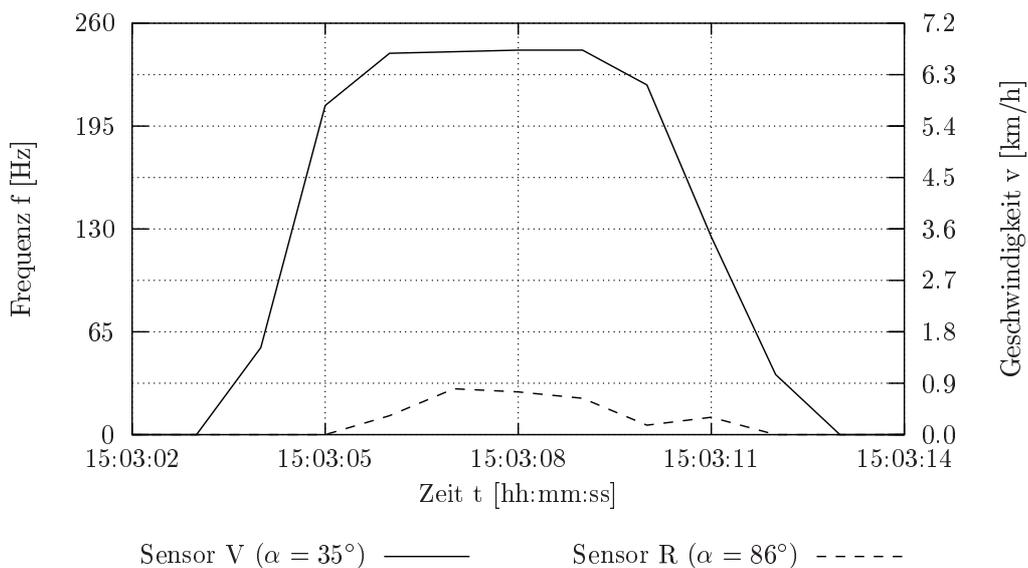


Abbildung 5.6: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-5

Auch bei den in Tabelle 5.2 zusammengefassten Mittelwerten, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten ist für den rechten Sensor keine eindeutige Tendenz erkennbar. Gegenüber der Messfahrt 2-1 haben sich die Mittelwerte der Frequenzen nicht erwartungsgemäß verändert. Genau entgegen den Annahmen vergrößerte sich der Mittelwert für  $\alpha_r = 86^\circ$ . Die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Messwerte des rechten Sensors weisen in Bezug zum Abstrahlwinkel kein nachvollziehbares Verhalten auf.

Tabelle 5.2: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung bei variierten Abstrahlwinkeln  $\alpha_r$  ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\alpha_v$ [°]	$\alpha_r$ [°]	$\bar{f}_v$ [Hz]	$\bar{s}_{f_v}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_v}$ [%]	$\bar{f}_r$ [Hz]	$\bar{s}_{f_r}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_r}$ [%]
2	35	35	244	1,0	0,4	20	6,0	30,0
4	35	25	244	1,5	0,6	23	4,4	19,1
5	35	60	244	0,6	0,2	24	5,6	23,3
6	35	86	242	1,0	0,4	25	4,0	16,0

Aus den Versuchsergebnissen und den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass diese Sensoranordnung die Erwartungen nur teilweise erfüllt und damit nur sehr bedingt einsetzbar ist. Von weiteren Prüfstandsuntersuchungen wird unter diesen Bedingungen abgesehen. Stattdessen wird die vollständige 90°-Sensoranordnung mit 4 Sensoren bei Feldversuchen an verschiedenen Standorten Praxistests unterzogen. Eine Alternative zur untersuchten Anordnung ist die 45°-Sensoranordnung, welche umfangreicheren Prüfstandsuntersuchungen unterzogen wurde.

### 5.1.2 Fahrversuche in 45°-Sensoranordnung

Neben der Geradeausfahrt wurde das Versuchsprogramm um die Streckenverläufe einfach und zweifach diagonale Fahrt erweitert. Je Messreihe erfolgten jeweils  $n = 10$  Versuchswiederholungen mit den in Tabelle B.2 gezeigten Versuchsparametern. Alle 4 Sensoren wurden unter einem Abstrahlwinkel  $\alpha = 35^\circ$  montiert. Zur Veranschaulichung dient wieder je Messreihe ein Versuchslauf in Diagrammform.

#### 5.1.2.1 Geradeausfahrten

In der Abbildung 5.7 ist der 5. Versuchslauf der 1. Messreihe dargestellt. Die Graphen der einzelnen Sensoren verlaufen, wie bei einer Geradeausfahrt erwartet, nahezu identisch. Das heißt alle Sensoren erhalten die gleiche Weginformation aus der x-Richtung und keine Information aus der y-Richtung. Beim Abbremsen kommt der Rahmen mit den Sensoren nicht vollständig zum Stillstand, sondern wird mit Rangiergeschwindigkeit in die Endposition gefahren. Aus diesem Grund fallen die Graphen am Ende der Abbremsphase nicht auf den Wert 0, sondern zeigen den Verlauf der Rangiergeschwindigkeit.

Ein identisches Verhalten ist auch bei einer höheren Geschwindigkeit zu beobachten (Abb. 5.8). Bei der 2. Messreihe gehen Abbremsvorgang und die Fahrt mit Rangiergeschwindigkeit ebenfalls unmittelbar ineinander über, so dass die Graphen den Wert 0 nicht erreichen.

Auch bei der 3. Messreihe (Abb. 5.9), welche mit der höchstmöglichen Geschwindigkeit gefahren wurde, ist der nahezu deckungsgleiche Verlauf der Graphen zu

erkennen. Im Gegensatz zur 1. und 2. Messreihe wurde bei dieser Messreihe der Rahmen mit den Sensoren bis zum Stillstand abgebremst, bevor die Fahrt mit Rangiergeschwindigkeit in die Endposition erfolgte.

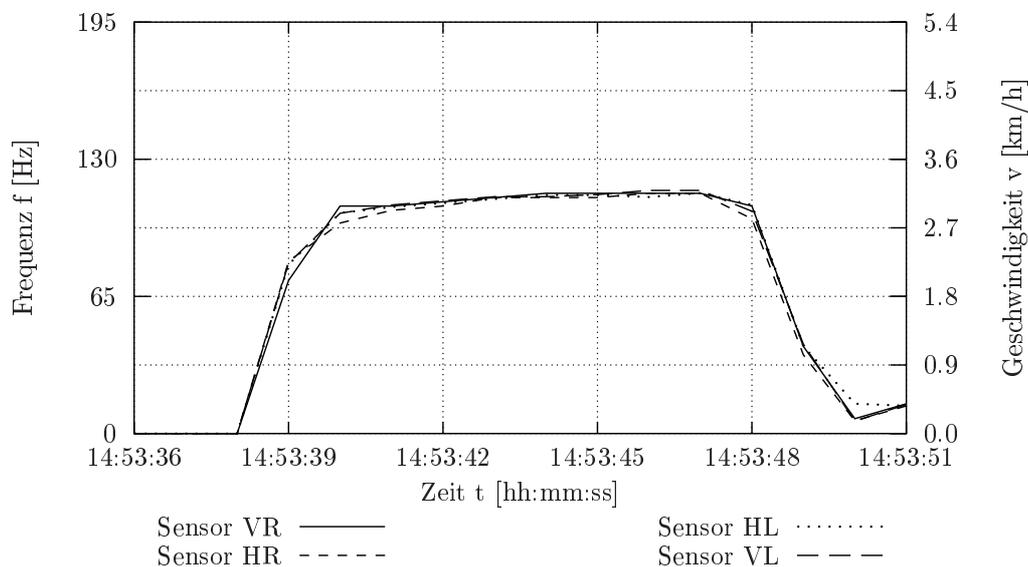


Abbildung 5.7: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-5

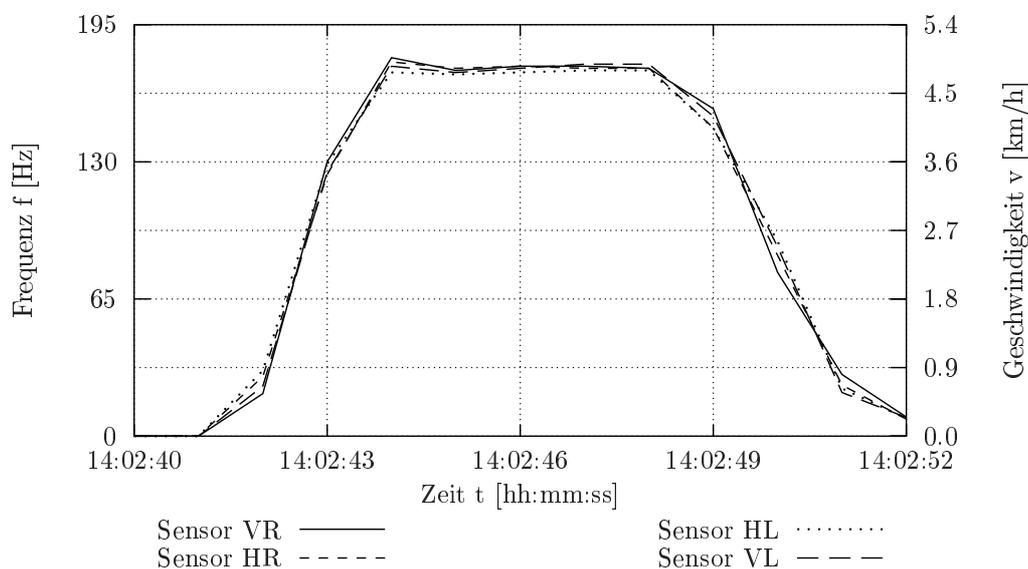


Abbildung 5.8: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-7

Tabelle 5.3 listet die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für die Messreihen 1 bis 3 auf. Zur Berechnung wurde der Abschnitt mit konstanter Geschwindigkeit herangezogen. Beschleunigungsphase und Abbremsphase blieben unberücksichtigt. Aus den sich daraus ergebenden Werten für jeden

Versuchslauf wurde der Mittelwert für  $n = 10$  Wiederholungen bestimmt.

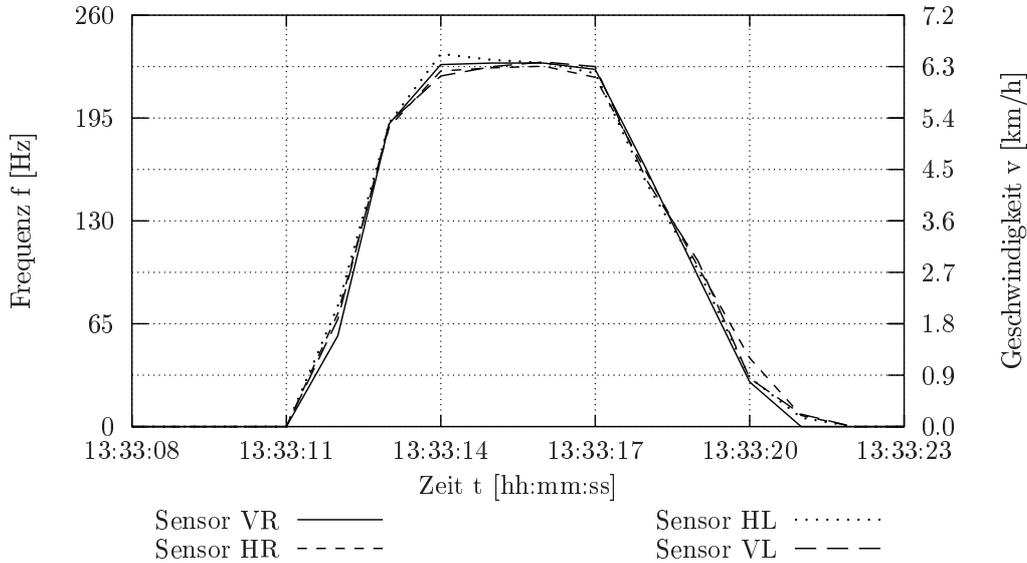


Abbildung 5.9: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-6

Tabelle 5.3: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in 45°-Anordnung ( $n = 10$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{hr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{hr}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{hr}}$ [%]	$\bar{f}_{hl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{hl}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{hl}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{vl}}$ [%]
1	113	1,5	1,3	113	1,2	1,1	112	1,2	1,1	113	1,3	1,2
2	175	1,5	0,9	173	2,3	1,3	172	1,2	0,7	176	1,6	0,9
3	227	3,1	1,4	226	3,3	1,5	225	4,1	1,8	226	4,2	1,9

Der Vergleich der in Tabelle 5.3 enthaltenen Werte zeigt die weitgehende Übereinstimmung bei den Mittelwerten innerhalb jeder Messreihe. Die maximale Standardabweichung und der maximale Variationskoeffizient sind in der 3. Messreihe bei Sensor *VL* anzutreffen. Sie betragen relativ zum Mittelwert 4,2% bzw. 1,9%.

Im Anschluss an die Geradeausfahrten standen erstmalig einfach diagonale Fahrten mit den in Tabelle B.2 enthaltenen Versuchseinstellungen auf dem Testprogramm. Dieser Streckenverlauf sollte Erkenntnisse zum Verhalten bei Kurvenfahrten erbringen.

### 5.1.2.2 Einfach diagonale Fahrten

Die Abbildungen 5.10, 5.11 und 5.12 für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten zeigen weitgehend identische Verläufe der Graphen von Sensor *VL* und Sensor *HR* bzw. Sensor *VR* und Sensor *HL*. Bedingt durch den Streckenverlauf ermitteln Sensor *VL* und Sensor *HR* betragsmäßig höhere Frequenzen als die beiden

anderen Sensoren.

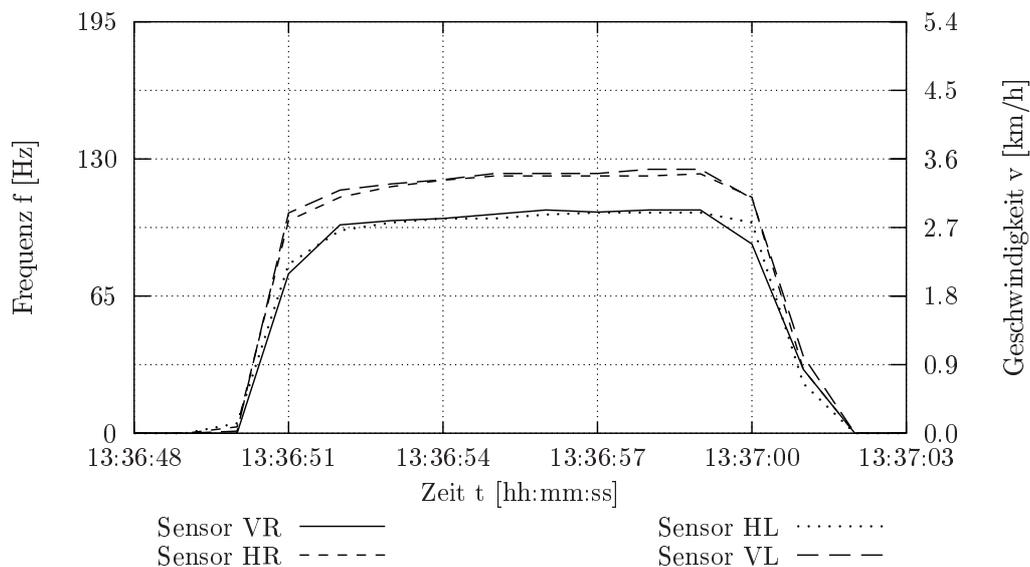


Abbildung 5.10: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-6

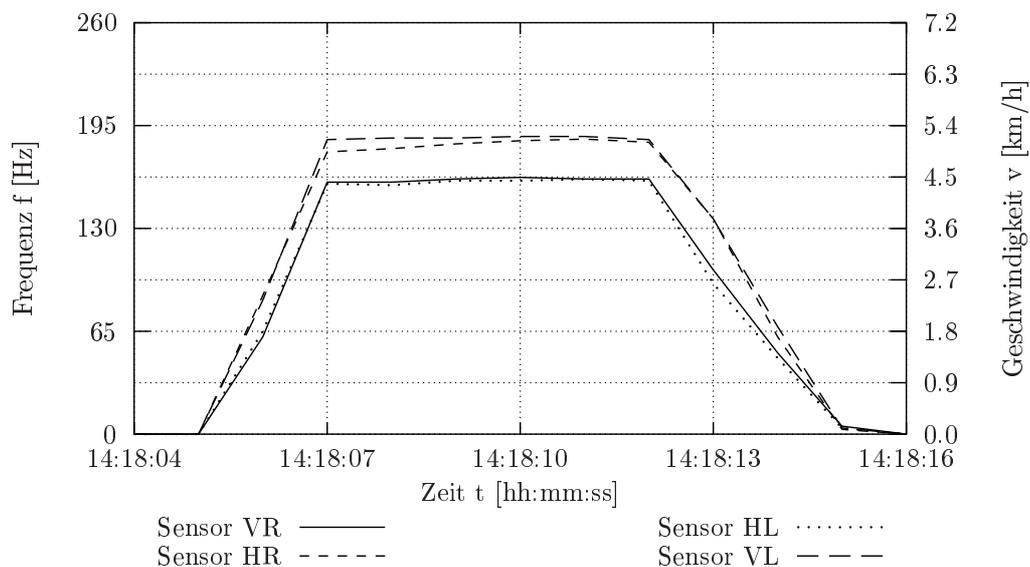


Abbildung 5.11: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-6

Eine Mittelwertbildung der Werte von Sensor *VL* und Sensor *HR* bzw. Sensor *VR* und Sensor *HL* aus Tabelle 5.4 innerhalb der 4. Messreihe ergibt einen prozentualen Unterschied zwischen beiden Mittelwerten von 17,8 %. Die Anwendung dieser Vorgehensweise auf Messreihe 5 und 6 führt zu Unterschieden von 14,9 % bzw. 11,9 %. Ursache für diese Tendenz ist die Prüfstandsgeometrie und der daraus resultierende, prozentual sinkende Anteil der Geschwindigkeit in y-Richtung

gegenüber der in x-Richtung. Während sich die Geschwindigkeit in x-Richtung bei Messreihe 6 gegenüber Messreihe 4 verdoppelt hat, ist in y-Richtung nur eine Zunahme von 23,8 % zu verzeichnen.

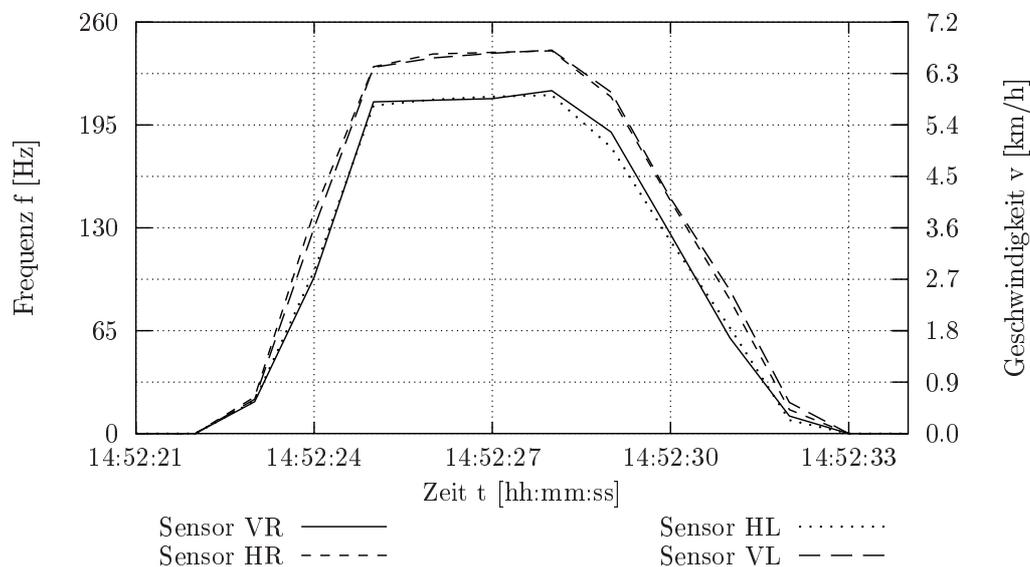


Abbildung 5.12: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-8

Tabelle 5.4: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei einfach diagonalen Fahrten in 45°-Anordnung ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{hr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{hr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{hr}}$ [%]	$\bar{f}_{hl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{hl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{hl}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
4	104	1,6	1,5	122	1,0	0,8	104	1,1	1,1	123	1,4	1,1
5	162	1,5	0,9	184	1,7	0,9	161	1,6	1,0	187	1,2	0,6
6	216	2,6	1,2	240	3,3	1,4	211	2,7	1,3	238	3,7	1,6

Die Ergebnisse haben die gestellten Erwartungen erfüllt. Mit dieser Anordnung ist es möglich schräge Fahrwege zu messen, so dass die Erfassung von Kurvenfahrten in der Praxis prinzipiell möglich sein sollte. Neben der Erkennung von Kurvenfahrten sollte diese Sensoranordnung auch Richtungswechsel erfassen, wie sie durch entgegengesetzte Lenkbewegungen hervorgerufen werden. Zu diesem Zweck wurde die 45°-Anordnung bei einem zweifach diagonalen Streckenverlauf getestet.

### 5.1.2.3 Zweifach diagonale Fahrten

An der Versuchsanordnung fanden im Vergleich zum einfach diagonalen Streckenverlauf keine Änderungen statt. Die bisherigen Erkenntnisse lassen erwarten, dass sich die Graphen von Sensor *VL* und Sensor *HR* auf einem anderen Frequenzniveau als die Graphen von Sensor *VR* und Sensor *HL* bewegen. Am Wendepunkt

schneiden sich die Graphen in einem Punkt und driften anschließend auf umgekehrten Frequenzniveaus auseinander.

Die Diagramme 5.13, 5.14 und 5.15 bestätigen den angenommenen Verlauf. Anhand der durch den Schnittpunkt getrennten Frequenzniveaus lassen sich die zwei schrägen, in unterschiedliche Richtungen laufenden Fahrwege eindeutig identifizieren. Ebenso wird durch den Schnittpunkt der Zeitpunkt des Wendens erfasst.

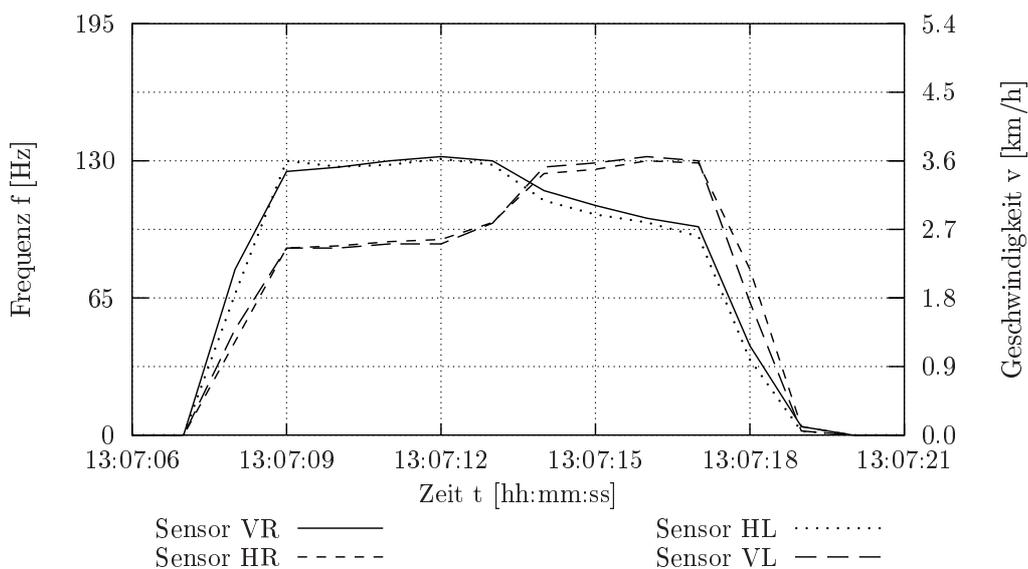


Abbildung 5.13: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 7-2

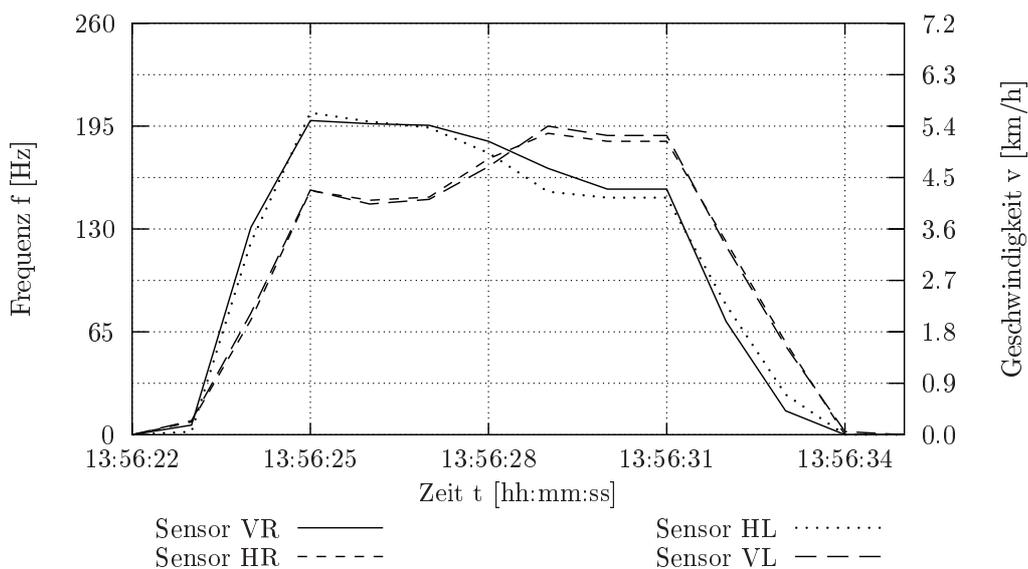


Abbildung 5.14: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 8-10

Die getroffenen Aussagen behalten auch bei steigenden Geschwindigkeiten ihre Gültigkeit, obwohl die Graphen nicht mehr den Idealfall zeigen. Grund für das in Abbildung 5.15 fehlende konstante Geschwindigkeitsniveau von Sensor *VR* und Sensor *HL* nach dem Wendepunkt ist das unmittelbar folgende Abbremsmanöver, welches zum Abfall der gemessenen Frequenzen führt. Beschränkender Faktor ist in diesem Fall die Prüfstandlänge. Messungen in einem Prüfstand doppelter Länge hätten den erwarteten und aus niedrigeren Geschwindigkeiten bekannten Graphenverlauf erbracht.

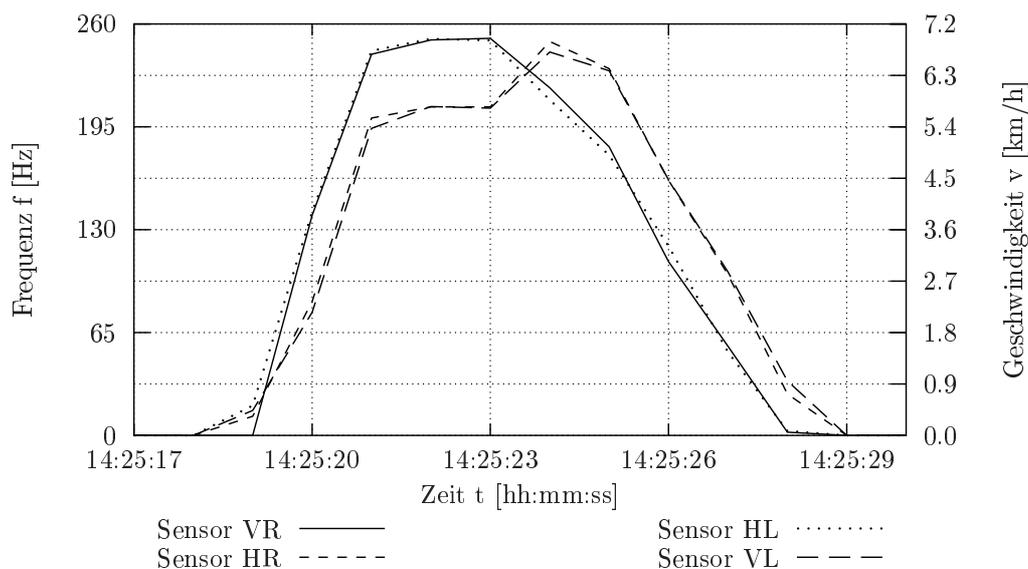


Abbildung 5.15: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 9-10

Die Ergebnisse aus allen 3 Streckenverläufen zeigen, dass geradlinige Fahrten, schräge Fahrten (einfach diagonal) und schräge Fahrten mit Richtungswechsel (zweifach diagonal) eindeutig erkannt und gemessen werden. Die gefahrenen Geschwindigkeiten entsprechen den in der Praxis üblichen Arbeitsgeschwindigkeiten. Obwohl diese Sensoranordnung bis zu diesem Zeitpunkt vielversprechende Ergebnisse lieferte, fanden in Anbetracht eines zeitgleich zu den laufenden Untersuchungen durch die Daimler-Benz Aerospace AG angemeldeten und offengelegten Schutzrechts [64] keine weiteren Tests mehr statt.

Die Y-Anordnung als Kombination aus  $90^\circ$ -Sensoranordnung und  $45^\circ$ -Sensoranordnung berücksichtigt den speziell in der Landwirtschaft auftretenden Einsatzfall von Fahrten im Bestand. Der Ersatz der Sensoren *HR* und *HL* durch Sensor *H* gewährleistet auch bei hohem Bestand die exakte Geschwindigkeitsmessung in Fahrzeuglängsrichtung durch direkte Messung in der Spur, wie sie bereits heute an Serienmaschinen verfügbar ist.

### 5.1.3 Fahrversuche in Y-Anordnung

Wie die 45°-Anordnung wurde auch die Y-Anordnung den Tests bei Geradeausfahrt, einfach und zweifach diagonalen Fahrt unterzogen. Anschließend sollte diese Versuchsanordnung ihre Funktionsfähigkeit zur Erfassung von Neigungswinkel Fehlern bei Geradeausfahrten unter Beweis stellen. Die den einzelnen Messreihen zugeordneten Versuchsparameter sind im Anhang in Tabelle B.3 aufgeführt. In den weiteren Kapiteln werden die Ergebnisse anhand eines für jede Messreihe typischen Versuchslaufs erläutert und diskutiert.

#### 5.1.3.1 Geradeausfahrten

In den Diagrammen 5.16, 5.18 und 5.20 sind die Ergebnisse aus der Frequenzmessung und in den Abbildungen 5.17, 5.19 und 5.21 die zugehörigen Streckenverläufe dargestellt. Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, berechnet das Referenzsystem aus den eigenen Messwerten  $H_z$ ,  $V$  und  $SD$  falsche Koordinaten. Deshalb wurden die Fahrwege nach den in 3.4 aufgezeigten Lösungsansätzen manuell bestimmt und ebenfalls in die Diagramme eingezeichnet. Auch bei der manuellen Berechnung blieb die Delayzeit zwischen Winkel- und Distanzmessung beim Referenzsystem als weiterer Fehlereinfluss unberücksichtigt.

Unter idealen Bedingungen messen die vorderen Sensoren  $VR$  und  $VL$  das  $1/\sqrt{2}$ -fache der Geschwindigkeit von Sensor  $H$ . Ideale Bedingungen schließen Nicken und/oder Wanken aus. Gleichzeitig setzen sie die exakte Ausrichtung der Sensoren in vertikaler Ebene mit einem Abstrahlwinkel von  $\alpha = 35^\circ$  und einem Drehwinkel von  $45^\circ$  zur Fahrzeuglängsrichtung in horizontaler Ebene voraus.

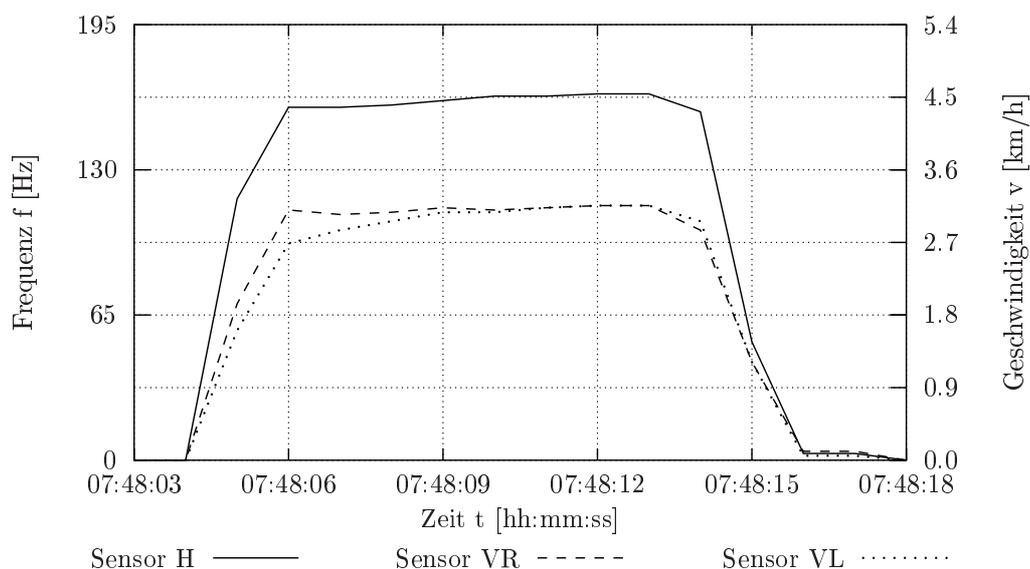


Abbildung 5.16: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 1-1

Der Vergleich zwischen den Abbildungen 5.1 und 5.16 zeigt die entscheidende

Verbesserung der Signalqualität durch die Montage der beiden vorderen Sensoren und dem Wegfall des rechten Sensors. Die durch Sensor  $V$  (Abb. 5.1) und Sensor  $H$  (Abb. 5.16) gemessenen Frequenzen sind identisch. Weitgehend gleiche Verläufe der Graphen von Sensor  $VR$  und  $VL$  lassen den Schluss zu, dass nur eine Geradeausfahrt in x-Richtung stattgefunden hat. Diese Schlussfolgerung stimmt mit den Erkenntnissen aus der  $45^\circ$ -Anordnung überein.

