

# Fehleranalyse und Datenfusion von Satellitennavigations- und Fahrdynamiksensorignalen

Vom Fachbereich Maschinenbau der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt. Ing. Doris Schmidt**  
aus Würzburg

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker
Tag der Einreichung:	23. November 2009
Tag der mündlichen Prüfung:	09. Februar 2010

Darmstadt, 2009

D 17



---

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (*FZD*) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Leiter des Fachgebietes Fahrzeugtechnik, Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Winner danke ich zum einen für die Möglichkeit auf thematisch verschiedenen Bereichen arbeiten zu können und zum anderen für die wissenschaftliche Betreuung. Die mit ihm regelmäßig geführten Fachdiskussionen, verbunden mit der Möglichkeit der selbstständigen Arbeitsweise trugen entscheidend zur Erstellung dieser Arbeit bei.

Ebenso gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Becker, Leiter des Fachgebietes Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie der Technischen Universität Darmstadt, für die freundliche Übernahme des Korreferats und die stets ermutigenden Worte.

Den ehemaligen Kollegen des Fachgebietes Fahrzeugtechnik, einschließlich den Sekretärinnen und allen Werkstattmitarbeitern gebührt mein Dank für die vielfältige Unterstützung, die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Auch den Mitarbeitern der Fachgebiete Flugsysteme und Regelungstechnik sowie Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie danke ich für die ausgesprochene Hilfsbereitschaft und für die zahlreichen Fachgespräche.

Ferner spreche ich allen Korrekturlesern meinen besonderen Dank aus, die dieser Arbeit den letzten Schliff gegeben haben.

Auch danken möchte ich allen Studien- und Diplomarbeitern sowie den Hilfswissenschaftlern, die mich tatkräftig bei der Forschungsarbeit unterstützt haben.

Meinen Freunden danke ich für das mir entgegengebrachte Verständnis sowie für die motivierenden Worte.

V. a. für den Rückhalt, den ich in der Endphase dieser Arbeit erfahren habe, bin ich allen sehr dankbar.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meine Eltern und Großeltern für ihren vertrauensvollen, ermutigenden und bedingungslosen Beistand. Ohne ihre Aufopferungen und Entbehrungen während meiner gesamten Ausbildung wäre sehr vieles nicht möglich gewesen. DANKE!

Würzburg, im November 2009

Doris Schmidt

”Wissenschaftliche Forschung läuft immer darauf hinaus, daß es plötzlich mehrere Probleme gibt, wo es früher ein einziges gegeben hat.” *Norman Mailer*

Diese Arbeit ist meinen Eltern sowie Großeltern gewidmet. Insbesondere Oma Emmi, die während der Bearbeitungszeit verstarb und mich noch mit ihrer allerletzten Kraft motiviert hat.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Fahrerassistenzsysteme . . . . .	2
1.2.1	Auswahl von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	2
1.2.2	Beschreibung der ausgewählten Fahrerassistenzsysteme und Ableitung der Betrachtungsgrößen . . . . .	5
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Forschung</b>	<b>11</b>
2.1	Globale Navigationssatellitensysteme . . . . .	11
2.1.1	Common-Mode-Fehler . . . . .	13
2.1.2	Noncommon-Mode-Fehler . . . . .	17
2.1.3	Zwischenfazit . . . . .	20
2.2	Trägheitsnavigation und Koppelortung . . . . .	21
2.2.1	Inertialnavigation . . . . .	21
2.2.2	Betrachtungsgrößen und deren Fehler . . . . .	23
2.2.3	Zwischenfazit . . . . .	33
2.3	Integrierte Navigation . . . . .	33
2.4	Fazit und Konkretisierung der Forschungsfragestellung . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Versuchsmethodik und Messtechnik</b>	<b>52</b>
3.1	Versuchsmethodik . . . . .	52
3.1.1	Ableitung der Versuche . . . . .	52
3.1.2	Versuchsdurchführung . . . . .	54
3.2	Messtechnik . . . . .	57
3.2.1	Eingesetzte Messwerkzeuge . . . . .	57
3.2.2	Messdatenerfassung und -aufbereitung . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Signalanalyse</b>	<b>62</b>
4.1	Bewertungskriterien . . . . .	62
4.2	Statisches Verhalten sowie Witterungs- und Tageszeiteinfluss . . . . .	65
4.2.1	Position . . . . .	66
4.2.2	Geschwindigkeit, Gierrate und Kurswinkel . . . . .	71
4.3	Dynamikverhalten . . . . .	73
4.3.1	Verfügbarkeitsuntersuchung . . . . .	73
4.3.2	Verzugszeitbestimmung . . . . .	79