Der zugehörige Streckenverlauf (Abb. 5.17) belegt diese Tatsachen. Trotz reiner Geradeausfahrt ist eine in y-Richtung auftretende Distanz von ca. 0,35 m zu verzeichnen.

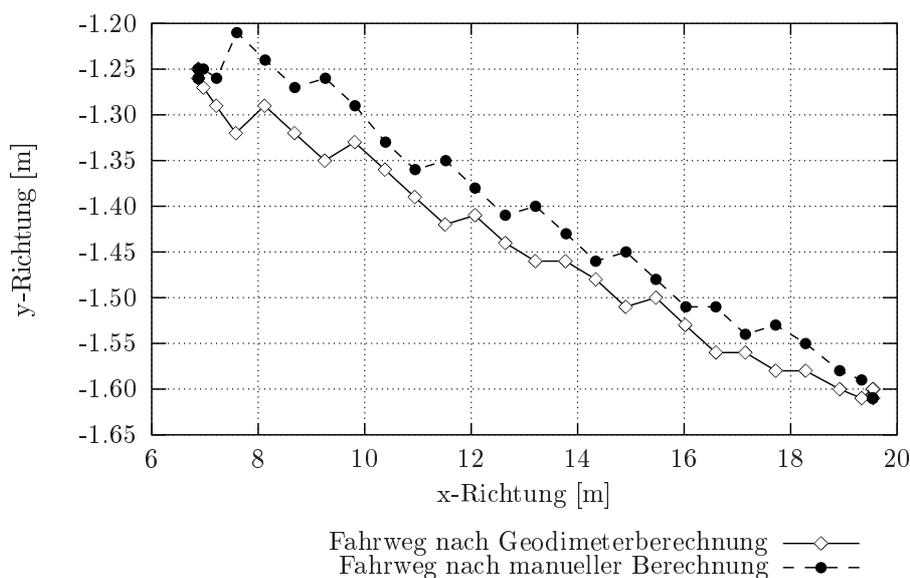


Abbildung 5.17: Streckenverlauf von Messfahrt 1-1

Daraus lässt sich ableiten, dass der Standort des Referenzsystems nicht auf einer Linie mit dem Start- und Endpunkt des zurückgelegten Fahrweges liegt. Die Anordnung des Referenzsystems auf der verlängerten Fluchtlinie von Start- und Endpunkt bei Geradeausfahrten wäre wünschenswert gewesen, aber durch die örtlichen Gegebenheiten im Prüfstand nicht realisierbar.

Hervorzuheben sind die Differenzen zwischen dem durch das Referenzsystem ermittelten Streckenverlauf und dem manuell berechneten Fahrweg. Beide Fahrwege basieren auf den gleichen Messwerten  $H_z$ ,  $V$  und  $SD$  des Referenzsystems. Das Referenzsystem ermittelt die Koordinaten nicht nach den Gleichungen 3.43, 3.44 und 3.45, sondern fälschlicherweise nach den Gleichungen 3.46, 3.47 und 3.48. Daraus geht hervor, dass zur Berechnung der aktuellen Koordinaten die Schrägdistanz  $SD$  der vorherigen Messung verwendet wird und somit der Versatz beider Streckenverläufe zueinander erklärbar ist.

Wird die Fahrgeschwindigkeit erhöht (Abb. 5.18), so zeichnen sich bis auf die Maximalgeschwindigkeit keine Veränderungen in den Geschwindigkeitsverläufen

der einzelnen Sensoren ab. Proportional zur erfassten Frequenz von Sensor *H* steigen die durch Sensor *VR* und *VL* gemessenen Geschwindigkeiten.

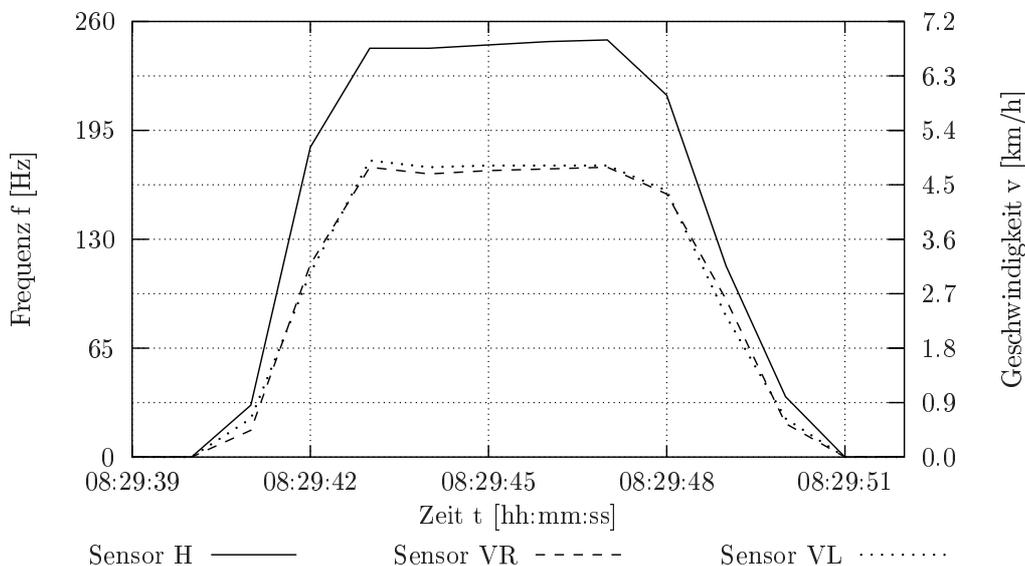


Abbildung 5.18: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 2-3

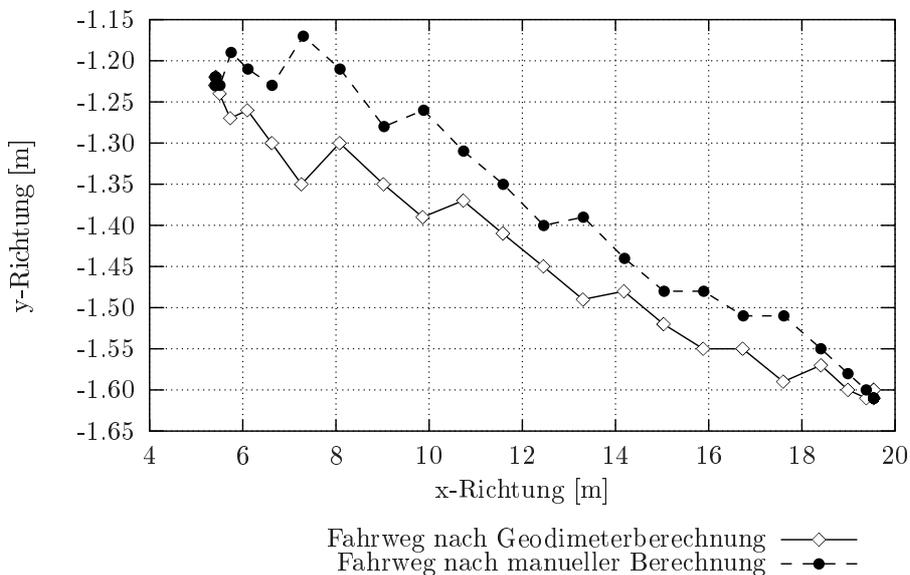


Abbildung 5.19: Streckenverlauf von Messfahrt 2-3

Im Streckenverlauf hingegen ist ein anwachsender Fehler zu verzeichnen. Beide Streckenverläufe drifteten in der  $y$ -Richtung weiter auseinander. Bei ca. 7 m in  $x$ -Richtung erreicht die Differenz in  $y$ -Richtung ihr Maximum. Bei genauerer Betrachtung beider Streckenverläufe ist der in Fahrtrichtung verschobene Verlauf zwischen beiden Graphen erkennbar. Da der zurückgelegte Fahrweg eine zeitabhängige Größe ist, ist der Versatz beider Graphen ebenfalls zeitabhängig.

Es lässt sich jedoch nicht zufriedenstellend erklären, ob nur die Delayzeit zwischen Winkel- und Distanzmessung oder weitere Faktoren für dieses Verhalten verantwortlich sind.

In Bezug auf die ermittelten Geschwindigkeitsverläufe setzt sich die Tendenz auch bei einer weiteren Erhöhung der Geschwindigkeit fort. Es sind keine Auffälligkeiten im Verlauf der Graphen gegeben.

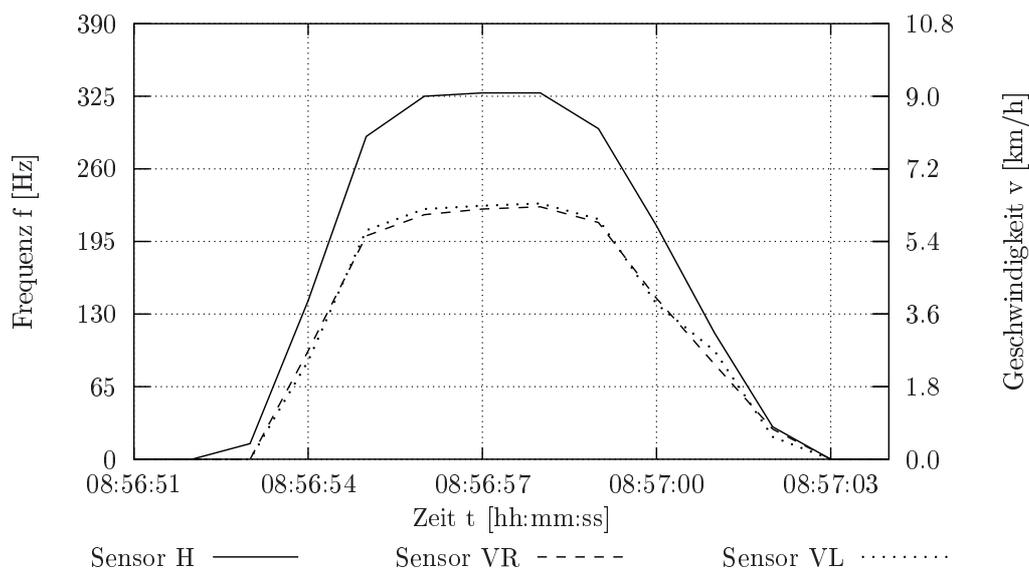


Abbildung 5.20: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 3-5

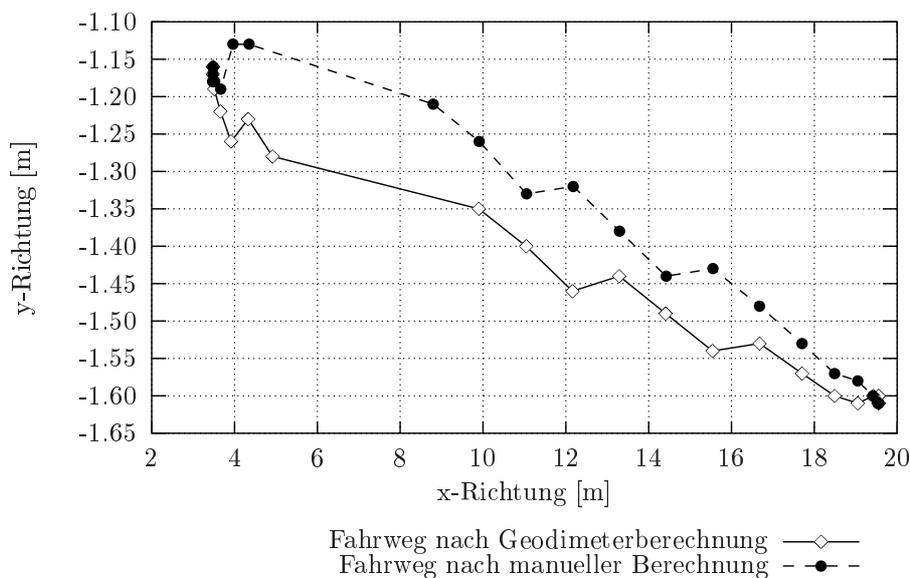


Abbildung 5.21: Streckenverlauf von Messfahrt 3-5

Im Gegensatz dazu weist der Streckenverlauf bei steigender Fahrgeschwindigkeit

zunehmend Fehler auf. Neben dem Versatz in Fahrtrichtung und dem Auseinanderdriften in y-Richtung sind Ausfälle in der Messwernerfassung hinzugekommen.

Im Streckenabschnitt von ca. 5 m bis 9 m in x-Richtung ist kein Messwert vorzufinden. Eine Analyse der Rohdaten zeigt, dass entweder keine oder ungültige Messwerte erfasst wurden. Dieses Verhalten bedarf weiterer Untersuchungen. Zusammenfassend sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für den konstanten Geschwindigkeitsbereich der 3 beschriebenen Messreihen in Tabelle 5.5 aufgelistet.

Tabelle 5.5: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
1	163	1,9	1,2	112	0,9	0,8	113	1,2	1,1
2	246	2,2	0,9	172	1,2	0,7	173	1,7	1,0
3	327	1,3	0,4	223	2,5	1,1	228	0,9	0,4

Unter Verwendung der in 3.3 gezeigten Zusammenhänge wurde in Tabelle 5.6 zu jedem  $\bar{f}_h$  ein Wert für einen um  $45^\circ$  gedrehten Sensor mit folgender Gleichung berechnet:

$$\bar{f}_{45^\circ} = \frac{\bar{f}_h}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

Damit ist festzustellen, inwieweit die mittleren Frequenzen  $\bar{f}_{vr}$  und  $\bar{f}_{vl}$  dem theoretischen Wert von  $\bar{f}_{45^\circ}$  am nächsten kommen. Durch diese Vorgehensweise sind Rückschlüsse auf die Messfehler möglich, die bei Fahrten mit anderen Streckenverläufen als der Geradeausfahrt auftreten.

Tabelle 5.6: Mittelwerte und Fehler bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{f}_{45^\circ}$ [Hz]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\Delta\bar{f}_{vr}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\Delta\bar{f}_{vl}$ [%]
1	163	115	112	2,8	113	2,0
2	246	174	172	1,1	173	0,6
3	327	231	223	3,5	228	1,4

Nach Analyse der Ergebnisse ist feststellbar, dass die Y-Anordnung einen geradlinigen Fahrweg exakt bestimmt. In Bezug auf die Sensoren  $VR$  und  $VL$  sind die Resultate mit denen der  $45^\circ$ -Sensoranordnung vergleichbar. Daraus ableitend sollten auch bei einfach diagonalen Fahrten die Ergebnisse der  $45^\circ$ -Anordnung bestätigt werden.

### 5.1.3.2 Einfach diagonale Fahrten

In identischer Konfiguration sind die Tests bei einem einfach diagonalen Streckenverlauf durchgeführt worden. Bei diesem Streckenverlauf wird durch Sensor *VL* eine höhere Geschwindigkeit ermittelt als durch Sensor *VR*, da die Ausrichtung von Sensor *VL* annähernd der Fahrtrichtung entspricht, hingegen Sensor *VR* nahezu im rechten Winkel dazu montiert ist. Die betragsmäßig kleine Geschwindigkeitskomponente in *y*-Richtung übt einen sehr geringen Einfluss auf Sensor *H* aus. Das Diagramm 5.22 bestätigt die getroffenen Annahmen.

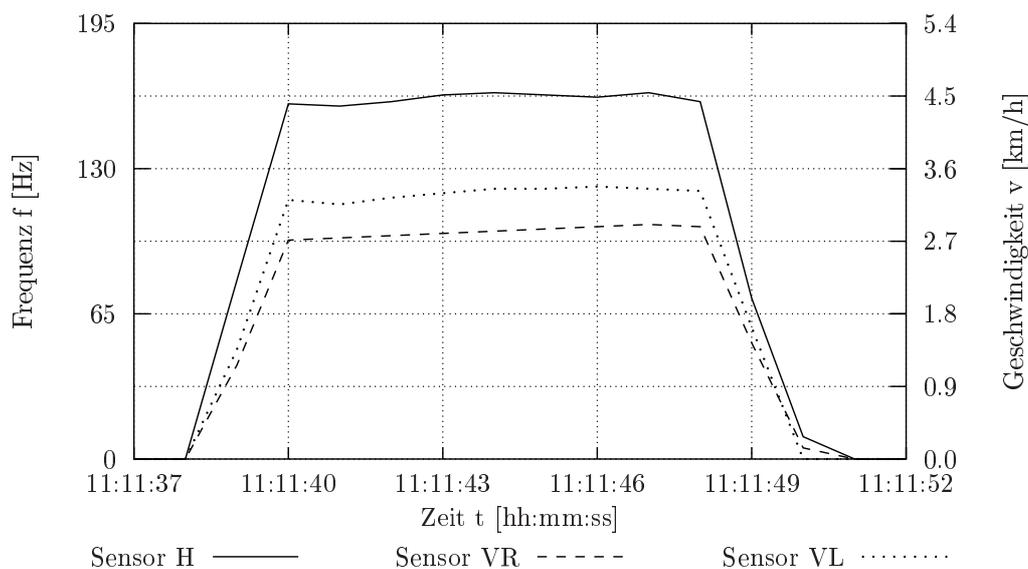


Abbildung 5.22: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 4-5

Die zusätzliche Bewegung in *y*-Richtung hat keinen messbaren Einfluss auf die Messwerte von Sensor *H*. Demgegenüber ist der quantitative Unterschied im Verlauf der Graphen der beiden vorderen Sensoren erkennbar. Abbildung 5.23 zeigt den zugehörigen Streckenverlauf.

Auffallend ist der weitgehend identische Verlauf zwischen den manuell und den durch das Referenzsystem bestimmten Koordinaten. Die Koordinaten sind weder in Fahrtrichtung noch senkrecht dazu zueinander versetzt und nahezu deckungsgleich. Im Vergleich zur Geradeausfahrt (Abb. 5.17) ist der zurückgelegte Weg in *y*-Richtung aufgrund der Diagonalfahrt größer. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Messung steigender Winkel in Horizontalrichtung das Messergebnis entscheidend verbessert. Kleine Winkeländerungen in Horizontalrichtung führen dagegen zu Messfehlern.

Das gleiche Bild zeigt sich bei höherer Geschwindigkeit im zeitlichen Verlauf der gemessenen Frequenzen bei Messfahrt 5-4 (Abb. B.1) und im zugehörigen Streckenverlauf (Abb. B.2).

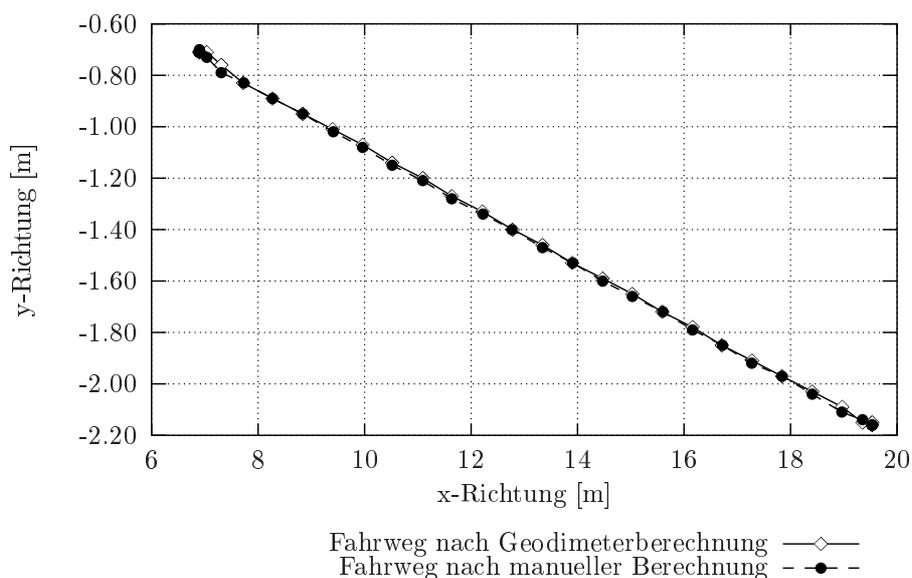


Abbildung 5.23: Streckenverlauf von Messfahrt 4-5

Diese Tendenz setzt sich auch bei Höchstgeschwindigkeit (Abb. 5.24) fort. Es muss allerdings hinzugefügt werden, dass sich die Geschwindigkeit in y-Richtung bei steigender Geschwindigkeit in x-Richtung nur geringfügig verändert. Daraus resultiert, dass sich das Verhältnis zwischen Sensor *VR* und Sensor *VL* nur unwesentlich verschiebt. Hingegen ist beim Streckenverlauf in Abbildung 5.25 ein Auseinanderdriften der Graphen in y-Richtung sichtbar. In der Fahrtrichtung treten keine Verschiebungen auf.

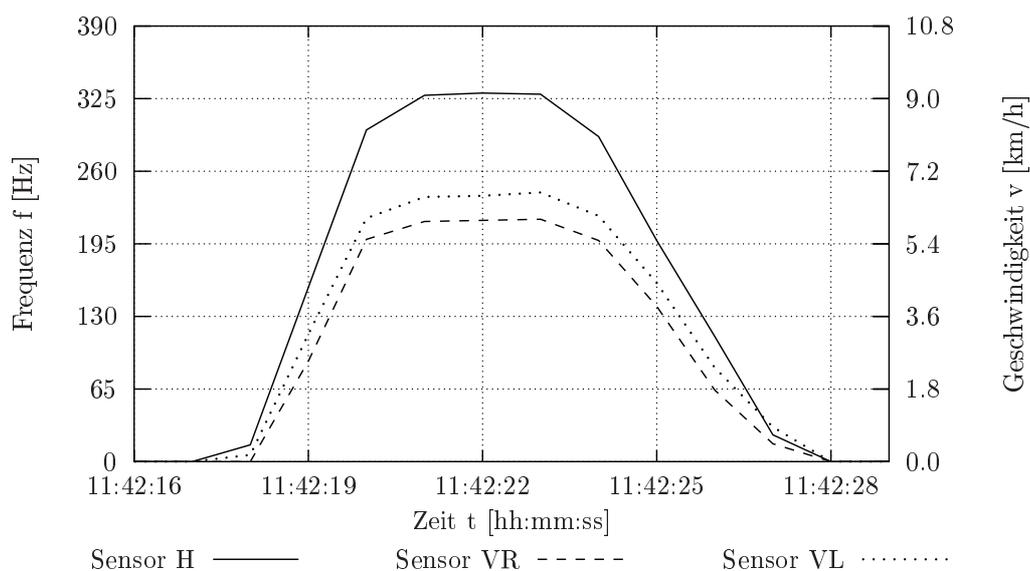


Abbildung 5.24: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 6-1

Über den Zeitraum konstanter Fahrgeschwindigkeit ergeben sich für die 3 dargestellten Versuche die in Tabelle 5.7 aufgelisteten Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten. Ein Vergleich der Mittelwerte  $\bar{f}_h$  aus Tabelle 5.5 und 5.7 zeigt einen geringfügigen Anstieg der Werte der Frequenz von Sensor  $H$  bei einfach diagonaler Fahrt gegenüber der Geradeausfahrt. Dieser Anstieg kann auf die zusätzliche Geschwindigkeitskomponente in  $y$ -Richtung zurückzuführen sein.

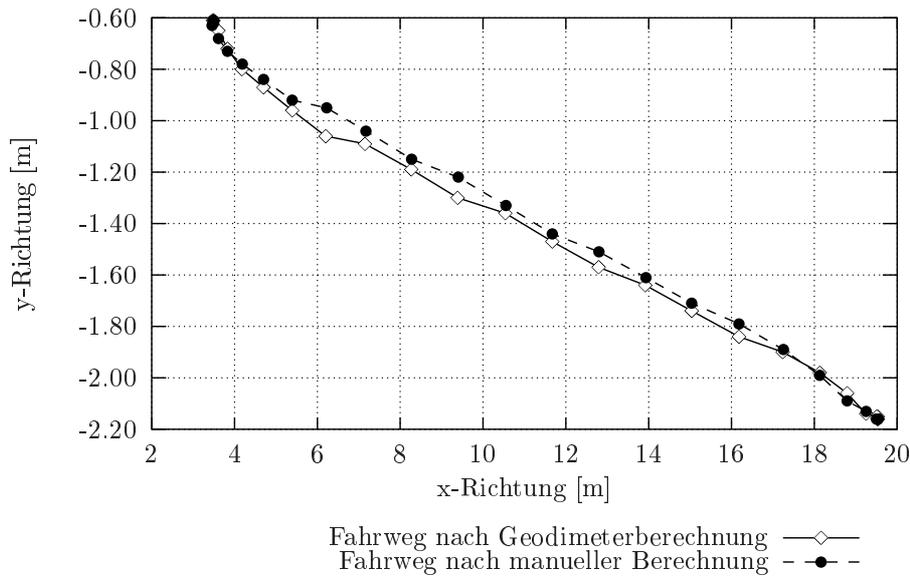


Abbildung 5.25: Streckenverlauf von Messfahrt 6-1

Tabelle 5.7: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei einfach diagonaler Fahrt in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
4	163	1,0	0,6	104	1,3	1,3	121	1,0	0,8
5	248	1,5	0,6	160	2,1	1,3	184	1,5	0,8
6	328	1,7	0,5	217	1,2	0,6	239	1,6	0,7

Die Versuchsergebnisse bestätigen die gestellten Erwartungen und die Resultate aus der  $45^\circ$ -Anordnung. Damit muss sich diese Sensoranordnung den Tests bei zweifach diagonalem Streckenverlauf stellen.

### 5.1.3.3 Zweifach diagonale Fahrten

Auch bei diesem Testszenario sollten die durch die beiden vorderen Sensoren gelieferten Ergebnisse mit denen aus der  $45^\circ$ -Anordnung übereinstimmen. Zum Vergleich der Messergebnisse steht eine zu den Versuchen bei Geradeausfahrt und einfach diagonaler Fahrt identische Konfiguration zur Verfügung.

Das Diagramm 5.26 veranschaulicht anhand der sich kreuzenden Graphen von Sensor VR und Sensor VL den absolvierten Richtungswechsel. Während die durch Sensor H gemessene Geschwindigkeit konstant bleibt, verlaufen Sensor VR und Sensor VL im gleichen Zeitraum gegenläufig. Der Schnittpunkt beider Graphen stellt den Richtungswechsel in der y-Richtung dar. Der zu diesem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zugehörige Streckenverlauf wird in Abbildung 5.27 gezeigt.

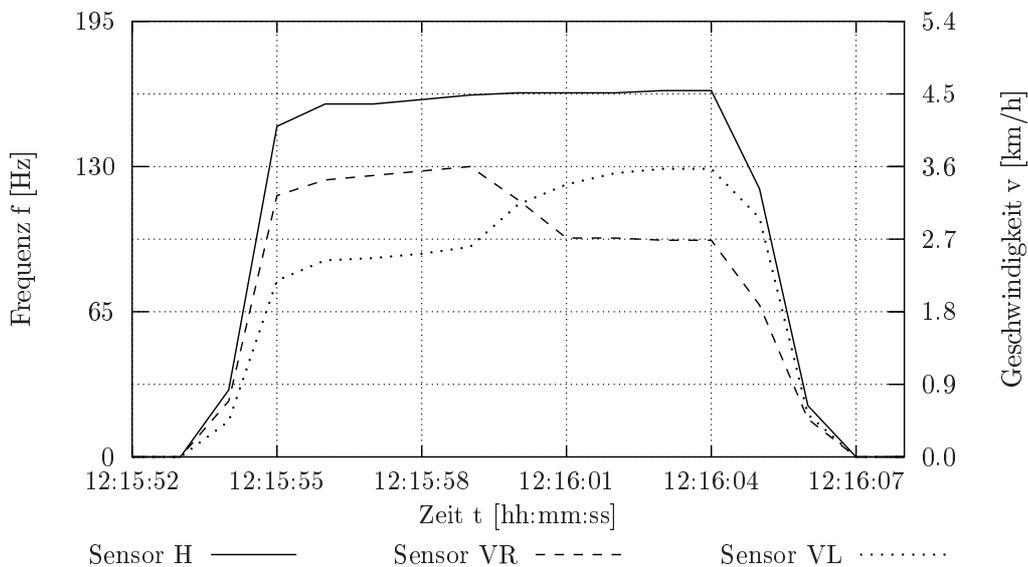


Abbildung 5.26: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 7-5

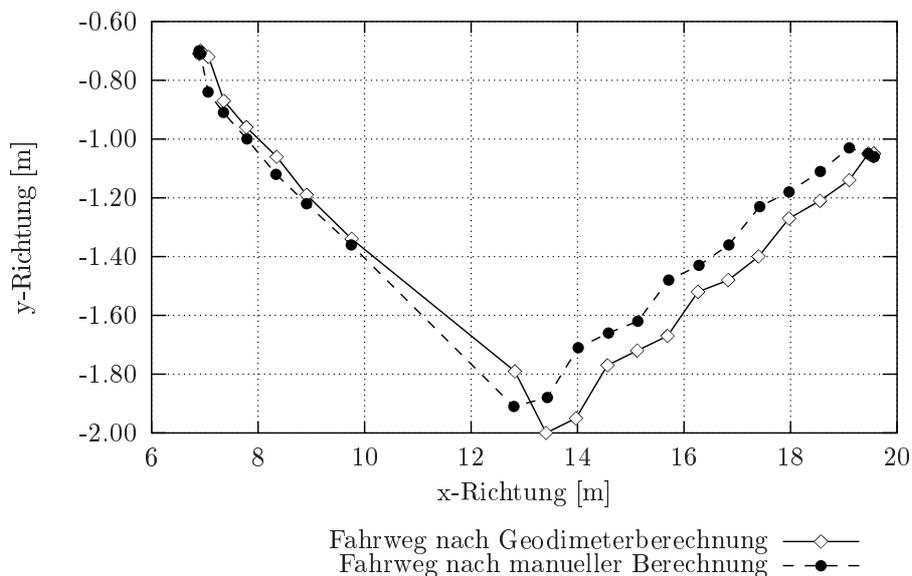


Abbildung 5.27: Streckenverlauf von Messfahrt 7-5

Wie schon bei der Geradeausfahrt ist ein Abdriften zwischen dem manuell ermittelten Fahrweg und dem durch das Geodimeter System 4000 berechneten

Fahrweg zu erkennen. Auffällig ist jedoch, dass im 2. Streckenabschnitt nach dem Richtungswechsel die Koordinaten aus manueller und automatischer Berechnung weitestgehend identisch sind. Weiterhin zeigt sich ein Ausfall der Messwertfassung im Bereich von ca. 10 m bis 12 m in der x-Richtung. Dieser Ausfall ist dem schnellen Richtungswechsel zuzuordnen, welcher durch das Referenzsystem zu spät erfasst wurde. Daraufhin liefert es keine oder ungültige Messwerte, bis das Ziel durch den Trackingstrahl wieder sicher geortet wurde. Eine Bestätigung dieses Verdachtes sollte eine Erhöhung der Geschwindigkeit bringen.

Diese führt bei Messfahrt 8-4 zu einem ähnlichen Bild wie bei Messfahrt 7-5. Auch bei steigender Fahrgeschwindigkeit wird der Richtungswechsel und die Bewegung in 2 Richtungen zuverlässig erkannt.

Stärker als bei Messfahrt 7-5 stellt sich das unterschiedliche Verhalten der beiden vorderen Sensoren während der Beschleunigungsphase und dem Abbremsvorgang heraus. In der Beschleunigungsphase im 1. Streckenabschnitt ist der Anstieg der Messwerte von Sensor *VR* mit denen von Sensor *H* vergleichbar, währenddessen Sensor *VL* einen geringeren Anstieg aufweist. Nach dem Richtungswechsel bietet sich beim Abbremsvorgang ein entgegengesetztes Bild in den Kurvenverläufen der beiden vorderen Sensoren.

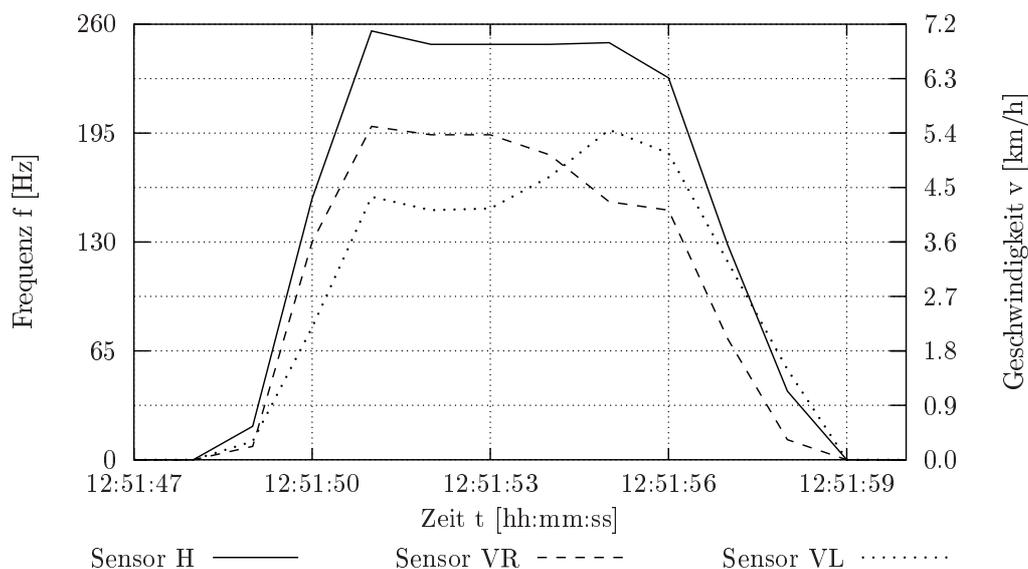


Abbildung 5.28: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 8-4

Der Verdacht, dass das Referenzsystem zu träge auf den Richtungswechsel reagiert bestätigt sich in Abbildung 5.29. Der Messausfall schließt den Abschnitt von ca. 7 m bis 11 m ein. Damit hat sich der Bereich des Ausfalls bei steigender Geschwindigkeit ebenfalls vergrößert. Ansonsten zeigt diese Abbildung gegenüber dem Streckenverlauf von Messfahrt 7-5 keine Auffälligkeiten. Im 1. Streckenabschnitt ist wiederum das Abdriften zwischen den Referenzsystemkoordinaten

und den manuell bestimmten Koordinaten zu verzeichnen, währenddessen im 2. Streckenabschnitt die Koordinaten weitgehend auf einer Linie liegen.

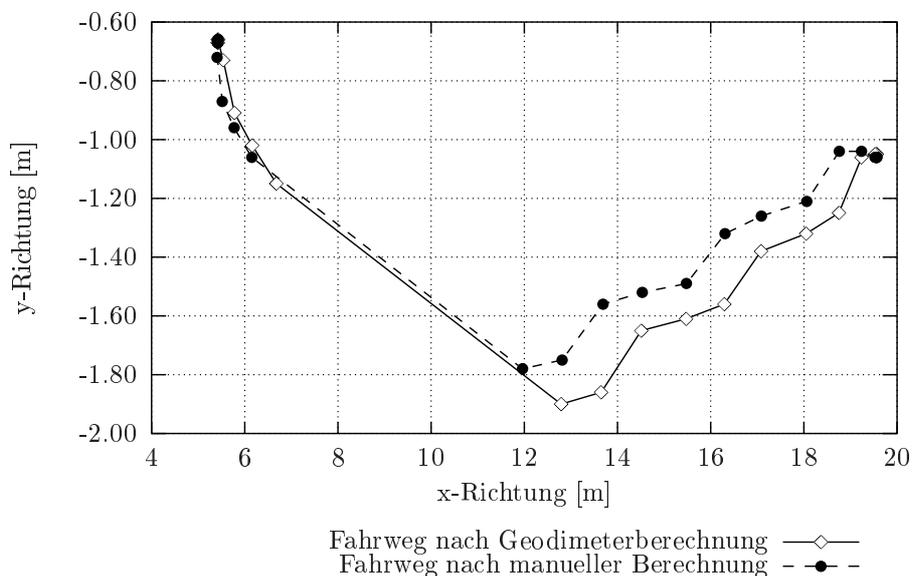


Abbildung 5.29: Streckenverlauf von Messfahrt 8-4

Bedingt durch die kurze Fahrstrecke zeigen sich bei Messfahrt 9-2 (Abb. 5.30) Unterschiede gegenüber Messfahrt 7-5 und 8-4.

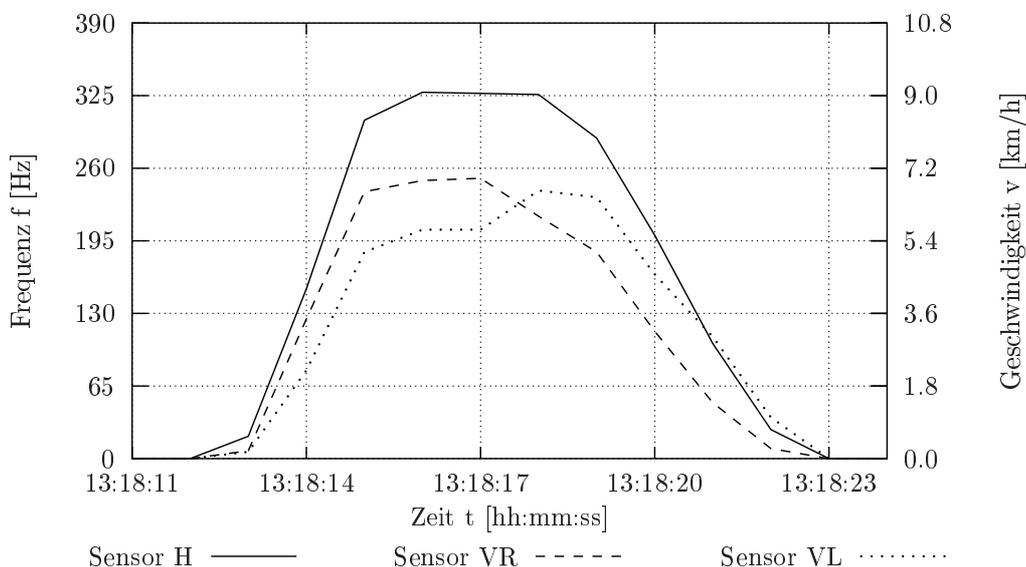


Abbildung 5.30: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 9-2

Im 1. Streckenabschnitt bis einschließlich dem Richtungswechsel treten die gleichen Effekte wie bei den Versuchen mit geringeren Fahrgeschwindigkeiten auf. Im 2. Streckenabschnitt hingegen ist ein Ansteigen der Messkurve von Sensor VL und

ein Abfallen der Kurve von Sensor *VR* zu verzeichnen, während ein ausgeprägter Bereich mit konstanter Fahrgeschwindigkeit fehlt. Hingegen verlaufen während des Abbremsvorganges die Graphen bei Messfahrt 9-2 in gleicher Weise, wie bei Messfahrt 8-4.

Für den Streckenverlauf von Messfahrt 9-2 (Abb. B.3) gelten die gleichen Aussagen wie bei Abbildung 5.29. Der Messausfall hat sich jetzt auf den Bereich von ca. 5 m bis 11 m ausgeweitet. Zudem sind im 1. Streckenabschnitt Sprünge zwischen den einzelnen Messpunkten zu beobachten. Sie treten unabhängig von der Art der Koordinatenermittlung auf und sind demzufolge den Sensoren bzw. den Messalgorithmen des Referenzsystems zuzuschreiben.

Aus den behandelten Messfahrten lassen sich Schlussfolgerungen für die gesamten Messreihen 7 bis 9 ableiten. Es werden bei allen 3 gefahrenen Geschwindigkeiten beide schräg gefahrenen Streckenabschnitte und der dazwischenliegende Richtungswechsel zuverlässig erkannt. Diese Aussage belegt die Resultate der 45°-Anordnung. Bei Messreihe 9 tritt wiederum das Problem des fehlenden konstanten Geschwindigkeitsniveaus bei den vorderen Sensoren nach dem Richtungswechsel auf. Ursache hierfür sind wie bei der 45°-Sensoranordnung die begrenzten Prüfstandsabmessungen. Nachdem die Y-Anordnung ihre Fähigkeiten bei Geradeausfahrten, einfach und zweifach diagonalen Fahrten unter Beweis gestellt hat, ist es notwendig sie bei simulierten Neigungswinkelfehlern, wie sie durch Nicken und Wanken auftreten, im Prüfstand zu untersuchen.

#### 5.1.3.4 Simulation von Neigungswinkelfehlern

Zur Simulation der in der Praxis auftretenden Nick- und Wankschwingungen im Prüfstand, müssen die Abstrahlwinkel  $\alpha$  gezielt variiert werden. Dabei handelt es sich nicht um die Messung einer vollständigen Nick- und/oder Wankschwingung, sondern nur um die Erfassung eines festgelegten und an den Sensoren eingestellten Nick- und/oder Wankwinkels. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit der Betrachtung eines endlich kleinen Zeitabschnittes einer realen Nick- und/oder Wankschwingung, in dem sich weder Nick- noch Wankwinkel verändern. Den durchgeführten Winkeländerungen lag eine Messgenauigkeit von  $\pm 1^\circ$  zugrunde.

Um Einflüsse auf das Messergebnis auszuschließen, wie sie durch schräge Fahrwege oder Richtungswechsel hervorgerufen werden, fanden die Versuche ausschließlich bei Geradeausfahrten statt. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine exakte Betrachtung des Sensorverhaltens unter simuliertem Nicken und/oder Wanken im Prüfstand.

Messfahrt 10-4 (Abb. 5.31) zeigt zunächst einen Versuchslauf aus der Messreihe der Referenzfahrten. Dabei sind alle Sensoren mit dem vom Hersteller vorgegebenen Abstrahlwinkel  $\alpha = 35^\circ$  montiert. Aus den Messreihen 11 bis 15 wurden wieder typische Versuchsläufe (Abb. 5.31 bis 5.36) für eine einheitliche Geschwindigkeit ausgewählt. Die auftretenden Effekte lassen sich auch bei anderen Geschwindigkeiten nachweisen.

Das Ergebnis eines Nickvorgangs, bei dem das Heck räumlich höher liegt als die Front, zeigt Messfahrt 11-8 (Abbildung 5.32). Der eingestellte Nickwinkel beträgt  $\beta = 10^\circ$ . Aufgrund der um  $45^\circ$  gedrehten Anordnung der beiden vorderen Sensoren liegen deren Neigungswinkel gerundet auf einen ganzzahligen Wert bei  $\phi = \rho \approx 7^\circ$ . Gegenüber den Graphen in Abbildung 5.31 steigt der Geschwindigkeitsverlauf bei Sensor *H*, bzw. fallen die Geschwindigkeitsverläufe von Sensor *VR* und Sensor *VL* proportional zum Nickwinkel  $\beta$ .

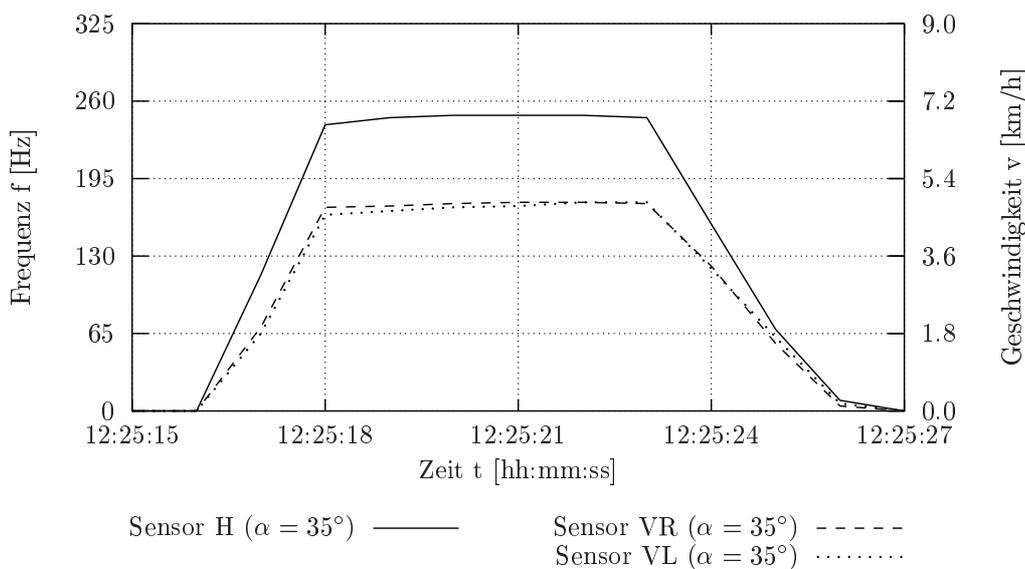


Abbildung 5.31: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 10-4

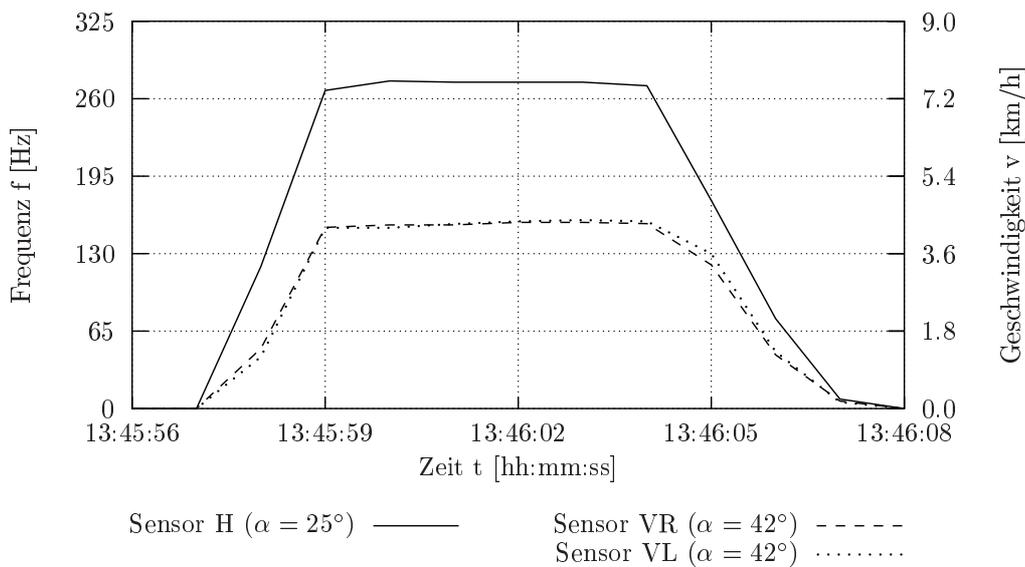


Abbildung 5.32: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 11-8

Der entgegengesetzte Fall ist bei Messfahrt 12-6 in Abbildung 5.33 zu sehen. Das simulierte Nicken erfolgte in umgekehrter Richtung, d.h. die Front des Fahrzeuges liegt zur Beobachtungszeit räumlich höher als dessen Heck. Damit steigen die Geschwindigkeitsverläufe der beiden vorderen Sensoren proportional zum Nickwinkel  $\beta$  an, während der Geschwindigkeitsverlauf am hinteren Sensor abfällt.

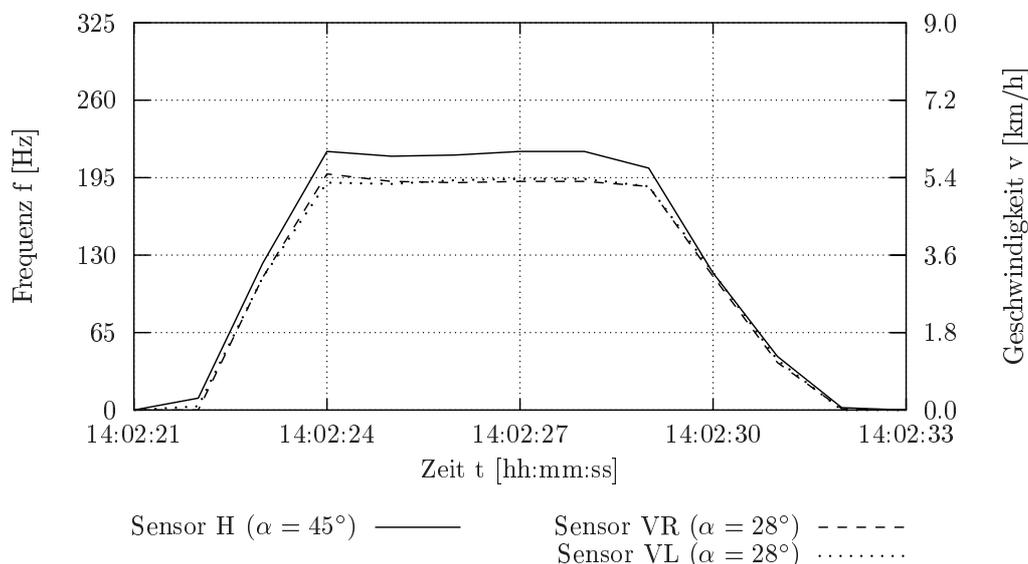


Abbildung 5.33: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 12-6

Zur Simulation eines zeitlich begrenzten Neigungswinkelfehlers während einer Wankschwingung bedarf es nur der Veränderung der Abstrahlwinkel des vorderen Sensorpaares. Bei Sensor *H* wird der Abstrahlwinkel von  $\alpha = 35^\circ$  beibehalten. Messfahrt 13-1 (Abb. 5.34) ist die Variante, bei der die rechte Fahrzeugseite bei Blick auf das Heck räumlich höher liegt, als die linke Fahrzeugseite.

Aus dem verringerten Abstrahlwinkel an Sensor *VR* resultiert ein ansteigender Geschwindigkeitsverlauf. Hingegen führt der vergrößerte Abstrahlwinkel an Sensor *VL* zu einem ein abfallender Geschwindigkeitsverlauf. Im Gegensatz dazu sind beim Kurvenverlauf von Sensor *H* keine Veränderungen zu verzeichnen.

Ein entgegengesetztes Verhalten in Bezug auf die Geschwindigkeitsverläufe der beiden vorderen Sensoren zeigt sich, wenn bei Blick auf das Heck des Fahrzeuges die linke Seite räumlich höher liegt als die rechte Seite (Abb. 5.35).

Zur Simulation eines Wankwinkels von  $\gamma = 10^\circ$  beträgt die Änderung der Neigungswinkel an den beiden vorderen Sensoren nach Rundung auf einen ganzzahligen Wert  $\phi = \rho \approx 7^\circ$ .

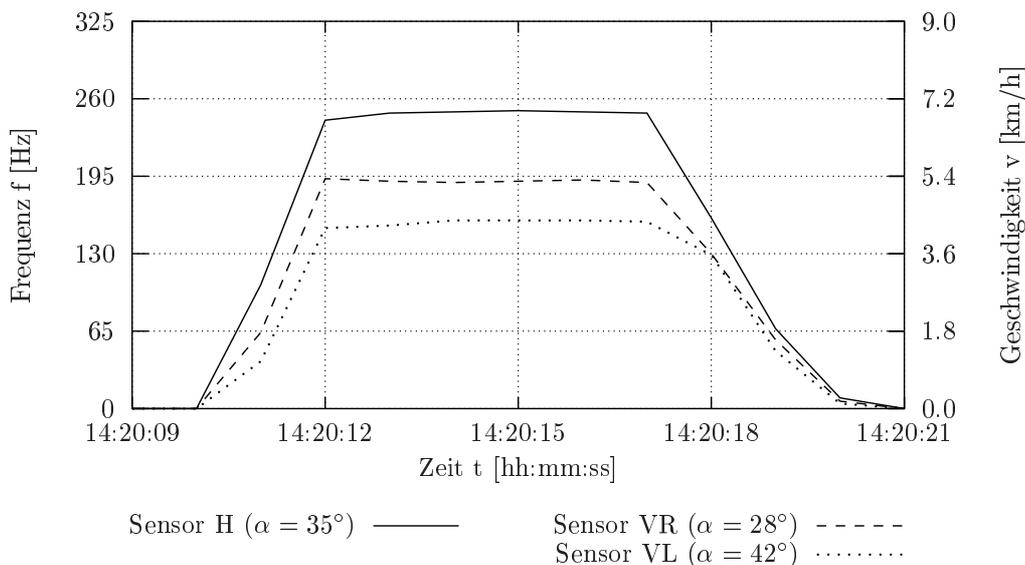


Abbildung 5.34: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 13-1

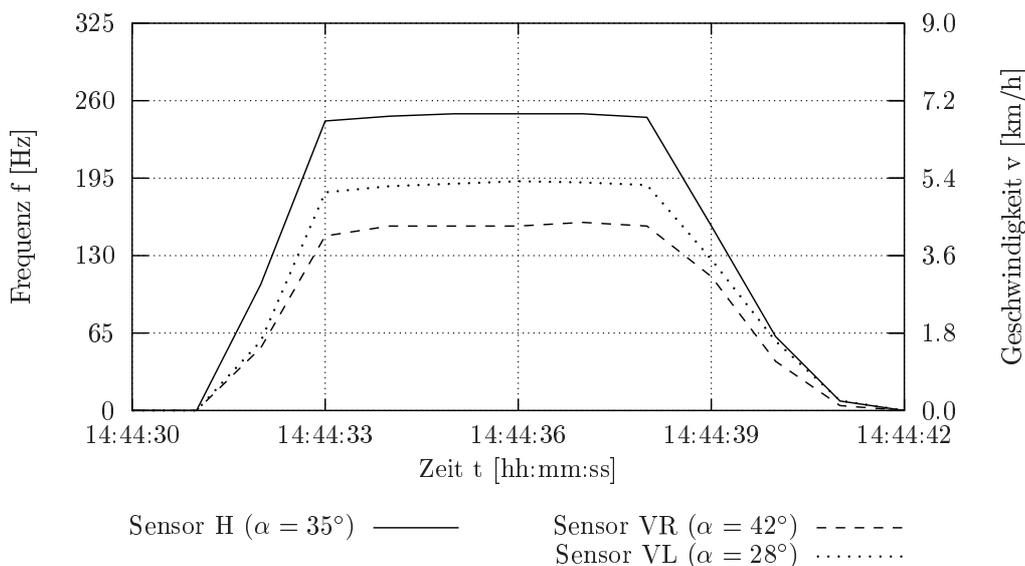


Abbildung 5.35: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 14-6

Nach der getrennten Betrachtung von Nick- und Wankwinkel zeigt Messfahrt 15-9 (Abb. 5.36) den Einfluss bei gleichzeitigem Auftreten von Nicken und Wanken. Das Fahrzeug liegt dabei mit dem Heck räumlich höher als mit der Front. Zugleich befindet sich die rechte Fahrzeugseite bei Blick auf das Heck räumlich höher als die linke Fahrzeugseite.

In B.4 sind die eingestellten Abstrahlwinkel an den Sensoren und die sich daraus

ergebenden Neigungswinkel für die einzelnen Messfahrten tabellarisch erfasst. Die Berechnung der Nickwinkel  $\beta$  und der Wankwinkel  $\gamma$  aus den Neigungswinkeln  $\phi$  und  $\rho$  führt nur durch Rundung zu ganzzahligen Werten.

Die Berechnung der in Tabelle 5.8 gezeigten Werte bezieht sich jeweils auf die Messwerte der Versuchsläufe 1 bis 10 bei konstanter Geschwindigkeit. Beschleunigungsphase und Abbremsvorgang blieben folglich unberücksichtigt.

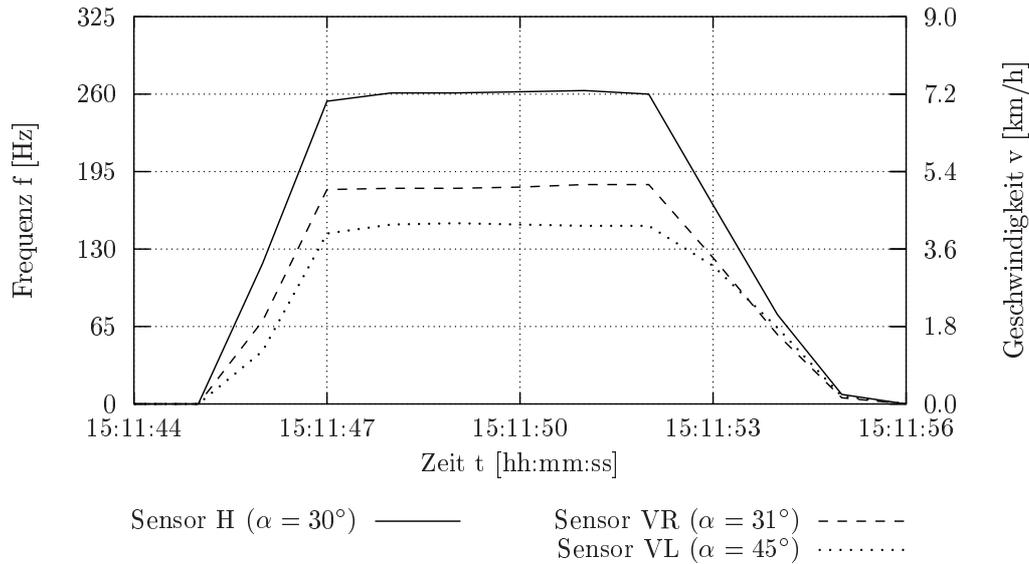


Abbildung 5.36: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 15-9

Tabelle 5.8: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung bei variierten Abstrahlwinkeln  $\alpha$  ( $n = 10$ )

$M$ -Nr.	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
10	248	1,0	0,4	175	1,3	0,7	175	2,3	1,3
11	274	2,1	0,8	150	1,7	1,1	150	2,0	1,3
12	214	1,8	0,8	193	2,7	1,4	193	1,9	1,0
13	247	0,7	0,3	194	1,7	0,9	152	1,9	1,3
14	246	1,1	0,4	152	1,1	0,7	194	1,3	0,7
15	262	1,2	0,5	184	1,6	0,9	148	1,7	1,1

Im Gegensatz zu Tabelle B.4, bei der die Nick- und Wankwinkel aus den Neigungswinkeln  $\phi$  und  $\rho$  ermittelt bzw. direkt am Sensor gemessen wurden, enthält Tabelle 5.9 die aus den Messwerten der Sensoren berechneten Nick- und Wankwinkel sowie die zugehörigen Standardabweichungen. Den Berechnungen wurden wiederum nur die Abschnitte konstanter Fahrgeschwindigkeit und Mittelung über  $n = 10$  Versuchsläufe zugrundegelegt.

Tabelle 5.9: Neigungswinkel bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung bei variierten Abstrahlwinkeln  $\alpha$  ( $n = 10$ )

Messfahrt Nr.	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\beta$ [°]	$\bar{s}_\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	$\bar{s}_\gamma$ [°]
10	248	175	175	-0,2	0,1	0,0	0,3
11	274	150	150	-10,3	0,2	0,1	0,5
12	214	193	193	9,9	0,2	0,0	0,4
13	247	194	152	-0,4	0,2	9,9	0,3
14	246	152	194	-0,4	0,2	-9,9	0,2
15	262	184	148	-4,6	0,2	8,7	0,6

Zu berücksichtigen ist die Winkelmessgenauigkeit von  $\pm 1^\circ$ , die zu geringfügigen Abweichungen vom geforderten Abstrahlwinkel bzw. der Messrichtung und damit zu Fehlern führen kann.

#### 5.1.4 Einordnung und Diskussion

Die Versuchsergebnisse der  $90^\circ$ -Sensoranordnung erfüllen die Erwartungen nur bedingt. Während die Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung durch Sensor  $V$  zuverlässig und genau ermittelt wird, weist die Ermittlung der Geschwindigkeit in Fahrzeugaußenrichtung durch Sensor  $R$  bereits bei Geradeausfahrt deutliche Fehler auf. Diese Fehler werden durch die Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung hervorgerufen, welche für die Messung mit Sensor  $R$  als Störgröße betrachtet werden muss. Trotz der vorliegenden Versuchsergebnisse für drei verschiedene Geschwindigkeiten ist aus den Messwerten von Sensor  $R$  kein nachvollziehbares Verhaltensmuster abzuleiten. Variationen des Abstrahlwinkels an diesem Sensor führten ebenfalls nicht zu den erwarteten Ergebnissen.

Im Gegensatz dazu zeigen die Messergebnisse der  $45^\circ$ -Sensoranordnung das erwartete Verhalten bei allen 3 absolvierten Streckenverläufen in unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Dazu zählt die nahezu identische Ermittlung der Geschwindigkeit in x-Richtung bei Geradeausfahrt durch alle 4 Sensoren. Ebenso wurde die einfach diagonale Fahrt durch die quantitativen Unterschiede zwischen den Sensorpaaren  $VR-HL$  und  $VL-HR$  eindeutig bestimmt. Auch bei der zweifach diagonalen Fahrt wurden die gegenläufigen Fahrrichtungen anhand der wechselnden quantitativen Unterschiede zwischen beiden Sensorpaaren ermittelt. Der Schnittpunkt der Graphen aller 4 Sensoren zeigt dabei den Wendepunkt im Streckenverlauf.

Die erzielten Ergebnisse von Sensor  $H$  bei Geradeausfahrt in Y-Anordnung stimmen mit denen von Sensor  $V$  bei  $90^\circ$ -Sensoranordnung überein. Weiterhin weisen die Graphen von Sensor  $VR$  und  $VL$  die gleichen Verläufe wie bei der  $45^\circ$ -Sensoranordnung bei allen 3 Streckenverläufen auf. Keine Unterschiede im Verlauf der Graphen von Sensor  $VR$  und  $VL$  zeigen sich bei einer Geradeausfahrt, währenddessen sich bei schrägen Fahrten die Graphen der beiden vorderen Sensoren auf unterschiedlichen Frequenzniveaus (Geschwindigkeitsniveaus) bewegen.

Tritt zusätzlich noch ein Richtungswechsel auf, so kreuzen sich beide Graphen und tauschen die Frequenzniveaus.

Die Ergebnisse aus der Neigungswinkelsimulation bei Geradeausfahrten belegen zudem, dass die Y-Anordnung in der Lage ist, Neigungswinkelfehler, die durch Nicken und/oder Wanken verursacht werden, zu messen [38, 39]. Damit stellt sie nach dem jetzigen Kenntnisstand eine vielversprechende Anordnung zur Lösung der gestellten Aufgabe dar.

Neben den Einschätzungen der verschiedenen Konfigurationen der Radarsensoren muss auch der Prüfstand und das Referenzsystem Geodimeter System 4000 bewertet werden. Die erzielten Versuchsergebnisse bescheinigen dem Prüfstand eine gute Eignung für die Untersuchungen. Lediglich bei der höchsten zulässigen Geschwindigkeit beim zweifach diagonalen Streckenverlauf wäre ein längerer Prüfstand wünschenswert, damit die Effekte im 2. Streckenabschnitt nach dem Richtungswechsel besser sichtbar werden. Die durch das Geodimeter System 4000 ermittelten Streckenverläufe lassen bei geringsten Winkeländerungen (Geradeausfahrt) bzw. sehr schnellen Richtungswechseln (zweifach diagonale Fahrt) in Horizontalrichtung bei kurzer Schrägendifferenz Zweifel über dessen Eignung als Referenzsystem im Prüfstand aufkommen. Bisherige Einsätze dieses Systems haben derartige Schwachstellen nicht aufgezeigt, zumal das Referenzsystem innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikation betrieben wurde. An dieser Stelle soll nochmals auf die in 3.4 genannten, parallel laufenden Genauigkeitsuntersuchungen vom Geodimeter System 4000 hingewiesen werden, die jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

In das umfangreiche Feldversuchsprogramm wurden nur die 90°-Sensoranordnung und die Y-Sensoranordnung aufgenommen. Von einer weiteren Untersuchung der 45°-Sensoranordnung wurde wegen des existierenden Schutzrechts abgesehen.

## 5.2 Feldversuche

### 5.2.1 Geradeausfahrten am Versuchstandort 1

#### 5.2.1.1 90°-Sensoranordnung

Am Versuchsstandort 1 fanden die ersten Feldversuche mit Traktor und angebauter Messkabine statt. Für die 90°-Sensoranordnung wurden 3 Messreihen bei Geradeausfahrten mit Geschwindigkeiten von ca. 5, 11 und 13 km/h aufgenommen. Zur DGPS-Ortung kam der Motorola DGPS-Empfänger zum Einsatz.

Die Diagramme C.1, C.2 und C.3 zeigen einen Vergleich zwischen der mit DGPS bestimmten Fahrgeschwindigkeit und den durch die 4 Radarsensoren gemessenen Fahrgeschwindigkeiten. Aus bisherigen Überlegungen und den Ergebnissen der Prüfstandsversuche sollten die mittels DGPS, Sensor *V* und Sensor *H* gemessenen Geschwindigkeiten unter der Voraussetzung, dass keine Neigungswinkelfehler im Fahrverlauf auftreten, weitgehend identisch sein. Diese Aussage wird durch

die Messergebnisse bestätigt. Geringfügige quantitative Unterschiede zwischen den Werten beider Sensoren resultieren aus montagebedingten Winkelfehlern, die mittels Kalibrierfaktoren ausgeglichen werden können.

Die Annahme, dass die von Sensor  $R$  und Sensor  $L$  ermittelten Geschwindigkeiten bei Geradeausfahrt annähernd 0 sind, wurde bereits durch die Prüfstandsversuche widerlegt. Das gleiche Ergebnis erzielen auch die Feldversuche. Bei allen 3 Messreihen ermitteln die seitlichen Sensoren eine Geschwindigkeit. Diese fällt zwar in der 1. Messreihe bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 5 km/h sporadisch auf den Wert 0 ab, bewegt sich aber bei den Messreihen 2 und 3 auf einem weitgehend konstanten Niveau. Daraus ist abzuleiten, dass die Geschwindigkeitskomponente in Fahrzeulängsrichtung einen Einfluss auf die Messung der seitlichen Sensoren ausübt. Die Bildung eines Mittelwertes für die Längsrichtung aus den in Tabelle 5.11 aufgelisteten Messwerten von Sensor  $V$  und  $H$  sowie für die Querrichtung aus Sensor  $R$  und  $L$  lässt eine grobe Fehlerabschätzung zu. Der relative Messfehler der seitlichen Sensoren in Bezug zu den in Längsrichtung montierten Sensoren beträgt bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten von ungefähr 11 bzw. 13 km/h jeweils ca. 10 %.

Stark gegenläufige Tendenzen beim Kurvenverlauf von Sensor  $V$  und  $H$ , bzw. Sensor  $R$  und  $L$  sind in den Diagrammen C.1, C.2 und C.3 nicht erkennbar. Daraus lässt sich ableiten, dass keine Nick- und/oder Wankschwingungen aufgetreten sind, welche die Messungen beeinflusst haben. Im Gegensatz dazu weist die mittels DGPS bestimmte Fahrgeschwindigkeit ständige Schwankungen auf. Die Ursache ist dabei im Auswertungsalgorithmus des DGPS-Empfängers zu suchen, da keine Empfangsprobleme des Satellitensignals zu verzeichnen waren.

Die Tabellen 5.10 und 5.11 zeigen die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der dargestellten Versuche über den Bereich der konstanten Geschwindigkeit, d. h. Beschleunigungsphase und Abbremsvorgang bleiben unberücksichtigt. Die mittleren Frequenzen  $\bar{f}_r$  und  $\bar{f}_l$  in Messreihe 1 sind nur zur Vollständigkeit aufgeführt. Sie besitzen keine Aussagekraft, da die Messwerte mehrmals den Wert 0 angenommen haben und demzufolge der jeweilige Mittelwert verfälscht ist. Diese Aussage wird durch die hohen Standardabweichungen und Variationskoeffizienten bestätigt.

Tabelle 5.10: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 5$ )

$M$ -Nr.	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{v_{DGPS}}$ [km/h]	$\bar{V}_{v_{DGPS}}$ [%]
1	5,5	0,1	1,8
2	10,9	0,2	1,8
3	13,3	0,2	1,5

Tabelle 5.11: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 5$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{f}_v$ [Hz]	$\bar{s}_{fv}$ [Hz]	$\bar{V}_{fv}$ [%]	$\bar{f}_r$ [Hz]	$\bar{s}_{fr}$ [Hz]	$\bar{V}_{fr}$ [%]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{fh}$ [Hz]	$\bar{V}_{fh}$ [%]	$\bar{f}_l$ [Hz]	$\bar{s}_{fl}$ [Hz]	$\bar{V}_{fl}$ [%]
1	196	1,6	0,8	23	5,3	23,0	197	1,7	0,9	21	6,9	32,9
2	392	3,6	0,9	41	4,5	11,0	393	3,6	0,9	39	5,0	12,8
3	489	3,9	0,8	51	4,6	9,0	488	4,1	0,8	49	5,3	10,8

Für Geradeausfahrten sind die Ergebnisse der 90°-Sensoranordnung akzeptabel, sie lassen aber Bedenken bei Kreisfahrten aufkommen. Die bei Kreisfahrten zusätzlich auftretende Geschwindigkeitskomponente in Fahrzeugquerrichtung ist betragsmäßig je nach Kreisradius nur ein Bruchteil der Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung. Der momentan auftretende Messfehler liegt demzufolge in der gleichen Größenordnung wie die Geschwindigkeit in Querrichtung. Alternativ zur behandelten Anordnung wurde die Y-Anordnung in die Untersuchungen einbezogen.