4.3.3	Qualitätsuntersuchung Kurswinkel . . . . .	81
4.3.4	Radgeschwindigkeitsfaktor . . . . .	85
4.4	Fazit . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Sensordatenfusion</b>	<b>103</b>
5.1	INS-/GPS Fusionsstrategien und deren Auswahl . . . . .	103
5.2	Anforderungen an den Fusionsansatz . . . . .	107
5.3	Fusionsansatz und dessen Implementierung . . . . .	108
5.3.1	Gierrate . . . . .	108
5.3.2	Geschwindigkeit . . . . .	109
5.4	Fazit . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Fusionsergebnisse</b>	<b>113</b>
6.1	Beurteilungskriterien . . . . .	113
6.2	Ergebnisse der Gierratenfusion . . . . .	114
6.3	Ergebnisse der Geschwindigkeitsfusion . . . . .	117
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>120</b>
7.1	Gültigkeit, Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse . . . . .	120
7.2	Empfehlungen und Ausblick . . . . .	121
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>124</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>127</b>
A.1	Darstellung der Patentrecherche . . . . .	127
A.2	Koordinatensysteme und Koordinatentransformation . . . . .	128
A.2.1	Grundlagen . . . . .	128
A.2.2	Transformation der erforderlichen Gleichungen . . . . .	131
A.3	Fahrzeugtechnische Modellvorstellung - Einachsmodell . . . . .	133
A.4	Versuchsstrecke und Technische Spezifikationen . . . . .	134
A.4.1	Versuchsstrecken im öffentlichen Straßenverkehr . . . . .	134
A.4.2	Testmanöver Slalom und seine Varianten . . . . .	137
A.4.3	Daten des Versuchsträgers . . . . .	138
A.4.4	Fachgebietseigene Referenzstation . . . . .	141
A.5	Anmerkungen und Ergänzungen zur Signalanalyse . . . . .	142
A.5.1	Anmerkungen - Variationsparameter $\tau$ . . . . .	142
A.5.2	Anmerkung - Normalverteilungsprüfung . . . . .	143
A.5.3	Geschwindigkeit, Gierrate und Kurswinkel . . . . .	143
A.5.4	Verzugszeit . . . . .	145
A.5.5	Anmerkung - Qualitätsuntersuchung Kurswinkel . . . . .	147
A.5.6	Radgeschwindigkeitsfaktor . . . . .	148
A.6	Ergänzung zum Ausblick . . . . .	153
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>154</b>

---

# Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
AIS	Automatic Identification System
Apolo	Advanced Position Locator
A/S	Anti-Spoofing
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
C/A	Coarse / Acquisition
CAN	Controller Area Network
CC	Cruise Control
CEP	Circular Error Probability
COMPASS	Name des chinesischen GNS-Systems
COOPERS	Kooperative Systeme für intelligente Straßenverkehrssicherheit
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP	Dilution Of Precision
DSC	Dynamic Stability Control
DURAN	Dual Radio Navigation Receiver
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FDR	Fahrdynamikregelung
FOG	Fiber-Optic-Gyroscope
FUE	Fahrumgebungserfassung und Interpretation
FVM	Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion
FZD	Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
GALILEO	Name des Europäischen Satellitennavigationssystems
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (russisch), Globales Satelliten-Navigations-System
GLORIA	GNSS & Loran-C in Road and Rail Application
GNSS	Global Navigation Satellite System(s)
GPS	Global Positioning System

---

HA	Hinterachse
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
IGS	International GNSS Service for Geodynamics
ILS	Instrument Landing System
INS	Inertiales Navigationssystem
INTEGRAIL	GPS/EGNOS-based Rail Navigation User Equipment
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
KS	Koordinatensystem
LDW	Lane Departure Warning
LEP	Linear Error Probability
LKA	Lane Keeping Assist
LkW	Lastkraftwagen
LORAN	Longe Range Navigation
MATLAB	Matrix Laboratory
MEDLL	Multipath Estimating Delay Lock Loop
MEMS	Micro Electro Mechanical Sensors
MLS	Microwave Landing System
MNM	Mathematischer Navigations-Monitor
MoSES	Mobile Straßen-Erfassungs-Systeme
MUSEN	Multi-Sensor-Navigation-Unit
NAVSTAR	Navigation System with Timing and Ranging
NED	North-East-Down
NMEA	National Marine Electronics Association
NSS	Navigation Satellite Systems
P/Y-Code	Precise Code (Precision/Encrypted)
PDGPS	Präzisions-Differential-GPS
Pkw	Personenkraftwagen
PPS	Precise Positioning Service
PreVent	Preventive and Active Safety Applications integrated project
PRN	Pseudo-Random-Noise
RC	Random Constant
RLG	Ring-Laser-Gyroscope
RLK	Ringlaserkreisel
RMS	Root Mean Square
RNSS	Regional Navigation Satellite System
RTG	Rubber Tire Gantry Crane
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SAE	Society of Automotive Engineers
SAR	Search And Rescue
SASPENCE	Safe Speed and (Safe) Distance System
Sat	Satellit
SATNAB	Satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SC	Straddle Carrier
SDMC	System for Differential Correction and Monitoring



SIM-TD	Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland
SKF	Skalenfaktorfehler
SNAS	Sino Navigation Augmentation System
sog.	sogenannt(e/r)
SPS	Standard Positioning Service
STA	Stauassistent
TU	Technische Universität
VA	Vorderachse
VAS	Vorausschauende Aktive Sicherheit
VDB	VHF-Data Broadcast
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHF	Very High Frequency
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Radio Range
VRA	Verkehrliche Wirkung, Rechtsfragen und Akzeptanz
WAAS	Wide-Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
WILLWARN	Wireless Local Danger Warning
WP	Wendepunkt