### 5.2.1.2 Y-Sensoranordnung

Bei Geradeausfahrten wurden mit dieser Anordnung 3 Messreihen mit jeweils 10 Versuchsläufen bei Geschwindigkeiten von 5, 10 und 15 km/h aufgenommen. Die DGPS-Ortungsdaten erzeugte dabei der Trimble AgGPS 132 DGPS-Empfänger.

In den Diagrammen 5.37, 5.38 und 5.39 sind die zeitlichen Verläufe der ermittelten Geschwindigkeiten der Radarsensoren und des DGPS-Empfängers dargestellt.

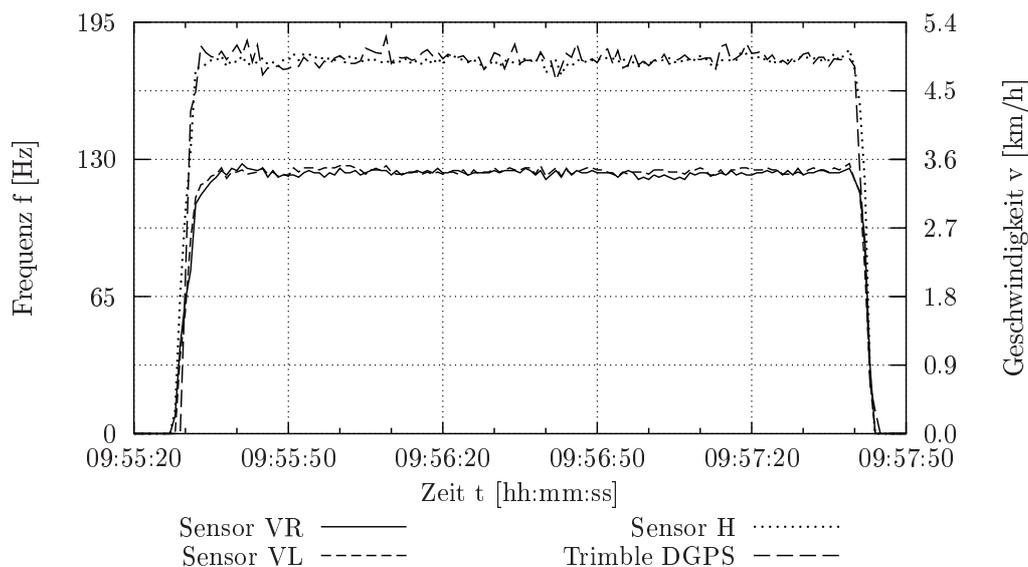


Abbildung 5.37: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-9

Wie bei der 90°-Sensoranordnung wurden durch DGPS und Sensor *H* gleiche Geschwindigkeiten in Fahrzeuginnenrichtung ermittelt. Die Messwerte der Sensoren *VR* und *VL* liegen, wie in 3.3 gezeigt, bei dem  $1/\sqrt{2}$ -fachen von Sensor *H*. Im konstanten Geschwindigkeitsbereich von ca. 5 km/h ergeben sich gemäß Tabelle 5.13 die Mittelwerte  $\bar{f}_h = 177$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 124$  Hz und  $\bar{f}_{vl} = 125$  Hz. Auch im konstanten Geschwindigkeitsbereich von ca. 10 km/h treffen die theoretischen Annahmen zu. Die Mittelwerte der Frequenzen liegen bei  $\bar{f}_{vr} = 250$  Hz,  $\bar{f}_{vl} = 252$  Hz und entsprechen damit dem annähernd  $1/\sqrt{2}$ -fachen von  $\bar{f}_h = 359$  Hz.

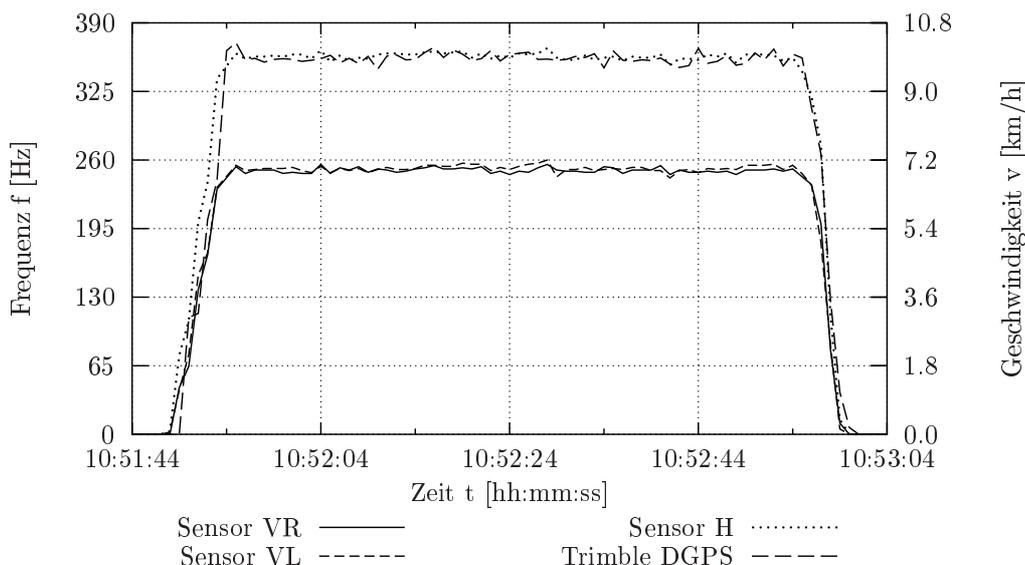


Abbildung 5.38: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-8

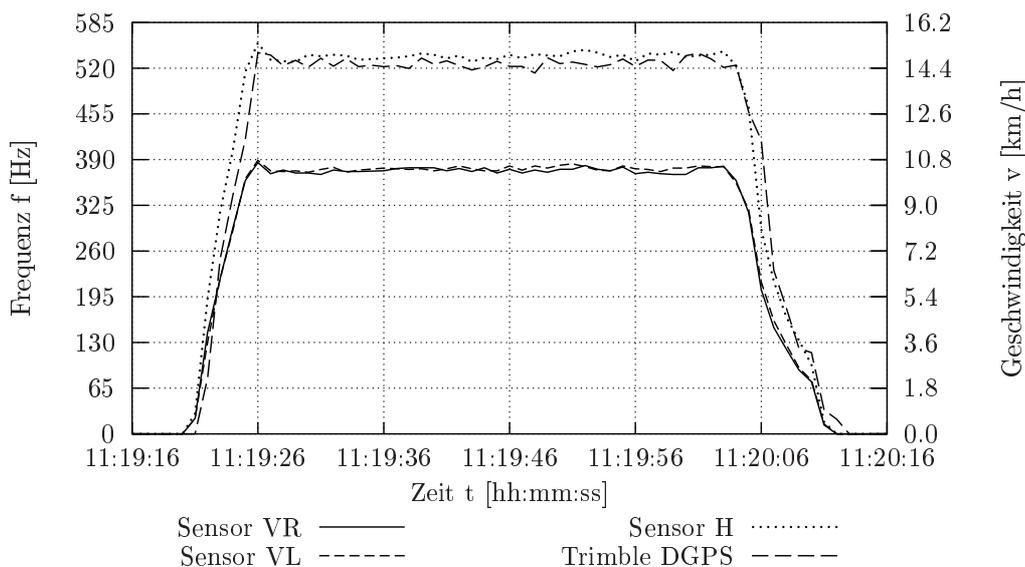


Abbildung 5.39: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 3-6

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 15 km/h betragen die Mittelwerte  $\bar{f}_h = 539$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 376$  Hz,  $\bar{f}_{vl} = 379$  Hz und bestätigen die Richtigkeit der Annahmen.

Eine Übersicht der berechneten Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten aus den 3 vorgestellten Messreihen zeigen die Tabellen 5.12 und 5.13. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die mathematischen Zusammenhänge zwischen Sensor *H* und Sensor *VR* bzw. Sensor *VL* zutreffen. Es sind keine Auffälligkeiten zu verzeichnen.

Tabelle 5.12: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

<i>M-Nr.</i>	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{vDGPS}$ [km/h]	$\bar{V}_{vDGPS}$ [%]
1	4,9	0,1	2,0
2	9,8	0,2	2,0
3	14,8	0,2	1,4

Tabelle 5.13: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

<i>M-Nr.</i>	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
1	177	2,6	1,5	124	1,9	1,5	125	1,9	1,5
2	359	3,2	0,9	250	2,4	1,0	252	2,6	1,0
3	539	6,4	1,2	376	4,6	1,2	379	4,9	1,3

Tabelle 5.14 zeigt einen Vergleich zwischen dem nach Gleichung 5.1 berechneten  $\bar{f}_{45^\circ}$  und den aus den Messwerten berechneten Mittelwerten  $\bar{f}_{vr}$  und  $\bar{f}_{vl}$ . Darüberhinaus wurde der relative Fehler der Mittelwerte der beiden vorderen Sensoren zum theoretischen Wert bestimmt.

Tabelle 5.14: Mittelwerte und Fehler bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

<i>M-Nr.</i>	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{f}_{45^\circ}$ [Hz]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\Delta\bar{f}_{vr}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\Delta\bar{f}_{vl}$ [%]
1	4,9	177	125	124	0,8	125	0,0
2	9,8	359	254	250	1,6	252	0,8
3	14,8	539	381	376	1,3	379	0,5

Die Tatsache, dass in allen 3 Messreihen  $\Delta\bar{f}_{vl} < \Delta\bar{f}_{vr}$  ist, deutet auf einen geringfügig höheren, montagebedingten Winkelfehler bei Sensor *VR* in horizontaler und/oder vertikaler Richtung hin.

Nach den Tests bei Geradeausfahrten wurden beide Anordnungen auf ihre Tauglichkeit bei Kurvenfahrten untersucht.

## 5.2.2 Kreisfahrten am Versuchsstandort 2

### 5.2.2.1 90°-Sensoranordnung

Der Versuchsstandort 2 bot mit seinem geteerten kreisförmigen Streckenverlauf ideale Voraussetzungen für Kurvenfahrten. Die Teststrecke wurde im und entgegen dem Uhrzeigersinn in mehrfacher Wiederholung abgefahren. Zur DGPS-Ortung kam, wie bei den Fahrten am Versuchsstandort 1 mit 90°-Anordnung, der Motorola DGPS-Empfänger zum Einsatz.

In den Abbildungen C.4 und C.5 sind Kreisfahrten mit mehrfacher Wiederholung dargestellt. Besonders auffällig sind die starken Schwankungen in der gemessenen DGPS-Geschwindigkeit, welche zyklisch unterhalb bzw. oberhalb der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit liegt. Für eine einzige Kreisfahrt ergibt sich beispielsweise der in Abbildung C.6 gezeigte Verlauf. Typisch für die mit DGPS ermittelte Fahrgeschwindigkeit ist ein Minimum und ein Maximum während einer vollständigen Kreisfahrt.

Bei Betrachtung der von den Radarsensoren ermittelten Frequenzen fällt die weitgehende Übereinstimmung zwischen Sensor  $V$  und  $H$  bzw.  $R$  und  $L$  auf. Nach ersten Überlegungen sollten sich bei den Messwerten von Sensor  $R$  und  $L$  quantitative Unterschiede einstellen. Eine Fahrt im Uhrzeigersinn führt bei Sensor  $L$  zu größeren Messwerten als bei Sensor  $R$ , da Sensor  $L$  einen weiteren Weg zurücklegt und damit dessen Geschwindigkeit über Grund größer ist als die von Sensor  $R$ . Die Verhältnisse kehren sich um, wenn der Traktor entgegen dem Uhrzeigersinn fährt.

Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für den Messbereich mit konstanter Fahrgeschwindigkeit für Messreihe 1 (im Uhrzeigersinn) und Messreihe 2 (entgegen dem Uhrzeigersinn) sind in den Tabellen 5.15 und 5.16 gegenübergestellt.

Tabelle 5.15: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{vDGPS}$ [km/h]	$\bar{V}_{vDGPS}$ [%]
1	8,0	1,1	13,8
2	8,0	1,1	13,8

Tabelle 5.16: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in 90°-Anordnung ( $n = 10$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{f}_v$ [Hz]	$\bar{s}_{f_v}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_v}$ [%]	$\bar{f}_r$ [Hz]	$\bar{s}_{f_r}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_r}$ [%]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_l$ [Hz]	$\bar{s}_{f_l}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_l}$ [%]
1	291	7,3	2,5	58	4,8	8,3	290	7,1	2,4	58	4,2	7,2
2	289	11,5	4,0	62	4,4	7,1	288	12,1	4,2	68	4,2	6,2

Die größeren Standardabweichungen bei Sensor  $V$  und  $H$  in Messreihe 2 sind auf ein Brems- und ein Beschleunigungsmanöver während der 1. Kreisfahrt zurückzuführen. Aus den Abbildungen C.4 und C.5 sowie den Tabellen 5.15 und 5.16 ist ersichtlich, dass die angestellten Überlegungen für diese Messanordnung nicht zutreffen. Die Messwerte von Sensor  $R$  und Sensor  $L$  sind nahezu identisch. Werden die Werte von Sensor  $R$  und Sensor  $L$  von den Geradeausfahrten aus Tabelle 5.11 auf eine Geschwindigkeit von 8 km/h interpoliert, so ergeben sich  $\bar{f}_r = 30$  Hz und  $\bar{f}_l = 28$  Hz. Ein Vergleich dieser Werte mit den in Tabelle 5.16 aufgelisteten Werten für  $\bar{f}_r$  und  $\bar{f}_l$  zeigt, dass der Messfehler der bei einer Geradeausfahrt auftritt ca. 50 % der Messwerte der gezeigten Kreisfahrten beträgt. Diese Fehlerbetrachtung und die weitgehende Übereinstimmung der Messwerte von Sensor  $R$  und Sensor  $L$  während einer Kreisfahrt lassen den Schluss zu, dass diese Messanordnung nicht geeignet ist, Kreisfahrten oder Kurvenfahrten zu erfassen.

Damit musste die Y-Anordnung den Beweis erbringen, dass die im Prüfstand erzielten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Erwartungen auch in Feldversuchen reproduzierbar sind.

### 5.2.2.2 Y-Sensoranordnung

Die bei der 90°-Sensoranordnung vermisste Differenz zwischen den Messwerten von Sensor  $R$  und  $L$  ist in der Y-Anordnung bei Sensor  $VR$  und  $VL$  anzutreffen (Abb. 5.40, 5.41 und C.7).

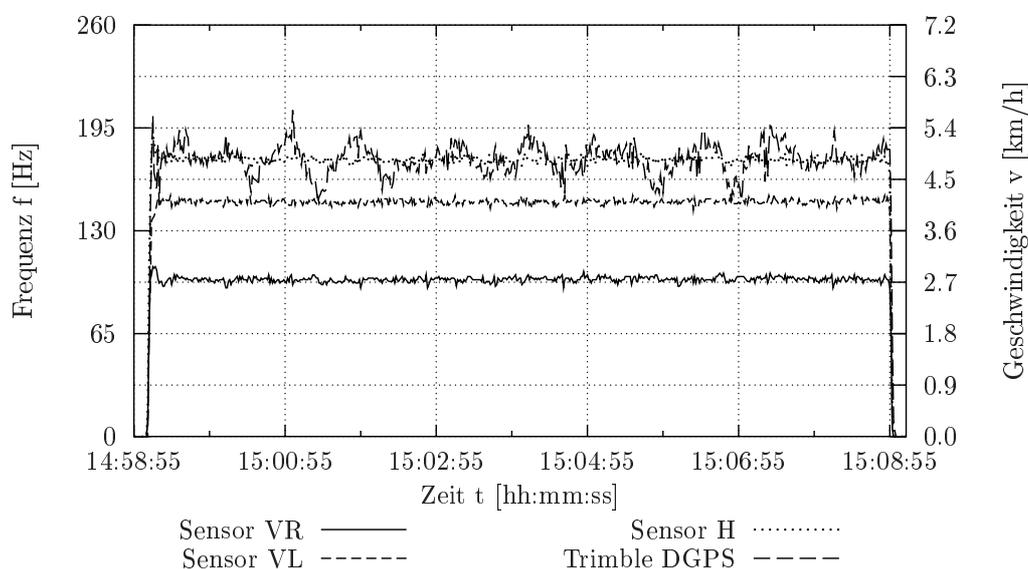


Abbildung 5.40: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 1

In diesen Diagrammen sind Fahrten im Uhrzeigersinn mit 10 Wiederholungen dargestellt. Bei Bewegung im Uhrzeigersinn resultiert die Differenz daraus, dass Sensor  $VL$  einen betragsmäßig weiteren Weg je Zeiteinheit zurücklegt als Sensor  $VR$ . Belegt wird diese Tatsache ebenfalls durch Mittelwerte der gemessenen

Frequenzen (Tab. 5.18) im Bereich konstanter Geschwindigkeit mit  $\bar{f}_h = 175$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 101$  Hz und  $\bar{f}_{vl} = 147$  Hz bei einer mittleren von DGPS bestimmten Fahrgeschwindigkeit von  $\bar{v}_{DGPS} = 4,9$  km/h.

Die DGPS-Ortungsdaten generierte der Trimble AgGPS 132. Wie schon beim Motorola DGPS-Empfänger sind deutliche Schwankungen in der ermittelten Fahrgeschwindigkeit zu sehen. Im Gegensatz dazu gibt der gleichförmig verlaufende Graph von Sensor *H* die tatsächliche Geschwindigkeit wieder. Das gleiche Bild zeigt sich bei Fahrten mit  $\bar{v}_{DGPS} = 9,8$  km/h. Hier erreichen die mittleren Messfrequenzen im Bereich konstanter Geschwindigkeit Werte von  $\bar{f}_h = 353$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 201$  Hz und  $\bar{f}_{vl} = 297$  Hz.

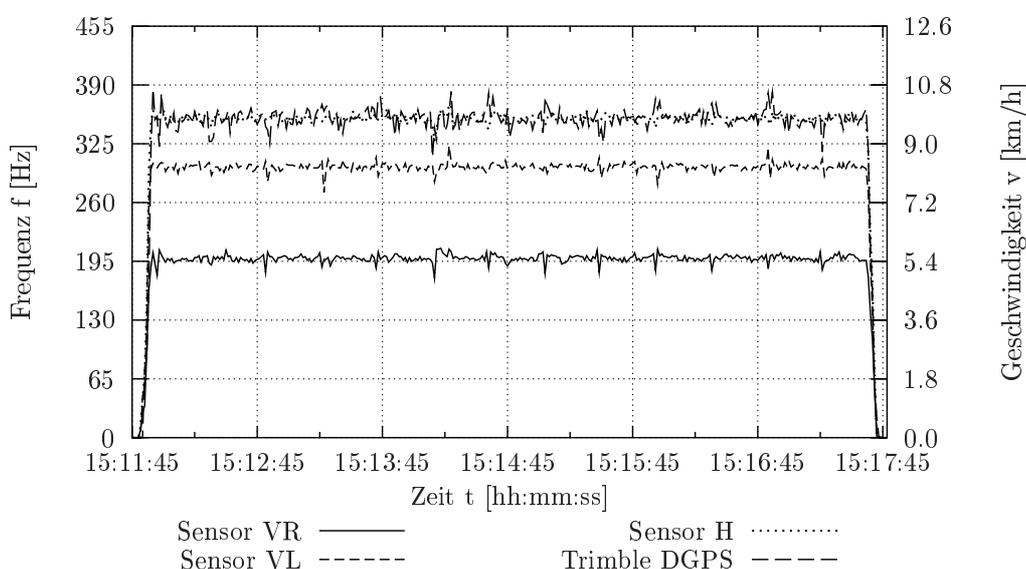


Abbildung 5.41: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 2

Bei Fahrten entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn kehrt sich das Bild um. Die Graphen in den Abbildungen 5.42, 5.43 und C.8 zeigen, dass durch Sensor *VR* quantitativ höhere Messwerte ermittelt wurden als durch Sensor *VL*. In dieser Bewegungsrichtung ist der zurückgelegte Weg je Zeiteinheit von Sensor *VR* größer als der von Sensor *VL*.

Für Messreihe 4 mit  $\bar{v}_{DGPS} = 4,9$  km/h liegen die Mittelwerte der gemessenen Frequenzen im Bereich konstanter Geschwindigkeit bei  $\bar{f}_h = 175$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 148$  Hz und  $\bar{f}_{vl} = 102$  Hz.

Steigt die Fahrgeschwindigkeit wie bei Messreihe 5 auf  $\bar{v}_{DGPS} = 9,9$  km/h an, so ergeben sich die gemittelten Frequenzen zu  $\bar{f}_h = 353$  Hz,  $\bar{f}_{vr} = 298$  Hz und  $\bar{f}_{vl} = 205$  Hz.

Auch bei höherer Geschwindigkeit von ca. 15 km/h setzen sich die Tendenzen

bei Kreisfahrten im Uhrzeigersinn (Messreihe 3, Abbildung C.7) und entgegen dem Uhrzeigersinn (Messreihe 6, Abbildung C.8) fort.

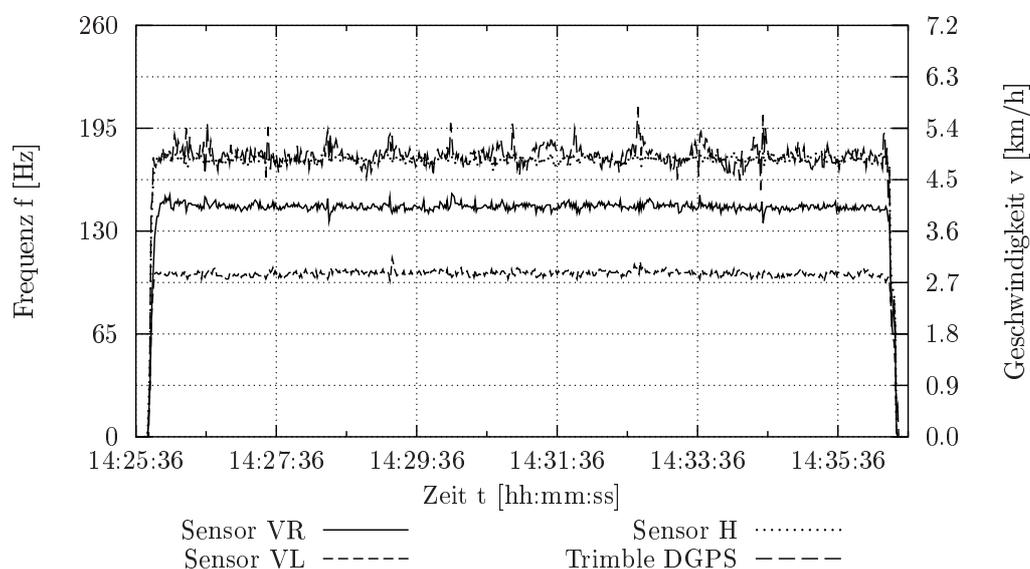


Abbildung 5.42: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 4

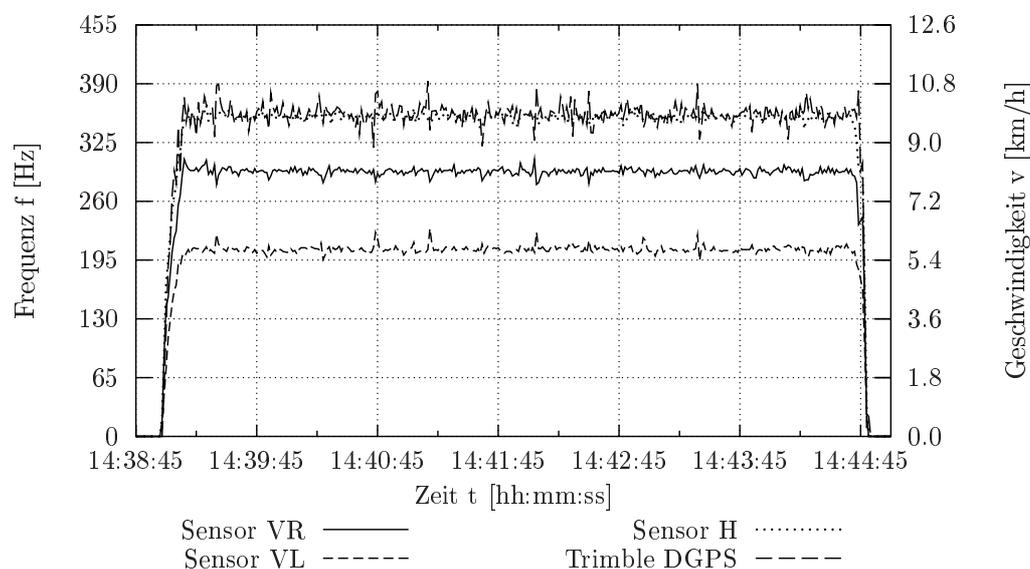


Abbildung 5.43: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 5

In den Tabellen 5.17 und 5.18 sind die berechneten Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten aufgelistet. Die Werte von  $\bar{v}_{DGPS}$  und  $\bar{f}_h$  lassen den Schluss zu, dass die Fahrgeschwindigkeiten im Uhrzeigersinn und entgegen dem Uhrzeigersinn nahezu identisch sind. Damit ist ein Vergleich von  $\bar{f}_{vr}$  und  $\bar{f}_{vl}$  für beide Fahrtrichtungen zulässig.

Tabelle 5.17: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{v_{DGPS}}$ [km/h]	$\bar{V}_{v_{DGPS}}$ [%]
1	4,9	0,3	6,1
4	4,9	0,2	4,1
2	9,8	0,3	3,1
5	9,9	0,3	3,0
3	14,8	0,5	3,4
6	14,9	0,4	2,7

Tabelle 5.18: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 10$ )

$M-Nr.$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
1	175	1,7	1,0	101	1,6	1,6	147	1,6	1,1
4	175	2,0	1,1	148	2,1	1,4	102	1,7	1,7
2	353	4,2	1,2	201	4,1	2,0	297	4,4	1,5
5	353	3,8	1,1	298	3,9	1,3	205	3,9	1,9
3	528	11,5	2,2	299	7,7	2,6	450	9,3	2,1
6	531	7,0	1,3	447	7,5	1,7	302	6,2	2,1

Zunächst werden die gemittelten Frequenzen  $\bar{f}_{vr}$  und  $\bar{f}_{vl}$  mit dem theoretischen Wert  $\bar{f}_{45^\circ}$  verglichen. Bei Geradeausfahrt sind im Idealfall alle 3 Werte identisch. Im Gegensatz dazu ergeben sich bei einer Kreisfahrt je nach Fahrtrichtung Abweichungen von  $\bar{f}_{vr}$  und  $\bar{f}_{vl}$  gegenüber  $\bar{f}_{45^\circ}$  (Tab. 5.19). Als Indiz für eine Kreisfahrt ohne auftretende Neigungswinkelfehler sollten diese betragsmäßigen Abweichungen innerhalb jeder Messreihe weitgehend identisch sein.

Tabelle 5.19: Mittelwerte und Abweichungen zum theoretischen Wert bei Kreisfahrten in Y-Anordnung

$M-Nr.$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{f}_{45^\circ}$ [Hz]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$ \bar{f}_{45^\circ} - \bar{f}_{vr} $ [Hz]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$ \bar{f}_{45^\circ} - \bar{f}_{vl} $ [Hz]
1	175	124	101	23	147	23
4	175	124	148	24	102	22
2	353	250	201	49	297	47
5	353	250	298	48	205	45
3	528	373	299	74	450	77
6	531	375	447	72	302	73

Unter Berücksichtigung identischer Fahrwege mit gleichen Kreisradien ist mit der Gleichheit von  $\bar{f}_{vr}$  (im Uhrzeigersinn) und  $\bar{f}_{vl}$  (entgegen dem Uhrzeigersinn) sowie umgekehrt zu rechnen. Sensor  $VR$  weist bei Fahrt im Uhrzeigersinn die gleiche Entfernung zum Kreismittelpunkt auf, wie Sensor  $VL$  bei Fahrt entgegen

dem Uhrzeigersinn. Demzufolge legen beide Sensoren die gleiche Wegstrecke je Zeiteinheit zurück und sollten gleiche Messergebnisse erzielen. Diese Annahme trifft auch für Sensor *VL* bei Fahrt im Uhrzeigersinn und Sensor *VR* bei Fahrt entgegen dem Uhrzeigersinn zu. Damit gilt:

- $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 1 =  $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 4
- $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 1 =  $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 4
- $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 2 =  $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 5
- $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 2 =  $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 5
- $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 3 =  $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 6
- $\bar{f}_{vl}$  aus Messreihe 3 =  $\bar{f}_{vr}$  aus Messreihe 6

Tabelle 5.20 zeigt, dass diese Annahmen unter Berücksichtigung geringer prozentualer Unterschiede zwischen den mittleren Frequenzen beider Sensoren zutreffen. Für die Ermittlung der Abweichungen wurden den Werten von  $\bar{f}_{vl}$  100 % zugrundegelegt.

Tabelle 5.20: Mittelwerte und Fehler bei Kreisfahrten in Y-Anordnung

<i>M-Nr.</i>	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	<i>M-Nr.</i>	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\Delta\bar{f}_{vr-vl}$ [%]
1	101	4	102	1,0
2	201	5	205	2,0
3	299	6	302	1,0
4	148	1	147	-0,7
5	298	2	297	-0,3
6	447	3	450	0,7

Eine Berücksichtigung möglicher Fehlerquellen lässt die ermittelten Fehler unwesentlich erscheinen. Unterschiedliche Luftdrücke in den Reifen, geringe Verschiebungen der Messkabine in der Drei-Punkt-Aufhängung und kleine Bodenunebenheiten können ebenfalls Ursachen von Abweichungen sein.

Schwankungen in der mit DGPS bestimmten Fahrgeschwindigkeit zeigen sich bei allen aufgenommenen Messreihen. Trotz modernster Empfängertechnik ist eine exakte Messung der Fahrgeschwindigkeit bei Kreisfahrten nicht möglich. Grund hierfür kann der geringe Streckenunterschied sein, der dem Durchmesser des abgefahrenen Kreises entspricht. Bei Kreisfahrten mit größeren Durchmessern sollte der dargestellte Effekt geringer ins Gewicht fallen.

Nachdem die 90°-Sensoranordnung und die Y-Anordnung ihre unterschiedlichen Potentiale zur Erfassung von Geradeausfahrten und Kreisfahrten auf geteertem Untergrund gezeigt haben, folgen am Versuchstandort 3 Geradeausfahrten und Kurvenfahrten auf einer Wiese. Insbesondere Bodenunebenheiten führen zu Fahrzeugschwingungen und damit zu Neigungswinkelfehlern.

## 5.2.3 Tests am Versuchsstandort 3

### 5.2.3.1 90°-Sensoranordnung

Im Rahmen der Versuche am Standort 3 erfolgten Fahrten in markierten Fahrspuren inklusive Wenden gemäß Abbildung 4.20 und verschiedene Kurvenfahrten wie in Abbildung 4.22 gezeigt. Trotz der Erkenntnisse aus Kapitel 5.2.2.1 sollte diese Sensoranordnung unter Einsatzbedingungen, die der realen Feldarbeit sehr nahe kommen, nochmals getestet werden.

Aus Abbildung 4.20 geht hervor, dass sich die erste Fahrspur in nächster Nähe zum Waldrand befindet. Demzufolge ist mit starker Abschattung bei der Satellitenortung zu rechnen. Der extrem schwankende Kurvenverlauf der mit DGPS bestimmten Fahrgeschwindigkeit bestätigt diese Annahme (Abb. 5.44). Im Vergleich dazu geben die Sensoren  $V$  und  $H$  den tatsächlichen Fahrgeschwindigkeitsverlauf fehlerfrei wieder.

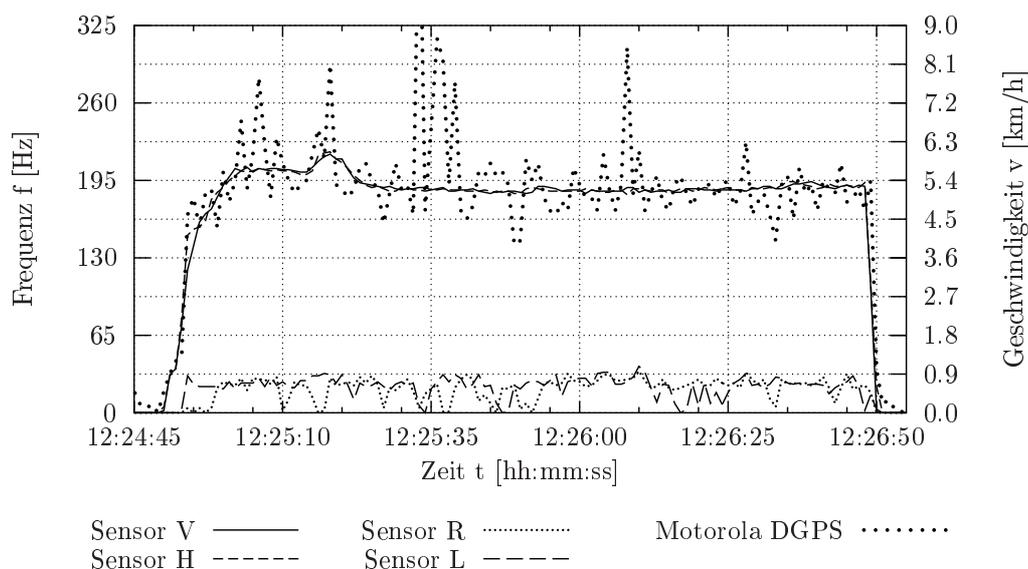


Abbildung 5.44: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-1 in Fahrspur 1

Mit einem Abstand von ca. 7 m zum Waldrand verläuft die Fahrt in Fahrspur 2. Bereits bei dieser Distanz zum Waldrand ist eine präzisere Satellitenortung an der durch DGPS ermittelten Fahrgeschwindigkeit zu erkennen (Abb. 5.45). Die Graphen von Sensor  $V$  und  $H$  weisen nahezu identische Verläufe auf.