---

# Formelzeichen und Indizes

Symbole	Einheit	Beschreibung
$a_{x,y}$	$m/s^2$	Längs-/Querbeschleunigung bzw. -verzögerung
$a$	m	Große Halbachse des WGS84-Ellipsoids
$b$	m	Kleine Halbachse des WGS84-Ellipsoids
$B$	$^\circ, \text{rad}$	Breitengrad
$BG$	$m/s, ^\circ/s$	Betrachtungsgröße
$d_i$	m	Pseudoentfernung zum Satellit $S_i$
$e$	$m, ^\circ/s$	Fehler
$e$	m	Erste Exzentrizität
$f$	Hz	Frequenz
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$g_{\Delta\psi}$	–	Gewichtungsfaktor
$i_{LG}$	–	Lenkübersetzung
$J$	$kg\ m^2$	Massenträgheitsmoment
$k$	–	Korrekturfaktor
$k_s$	%	Streckenkorrekturfaktor
$k_v$	%	Radgeschwindigkeitsfaktor
$l_v$	m	Abstand Schwerpunkt zur Vorderachse
$l_h$	m	Abstand Schwerpunkt zur Hinterachse
$l$	m	Fahrzeuglänge
$L$	$^\circ, \text{rad}$	Längengrad
$L_1$	Hz	GPS-Trägerfrequenz
$L_2$	Hz	GPS-Trägerfrequenz
$m$	kg	Masse
$MSE$	$(m/s)^2, (^{\circ}/s)^2$	Mean Square Error
$n$	–	Eckenanzahl
$n$	–	Anzahl an diskreten Messpunkten
$N$	–	Stichprobe
$N$	–	Zufallsvektor
$N$	m	Querkrümmungsradius
$NV$	%	Nichtverwendbarkeitsstreckenanteil
$NV_{\max}$	%	Maximaler Nichtverwendbarkeitsstreckenanteil
$P$	%	Wahrscheinlichkeit
$P_E$	m	Empfängerposition
$P_S$	m	Satellitenposition
$quad_{\cdot e_{BG}}$	$(m/s)^2, (^{\circ}/s)^2$	Summe der quadrierten Abweichungen von BG
$r$	m	Radius, Reifenhalmesser

$RMSE$	m/s, °/s	Root Mean Square Error
$r_E$	m	Erdradius
$s$	m	Strecke, Weg
$s_v$	m	Spurbreite
$S$	–, %	Schlupf
$S$	–	Ungenauigkeit
$t$	s	Messdauer, Messzeit, Zeitpunkt
$t_1$	s	Laufzeit
$T$	s	Zeitkonstante, Zykluszeit
$U$	m	Umfang
$U_{ab}$	m	Abrollumfang
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$VF$	–	Verbesserungsfaktor
$W$	%	Wahrscheinlichkeit
$\beta$	°	Schwimmwinkel
$\dot{\beta}$	°/s	Schwimmrate
$\delta_h$	°	Lenkradwinkel
$\kappa$	m <sup>-1</sup>	Krümmung
$\omega$	rad/s	Raddrehzahl
$\dot{\psi}$	°/s	Gierrate
$\psi$	°	Gierwinkel
$\sigma$	m, m/s, °/s	Standardabweichung
$\Theta, \nu$	°	Kurs-/Headingwinkel
$\Phi$	–	Varianz-Kovarianz-Matrix
$\tau$	s	Zeitlicher Variationsparameter
$\mu$	m/s, °/s	Mittelwert
$\#$	–	Anzahl

---

<b>Indizes</b>	<b>Beschreibung</b>
Abtast	Abtastung
b	Body, körperfest
B	Bremsen
BEP	Break-Even-Point
dyn	Dynamisch
e	Erdfest
err	Error, Fehler
E	Erde
E	Empfänger
ECEF	Earth Centered Earth Fixed, erdfest
Fzg	Fahrzeug
ges	gesamt
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
h	Hand
h,H	Hinten
inertial	Auf das inertielle Koordinatensystem bezogen
k	diskret
L	Links
n	Navigation
P	Punkt
R	Rechts
R	Rad
Ref	Referenz
SP	Schwerpunkt
Sat	Satellit
Schätz	Schätzung
stat	Statisch
t	Tangential
T	Trieb, Antrieb
v	vehicle, Fahrzeug
v,V	Vorne
x	x-Richtung
y	y-Richtung
z	z-Richtung
0	Ausgangszustand

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Navigationssysteme und satellitengestützte Positionierung nehmen in allen Anwendungsbereichen eine stetig wachsende Rolle ein. Auch die Anforderungen an solche Systeme wachsen kontinuierlich. Während der Begriff Navigation ursprünglich nur in der Seefahrt verwendet wurde, wird heute unter diesem Begriff neben der Festlegung eines geographischen Ziels und der Planung der Route zu einem definierten Ziel auch ein Abgleich der tatsächlich eingeschlagenen mit der geplanten Route anhand geeigneter Parameter verstanden.

Dass der Bedarf an Navigationssystemen ständig wächst und die Bedeutung solcher Systeme stetig zunimmt ist am Bau neuer globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) sowie an dem technischen Fortschritt vorhandener GNSS in den letzten Jahren zu erkennen.<sup>1,2,3,4</sup> Die zunehmende große Bedeutung der Satellitennavigation zeigt sich ebenfalls in den zahlreichen Anwendungsgebieten, in denen Navigation heute eingesetzt wird. Somit ist auch die Anforderung an die Genauigkeit, je nach Anwendung, bis in den Millimeterbereich gestiegen. Dieser Genauigkeitsbereich kann von den Satellitennavigationssystemen derzeit allein nicht garantiert werden. Deshalb werden diese Systeme durch sog. Ergänzungssysteme unterstützt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Auch hier sind zahlreiche technische Entwicklungen und Tätigkeiten zu verzeichnen.<sup>5,6</sup>

Nicht nur auf der Systemebene, sondern auch bei den Empfängern der Satellitensignale, den Empfangsgeräten, ist eine zunehmende Verbreitung zu beobachten. Im Vergleich zum Jahr 2005 ist die Zahl verkaufter Empfänger (mobil oder festeingebaut) im Jahr 2006 um 300% gestiegen<sup>7</sup>, was einerseits auf die Kosten-, Gewichts- und Größenreduktion und andererseits auf die Effizienzsteigerung zurückzuführen ist. Durch diese starke Zunahme sind GNSS-Empfänger heutzutage aus vielen Anwendungsbereichen nicht mehr wegzudenken und Experten gehen davon aus, dass der GNSS-Markt auch weiterhin wachsen wird.<sup>8</sup> Diese Entwicklung spiegelt sich bis heute ebenfalls in der Automobilindustrie wieder, wie aus den DAT-Reports der Jahre 2005-2008<sup>9</sup> zu entnehmen ist. Ferner wird

---

<sup>1</sup>Becker (2007): Globale Satellitennavigationssysteme - Wo stehen wir heute?.

<sup>2</sup>Falcone/Erhard/Hein (2006): GALILEO.

<sup>3</sup>Feairheller/Clark (2006): Other Satellite Navigation Systems.

<sup>4</sup>Hofmann-Wellenhof/Lichtenegger/Wasle: GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GALILEO, Galileo and More.

<sup>5</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 213ff.

<sup>6</sup>Grewal/Weill/Andrews (2007): Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration S. 199ff.

<sup>7</sup>Harms (2007): Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.,

<sup>8</sup>Jacobson (2006): GNSS Markets and Applications.

<sup>9</sup>DAT-Veedol (2002): DAT-Veedol-Report 2002, S. 39; DAT (2003): DAT-Report 2003, S. 39; DAT (2004):

die stetige Zunahme des Straßenverkehrs und das immer größer werdende Bedürfnis der Menschen nach Mobilität die Verbreitung von Fahrzeugnavigationssystemen in Zukunft weiter vorantreiben. Diese Trendentwicklung hat zur Folge, dass Navigationsgeräte bereits im Kleinwagensegment als Sonderausstattung angeboten werden. So zeigen Prognosen von GRELL (2003)<sup>10</sup> oder VASEK (2004)<sup>11</sup>, dass Navigationsgeräte, unabhängig davon, ob portabel oder festeingebaut, in naher Zukunft zur Serienausstattung in Neufahrzeugen gehören.

Ebenso wie im Bereich der Satellitennavigationssysteme und GNSS-Empfänger wird die starke technologische Progression und Wachstumsgeschwindigkeit des Marktes auch für Fahrerassistenzsysteme (FAS), wie beispielsweise ESP und Adaptive Cruise Control (ACC), in den letzten Jahren offensichtlich.<sup>12</sup> Als Fahrerassistenzsysteme werden Systeme verstanden, die den Fahrer bei dem Führen des Fahrzeugs unterstützen.

Durch die Verfügbarkeit von immer mehr Einzelsystemen in den Fahrzeugen wird zunehmend versucht, die Vorteile der verschiedenen Systeme zu kombinieren. So ist ein Einsatz von GNSS-Systemen in Kraftfahrzeugen in einem vielfältigen Bereich und Kombinationen möglich, wie eine Auflistung von ZUKUNFT (2005)<sup>13</sup> zeigt. In der vorliegenden Arbeit wird die Kombination mit GNSS und Fahrerassistenzsystemen mit dem Ziel der Verbesserung der Datenqualität der für Fahrerassistenzsysteme notwendigen Messgrößen näher betrachtet. Die Kombination ist jedoch nicht für alle Fahrerassistenzsysteme sinnvoll, weshalb eine Vorauswahl der Assistenzsysteme unter dem zu untersuchenden Kombinationsaspekt (Stützung durch GNSS) erforderlich ist.