Die Messungen in der vom Waldrand am weitesten entfernten Fahrspur 3 (Abb. 5.46) führen nochmals zu einer deutlichen Reduzierung der Schwankungen im Verlauf der DGPS-Geschwindigkeit. Gegenüber den Kurvenverläufen für die Fahrspuren 1 und 2 weisen die Graphen von Sensor  $V$  und  $H$  erwartungsgemäß keine Unterschiede auf.

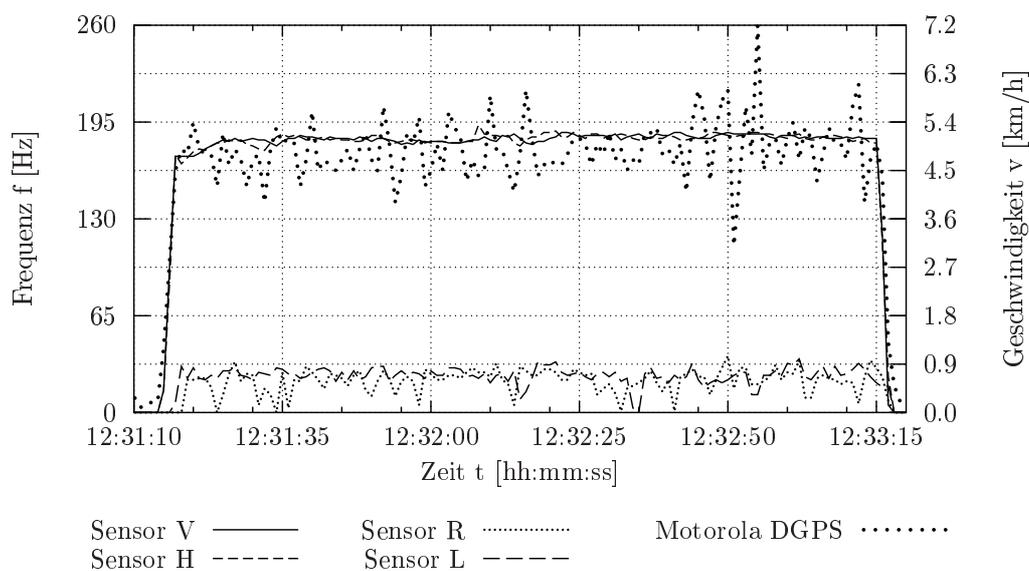


Abbildung 5.45: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-2 in Fahrspur 2

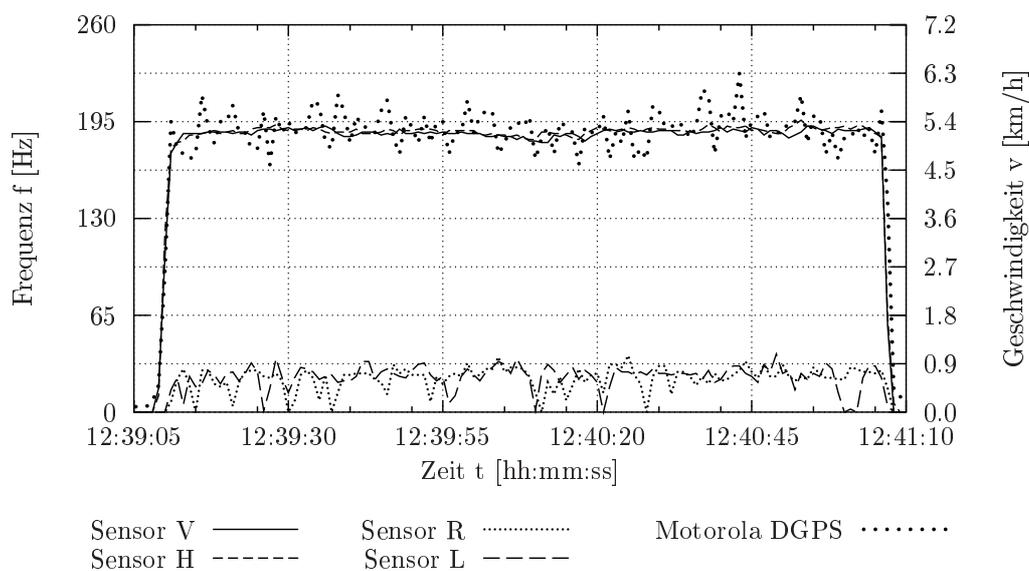


Abbildung 5.46: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-3 in Fahrspur 3

Bereits aus den Untersuchungen dieser Sensoranordnung am Versuchstandort 1 ist bekannt, dass die durch Sensor *R* und *L* gemessenen Geschwindigkeiten bei Geradeausfahrt fehlerbehaftet sind. Ebenso fallen die von Sensor *R* und *L* ermittelten Geschwindigkeiten bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 5 km/h teilweise auf den Wert 0 ab. Diese Erkenntnisse werden durch die Messfahrten 1-1, 1-2 und 1-3 bestätigt.

Gegenläufige Tendenzen in den Kurvenverläufen von Sensor  $V$  und  $H$  sind nicht zu erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Traktor mit angebaute Messkabine keine Nickschwingungen ausgeführt hat. Eine zuverlässige Aussage für aufgetretenes Wanken auf Basis der Graphen von Sensor  $R$  und  $L$  ist wegen der stark schwankenden und fehlerbehafteten Kurvenverläufe beider Sensoren nicht möglich.

Die Tabellen 5.21 und 5.22 enthalten die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der in den einzelnen Fahrspuren gemessenen Werte. Die Werte beziehen sich nur auf den Bereich der konstanten Geschwindigkeit.

Tabelle 5.21: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei 90°-Anordnung in den Fahrspuren 1 bis 3

$M-Nr.$	$V-Nr.$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{vDGPS}$ [km/h]	$\bar{V}_{vDGPS}$ [%]
1	1	5,5	1,1	20,0
1	2	4,9	0,5	10,2
1	3	5,3	0,3	5,7

Tabelle 5.22: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei 90°-Anordnung in den Fahrspuren 1 bis 3

$M-Nr.-$ $V-Nr.$	$\bar{f}_v$ [Hz]	$\bar{s}_{fv}$ [Hz]	$\bar{V}_{fv}$ [%]	$\bar{f}_r$ [Hz]	$\bar{s}_{fr}$ [Hz]	$\bar{V}_{fr}$ [%]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{fh}$ [Hz]	$\bar{V}_{fh}$ [%]	$\bar{f}_l$ [Hz]	$\bar{s}_{fl}$ [Hz]	$\bar{V}_{fl}$ [%]
1-1	192	7,7	4,0	22	8,5	38,6	191	7,7	4,0	23	8,1	35,2
1-2	184	2,1	1,1	22	7,9	35,9	184	2,6	1,4	25	5,4	21,6
1-3	188	2,3	1,2	23	7,8	33,9	189	2,4	1,3	24	7,7	32,1

Erkennbar ist, dass die gegenüberliegenden Sensoren  $V$  und  $H$  übereinstimmende Werte erzielt haben. Die hohen Standardabweichungen bei Messfahrt 1-1 von  $s_{fv} = 7,7$  Hz und  $s_{fh} = 7,7$  Hz resultieren aus der kurzzeitigen Schwankung der Fahrgeschwindigkeit im 1. Drittel dieser Fahrt. Ebenso sind die Standardabweichungen des rechten und linken Sensors für alle 3 Messfahrten als sehr hoch zu bewerten. Ursache dafür ist der sporadische Abfall der Messwerte auf 0.

Unter realen Bedingungen muss auch das Wendemanöver zwischen den einzelnen Fahrspuren berücksichtigt werden. In Abbildung C.9 ist ein solcher Fahrverlauf dargestellt. Aus den Graphen der Sensoren  $R$  und  $L$  ist jedoch nicht ersichtlich, in welche Richtung der Traktor gefahren ist. Bei diesem Wendemanöver handelte es sich um eine Kurvenfahrt entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn. Dabei legt Sensor  $R$  gegenüber Sensor  $L$  einen weiteren Weg je Zeiteinheit zurück, so dass die von Sensor  $R$  bestimmte Geschwindigkeit einen höheren Betrag aufweisen sollte, als die von Sensor  $L$ . Durch das Diagramm wird diese Annahme widerlegt.

Die vorgestellten Ergebnisse der Tests in den Fahrspuren 1 bis 3 und des Wendemanövers bestätigen alle bisherigen Versuchsergebnisse der Geradeausfahrten

am Standort 1 und der Kreisfahrten am Standort 2. Die  $90^\circ$ -Sensoranordnung ist nicht in der Lage krummlinige Streckenverläufe zu erfassen [36, 37]. Deshalb muss sich die Y-Anordnung nach dem erfolgreichen Abschneiden bei den Untersuchungen an den Versuchsstandorten 1 und 2 den Tests am Standort 3 unterziehen.

### 5.2.3.2 Y-Sensoranordnung

Zu den 3 bekannten Fahrspuren wurden die Tests um eine 4. Fahrspur zwischen Fahrspur 1 und dem Waldrand erweitert. Diese Fahrspur verläuft nicht geradlinig, sondern passt sich der Kontur des Waldrandes an. Der zu befahrene Untergrund weist größere Unebenheiten auf als die in der Wiese angelegten Fahrspuren 1 bis 3. Zur Ortung mit DGPS stand der in die ESMERALDA-Station integrierte Ashtech DGPS-Empfänger mit lokaler GPS/GLONASS-Referenzstation zur Verfügung.

Aus den geringfügig schwankenden Verläufen bei Sensor  $H$  in den Abbildungen 5.47, 5.48 und 5.49 ist abzuleiten, dass die Fahrgeschwindigkeit des Traktors über die gesamte Versuchsdauer nicht konstant gehalten werden konnte. Diese minimalen Veränderungen der Fahrgeschwindigkeit sind jedoch nicht die Ursache für die durch den DGPS-Empfänger ermittelten Schwankungen in der Fahrgeschwindigkeit. Trotz der verbesserten Empfängereigenschaften des Ashtech GG24 beträgt die Standardabweichung bei Messfahrt 2-1 noch  $\bar{s}_{v_{DGPS}} = 0,3 \text{ km/h}$ .

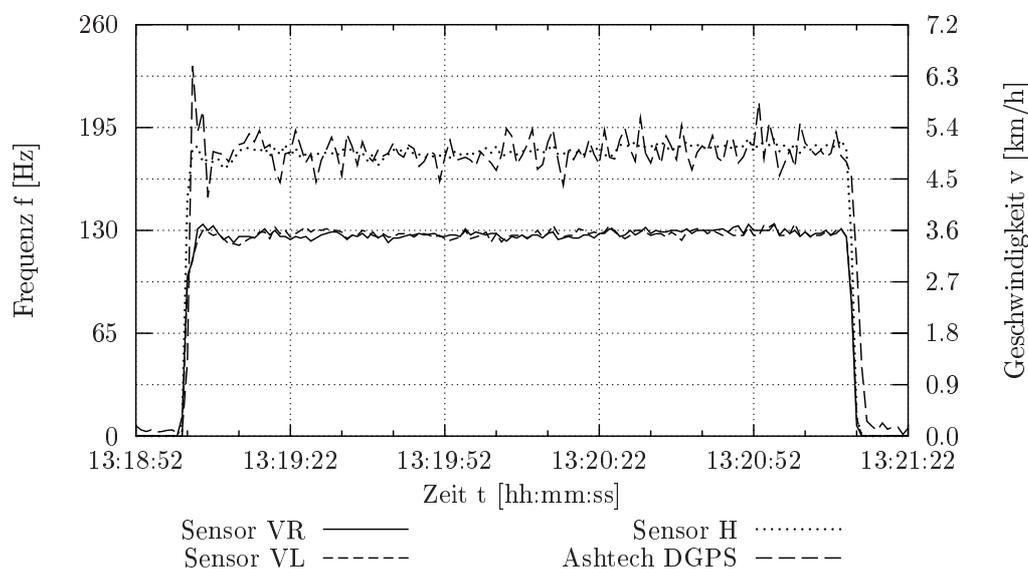


Abbildung 5.47: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-1 in Fahrspur 1

Auffällig ist das bei den Messfahrten 2-1 und 2-3 auftretende Maximum beim Ashtech DGPS am Ende der Beschleunigungsphase. Im Gegensatz dazu tritt dieser Effekt bei Messfahrt 2-2 nicht auf. Dieser Sachverhalt deutet auf Unstimmigkeiten im Berechnungsalgorithmus des DGPS-Empfängers hin. Es besteht die Möglichkeit, dass der Empfänger die Geschwindigkeit auf Basis der vorherigen

Messwerte schätzt und im voraus berechnet. Ändert sich die Geschwindigkeit abrupt, können derartige Messfehler auftreten. Diese Aussage ist jedoch nur eine Vermutung und keine zufriedenstellende Erklärung.

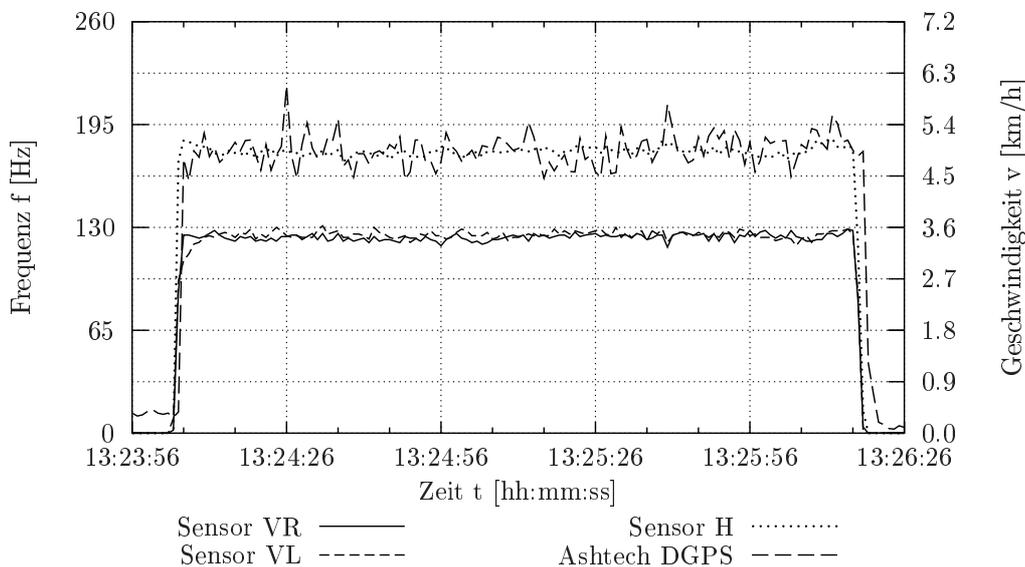


Abbildung 5.48: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-2 in Fahrspur 2

Bei allen 3 Messfahrten sind nur sehr geringe Unterschiede in den Geschwindigkeitsverläufen von Sensor *VR* und Sensor *VL* zu beobachten. Gegensätzliche Kurvenverläufe sind nicht zu sehen. Das deutet auf einen überwiegend ebenen Untergrund hin.

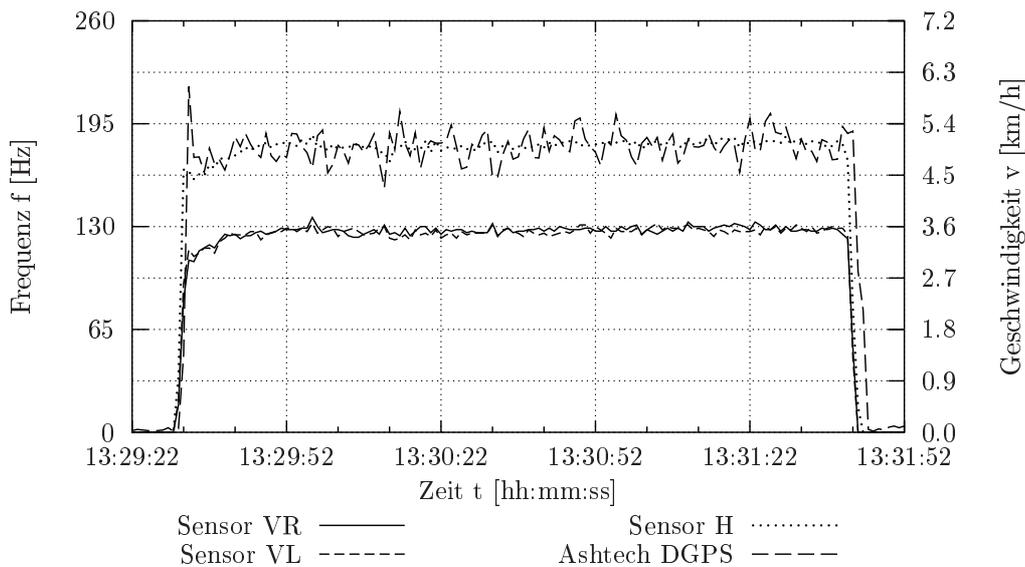


Abbildung 5.49: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-3 in Fahrspur 3

Hingegen sind in Abbildung 5.50 gegensätzliche Tendenzen von Sensor *VR* und *VL* deutlich ausgeprägt. Hierbei handelt es sich um geringe Nick- und ausgeprägte Wankschwingungen. Diese Aussage lässt sich aus dem weitgehend konstanten Verlauf bei Sensor *H* und den stark schwankungsbehafteten Graphen des vorderen Sensorpaares ableiten.

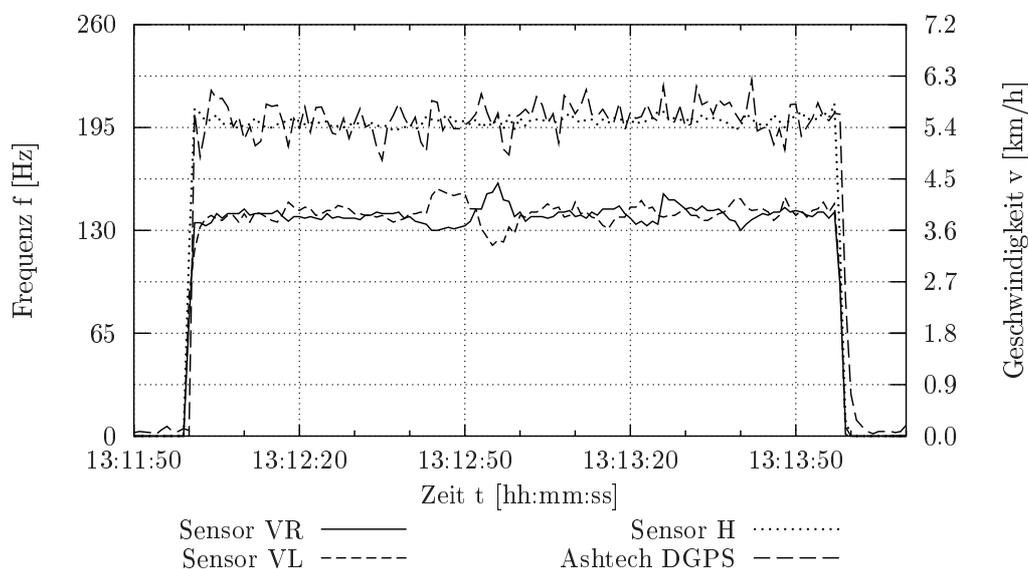


Abbildung 5.50: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-4 in Fahrspur 4

Die Messfahrten 2-4 (Abb. C.10) und 3-4 weisen nahezu gleiche Verläufe bei Sensor *VR* und *VL* auf. Das ist ein Indiz für die aufgetretenen Neigungswinkelfehler aufgrund von Bodenunebenheiten.

Erst eine Analyse der Messwerte bringt Aufschluss über die exakte Aufteilung in Nick- und Wankschwingungen. Dazu wurde der zu betrachtende Bereich aus Abbildung 5.50 herausgegriffen und in Abbildung 5.51 gesondert dargestellt. Zusätzlich enthält diese Abbildung die Graphen der aufgetretenen Nick- und Wankwinkel. Diese Winkel wurden mit den Formeln 3.35 und 3.36 bestimmt. Aus dem Diagramm ist abzulesen, dass die auftretenden Nickwinkel  $\beta$  vernachlässigbar klein sind. Hingegen zeigen sich bei Betrachtung des Kurvenverlaufs des Wankwinkels starke Schwankungen in den negativen und positiven Bereich hinein. Im ersten Abschnitt, in welchem der Graph von Sensor *VR* unterhalb des Graphen von Sensor *VL* liegt, ist der Wankwinkel  $\gamma < 0$ . Damit liegt mit Blick auf das Heck des Traktors die linke Fahrzeugseite räumlich höher als die rechte. Im zweiten Abschnitt kehren sich die Verhältnisse zwischen den beiden vorderen Sensoren um, so dass der Wankwinkel  $\gamma > 0$  ist und die rechte Fahrzeugseite räumlich höher liegt als die linke.

Zu den Zeitpunkten, bei denen der Wankwinkel  $\gamma = 0^\circ$  ist, kreuzen sich auch die Graphen von Sensor *VR* und *VL*. Das gleiche Bild zeigt sich auch in Abbildung

C.11, welche den gleichen Ausschnitt aus Messfahrt 2-4 (Abb. C.10) zeigt.

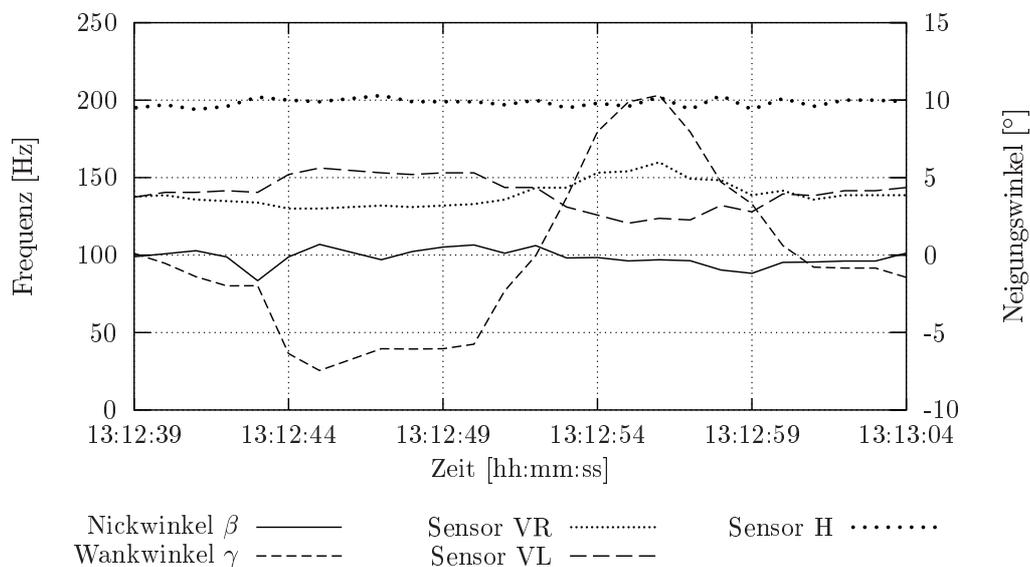


Abbildung 5.51: Ausschnitt der zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-4 in Fahrspur 4

In den Tabellen C.1 und C.2 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für die Messreihen 1 bis 6 zusammenfassend aufgelistet. Die Messreihen 4 bis 6 wurden bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 10 km/h aufgenommen. Ein Vergleich der Werte zeigt, dass die Standardabweichung  $\bar{s}_{v_{DGPS}}$  innerhalb einer Messreihe in Fahrspur 3 am geringsten und in Fahrspur 4 am größten ist.

Auch bei den Radarsensoren sind Unterschiede der Standardabweichungen zu erkennen. Während die geringen Unterschiede bei Sensor  $H$  aus der tatsächlich schwankenden Fahrgeschwindigkeit resultieren, sind bei den beiden vorderen Sensoren in Fahrspur 4 deutliche Abweichungen gegenüber den Fahrspuren 1 bis 3 zu beobachten. Diese haben ihre Ursache in den, durch Bodenunebenheiten bedingten, auftretenden Neigungswinkelfehlern. Mit steigender Fahrgeschwindigkeit erhöhen sich ebenfalls die Standardabweichungen.

Ein weitgehend identischer Messwertverlauf von Sensor  $VR$  und  $VL$  zeigt sich bereits in den Abbildungen 5.47, 5.48 und 5.49. Der Vergleich mit den in Tabelle 5.23 aufgelisteten theoretischen Werten bei Geradeausfahrt  $\bar{f}_{45^\circ}$  bestätigt diesen Sachverhalt. Die Werte beider Sensoren weisen geringe prozentuale Unterschiede zum theoretischen Wert auf.

Diese weitgehende Übereinstimmung bei Geradeausfahrten ist die Grundlage für die Fehlerbetrachtung zwischen den beiden vorderen Sensoren bei Kurvenfahrten. Jede Änderung der Sensoranordnung führt zur Notwendigkeit, erneut Geradeausfahrten durchzuführen, um die Verhältnisse zwischen den Sensoren  $VR$  und  $VL$

zu erfassen.

Tabelle 5.23: Mittelwerte und Fehler bei Y-Anordnung in verschiedenen Fahrspuren

$M\text{-Nr.}$	$V\text{-Nr.}$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{f}_{45^\circ}$ [Hz]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$ \Delta\bar{f}_{vr} $ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$ \Delta\bar{f}_{vl} $ [%]
1	1	4,9	181	128	128	0,0	128	0,0
1	2	5,1	185	131	129	1,5	131	0,0
1	3	5,0	181	128	128	0,0	127	0,8
1	4	5,6	199	141	140	0,7	140	0,7
2	1	5,0	180	127	128	0,8	128	0,8
2	2	5,0	178	126	124	1,6	125	0,8
2	3	5,0	181	128	128	0,0	127	0,8
2	4	5,2	180	127	127	0,0	127	0,0
3	1	5,1	180	127	128	0,8	128	0,8
3	2	5,0	180	127	126	0,8	126	0,8
3	3	5,0	181	128	127	0,8	127	0,8
3	4	4,9	181	128	126	1,6	128	0,0
4	1	9,7	353	250	250	0,0	249	0,4
4	2	10,0	362	256	252	1,6	259	1,2
4	3	9,8	357	252	253	0,4	252	0,0
4	4	10,0	362	256	254	0,8	256	0,0
5	1	9,9	357	252	249	1,2	251	0,4
5	2	10,0	356	252	250	0,8	254	0,8
5	3	9,7	354	250	248	0,8	250	0,0
5	4	10,7	363	257	255	0,8	255	0,8
6	1	10,0	358	253	254	0,4	255	0,8
6	2	9,9	360	255	252	1,2	256	0,4
6	3	9,8	356	252	253	0,4	253	0,4
6	4	9,9	363	257	253	1,6	257	0,0

Die Abbildungen 5.52 und C.12 zeigen den gesamten Streckenverlauf für die 2. und 5. Messreihe. Neben den 4 Fahrspuren sind auch die Wendefahrten eingezeichnet. Die zufälligen Ausreißer verdeutlichen die Problematik der fehlerhaften Ortung mit DGPS.

Totale Ortungsausfälle sind bei Messreihe 5 in der 4. Fahrspur zu verzeichnen. Während des Totalausfalls der DGPS-Ortung ist nur noch die durch das Referenzsystem Geodimeter System 4000 aufgezeichnete Fahrspur sichtbar.

Herausgegriffen werden für die weitere Betrachtung die Wendefahrten zwischen Fahrspur 1 und 2 sowie zwischen Fahrspur 3 und 4 (Abb. 5.53). Die zeitlichen Verläufe der gemessenen Frequenzen und der DGPS-Geschwindigkeit zeigen die Abbildungen 5.54 und 5.55.

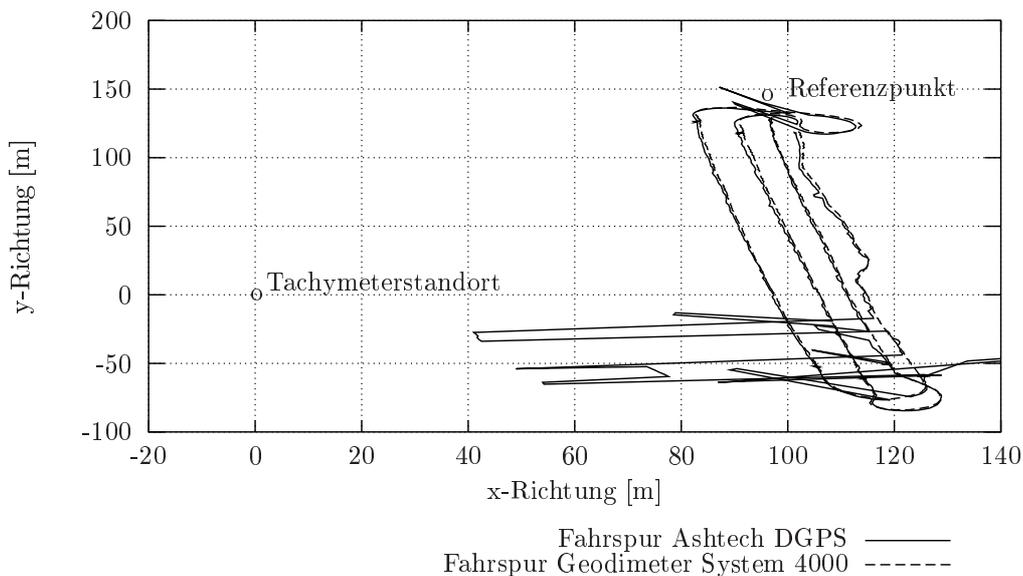


Abbildung 5.52: Ortungsfehler bei Fahrten für Messreihe 2

Beim Wendemanöver zwischen Fahrspur 1 und 2 ist der dreifache Richtungswechsel im Geschwindigkeitsverlauf zu erkennen. Ausgehend vom Ende der 1. Fahrspur, hier als Startpunkt gekennzeichnet, fuhr der Traktor zuerst eine Kurve im entgegengesetzten Uhrzeigersinn mit einem großen Kurvenradius. Dementsprechend ermittelt Sensor *VR* gegenüber Sensor *VL* eine höhere Geschwindigkeit.

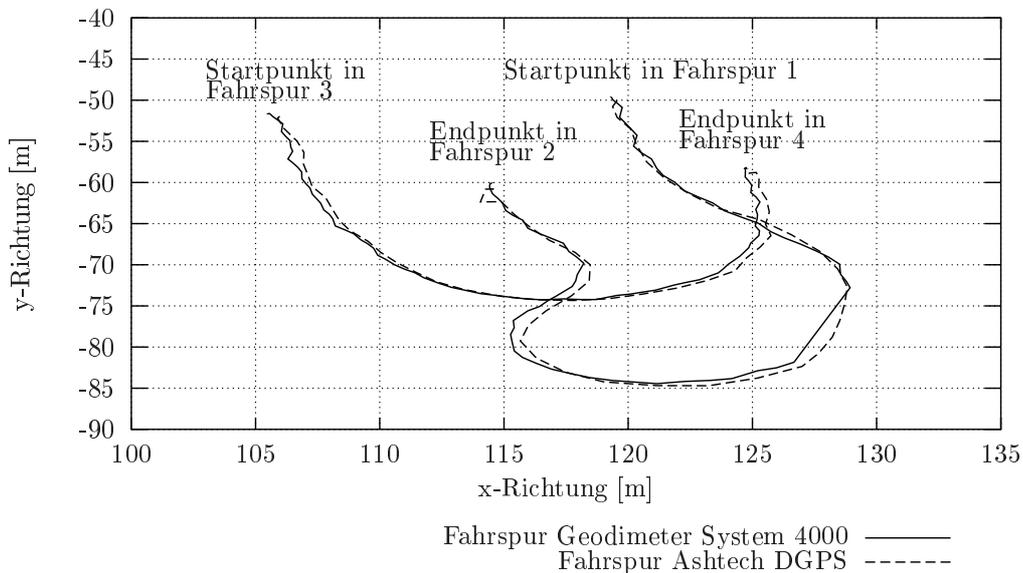


Abbildung 5.53: Wendefahrten zwischen Fahrspuren

Nach dem sich anschließenden Richtungswechsel fuhr der Traktor einen Halbkreis im Uhrzeigersinn. Damit kehren sich im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm die

Verhältnisse zwischen den vorderen Sensoren um. Zusätzlich sind noch zwei gegenläufige Tendenzen sichtbar. Zum Zeitpunkt  $t = 13:00:38$  h steigt die Messkurve von Sensor *VL* an, während bei Sensor *VR* ein Abfall zu sehen ist. Ein umgekehrtes Bild zeigt sich bei  $t = 13:00:42$  h. Sensor *VR* ermittelt eine steigende und Sensor *VL* eine sinkende Geschwindigkeit. Zu beiden Zeitpunkten kann es zu Wankschwingungen und/oder einer sprunghaften Vergrößerung und Verkleinerung des Kurvenradius gekommen sein. Die Analyse des in Abbildung 5.53 gezeigten Streckenverlaufs lässt nur den Schluss zu, dass es sich um Neigungswinkelfehler handelt, da die Fahrspur keine sprunghaften Richtungsänderungen aufweist und gleichförmig verläuft. Diese Schlussfolgerung gilt nur unter der Voraussetzung der uneingeschränkten Verfügbarkeit der notwendigen GPS-Signale.