## 1.2 Fahrerassistenzsysteme

### 1.2.1 Auswahl von Fahrerassistenzsystemen

Die Ausprägungen von Fahrerassistenzsystemen (FAS) sowie die Einsatzarten der Fahrerassistenz können in vielfältiger Weise variieren. Durch die rasch fortschreitende technische Entwicklung zeigt sich immer mehr, dass Fahrerassistenzsysteme nicht mehr nur maßgeblich das Fahrgefühl und den Komfort von Kraftfahrzeugen erhöhen (wie beispielsweise ein Tempomat), sondern weit darüber hinaus in den Bereich der Sicherheit (z.B. ABS, ESP) eingreifen und eine effizientere Nutzung des vorhandenen Verkehrsraumes erlauben. Abbildung 1.1 gibt beispielhaft einen Einblick in die Entwicklung und Einführung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. Weiterführende Aufstellungen finden sich u. a. in GEDULD (1997)<sup>14</sup>, METZLER (1998)<sup>15</sup>, EHMANN ET AL. (2000)<sup>16</sup>, FRANK UND REICH-

---

DAT-Report 2004, S. 39; Autohaus (2005): DAT-Report 2005, S. 43; Autohaus (2006): DAT-Report 2006, S. 43; Autohaus (2007): DAT-Report 2007, S. 48; Autohaus (2008): DAT-Report 2008, S. 49.

<sup>10</sup>Grell (2003): Rad am Draht.

<sup>11</sup>Vasek (2004): Rechner auf Rädern.

<sup>12</sup>Dudenhöffer (2005): Wertwachstum durch Mikrotechnik: Fahrerassistenzsysteme.

<sup>13</sup>Zukunft (2005): Anwendungspotential und DLR-Expertise S. 13ff.

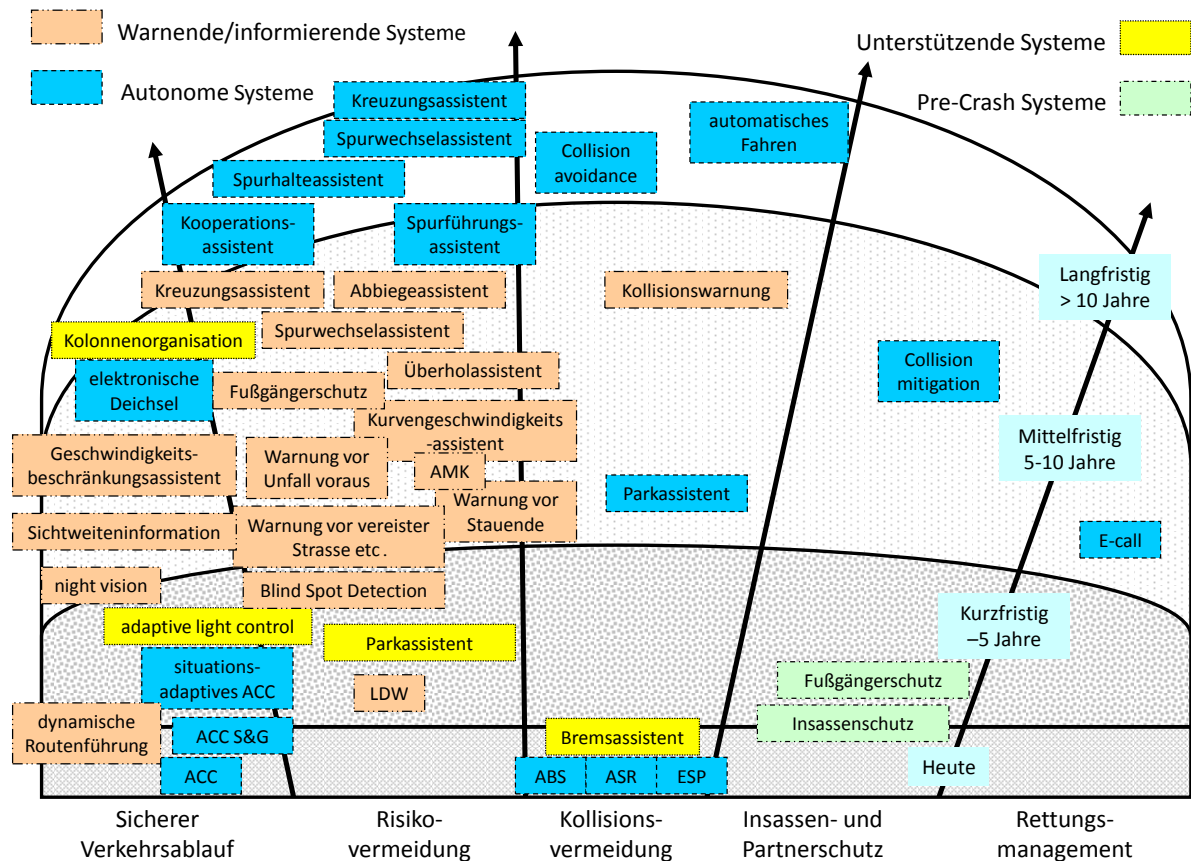
<sup>14</sup>Geduld (1997): Collision Avoidance, Adaptive Cruise Control: Two similar Applications with different Kinds of Philosophy and Safety Impact.

<sup>15</sup>Metzler (1998): Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung.

<sup>16</sup>Ehmanns et al. (2000): Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung.

ART (2000)<sup>17</sup>, BARRENSCHEEN UND EICHHORN (2001)<sup>18</sup>, FRIEDRICH ET AL. (2001)<sup>19</sup>, HIPPE UND SCHALLER (2001)<sup>20</sup>, MAURER (2000)<sup>21</sup> und STILLER (2005)<sup>22</sup>.