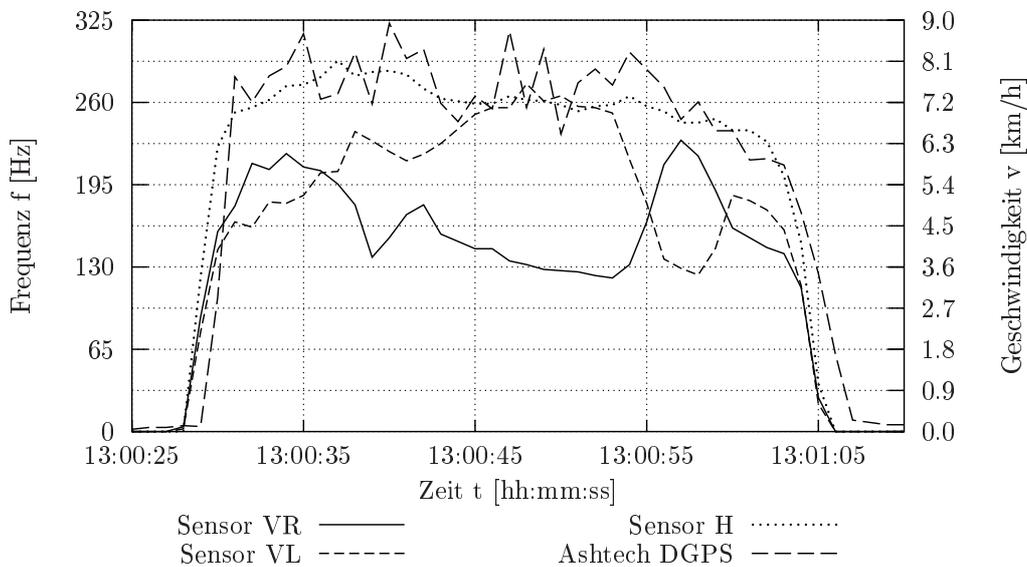


Abbildung 5.54: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-5 zwischen Fahrspur 1 und 2

Nach dem Abfahren des Halbkreises bewegte sich der Traktor zum Startpunkt in der 2. Fahrspur. Dazu war es wiederum notwendig eine Kurve im entgegengesetzten Uhrzeigersinn zurückzulegen. Diese Bewegung gibt der Geschwindigkeitsverlauf im Zeitraum von  $t = 13:00:55$  h bis  $t = 13:00:59$  h wieder. Abschließend bremste der Traktor ab und stoppte am Endpunkt, der gleichzeitig der Startpunkt der 2. Fahrspur ist.

Die Wendefahrt zwischen Fahrspur 3 und 4 wurde ohne jeglichen Richtungswechsel zurückgelegt. Wie Abbildung 5.53 verdeutlicht, verlief die Fahrt im entgegengesetzten Uhrzeigersinn vom Startpunkt beginnend, anfänglich weitgehend geradlinig. Diese Tatsache wird auch durch die Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 5.55 bis zum Zeitpunkt  $t = 13:10:32$  h wiedergegeben. Im folgenden Zeitraum von  $t = 2$  s wankte das Fahrzeug, welches am Absinken des Kurvenverlaufes von Sensor *VR* und am Ansteigen des Kurvenverlaufes von Sensor *VL* zu erkennen ist. Diese Feststellung beruht wiederum auf dem gleichförmigen Streckenverlauf

in Abbildung 5.53 und der Voraussetzung der fehlerlosen Ortung des DGPS-Empfängers. Im weiteren Verlauf wurde bei annähernd konstanter Fahrgeschwindigkeit der Lenkeinschlag vergrößert. Damit verkleinert sich der Kurvenradius und die Messkurve von Sensor *VR* steigt weiter an. Demgegenüber sinkt der Kurvenverlaufes von Sensor *VL* ab.

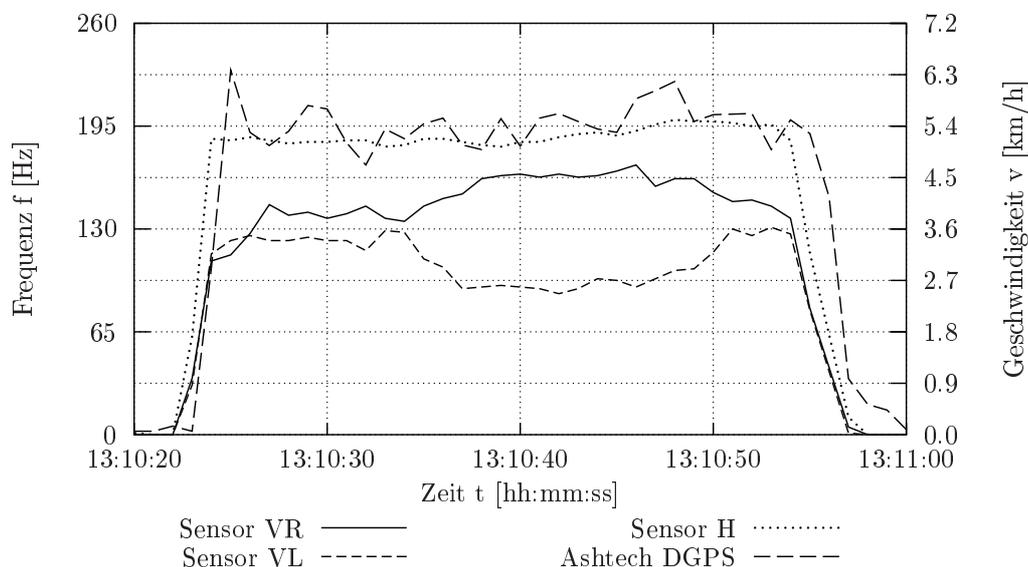


Abbildung 5.55: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-6 zwischen Fahrspur 3 und 4

Am gleichen Standort wurden Testfahrten mit den in Abbildung 4.22 dargestellten Streckenverläufen durchgeführt. Dazu zählen Kreisfahrten im Uhrzeigersinn, entgegen dem Uhrzeigersinn sowie das Abfahren einer Acht und eines Ovals. Der Versuchsaufbau und die Anordnung der Radarsensoren blieben gegenüber den Tests in den Fahrspuren 1 bis 4 unverändert.

Bei annähernd konstanten Geschwindigkeiten während der Kreisfahrten in beiden Richtungen (Abb. 5.56 und 5.57) bestätigen sich die am Versuchsstandort 2 erzielten Ergebnisse. Auch bei sich ändernden Untergrundeigenschaften und Bodenunebenheiten stimmen die Versuchsergebnisse mit denen vom Versuchsstandort 2 auf geteertem Untergrund weitestgehend überein. Dargestellt sind für beide Kreisfahrten jeweils ein Ausschnitt von 3 vollständigen Umrundungen. Während dieser 3 Umrundungen wurde die Fahrt nicht unterbrochen.

Ein Vergleich von Abbildung 5.56 mit 5.57 zeigt die charakteristischen Messwertverläufe für beide Fahrtrichtungen. Während bei Fahrten im Uhrzeigersinn durch Sensor *VL* höhere Messwerte erzielt werden als durch Sensor *VR*, kehren sich die Verhältnisse bei Kreisfahrten entgegen dem Uhrzeigersinn um. Gegenüber den Tests am Versuchsstandort 2 sind größere Schwankungen im Messwertverlauf der Radarsensoren zu beobachten. Diese Schwankungen sind dem ständigen Korrigieren der Fahrgeschwindigkeit und den Lenkbewegungen zuzuschreiben. Am Tag

der Messung regnete es, so dass der Traktor mit Messkabine auf dem nassen Untergrund, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, nur sehr schwer in der Spur gehalten werden konnte. Die aus den vorangegangenen Tests mit kreisförmigen Streckenverläufen bekannten Schwankungen in der mit DGPS bestimmten Fahrgeschwindigkeit sind auch bei diesen Versuchen anzutreffen.

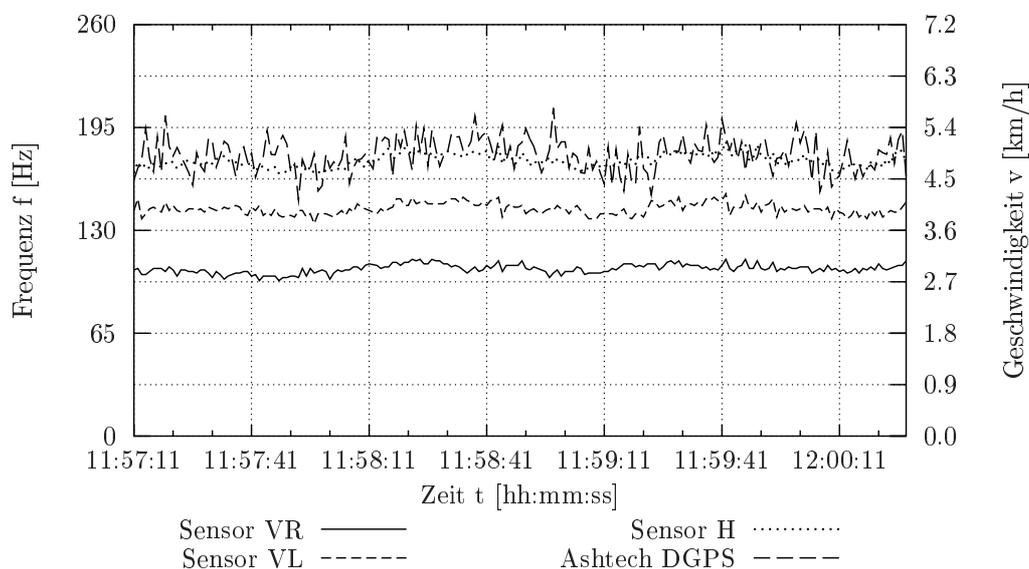


Abbildung 5.56: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 7-3 bis 7-5 im Uhrzeigersinn

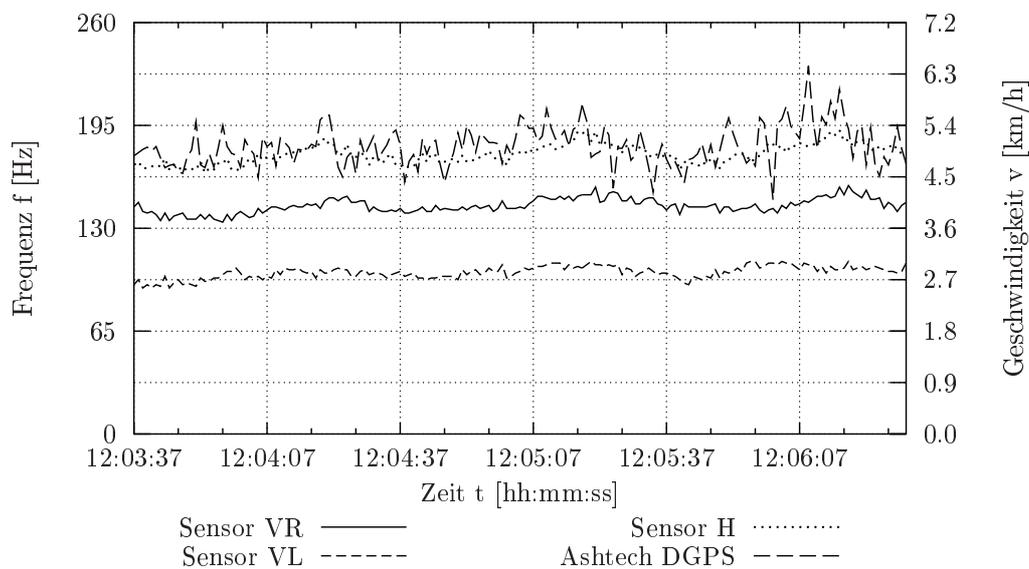


Abbildung 5.57: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 8-2 bis 8-4 entgegen dem Uhrzeigersinn

Die den Messreihen 7 und 8 zugeordneten Streckenverläufe sind Abbildung 5.58 zu entnehmen. Diese Darstellung zeigt nur einen Ausschnitt des Versuchfeldes. Der Ursprung des lokalen Nord-Ost-Koordinatensystems befindet sich am Standort des Referenzsystems (Geodimeter System 4000), wie in Abbildung 5.52 eingezeichnet.

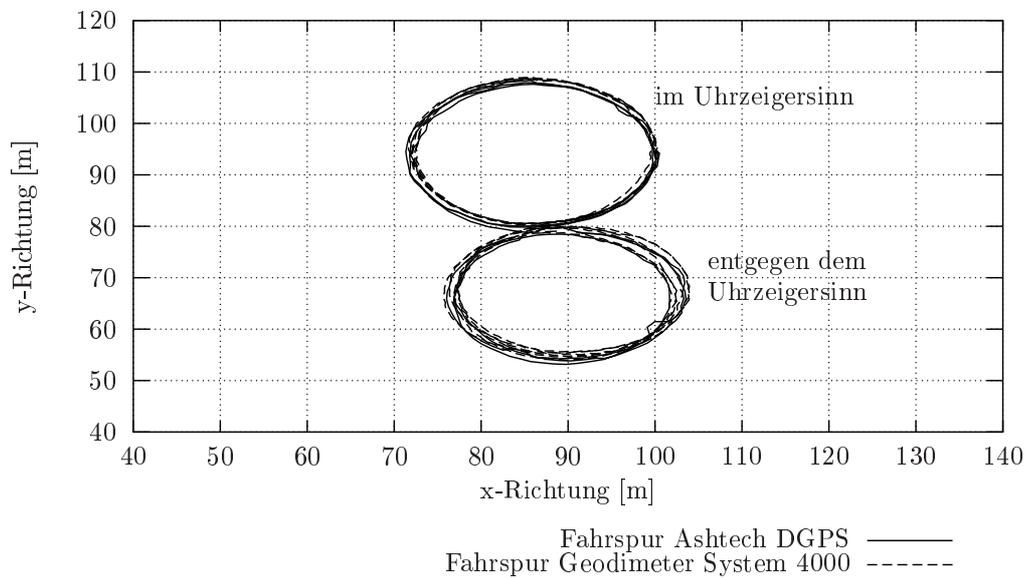


Abbildung 5.58: Fahrspur der Messfahrten 7-3 bis 7-5 und 8-2 bis 8-4

Neben den gezeigten Kreisfahrten wurden weitere Versuche durchgeführt. In den Tabellen 5.24 und 5.25 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für alle Messreihen aufgelistet.

Tabelle 5.24: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 3$ )

$M\text{-Nr.}$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{v_{DGPS}}$ [km/h]	$\bar{V}_{v_{DGPS}}$ [%]
7	4,9	0,3	6,1
8	5,0	0,4	8,0
9	10,1	0,5	4,9
10	10,3	0,5	4,9
11	10,2	0,5	4,9
12	10,5	0,4	3,8

Tabelle 5.25: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Kreisfahrten in Y-Anordnung ( $n = 3$ )

$M-Nr.$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{v}_{f_{vl}}$ [%]
7	174	4,3	2,5	106	2,9	2,7	144	3,6	2,5
8	177	6,1	3,4	144	4,6	3,2	102	4,0	3,9
9	360	13,3	3,7	216	10,3	4,8	304	12,4	4,1
10	363	10,1	2,8	292	9,4	3,2	217	9,0	4,1
11	363	10,7	2,9	225	7,9	3,5	303	10,3	3,4
12	370	9,1	2,5	303	6,9	2,3	213	8,7	4,1

Zur Erfassung des Verhaltens bei fließenden Richtungswechseln und Kurvenfahrten wurde als Fahrspur eine Acht zugrunde gelegt (Abb. 4.22). In den Diagrammen 5.59 und 5.60 sind jeweils 3 vollständige Umläufe dargestellt. Der Startpunkt befindet sich im Berührungspunkt beider Kreise. Bei Messreihe 13 wurde der erste Kreis im Uhrzeigersinn durchfahren. Demzufolge registriert Sensoren VL eine höhere Geschwindigkeit als Sensor VR. Anschließend wurde der zweite Kreis entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn abgefahren. Dadurch ermittelt Sensor VR gegenüber Sensor VL eine höhere Geschwindigkeit.

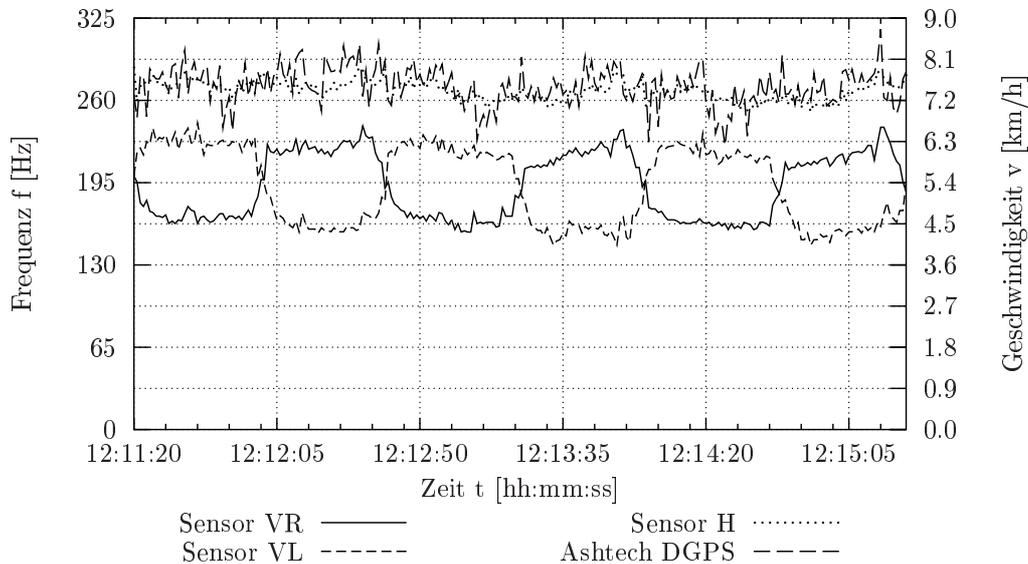


Abbildung 5.59: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 13-3 bis 13-5 im Uhrzeigersinn beginnend

Bei den in Abbildung 5.60 dargestellten Messwertverläufen startete die Fahrt entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn. Zusätzlich wurde die Fahrgeschwindigkeit erhöht.

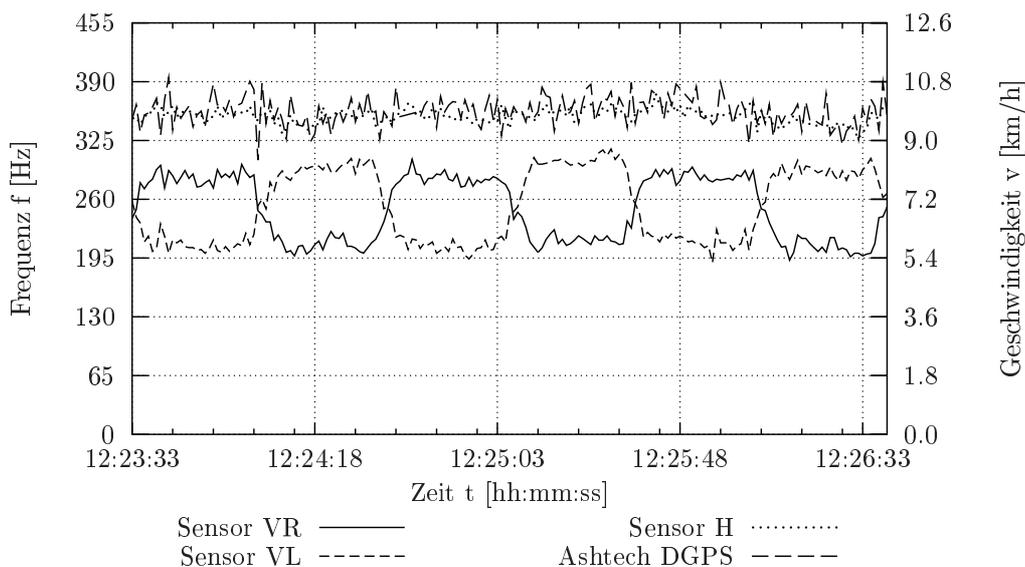


Abbildung 5.60: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 14-2 bis 14-4 entgegen dem Uhrzeigersinn beginnend

Aus den gezeigten Messreihen 13 und 14 geht hervor, dass mit Hilfe des vorderen Sensorpaares Kreisfahrten mit fließendem Richtungswechsel, wie sie bei einer Acht (Abb. 5.61) auftreten, zuverlässig erkannt werden. Für einen vollständigen Umlauf bilden die Graphen beider Sensoren zusammen eine liegende Acht. Damit erfüllen die Ergebnisse die nach den Kreisfahrten aufgestellten Erwartungen.

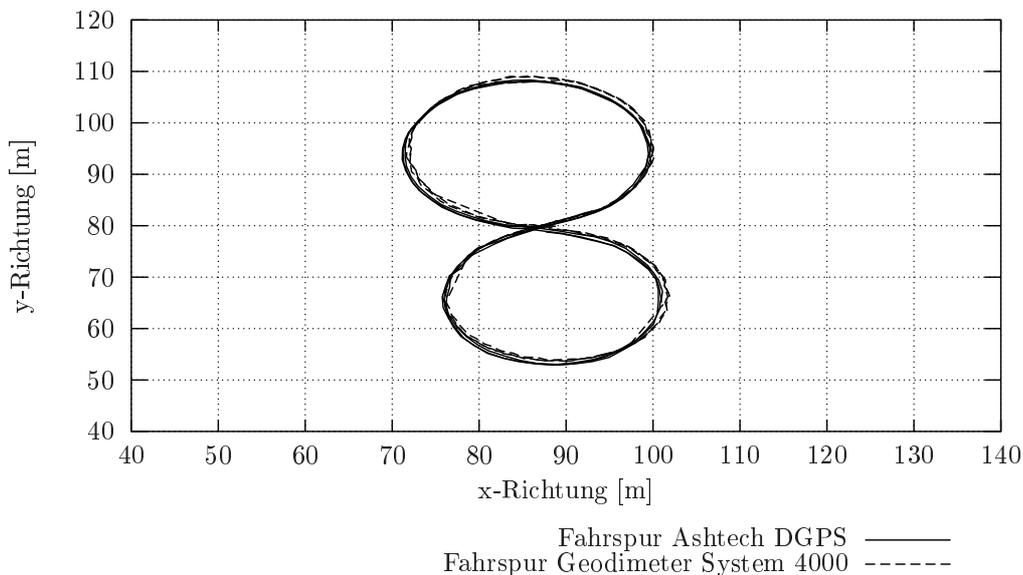


Abbildung 5.61: Fahrspur der Messfahrten 13-3 bis 13-5

Zur eindeutigen Trennung von Geradeaus- und Kurvenfahrten wurde eine weitere Fahrspur in Form eines Ovals angelegt. Das Oval umschließt dabei die Figur Acht, wie aus Abbildung 4.22 hervorgeht. Neben 2 Halbkreisen gehören zum Oval auch 2 geradlinige Abschnitte. Für die Versuche wurden beide möglichen Fahrtrichtungen genutzt. Die ersten 3 vollständigen Umrundungen (Abb. 5.62) stammen aus Messreihe 15 im Uhrzeigersinn.

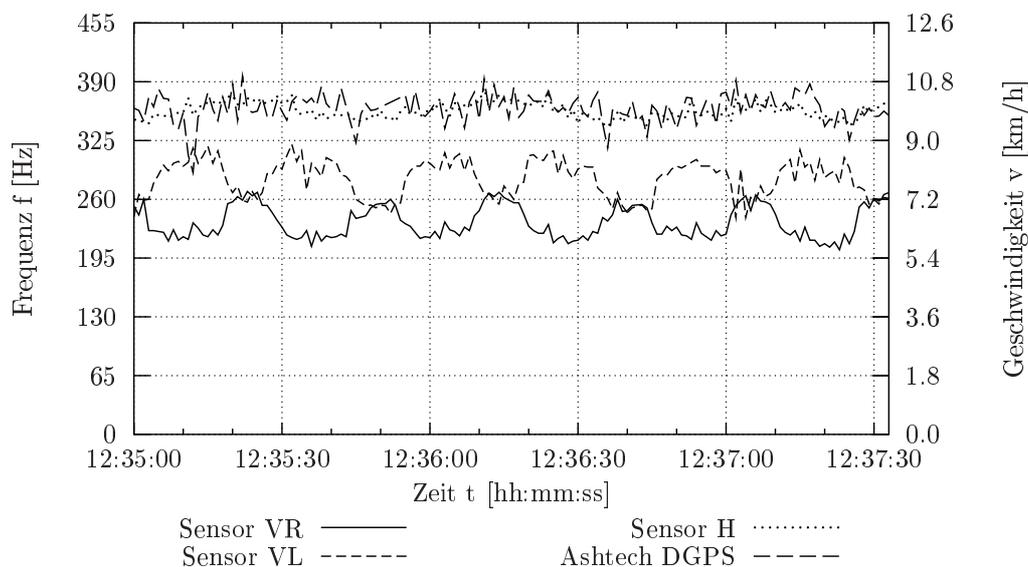


Abbildung 5.62: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 15-3 bis 15-5 im Uhrzeigersinn

Entsprechend den Erwartungen für eine Kurvenfahrt im Uhrzeigersinn bestimmt der vordere rechte Sensor beim Durchfahren beider Halbkreise eine betragsmäßig geringere Geschwindigkeit als der vordere linke Sensor. In beiden zwischen den Halbkreisen liegenden, geradlinigen Streckenabschnitten ermitteln Sensor *VR* und *VL* nahezu identische Geschwindigkeiten. Nach der Fahrtrichtungsumkehr (Abb. 5.63) stellt sich wie erwartet ein Wechsel der Messwertpegel bei den vorderen Sensoren ein.

Damit zeigen die Messreihen 15 und 16 die erwarteten Messwertverläufe für einen ovalförmigen Streckenverlauf (Abb. 5.64). Aus den Kurvenverläufen lassen sich die momentanen Fahrtrichtungen eindeutig bestimmen und damit Geradeausfahrten von Kurvenfahrten unterscheiden.

Die sich daraus ergebenden Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten sind in Tabelle 5.26 dargestellt. Ein Vergleich dieser Werte mit den in Tabelle 5.25 erfassten Daten darf nur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der jeweiligen Versuche erfolgen. Höhere Geschwindigkeiten und die Untergrundbeschaffenheit sind Einflussfaktoren für das Driftverhalten des Traktors. Zur Verhinderung des Ausbrechens aus der gewünschten Fahrspur waren ständige Korrekturen bei Fahrgeschwindigkeit und Lenkwinkel notwendig.

Daraus resultieren Abweichungen im Messwertverlauf und vergleichsweise höhere Standardabweichungen bei den einzelnen Messwerten.

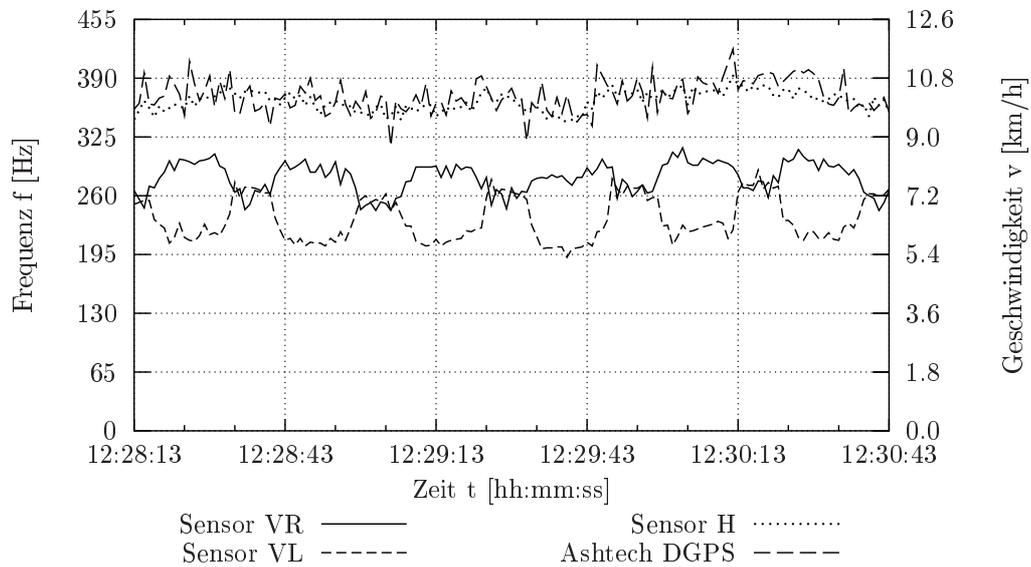


Abbildung 5.63: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrten 16-1 bis 16-3 entgegen dem Uhrzeigersinn

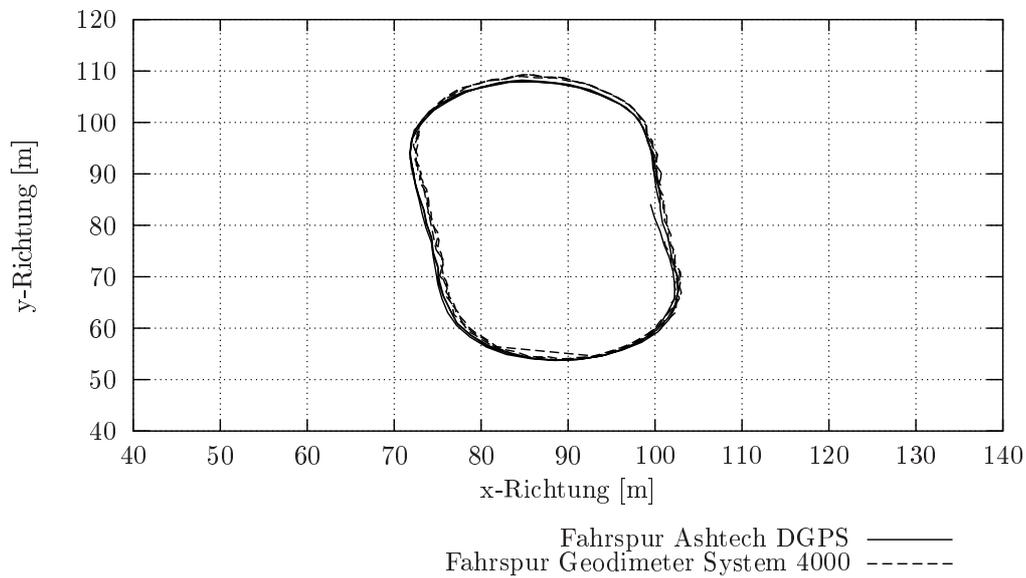


Abbildung 5.64: Fahrspur der Messfahrten 15-3 bis 15-5 bei Y-Sensoranordnung

Tabelle 5.26: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten beim Abfahren einer Acht und eines Ovals in Y-Anordnung

$M\text{-Nr.}$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{v_{DGPS}}$ [km/h]	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]
13	7,5	0,4	268	7,7
14	9,9	0,5	352	8,1
15	10,3	0,5	365	10,6
16	10,0	0,4	358	8,9

### 5.2.4 Einordnung und Diskussion

Auch im Feldeinsatz zeigt sich, dass die 90°-Sensoranordnung die Erwartungen nur teilweise erfüllt. In Fahrzeuglängsrichtung bestimmen Sensor  $V$  und  $H$  die Geschwindigkeit zuverlässig und exakt. Die Messung der Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung durch Sensor  $R$  und  $L$  weist bereits bei Geradeausfahrt deutliche Fehler auf. Gekrümmte Streckenverläufe wie etwa ein Wendemanöver erfasst diese Anordnung nicht. Die dafür notwendigen Unterschiede im Messwertverlauf von Sensor  $R$  und  $L$  stellen sich nicht ein. Damit scheidet die 90°-Sensoranordnung für den Einsatz in einem Koppelortungssystem aus.

Die für den landwirtschaftlichen Einsatzfall konzipierte Y-Anordnung bestätigte im Feldeinsatz die im Prüfstand erzielten Ergebnisse. Mit ihr wurden geradlinige Streckenverläufe am Versuchsstandort 1 und gekrümmte Streckenverläufe in Form von Kreisfahrten am Versuchsstandort 2 auf geteertem Untergrund zuverlässig gemessen. Auch unter feldähnlichen Bedingungen auf einer Wiese mit erheblicher GPS-Signalabschattung durch einen angrenzenden Wald am Versuchsstandort 3 wurden alle Versuche erfolgreich absolviert. Bei geradlinigen Streckenverläufen erfasste Sensor  $H$  die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit im Vergleich zum DGPS exakt. Aus den weitgehend identischen Messwertverläufen von Sensor  $VR$  und  $VL$  lässt sich der geradlinige Fahrweg ableiten. Kreisfahrten und andere gekrümmte Fahrwege werden anhand von charakteristischen Messwertverläufen bei  $VR$  und  $VL$  sichtbar. Auch eine Kombination von geradlinigen und gekrümmten Fahrwegen, wie sie beim Abfahren eines Ovals auftritt, wird durch die Y-Anordnung wiedergegeben. Im gekrümmten Streckenabschnitt weisen die Messwertverläufe beider Sensoren die typischen Merkmale einer Kreisfahrt auf, währenddessen im geradlinigen Streckenabschnitt die Graphen nahezu identisch verlaufen. Schnelle Richtungswechsel, wie sie beim Abfahren einer Acht auftreten, werden ohne Verzögerung ausgegeben.

Die Prüfstandsergebnisse der Neigungswinkelsimulation wurden anhand von auftretenden Bodenunebenheiten am Versuchsstandort 3 bestätigt. Auch bei geradlinigen Fahrten im Feldeinsatz ist die Y-Anordnung in der Lage, Neigungswinkelfehler, die durch durch Nicken und/oder Wanken verursacht werden, zu messen.

Insbesondere bei den Versuchen an den Standorten 2 und 3 traten Probleme bei

der DGPS-Ortung auf. Kreisfahrten führten zu erheblichen Schwankungen in der mit DGPS ermittelten Fahrgeschwindigkeit. Die dabei auftretenden Messwertverläufe wiesen ähnliche Muster auf. Am Versuchstandort 3 führte der angrenzende Wald zur Abschattung der GPS-Signale und damit zu Ortungsausfällen. Diese Effekte traten sowohl beim Motorola DGPS als auch beim Ashtech DGPS mit lokaler Referenzstation auf.

Die im Prüfstand bei Höchstgeschwindigkeit und schnellen Fahrtrichtungswechseln aufgetretenen Unzulänglichkeiten beim Geodimeter System 4000 zeigten sich im Feldeinsatz nicht. Bedingt durch die Entfernung von mehr als 50 m zwischen dem Referenzsystem Geodimeter System 4000 und dem Trackerprisma auf dem Dach der Messkabine waren keine relevanten Messausfälle durch schnelle Richtungswechsel oder zu kurze Schrägentfernung zu verzeichnen. Ebenso kam es nicht zu den im Prüfstand beobachteten fehlerbehafteten Messungen des Streckenverlaufs, die auf geringste Winkeländerungen in Horizontalrichtung während geradliniger Fahrten zurückzuführen sind. Dieser Fall trat bei Geradeausfahrten auf, bei denen der Standort des Referenzsystems auf der Fluchtlinie des vom Trackerprisma zurückgelegten Fahrweges lag. Aufgrund des günstigeren Standortes zu den angelegten Fahrspuren fielen die Winkeländerungen in Horizontalrichtung deutlich größer aus. Bei einer Kreisfahrt betrug die Winkeländerung bezogen auf den Durchmesser mindestens 10 gon.

Nach der Beurteilung der verschiedenen Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme und der Erfassung von Neigungswinkel Fehlern folgt die Berechnung und die graphische Darstellung eines zurückgelegten Fahrweges.

### 5.2.5 Beispiel eines berechneten Streckenverlaufs

Am ehemaligen Institut für Landtechnik der Technischen Universität München (heute Fachgebiet Technik im Pflanzenbau am Wissenschaftszentrum Weißenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München) erfolgten die vorgestellten Prüfstands- und Feldversuche. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt und diskutiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes *ESMERALDA* war das Mathematische Institut der Ludwig-Maximilian-Universität München mit der weiteren Datenauswertung beauftragt. Dazu zählten unter anderem die Fahrwegberechnung aus den gemessenen Frequenzen der Radarsensoren. Der vollständige Forschungsbericht aller Projektpartner zeigt u.a. die zur Fahrwegberechnung eingesetzten Modelle und Verfahren [65]. Im folgenden Beispiel wird ein Versuch am Standort 2 behandelt.

Ausgehend vom vorgegebenen Startpunkt und der Startrichtung aus den Daten des Referenzsystems Geodimeter System 4000 führt die Integration der Messwerte der Radarsensoren  $VR$ ,  $VL$  und  $H$  zu dem in Abbildung 5.65 gezeigten Wegverlauf für eine Kreisfahrt. In Abhängigkeit vom Durchmesser des abgefahrenen Kreises und der Montageparameter der Sensoren  $VR$  und  $VL$  muss ein gültiger Integrationsfaktor ermittelt werden, so dass sich der aus den Daten der Radarsensoren

berechnete Streckenverlauf dem des Referenzsystems angleicht.

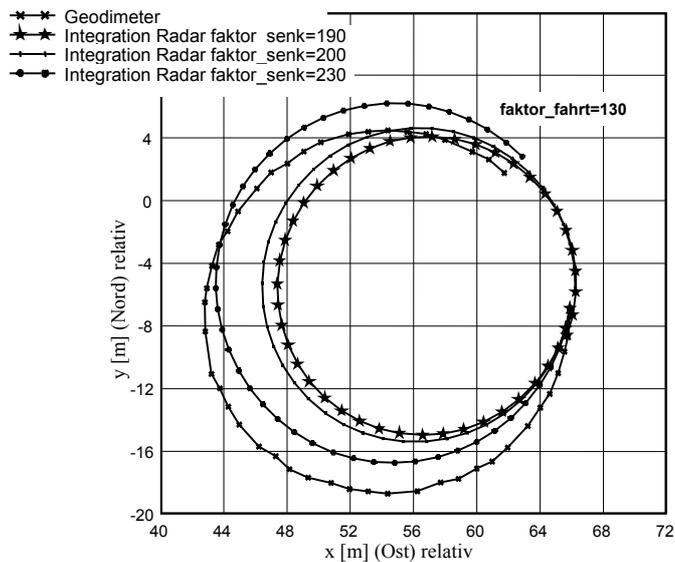


Abbildung 5.65: Vergleich der berechneten Fahrwege aus Radarsensoren und Referenzsystem

Der Integrationsfaktor für Sensor  $H$  ist konstant. Die in diesem Beispiel erzielte Genauigkeit für einen Integrationsfaktor von 230 liegt im Vergleich zum Referenzsystem unterhalb von 3 m und entspricht damit der Genauigkeit verfügbarer GPS-Empfänger.

## 6 Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse bescheinigen der Y-Anordnung die Fähigkeiten, geradlinige Fahrten und gekrümmte Streckenverläufe zuverlässig zu erfassen. Zudem erlaubt diese Anordnung bei geradlinigen Fahrten die Ermittlung der durch Fahrzeugschwingungen hervorgerufenen Neigungswinkelfehler. Diese Fehler haben bei sehr hoch montierten GPS-Antennen Einfluss auf die Ortungsgenauigkeit. Mit Hilfe der aus den Messwerten berechneten Nick- und Wankwinkel des Fahrzeuges lassen sich Positionsfehler korrigieren.

Das noch in der Entwicklung und Erprobung befindliche Verfahren der automatischen Führung mit DGPS von selbstfahrenden Erntemaschinen ist als zusätzliches Einsatzfeld zu nennen [40, 41]. Auf Abweichungen der (D)GPS-Antenne von der Sollspur reagiert das System mit korrigierenden Lenkbewegungen. Treten diese kurzzeitigen Abweichungen beispielsweise durch Wankschwingungen auf, so sind Regelungen an der Lenkung überflüssig, da sich die (D)GPS-Antenne wieder in der Sollspur einpendelt. Mit Hilfe der Y-Anordnung sind Fahrzeugschwingungen messbar, so dass der Regelaufwand reduziert werden kann.

Im nächsten Schritt ist die Integration eines Lenkwinkelsensors sinnvoll. Dieser Sensor liefert Daten zum Lenkeinschlag und damit zur Fahrtrichtung. Damit kann die derzeit vorliegende Beschränkung der Detektion von Neigungswinkelfehlern auf geradlinige Fahrten aufgehoben werden.

Aus Abbildung 5.65 sind verschiedene Genauigkeiten bei der Ermittlung des Streckenverlaufs in Abhängigkeit vom Auswertalgorithmus ablesbar. Eine weitere Verfeinerung der eingesetzten mathematischen Modelle kann zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung führen.

Die untersuchten Radarsensoren sind für die Bestimmung der Bewegung in Fahrzeuglängsrichtung ausgelegt. Veränderungen an den Sensoren wie die Optimierung der Keulenform oder die Anpassung der Signalauswertung sind vorstellbar. Vorteilhaft wäre die Integration der Y-Anordnung in eine kompakte Einheit, um höchstmögliche Genauigkeiten bei der Ausrichtung der Keulen dauerhaft zu gewährleisten.



## 7 Zusammenfassung

Für den zuverlässigen Einsatz von Satellitenortungssystemen wie GPS stehen die Ortungsgenauigkeit und die dauerhafte Verfügbarkeit der Satellitensignale im Vordergrund. In der Landwirtschaft treten Probleme wie Abschattung und Mehrwegausbreitung der Satellitensignale durch lokale spezifische Gegebenheiten auf. Trotz moderner Empfängertechnik und verfügbaren Korrekturdiensten sind fehlerbehaftete Positionsdaten oder Signalausfälle nicht auszuschließen.

Zur Überbrückung von Signalausfällen oder fehlerbehafteten Positionsdaten kommen Koppelortungssysteme zum Einsatz. Vorzugsweise werden berührungslos arbeitende Sensoren, wie z. B. inertielle Sensoren, in diese Systeme integriert. Optische Sensoren, Laser-Doppler-Sensoren und Ultraschall-Doppler-Sensoren erfüllen die Kriterien für die Anwendung im rauen landwirtschaftlichen Umfeld nicht oder nur bedingt. Bisherige Untersuchungen zeigen die besondere Eignung von Mikrowellen-Doppler-Sensoren (Radarsensoren) zur schlupffreien Geschwindigkeitsmessung für den landwirtschaftlichen Einsatz.

Nach der Auswahl eines den Anforderungen entsprechenden und am Markt verfügbaren Sensormodells wurden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit dieses Sensors abgeleitet. Besondere Berücksichtigung fanden dabei die aus der Fahrzeugdynamik resultierenden Fehlerquellen, wie Nick- und Wank-schwingungen. Zur simultanen Erfassung von Bewegungen in Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerrichtung sind mehrere Sensoren des gleichen Modells notwendig, die dazu in eine 90°-Sensoranordnung, eine 45°-Sensoranordnung und eine Y-Sensoranordnung integriert wurden. Für jede dieser Anordnungen wurden die mathematischen Beziehungen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten in Fahrzeuglängs- und -querrichtung sowie der Nick- und Wankwinkel aufgestellt.

Mit dem Tachymeter Geodimeter System 4000 stand ein automatisch zielverfolgendes Referenzsystem für alle Versuche zur Verfügung. Zur Auswertung und zum Vergleich der Ergebnisse der Mikrowellen-Doppler-Sensoren, des (D)GPS und des Referenzsystems waren die räumliche Zuordnung und die zeitliche Synchronisation der Messwerte notwendig. Erfasst wurden neben den geschwindigkeitsproportionalen Frequenzen der Radarsensoren und den (D)GPS-Daten auch die Werte aus der Distanz- und Winkelmessung des Referenzsystems zur Fahrwegbestimmung. Mit Hilfe von Koordinatentransformationen in ein lokales Nord-Ost-Koordinatensystem und der Synchronisation auf die im (D)GPS-Datenstring mitgelieferte Zeit (UTC) wurden diese Aufgaben gelöst.

Das Versuchsprogramm gliederte sich in Prüfstandsuntersuchungen und Feldversuche. Nach der Aufrüstung des Prüfstandes mit einer computergestützten Steuerung und der Erweiterung um eine zusätzliche Bewegungsrichtung (y-Richtung) zeichnen sich die durchgeführten Untersuchungen durch eine hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit unter identischen Rahmenbedingungen aus. In der Praxis

auftretende Fehlereinflüsse, wie z. B. Nick- und Wankschwingungen, werden eliminiert. Für die Versuche wurden 3 Streckenverläufe (Geradeausfahrt, einfach und zweifach diagonale Fahrt) mit jeweils 3 unterschiedlichen Geschwindigkeiten programmiert. Zusätzlich wurde die Y-Anordnung unter simulierten Nick- und Wankwinkeln bei Geradeausfahrt getestet.

Mit den Feldversuchen erfolgte die Verifizierung der Prüfstandsergebnisse. Die Untersuchungen am Standort 1 bzw. 2 hatten die Erprobung der einzelnen Sensoranordnungen bei Geradeausfahrten bzw. Kreisfahrten auf Asphalt bei optimalen Empfangsbedingungen der Satellitensignale zum Ziel. Hingegen waren die Tests am Versuchstandort 3 auf Fahrten über bewachsenem Untergrund (Gras) mit verschiedenen Streckenverläufen, häufigen Richtungswechseln und auf eine gezielte Abschattung der Satellitensignale ausgerichtet. Zu den getesteten Streckenverläufen zählen geradlinige Fahrten, Kreisfahrten, das Abfahren einer Acht und eines Ovals.

Die Prüfstandsuntersuchungen bescheinigen der 90°-Sensoranordnung eine bedingte Eignung. Hingegen entsprechen die Ergebnisse der 45°-Sensoranordnung und der Y-Sensoranordnung bei allen 3 Streckenverläufen den Erwartungen. Zudem ist bei Simulation von Neigungswinkelfehlern eine Bestimmung des eingestellten Nick- bzw. Wankwinkels aus den Messwerten der Y-Sensoranordnung möglich.

Die Feldversuche bestätigen die Prüfstandsergebnisse der 90°-Sensoranordnung und der Y-Sensoranordnung. Mit der 45°-Sensoranordnung fanden aufgrund eines zeitgleich offengelegten Schutzrechts keine Feldversuche statt. Eine Erfassung von krummlinigen Streckenverläufen (z. B. Kurven) ist mit der 90°-Sensoranordnung nicht möglich. Damit scheidet diese Sensoranordnung aus. Die Y-Anordnung hingegen gewährleistet sowohl die Bestimmung von geradlinigen als auch gekrümmten Streckenverläufen. Ebenso sind Fahrtrichtungswechsel, wie sie beim Abfahren einer Acht oder eines Ovals auftreten, aus den Messergebnissen ablesbar. Bei geradlinigen Fahrten lassen sich die durch Fahrzeugschwingungen verursachten Neigungswinkelfehler des Fahrzeuges in Form von Nick- und Wankwinkel bestimmen.

Anhand einer Kreisfahrt stellt die Y-Anordnung ihre Fähigkeiten für die Fahrwegbestimmung unter Beweis. Auf Basis der Messwerte der Radarsensoren wurden 3 Streckenverläufe in verschiedenen Optimierungsschritten berechnet. Der Streckenverlauf mit der größtmöglichen Übereinstimmung zum Referenzfahrweg erzielt Abweichungen von weniger als 3 m zum Referenzfahrweg. Damit sind mit der Y-Anordnung im jetzigen Entwicklungsstadium vergleichbare Genauigkeiten wie die derzeit verfügbarer GPS-Empfänger realisierbar.

Weiteres Entwicklungspotential ist bei der Optimierung des Sensoraufbaus für diesen Einsatzfall, bei der Integration der Y-Anordnung und bei der Verfeinerung der Auswertelgorithmen zur Fahrwegsberechnung zu erwarten. Ein zusätzlicher Lenkwinkelsensor würde die Zuordnung von Kurvenfahrten erleichtern und so die Bestimmung von Neigungswinkelfehlern bei Kurvenfahrten ermöglichen.

## 8 Summary

During the change from the uniform cultivation of agricultural crops towards precision farming, navigation and positioning of vehicles play a decisive role. Today satellite positioning systems like GPS are used for yield mapping and soil sampling. Furthermore they are needed for spatially variable fertilizing and plant protection. Higher accuracy and reliability of the available satellite positioning systems might promote a wider acceptance of this technology and might improve the cultivation of crops regarding costs/yield and environmental protection.

A central problem of satellite navigation and positioning is the lack of continuous availability of satellite signals and their reliability. During the positioning and navigation by means of GPS, shading and multipath effects can occur. Shading occurs due to the fact that the direct line of sight to the GPS satellites is not available. Also multipath propagation through refraction and reflection of the GPS signal is possible. The propagation of the differential correction signal is influenced by the same effects. The result of these effects are a reduced accuracy of positioning and/or the total loss of positioning. In this case dead reckoning systems support the positioning and navigation of (D)GPS.

Some systems with gyro sensors or acceleration sensors are available on the market. These sensors measure the vehicle acceleration and rotation. With this additional information, positioning data can be calculated more exactly. The disadvantage of such systems with the deliverable required accuracy are high costs. On the other hand optical sensors, laser doppler sensors or ultrasonic doppler sensors do not fulfill the requirements for an agricultural use, as they are influenced by fluctuating temperature or dusty, wet and windy environments. Previous investigations showed the particular suitability of radar sensors under difficult agricultural conditions.

Radar sensors (Vansco TGSS Model 338000) in various configurations were examined as sensors for a dead reckoning system. These sensors allow a contactless and slip-free velocity and track measurement with high accuracy under difficult agricultural conditions. The tests took place with a dead reckoning system based on four identical radar sensors in a 90°-configuration/45°-configuration at a mounting angle of  $\alpha = 35^\circ$  and three radar sensors ( $\alpha = 35^\circ$ ) in a Y-configuration respectively. Further studies in a test stand were concentrated on the registration of pitch and rolling motions occurring in practice. The required equations and relations were deduced for all these configurations.

An automatic geodetic total station Geodimeter System 4000 with automatic target tracking was used as reference system. Spatial allocation and time synchronization were needed for analyzing and comparing the measurement results of radar sensors, (D)GPS and the reference system. This problem was solved with the transformation of coordinates into a local north-east coordinate system and

the time synchronization to the UTC.

The studies have been divided in test stand investigations and field trials. The investigations of the various configurations took place in the test stand, in which translational motions of vehicles can be simulated. These examinations were featured by computerized control and a high reproducibility. Fault effects like pitch and rolling motions were eliminated. Calibration runs have been made to examine and evaluate the behavior of each sensor at different movements, various speeds, mounting angles and mounting positions. The Geodimeter System 4000 target prism was mounted on the frame with the radar sensors.

The test stand results of the 90°-configuration and Y-configuration have been evaluated at a tractor with a rear mounted measuring cabin. The sensor performance on straight lanes and circular rides was examined on asphalt at two different experimental locations with optimal satellite signal reception. At a third experimental location the sensor behaviour on grassland was investigated. The tests have been made in parallel straight lanes at different distances to a forest edge for representing (D)GPS shading problems and in miscellaneous curved lanes. In these experiments, the data of the radar sensors and the DGPS receivers (Ashtech GG24, Motorola Oncore DGPS, CT STAR TRACK DGPS or Trimble AgGPS 132) have been recorded parallel. Again the automatic geodetic total station Geodimeter System 4000 with the target prism mounted on the measuring cabin roof was used as reference system.

Because of the cross sensitiveness of the sensors positioned to the left and right side, the 90°-configuration is not able to detect or measure any right hand and left hand turns. In the test stand, the 45°-configuration has demonstrated the ability to record straight and skew runs as well as shifts in direction. The same results were achieved with the Y-configuration. Additionally this configuration allows angle misalignment measurements during runs in straight lanes. Simulated pitch and rolling angles in the test stand were registered and calculated with measuring data. Angle misalignment measurements were also verified during field tests in straight lanes. Minor deviations in the mounting position and the angle of the radar sensors may be responsible for differences between desired values and calculated values.

Finally a right turn was calculated based on radar sensor data. The results of three optimization steps of the mathematical algorithm were compared with a real driving path measured by the reference system. A resulting accuracy of approximately 3 m was achieved with the best match to the reference system. Investigations prove that whole lanes and angle misalignments in straight lanes can be measured and calculated with radar sensors in Y-configuration.

Further potential for developments is expected from sensor integration and algorithm optimization for calculating lanes. An additional sensor for the angle of steering would facilitate the allocation of right hand and left hand turns and therewith the recording of rolling motions.

---

# Literaturverzeichnis

- [1] **Adler, U.:** Kraftfahrzeugtechnisches Jahrbuch. Hrsg. Robert Bosch GmbH, 20. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987
- [2] **Auernhammer, H.:** Anforderungen an GPS und DGPS aus Sicht der Landwirtschaft. SATNAV 94, Hamburg, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1995), S. 189-198
- [3] **Auernhammer, H.:** Landwirtschaftliche Betriebsführung mit GPS. SATNAV 95, Freising-Weihenstephan, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1995), S. 91-99
- [4] **Badmann, Reinhold:** Measuring Vehicle Ground Speed with a Radar Sensor. Sensors (1996) H. 12, S. 30-31
- [5] **Beuche, H.; Hellebrand, H. J.:** DGPS-Ortung mit öffentlichen Referenzdiensten - Bewertung für den landwirtschaftlichen Einsatz. Zeitschrift für Agrarinformatik (1997) H. 2, S. 31-38
- [6] **Beuche, H.; Hellebrand, H. J.:** Stützungsverfahren für dynamische DGPS-Ortung in der Landwirtschaft. Frühjahrstagung der DPG, Münster 17.-21.3.1997, Verhandlungen der DPG, Reihe VI, Band 32, (1997) H. 5
- [7] **Beuche, H.; Hellebrand, H. J.:** Positionsgenauigkeit und Verfügbarkeit verbessern. Landtechnik 53 (1998) H. 3, S. 140-141
- [8] **Beuche, H.; Hellebrand, H. J.:** DGPS-Stützung mit ortsrelevanten Informationen aus der Feldbewirtschaftung. Zeitschrift für Agrarinformatik (1999) H. 1, S. 3-9
- [9] **Elterich, A.:** Optimierung der Signalverarbeitung zur Schätzung der Geschwindigkeit über Grund mit einem Dopplerradar. 9. Radarsymposium, Stuttgart, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1997), S. 117-126
- [10] **Fleming, W. J.; Hundiwal, A. K.:** Radar Ground Speed Sensors. IEEE Vehicular Techn. Conf., Boulder (USA) (1985), S. 267-272
- [11] **Heide, P.:** Codierte Doppler-Radarsensoren zur präzisen Weg- und Geschwindigkeitsermittlung: Systemtechnische Aspekte und Realisierung. Dissertation, Universität-GH-Siegen 1994
- [12] **Heide, P.; Schubert, R.; Joppich M.:** Berührungslose Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip mit Ultraschall und Mikrowelle. VDI-Berichte 939, Düsseldorf: VDI-Verlag (1992), S. 159-164
- [13] **Hetzner, W.:** Aktive und passive Straßenzustandserkennung im Millimeterwellenbereich. Frequenz 38 (1984) H. 7/8, S. 179-185

- [14] **Joppich, M.; Heide, P.; Schubert, R.; Magori, V.:** Radar-Sensoren für Geschwindigkeit und Weg über Grund, sowie zur Erfassung der Länge von zügen. ITG-Fachbericht 126: Sensoren - Technologie und Anwendung, Bad Nauheim (1994), S. 329-334
- [15] **Joppich, M.; Wenrich, R.:** Radargestutzte Weg- und Geschwindigkeitsmessung auf Schienenfahrzeugen. Signal+Draht 85 (1993) H. 11, S. 360-364
- [16] **Kees, N.; Weinberger, M.; Detlefsen, J.:** Doppler Measurement of Lateral and Longitudinal Velocity for Automobiles at Millimeterwaves, IEEE MTT-S International Microwave Symposium 1993, Atlanta, Georgia (USA), 14-18 June 1993, S. 805-808
- [17] **Kees, N.; Detlefsen, J.:** Road Surface Classification by Using a Polarimetric Coherent Radar Modul at Millimeter Waves. IEEE Int. Symp. on microwave Theory and Techniques, San Diego, CA (USA) (1994), S. 1675-1678
- [18] **Kehrbeck, J.:** Mikrowellen-Doppler-Sensor zur Geschwindigkeits- und Wegmessung - Systemmodellierung und Verifikation. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994
- [19] **Kehrbeck, J.; Heidrich, E.; Wiesbeck, W.:** Microwave front-end for true ground speed measurement. EURNAV 94, Dresden, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1994), S. 207-214
- [20] **Kleinhempel, W.; Bergmann, D.; Stammler, W.:** Speed Measure of Vehicles with on-Board Doppler Radar. IEE Conf. Publ. No. 365 (1992), S. 284-287
- [21] **Kobayashi, H.; Kimura, T.; Negishi, M.:** A study of vehicle ground speed sensor using ultrasonic wave doppler effect. Journ. Acoust. Soc. Am. 89 (1991) H. 1, S. 191-195
- [22] **Laqua, H.:** Berührungslose Geschwindigkeitsmessung von Straßen- und Schienenfahrzeugen mit Mikrowellensensoren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996
- [23] **Lissel, E.:** Geschwindigkeits- und Wegsensor nach dem Mikrowellen-Doppler-Prinzip. VDI-Berichte 687, Düsseldorf: VDI-Verlag (1988), S. 257-275
- [24] **Muhr, T.:** Vergleich von berührungslos arbeitenden Geschwindigkeitssensoren für die Landwirtschaft. Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Landtechnik Freising-Weihenstephan, 1989
- [25] **Muhr, T.; Auernhammer, H.; Demmel, M.; Seebauer, C.; Weigel, R.:** Dead Reckoning as Backup for DGPS in Agriculture. ASAE Meeting Presentation Paper No. 951749 (1995)
- [26] **Mesch, F.:** Vehicle Ground Speed Measurement by Radar Systems. Proc. of IMEKO XII Congress, Beijing (1991) S. 481-488

- 
- [27] **Richardson, N. A.; Lanning, R. L.; Kopp, K. A.; Carnegie, E. J.:** True Ground Speed Measurement Techniques. SAE International Off-Highway Meeting and Exposition, Milwaukee Wisconsin (USA) (1982), Paper No. 821058
- [28] **Rohling, H.; Mende, R.:** Systemkonzept und Leistungsfähigkeit eines Low Cost 77 GHz Radarsensors für den Einsatz im Automobil. *Ortung und Navigation* (1996) H. 2-3, S. 232-244
- [29] **Schanz, G. W.:** Sensoren - Fühler der Messtechnik. Heidelberg: Hüthig, 1988
- [30] **Schlemmer, H.:** Grundlagen der Sensorik - Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Heidelberg: H. Wichmann Verlag, 1996
- [31] **Schneider, H.; Reitz, P.:** GPS zur Geschwindigkeitsmessung. *Landtechnik* 51 (1996) H. 5, S. 264-265
- [32] **Schröder, D.:** Genauigkeitsanalyse inertialer Vermessungssysteme mit fahrzeugfesten Sensoren. Dissertation, Bayrische Akademie der Wissenschaften, 1992
- [33] **Siart, U.; Detlefsen, J.; Wollitzer, M.; Büchler, J.; Luy, J.-F.:** Systemkonzept eines multifunktionalen Mikrowellensensors für Kraftfahrzeuge. *Kleinheubacher Berichte*, Band 41, Ausgabe 1998, S. 418-423
- [34] **Stempfhuber, W.; Schnädelbach, K.; Maurer, W.:** Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. *Ingenieurvermessung 2000 XIII. International Course on Engineering Surveying Beiträge* S. 144 - 154
- [35] **Stöcker, H.:** Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Frankfurt am Main: Thun, 1995
- [36] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** Examinations on a microwave velocity sensor based dead reckoning system for improved positioning of agricultural vehicles with GPS. *IRS 98, Munich*, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1998), S. 839-844
- [37] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** Untersuchung eines Koppelortungssystems zur Unterstützung der autonomen Positionierung landmobiler Anwendungen mit GPS. *SATNAV 98, Dresden*, Hrsg. DGON, Düsseldorf (1998), S. 141-146
- [38] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** GPS-Stützung mit Mikrowellensensoren in der Landwirtschaft. *VDI-MEG Tagung Landtechnik 2000, Münster*, VDI-MEG, Düsseldorf: VDI-Verlag (2000), S. 301-306
- [39] **Schwenke, T.; Auernhammer, H.:** Koppelortung für landwirtschaftliche Fahrzeuge auf Basis von Radarsensoren. *Ortung und Navigation 2000, Freising-Weißenstephan*, Hrsg. DGON, Düsseldorf (2000), S. 157-166

- [40] **Stoll, A.:** Automatische Lenkung mit DGPS. Agrartechnische Forschung 5 (1999) H. 2, S. 107-116
- [41] **Stoll, A.; Kutzbach, H. D.:** Führung von Landmaschinen mit GPS. VDI-MEG Tagung Landtechnik 2000, Münster, VDI-MEG, Düsseldorf: VDI-Verlag (2000), S. 331-336
- [42] **Weinberger, M.:** Eigengeschwindigkeitsmessung für Kraftfahrzeuge mit dem Doppler-Effekt im Millimeterwellenbereich. Dissertation, Technische Universität München, 1993
- [43] **B+S Software und Messtechnik GmbH:** Beschleunigungs- und Drehratensensor mit Winkelausgabe DYMO-2. Gräfelfing, 2000. - Firmenschrift
- [44] **B+S Software und Messtechnik GmbH:** Radar-Geschwindigkeits-Sensor DRS-3. Gräfelfing, 2000. - Firmenschrift
- [45] **CORRSYS GmbH:** CORREVIT L-CE-Sensor. Wetzlar, 1999. - Firmenschrift
- [46] **CORRSYS GmbH:** Physikalisches Arbeitsprinzip der optischen CORREVIT Sensoren L-CE und IL. Wetzlar, 1999. - Firmenschrift
- [47] **CT COMMUNICATION TECHNOLOGY GmbH:** STAR TRACK DGPS. Wöllstadt, 1996. - Firmenschrift
- [48] **Datron-Messtechnik GmbH:** Weg- und Geschwindigkeitsmessung - berührungslos & schlupffrei, M-Sensoren. Schöffengrund, Circa 1996. - Firmenschrift
- [49] **Datron-Messtechnik GmbH:** Weg-, Geschwindigkeits-, Schwimm- und Schräglaufmessung - berührungslos & schlupffrei, V-Sensoren. Schöffengrund, 1996. - Firmenschrift
- [50] **DICKEY-john Corporation:** Radar II Ground Speed Sensor. Auburn, Illinois, USA, Circa 1990. - Firmenschrift
- [51] **elektronik-labor Carls GmbH & Co. KG:** NAV 864 DGPS-Empfangseinheit für LW-RDS (ALF) und UKW-RDS (RASANT 2) mit Empfängerdiversity und internem Gyro-Sensor. Neuenkirchen, 1999. - Firmenschrift
- [52] **ertec GmbH:** RDS66: UKW-RDS/RASANT-Empfänger für DGPS-Korrekturdaten. Erlangen, 1996. - Firmenschrift
- [53] **GeneSys Elektronik GmbH:** Beschreibung inertialer Sensoren und Systeme. Offenburg, 1998. - Firmenschrift
- [54] **Geotronics AB:** Geodimeter System 4000 User Manual. Danderyd, Schweden, 1994. - Firmenschrift

- 
- [55] **Magellan Corporation:** Ashtech GG24 GPS Board. Santa Clara, CA, USA, 2000. - Firmenschrift
- [56] **MAN Technologie AG:** GPS/GLONASS Reference Station NR-R124. Karlsfeld, 1997. - Firmenschrift
- [57] **Perfom Tech:** Autonomes Navigations-Sensor-Modul, Hildesheim, Circa 1997. - Firmenschrift
- [58] **Raven Industries:** Raven Radar Installation. Sioux Falls, SD, USA, 1996. - Firmenschrift
- [59] **RDS Technology Ltd.:** True Ground Speed Sensor Model TGSS 012. Nailsworth, GLOS., UK 1993. - Firmenschrift
- [60] **Trimble Navigation Limited:** AgGPS 124/132 Operation Manual. Sunnyvale, CA, USA 1999. - Firmenschrift
- [61] **Vansco Electronics Ltd.:** True Ground Speed Sensor Model 338000. Winnipeg, Manitoba, Canada, Circa 1996. - Firmenschrift
- [62] **VDO Control Systems Inc.:** Radar Ground Speed Sensor Model RGSS 201 Series. Auburn, Indiana, USA, Circa 1997. - Firmenschrift
- [63] **Visionet GmbH:**  $\mu$ AWS - Sensor für berührungslose Weg- und Geschwindigkeitsmessung. Karlsruhe, Circa 1996. - Firmenschrift
- [64] **Schutzrecht DE 19720846-A 1** (1998-11-19). Daimler-Benz Aerospace AG
- [65] **Maurer, M.; Schwenke, T.; Auernhammer, H.; Haschka, T.; Richter, W.; Röder, U.; Niklasch, N.:** ESMERALDA - Entwicklung von satellitengestützten Mehrsensorsystemen zur autonomen Positionierung für landmobile Anwendungen. 2000 - Forschungsbericht. Forschungsprojekt ESMERALDA (FKZ: 50 NB 9602) im Auftrag von DLR e.V./BMBF



# A Beispielprogramm zur Prüfstandssteuerung

BASIC-Programm für zweifach diagonale Prüfstandsfahrt bei maximal zulässiger Geschwindigkeit mit 20 Wiederholungen

```
100 OPEN "COM1:9600,N,8,1,CD,DS,CS,RS" FOR RANDOM AS #1
200 OPEN "COM2:9600,N,8,1,CD,DS" FOR RANDOM AS #2
210 X = 0
250 X = X + 1
300 PRINT #2, "@01"
400 PRINT #1, "#0120.000"
500 SLEEP 1
600 PRINT #1, "#0A0A00"
700 SLEEP 1
800 PRINT #1, "#0A0A06"
850 SLEEP 1
900 PRINT #2, "0A-22000,5400"
950 PRINT #2, "0A22000,5400"
1000 SLEEP 1
1100 PRINT #1, "#0A0A00"
1200 SLEEP 13
1300 PRINT #1, "#0A0A12"
1400 SLEEP 11
1500 PRINT #1, "#0A0A00"
1600 SLEEP 1
1700 PRINT #1, "#0A0A0A"
1800 SLEEP 1
1900 PRINT #2, "0A-22000,5400"
1950 PRINT #2, "0A22000,5400"
2000 SLEEP 1
2100 PRINT #1, "#0A0A00"
2200 SLEEP 14
2300 PRINT #1, "#0A0A22"
2400 SLEEP 10
2500 IF X < 20 GOTO 250
2600 STOP
```



## B Prüfstandsversuche

Tabelle B.1: Versuchsparameter bei Messfahrten in 90°-Anordnung

<i>Beispiel</i>	<i>M-Nr.</i>	<i>V-Nr.</i>	<i>Streckenverlauf</i>	<i>Stromstärke I [mA]</i>	$\alpha_v$ [°]	$\alpha_r$ [°]
Messfahrt 1-3	1	3	Geradeausfahrt	10	35	35
Messfahrt 2-1	2	1	Geradeausfahrt	15	35	35
Messfahrt 3-1	3	3	Geradeausfahrt	20	35	35
Messfahrt 4-4	4	4	Geradeausfahrt	15	35	25
Messfahrt 5-8	5	8	Geradeausfahrt	15	35	60
Messfahrt 6-5	6	5	Geradeausfahrt	15	35	86

Tabelle B.2: Versuchsparameter bei Messfahrten in 45°-Anordnung

<i>Beispiel</i>	<i>M-Nr.</i>	<i>V-Nr.</i>	<i>Streckenverlauf</i>	<i>Stromstärke I [mA]</i>	$\alpha$ [°]
Messfahrt 1-5	1	5	Geradeausfahrt	10	35
Messfahrt 2-7	2	7	Geradeausfahrt	15	35
Messfahrt 3-6	3	6	Geradeausfahrt	20	35
Messfahrt 4-6	4	6	einfach diagonal	10	35
Messfahrt 5-6	5	6	einfach diagonal	15	35
Messfahrt 6-8	6	8	einfach diagonal	20	35
Messfahrt 7-2	7	2	zweifach diagonal	10	35
Messfahrt 8-10	8	10	zweifach diagonal	15	35
Messfahrt 9-10	9	10	zweifach diagonal	20	35