In Abbildung 1.1 sind vier verschiedene Systemtypen (Pre-Crash, unterstützende, warnende/informierende sowie autonome Systeme) dargestellt. Diese sind im Weiteren in folgende fünf Gruppen eingeteilt: sicherer Verkehrsverlauf, Risiko-, Kollisionsvermeidung, Insassen- und Partnerschutz sowie Rettungsmanagement. Die horizontalen Bereiche stellen den Zeithorizont von heute bis langfristig (> 10 Jahre) dar.



**Abbildung 1.1:** Zeitliche Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen.

Quelle: NEUNZIG ET AL. (2005).

Aus Abbildung 1.1 ist zu entnehmen, dass der Risikovermeidungsbereich mittelfristig einen starken Zuwachs an warnenden/informierenden sowie langfristig an autonomen Systemen erfährt. Im Hinblick auf die Vision des autonomen, vollautomatischen Fah-

<sup>17</sup>Frank/Reichart (2000): Grenzen der Verkehrssicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz.

<sup>18</sup>Barrenscheen/Eichhorn (2001): Mobilität der Zukunft.

<sup>19</sup>Friedrich et al. (2001): Auf dem Weg zum intelligenten Auto - Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen.

<sup>20</sup>Hipp/Schaller (2001): Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge - Stand und Ausblick.

<sup>21</sup>Maurer (2000): Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen.

<sup>22</sup>Stiller (2005): Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr S. 2.

rens<sup>23</sup> bedeutet dies, dass die Assistenzsysteme zunehmend Einzelaufgaben des Fahrers übernehmen. Dies mündet neben einer wachsenden Wertigkeit auch in eine steigende Zahl elektronischer Systeme und in eine höhere Komplexität.<sup>24</sup> Der gestiegene Aufwand für die Verwaltung der großen Anzahl an Sensoren und Systemen wird mit einer Verbesserung der Verlässlichkeit der Systeminformation einhergehen. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf die Akzeptanz der Systeme bei den Fahrern. Somit ist es sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus organisatorischen Gesichtspunkten zweckmäßig, zukünftig nicht für jede Applikation ein Einzelsystem mit separatem Sensor (z. B. Radar- oder Lidar-basierte ACC<sup>25</sup>-Systeme sowie Ultraschall-basierte Einparkhilfen) zu entwickeln, sondern verschiedene Sensoren miteinander zu fusionieren. Ein Beispiel hierfür ist die Kombination eines LDW-Systems<sup>26</sup> mit einem Verkehrszeichenassistenten mit gemeinsamer Nutzung der Videokamera. Durch diesen integrierten Ansatz lassen sich Synergieeffekte der Systeme ausnutzen. Konkret ergibt sich damit auch die Möglichkeit, dass Navigationssysteme, die heute vorwiegend zur Routensuche und Zielführung im Fahrzeugbereich eingesetzt werden, zukünftig andere im Fahrzeug vorhandene Systeme unterstützen. Darüber hinaus ist neben einer Performanceverbesserung vorhandener Systeme auch die Entwicklung neuer Systeme bzw. Funktionen denkbar. Da nicht alle in Abbildung 1.1 aufgelisteten Assistenzsysteme für eine Kombination mit GNSS-Informationen geeignet sind, wird eine Selektion von Systemen, die ein Potenzial für eine Verbesserung durch GNSS-Informationen aufweisen, vorgenommen.

Bei dem Einsatz des Navigationssystems im Fahrzeug zur Routenführung basiert diese auf der Nutzung der GNSS-Daten sowie auf der Verwendung von Digitalen Karten. Da diese Karten jedoch mangelnde Aktualität<sup>27</sup> (beispielsweise keine zeitnahe Erfassung neuer Straßen, längerfristige Umleitungen) sowie eine geringe Genauigkeit aufweisen können, wird die Digitale Karte für die Untersuchung ausgeschlossen. Ferner besteht das Ziel der Arbeit nicht in der Entwicklung eines GNSS-Empfängers, weshalb für die vorliegende Arbeit die von den GNSS-Empfängern jeweils ausgegebene GNSS-Position, GNSS-Geschwindigkeit sowie der GNSS-Kurswinkel als Ausgangsgrößen verwendet werden. Somit erfolgt die Auswahl von Fahrerassistenzsystemen für das Vorhaben unter folgenden Rahmenbedingungen:

- Verzicht auf die Nutzung der Digitalen Karten aufgrund möglicher mangelnder Aktualität und schlechter Genauigkeit (vergleiche Kapitel 2).
- Nutzung von GNSS-Position und/oder -Geschwindigkeit und/oder -Kurswinkel-Daten, die vom GNSS-Empfänger zur Verfügung gestellt werden.

Unter dem Gesichtspunkt der möglichen Nutzung der verfügbaren GNSS-Daten (Position, Geschwindigkeit, Kurswinkel) für die Unterstützung von Assistenzsystemen ergeben sich, ausgehend von Abbildung 1.1, die in Tabelle 1.1 links dargestellten Assistenzsysteme. Diese werden, soweit es für das Verständnis der Arbeit erforderlich ist, nun näher vorgestellt.

---

<sup>23</sup>Siehe Evolutionsroadmap in WINNER und WOLF (2009, S. 672)

<sup>24</sup>Rottmann (2005): Wertwachstum durch Mikrotechnik: Fahrerassistenzsysteme.

<sup>25</sup>ACC steht für Adaptive Cruise Control. Hierbei handelt es sich um die Erweiterung des Tempomaten, in dem neben der Geschwindigkeit auch der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug geregelt wird.

<sup>26</sup>LDW steht für Lane Departure Warning. Hierbei handelt es sich um ein Fahrstreifenverlassenswarner, der den Fahrer vor einem Verlassen des eigenen Fahrstreifens durch haptisches oder akustisches Signal warnt.

<sup>27</sup>Kleine-Besten et al. (2009): Navigation und Telematik S. 611.



Wird im Folgenden der Begriff GNSS-Daten verwendet, so sind immer die von den GNSS-Empfängern zur Verfügung gestellten Daten (Position, Geschwindigkeit und Kurswinkel) gemeint.

**Tabelle 1.1:** Auswahl und Gruppierung von für die Integration von GNSS-Daten geeignete Fahrerassistenzsysteme.

Fahrerassistenzsysteme	Gruppierung		
	Sensorabgleich	Genauere Positionierung	Krümmungsbestimmung
Elektronisches Stabilitätsprogramm (incl. ABS, ASR)	X		
Adaptive Cruise Control	X		X
Lane Departure Warning		X	
Überholassistent		X	
Kreuzungsassistent		X	
Abbiegeassistent		X	
Spurführungsassistent		X	X
Spurhalteassistent		X	X
Fahrstreifenwechselassistent		X	

### 1.2.2 Beschreibung der ausgewählten Fahrerassistenzsysteme und Ableitung der Betrachtungsgrößen

Bei den Systemen Antiblockiersystem (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR) und Elektronische Stabilitätskontrolle (ESP) handelt es sich um Fahrdynamikstabilisierungssysteme. Im Gegensatz zu ESP gehören ABS und ASR mittlerweile zur Serienausstattung.<sup>28</sup>

Durch die Kombination der längsdynamischen Größen (aus ABS, ASR) mit querdynamischen Größen wird die Fahrstabilität des Fahrzeugs in querdynamisch kritischen Situationen (beispielsweise Kontrollverlust durch Übersteuern, sog. Schleudern) durch radindividuelles Abbremsen einzelner Räder in gewissen Grenzen gewährleistet. Dies bedeutet, dass dieses Giermomentenregelungssystem, statt ESP auch als *Fahrdynamikregelung* (FDR) oder *Dynamic Stability Control* (DSC)<sup>29</sup> bezeichnet, zur Verbesserung des Fahrverhaltens dient. Eine Instabilität sowie ein seitliches Ausbrechen werden beim Lenken solange verhindert, bis die physikalischen Grenzen überschritten werden. Somit besteht das ESP-Assistenzziel in der Verbesserung der Spur- und Richtungstreue in allen Betriebszuständen soweit es die physikalischen Grenzen zulassen.

Im Gegensatz zu den beiden Systemen ABS und ASR, die sich auf die Messung der fahrzeuginternen Größe Raddrehzahl beschränken, verwendet das ESP zusätzlich zu den vier Raddrehzahlen die Gierrate  $\dot{\psi}$ , die Querbewegung  $a_y$ , die geschätzte Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  sowie den Lenkradwinkel  $\delta_h$  und vergleicht den aktuellen Fahrzustand

<sup>28</sup>Schröder: EU-Kommission: ESP und Sprintspar-Reifen sollen Leben und Umwelt retten.

<sup>29</sup>Je nach Hersteller wird dieses System unterschiedlich bezeichnet.

mit einem geschätzten Soll-Zustand anhand des Schwimmwinkels  $\beta$ . Während die Gierrate die Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeuges um seine Hochachse angibt, handelt es sich bei dem Schwimmwinkel um den Winkel, der zwischen der Fahrzeuglängsachse und der tatsächlichen Bewegungsrichtung des Fahrzeugs entsteht. Er wird aus den genannten Größen unter der Annahme kleiner Schwimmwinkel und geringer Fahrzeugverzögerung gemäß Gleichung 1.1 bestimmt.<sup>30</sup>

$$\beta(t) = \beta_0 + \int_0^t \underbrace{\left( \frac{a_y}{v_{\text{Fzg}}} - \dot{\psi} \right)}_{\dot{\beta}} dt \quad (1.1)$$

Sowohl die gemessenen Werte für die Querbefleunigung und für die Gierrate als auch die geschätzte Fahrzeuggeschwindigkeit, die sich aus den Raddrehzahlen der einzelnen Räder der nicht angetriebenen Achse und des geschätzten dynamischen Reifenhalbmessers  $r_{\text{dyn}}$ , der eine virtuelle Größe darstellt, sind fehlerbehaftet. Daher führt die Integration schnell zu Fehlern, die sich bei der Bestimmung des Schwimmwinkelwertes auswirken. Daher wird der Schwimmwinkel im Fahrzeug heutzutage meist mittels Kalmanfilter bestimmt.<sup>31</sup> Die Fehlerfortpflanzung könnte künftig durch die Nutzung der GNSS-Daten für einen Abgleich der Fahrzeuggeschwindigkeit und für einen Offsetabgleich der Gierrate durch Fusion reduziert werden. Somit ergeben sich für die Stützung mit GNSS-Daten als erste mögliche Betrachtungsgrößen<sup>32</sup> die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$  sowie die Gierrate  $\dot{\psi}$ .