Tabelle B.3: Versuchsparameter bei Messfahrten in Y-Anordnung

Beispiel	M-Nr.	V-Nr.	Streckenverlauf	Stromstärke $I$ [mA]	$\alpha_h$ [°]	$\alpha_{vr}$ [°]	$\alpha_{vl}$ [°]
Messfahrt 1-1	1	1	Geradeausfahrt	10	35	35	35
Messfahrt 2-3	2	3	Geradeausfahrt	15	35	35	35
Messfahrt 3-5	3	5	Geradeausfahrt	20	35	35	35
Messfahrt 4-5	4	5	einfach diagonal	10	35	35	35
Messfahrt 5-4	5	4	einfach diagonal	15	35	35	35
Messfahrt 6-1	6	1	einfach diagonal	20	35	35	35
Messfahrt 7-5	7	5	zweifach diagonal	10	35	35	35
Messfahrt 8-4	8	4	zweifach diagonal	15	35	35	35
Messfahrt 9-2	9	2	zweifach diagonal	20	35	35	35
Messfahrt 10-4	10	4	Geradeausfahrt	15	35	35	35
Messfahrt 11-8	11	8	Geradeausfahrt	15	25	42	42
Messfahrt 12-6	12	6	Geradeausfahrt	15	45	28	28
Messfahrt 13-1	13	1	Geradeausfahrt	15	35	28	42
Messfahrt 14-6	14	6	Geradeausfahrt	15	35	42	28
Messfahrt 15-9	15	9	Geradeausfahrt	15	30	31	45

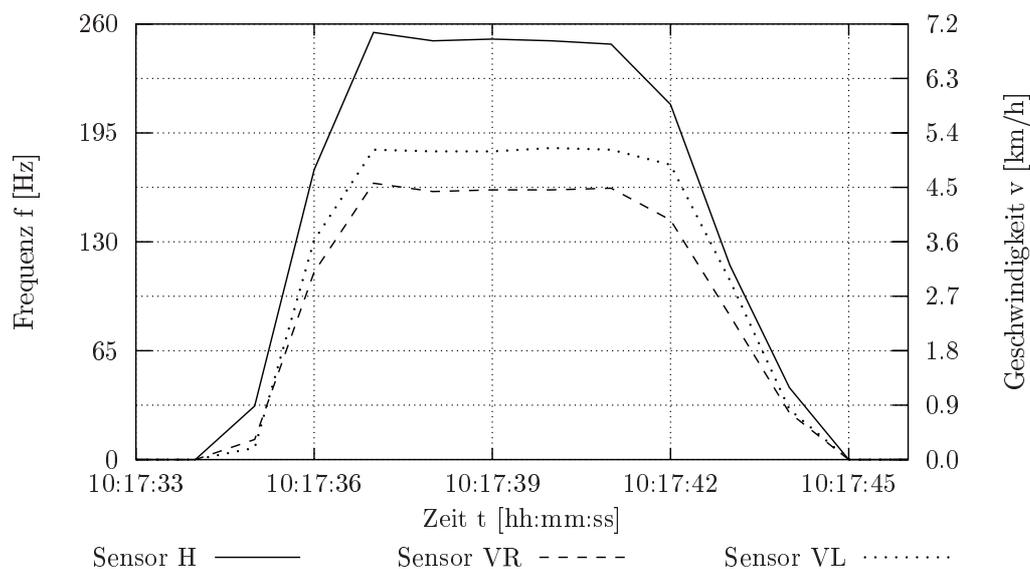


Abbildung B.1: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen (Geschwindigkeiten) bei Messfahrt 5-4

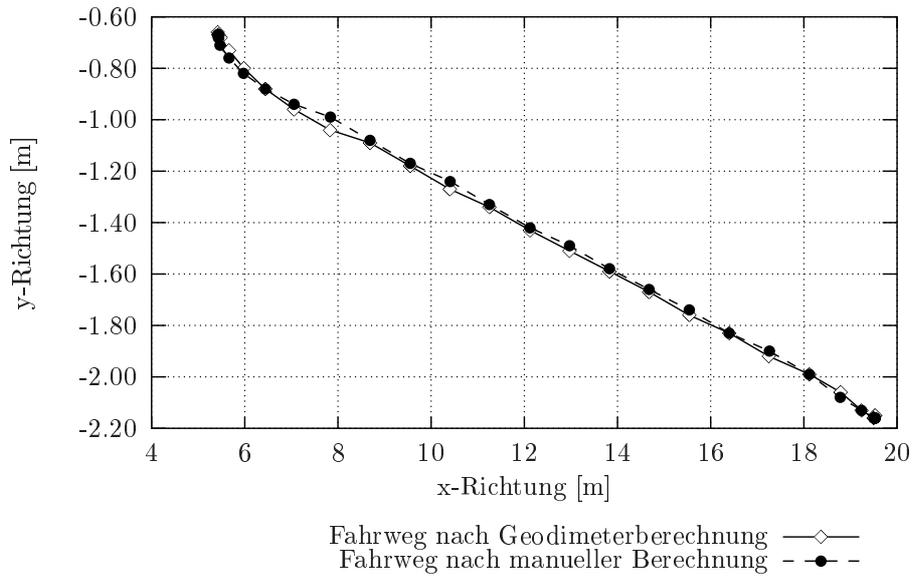


Abbildung B.2: Streckenverlauf von Messfahrt 5-4

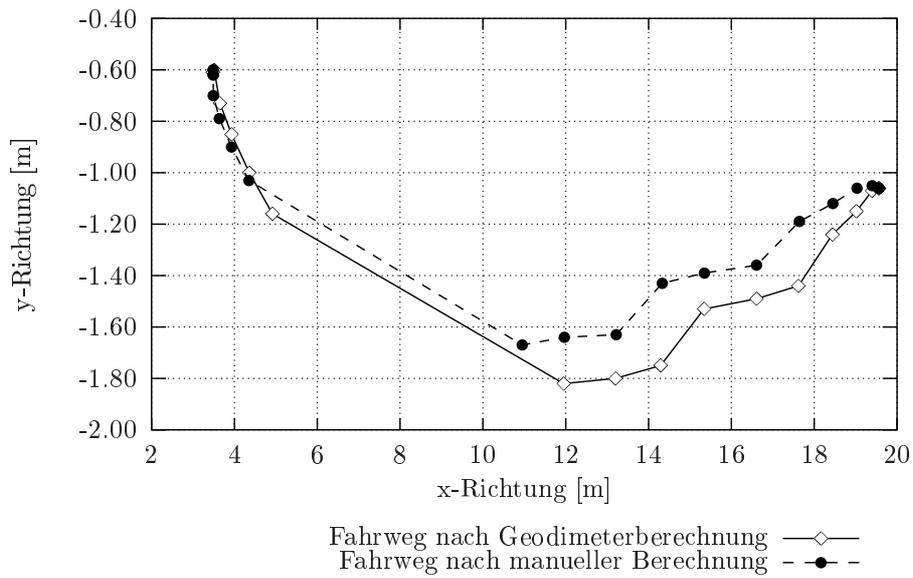


Abbildung B.3: Streckenverlauf von Messfahrt 9-2

Tabelle B.4: Abstrahl- und Neigungswinkel bei Geradeausfahrten in Y-Anordnung

<i>M-Nr.</i>	$\alpha_h$ [°]	$\alpha_{vr}$ [°]	$\alpha_{vl}$ [°]	$\phi$ [°]	$\rho$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]
10	35	35	35	0	0	0	0
11	25	42	42	-7	7	-10	0
12	45	28	28	7	-7	10	0
13	35	28	42	7	7	0	10
14	35	42	28	-7	-7	0	-10
15	30	31	45	5	10	-4	10,6

## C Feldversuche

### C.1 Geradeausfahrten am Versuchsstandort 1 bei 90°-Sensoranordnung

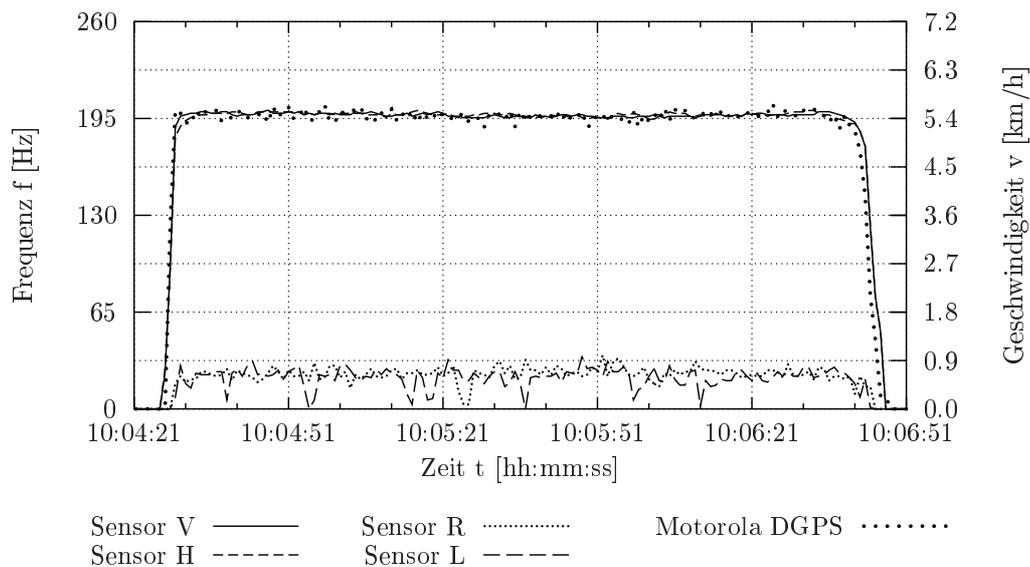


Abbildung C.1: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 1-5

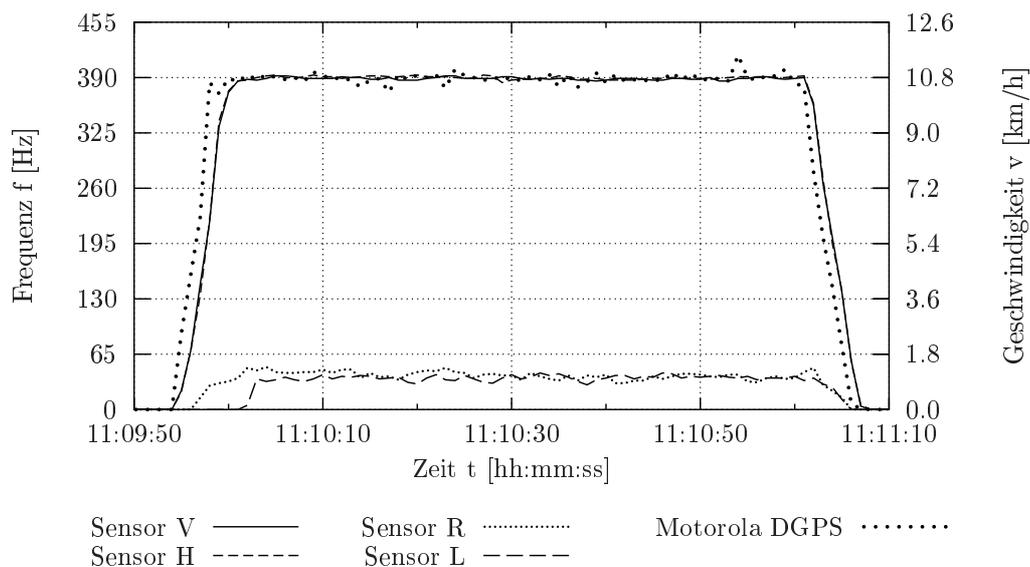


Abbildung C.2: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-3

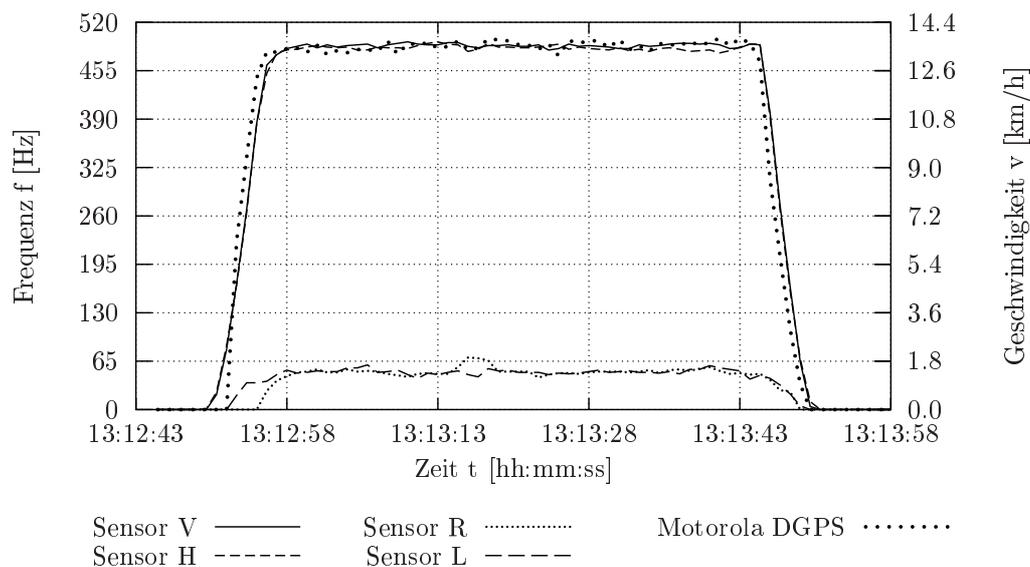


Abbildung C.3: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 3-1

## C.2 Kreisfahrten am Versuchsstandort 2

### C.2.1 90°-Sensoranordnung

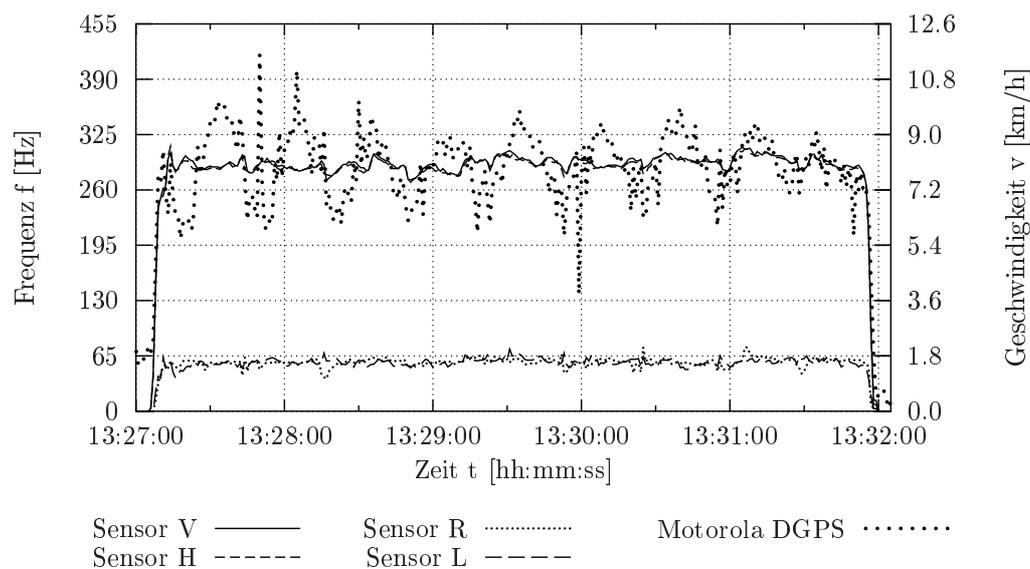


Abbildung C.4: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 1

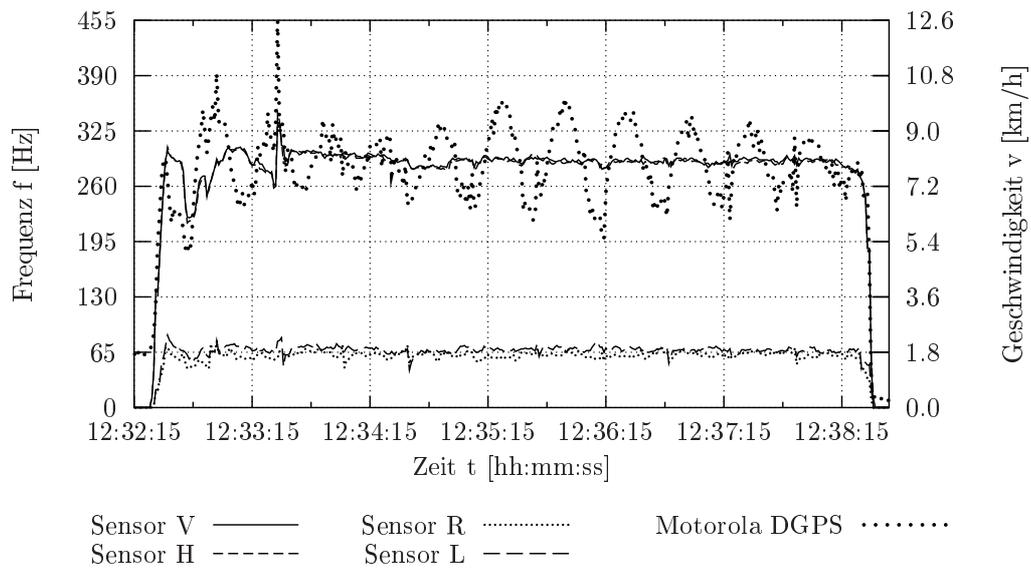


Abbildung C.5: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 2

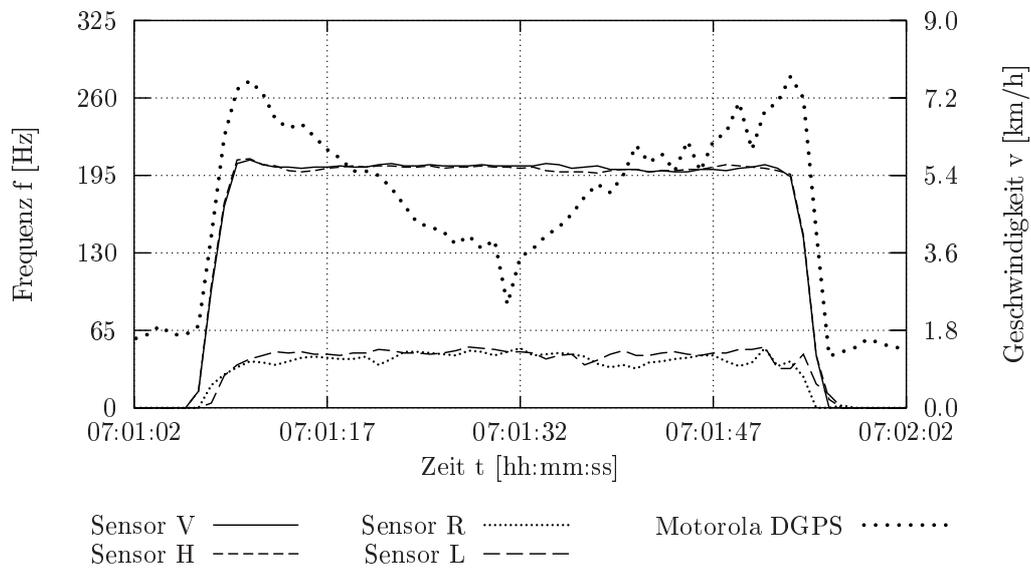


Abbildung C.6: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 3-8

## C.2.2 Y-Sensoranordnung

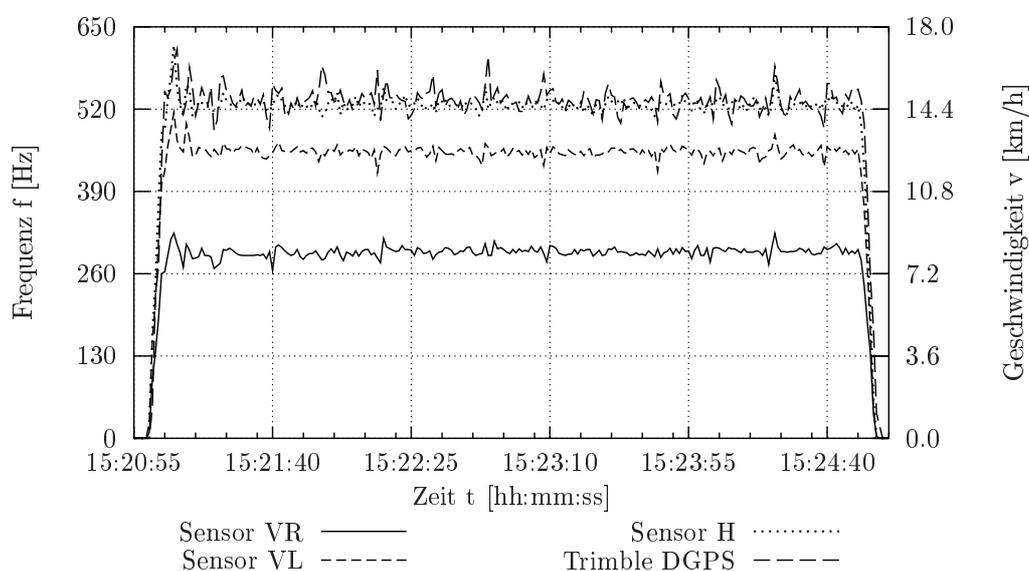


Abbildung C.7: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 3

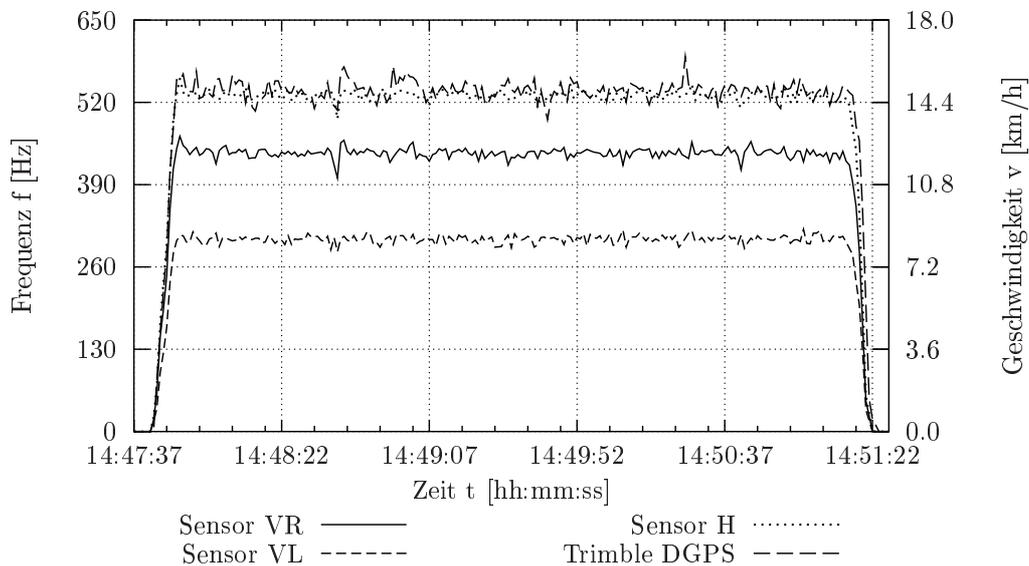


Abbildung C.8: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messreihe 6

## C.3 Tests am Versuchsstandort 3

### C.3.1 90°-Sensoranordnung

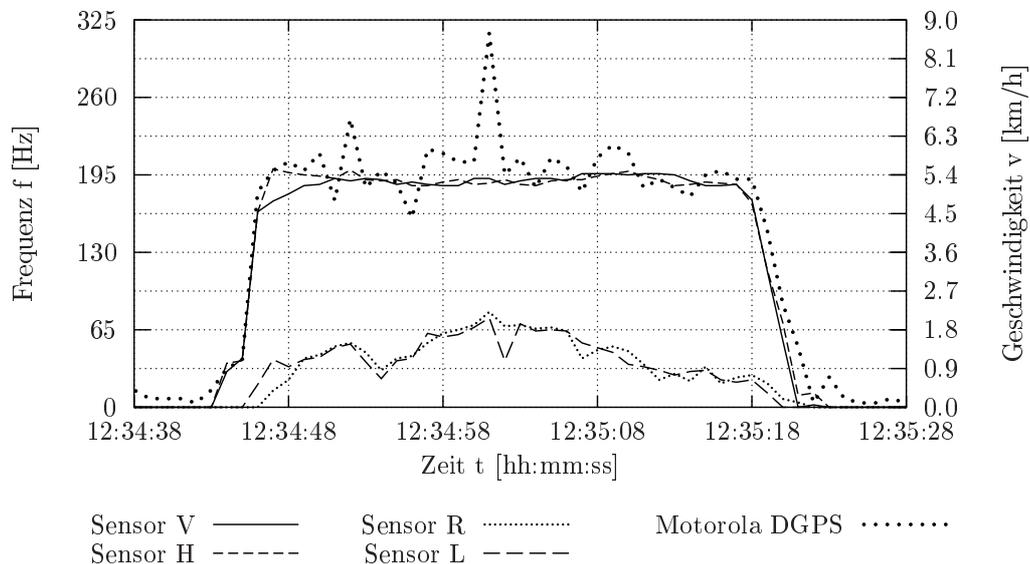


Abbildung C.9: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 4-1, Wenden zwischen Fahrspur 2 und 3

### C.3.2 Y-Sensoranordnung

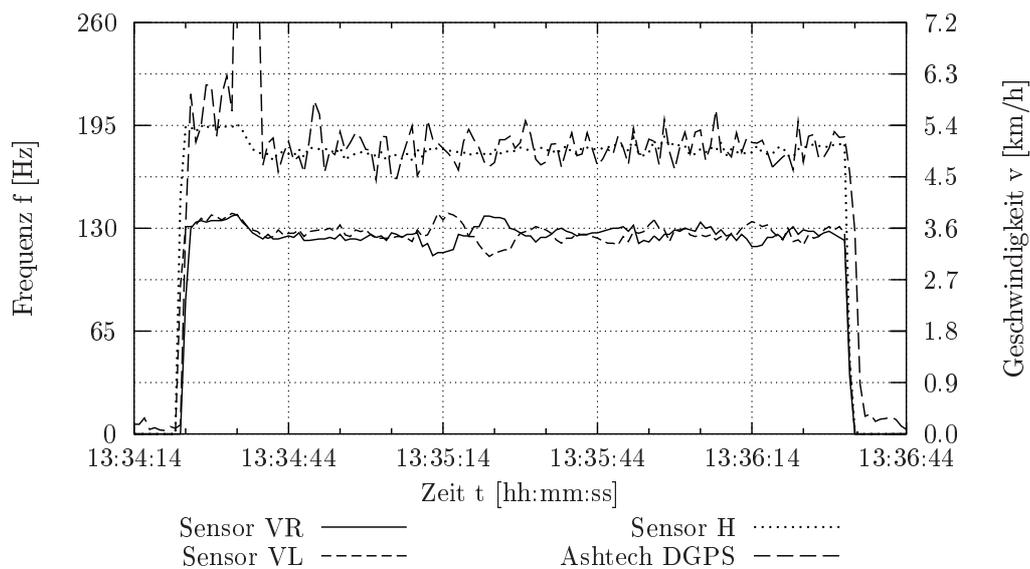


Abbildung C.10: Zeitliche Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-4 bei in Fahrspur 4

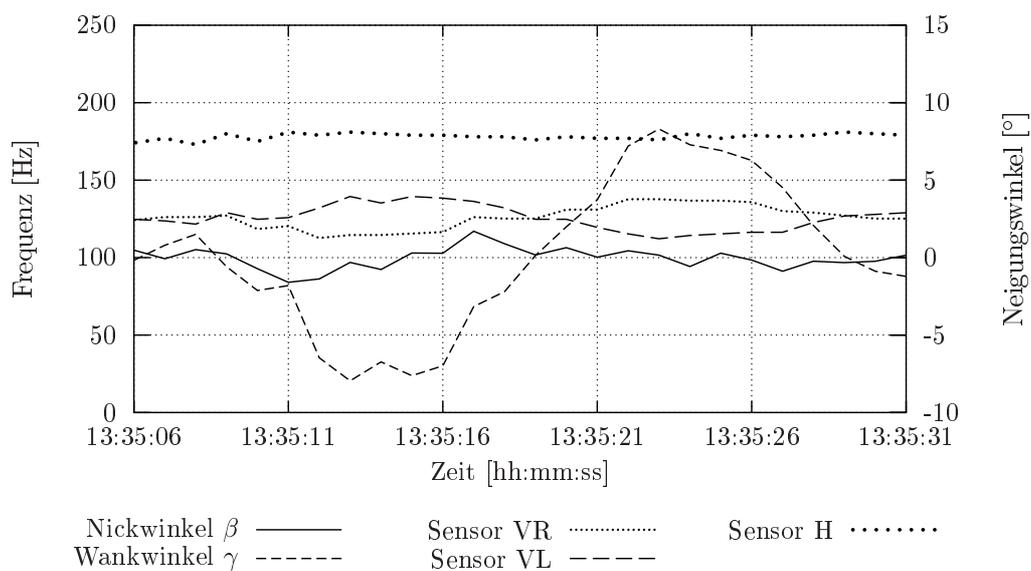


Abbildung C.11: Ausschnitt der zeitlichen Verläufe der gemessenen Frequenzen und Geschwindigkeiten bei Messfahrt 2-4 in Fahrspur 4

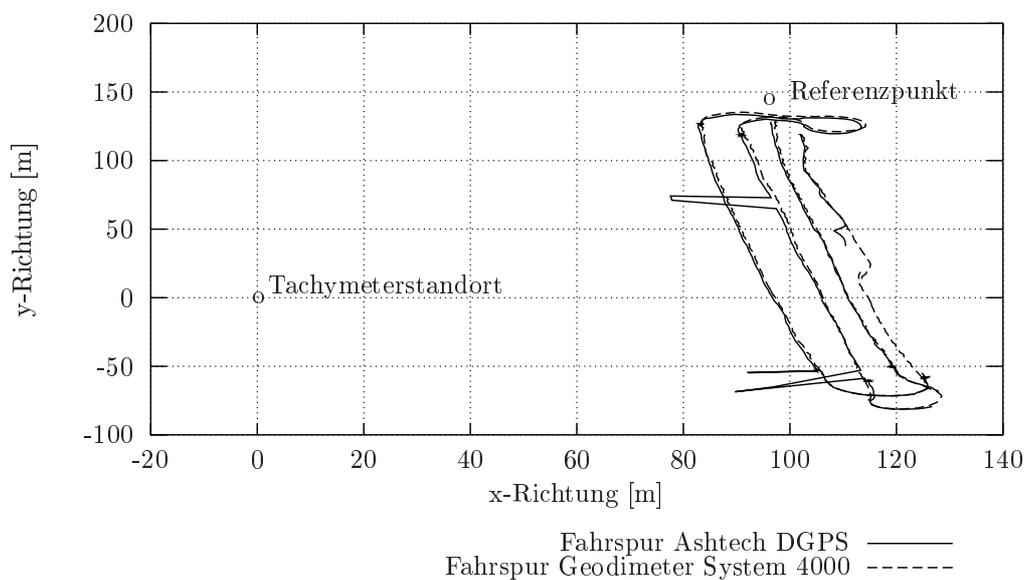


Abbildung C.12: Ortungsfehler bei Fahrten für Messreihe 5

Tabelle C.1: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vom DGPS bei Geradeausfahrten in verschiedenen Fahrspuren

$M\text{-Nr.}$	$V\text{-Nr.}$	$\bar{v}_{DGPS}$ [km/h]	$\bar{s}_{v_{DGPS}}$ [km/h]	$\bar{V}_{v_{DGPS}}$ [%]
1	1	4,9	0,3	6,1
1	2	5,1	0,3	5,9
1	3	5,0	0,2	4,0
1	4	5,6	0,3	5,4
2	1	5,0	0,3	6,0
2	2	5,0	0,3	6,0
2	3	5,0	0,3	6,0
2	4	5,2	1,0	19,2
3	1	5,1	0,3	5,9
3	2	5,0	0,3	6,0
3	3	5,0	0,3	6,0
3	4	4,9	0,3	6,1
4	1	9,7	0,4	4,1
4	2	10,0	0,4	4,0
4	3	9,8	0,3	3,1
4	4	10,0	0,6	6,0
5	1	9,9	0,4	4,0
5	2	10,0	0,5	5,0
5	3	9,7	0,4	4,1
5	4	10,7	1,9	17,8
6	1	10,0	0,4	4,0
6	2	9,9	0,4	4,0
6	3	9,8	0,3	3,1
6	4	9,9	0,6	6,1

Tabelle C.2: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Radarsensoren bei Geradeausfahrten in verschiedenen Fahrspuren

$M\text{-Nr.}$	$V\text{-Nr.}$	$\bar{f}_h$ [Hz]	$\bar{s}_{f_h}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_h}$ [%]	$\bar{f}_{vr}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vr}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vr}}$ [%]	$\bar{f}_{vl}$ [Hz]	$\bar{s}_{f_{vl}}$ [Hz]	$\bar{V}_{f_{vl}}$ [%]
1	1	181	2,8	1,5	128	2,1	1,6	128	2,4	1,9
1	2	185	3,4	1,8	129	2,3	1,8	131	2,1	1,6
1	3	181	4,1	2,3	128	2,8	2,2	127	3,3	2,6
1	4	199	3,0	1,5	140	4,9	3,5	140	6,3	4,5
2	1	180	3,4	1,9	128	2,8	2,2	128	2,9	2,3
2	2	178	2,8	1,6	124	2,1	1,7	125	2,9	2,3
2	3	181	2,9	1,6	128	2,8	2,2	127	2,4	1,9
2	4	180	4,9	2,7	127	5,0	3,9	127	5,4	4,3
3	1	180	2,7	1,5	128	2,2	1,7	128	3,0	2,3
3	2	180	2,7	1,5	126	2,1	1,7	126	2,3	1,8
3	3	181	2,5	1,4	127	2,1	1,7	127	2,2	1,7
3	4	181	5,6	3,1	126	4,7	3,7	128	6,7	5,2
4	1	353	4,3	1,2	250	4,9	2,0	249	5,8	2,3
4	2	362	5,6	1,5	252	5,4	2,1	259	7,2	2,8
4	3	357	4,3	1,2	253	3,4	1,3	252	5,0	2,0
4	4	362	6,1	1,7	254	9,3	3,7	256	11,8	4,6
5	1	357	6,7	1,9	249	6,7	2,7	251	7,0	2,8
5	2	356	7,4	2,1	250	5,3	2,1	254	7,9	3,1
5	3	354	4,6	1,3	248	4,9	2,0	250	4,6	1,8
5	4	363	5,4	1,5	255	10,0	3,9	255	11,2	4,4
6	1	358	6,5	1,8	254	7,2	2,8	255	6,9	2,7
6	2	360	5,9	1,6	252	5,4	2,1	256	6,8	2,7
6	3	356	5,1	1,4	253	4,3	1,7	253	5,8	2,3
6	4	363	5,9	1,6	253	9,1	3,6	257	10,3	4,0