Im Gegensatz zu dem Stabilisierungssystem ESP handelt es sich bei dem *Adaptive Cruise Control-System* (ACC) um ein komfortorientiertes Fahrzeuglängsregelungssystem mit dem Ziel der Unterstützung des Fahrers bei der längsdynamischen Fahrzeugführung durch Entlastung von als ermüdend empfundenen Gas- und Bremspedalbetätigungen (v. a. bei häufig wechselnden Verkehrsverhältnissen). ACC, das eine Erweiterung der konventionellen Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat, Cruise Control (CC)) darstellt, ist neben der konstanten Einregelung auf eine zuvor eingestellte Wunschgeschwindigkeit ferner in der Lage, den zuvor eingestellten (longitudinalen) Wunschabstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen einzuhalten. Hierzu wird, wenn keine "Freie Fahrt" möglich ist, der Abstand und die Geschwindigkeit stets dynamisch durch das ACC-System an die des vorausfahrenden Zielfahrzeugs angepasst bis die Relativgeschwindigkeit beider Fahrzeuge annähernd Null ist und der vom Fahrer eingestellte, geschwindigkeitsproportionale Abstand, die sog. *Zeitlücke*<sup>33</sup>, möglichst konstant gehalten wird.

Neben der "Freien Fahrt" spielt die Zielauswahl für die Regelung des ACC eine wichtige Rolle. Sie ist Hauptnutzer der Krümmung beim ACC und ist besonders leicht durch Offset zu stören. Tritt nun infolge der Störung ein Zielverlust während einer Folgeregelungssitua-

---

<sup>30</sup>Van Zanten/Kost (2009): Bremsenbasierte Assistenzfunktionen S. 377.

<sup>31</sup>Van Zanten/Kost (2009): Bremsenbasierte Assistenzfunktionen S. 377ff.

<sup>32</sup>Betrachtungsgrößen sind Größen, auf die das Hauptaugenmerk gelegt wird. Hierbei kann es sich um Messsignale oder abgeleitete Größen handeln.

<sup>33</sup>Die Zeitlücke ist definiert als die Zeit, die die vordere Begrenzung des mit ACC ausgestatteten Fahrzeugs benötigt, um die aktuelle Position der hinteren Begrenzung des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erreichen.

tion<sup>34</sup> beispielsweise in der Kurve auf, so ist die sofortige Beschleunigung des Fahrzeugs die Konsequenz. Somit ist eine zuverlässige und korrekte Krümmungsprädiktion für die Systemperformance von ACC-Systemen erforderlich.

Für die Bestimmung der Krümmung  $\kappa$ <sup>35</sup> gibt es unterschiedlichste Modelle (siehe WINNER (2001)), jedoch hat sich aufgrund der Robustheit folgende Berechnungsvorschrift durchgesetzt:<sup>36</sup>

$$\kappa = \frac{\dot{\psi}}{v_{Fzg}} \quad (1.2)$$

Aus Gleichung (1.2) ist die Abhängigkeit der Krümmungsbestimmung von der Geschwindigkeitsschätzung  $v_{Fzg}$  und von der Messgröße Gierrate  $\dot{\psi}$  ersichtlich. Dies bedeutet, dass sich die im Gierratensensor sowie bei der Schätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit entstehenden Fehler (Driftverhalten über der Zeit, dynamischer Reifenhalbmesser) direkt auf die Krümmungsbestimmung auswirken. Jedoch ist der Geschwindigkeitsfehler für ACC irrelevant, da dieser nur faktoriell wirksam ist und ein Wert von 5% wirkt sich nicht auf die Krümmungsbestimmung aus, da die Trajektorie nicht genauer der konstanten Krümmung folgt. Somit folgt, dass durch Korrektur des Langzeit-Fehlerverhaltens des Gierratensensors durch Offsetabgleich auch die Krümmungsbestimmung voraussichtlich durch GNSS positiv beeinflussbar ist. Diese Erwartung wird von LUH (2007) formuliert.<sup>37</sup> Dies bedeutet, dass bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s und einer fehlerhaften Krümmung von  $\kappa_{err} \leq 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/m}$  ein Zielwert für den Fehler der Gierrate ( $\dot{\psi}_{err}$ ) gemäß Gleichung 1.2 von  $\dot{\psi}_{err} \leq 3 \text{ mrad/s}$  erwartet wird.

Während ACC sich auf die Fahrerunterstützung bei Längsführung konzentriert, wird neben dem Fahrstreifenverlassenswarner (Lane Departure Warning, kurz LDW), der bereits in Serie und als Sonderausstattungen im Pkw-Bereich erhältlich ist (z.B. bei Lexus, Citroën)<sup>38</sup>, mit der Entwicklung von Spurhaltesystemen wie Lane Keeping Assist (LKA) und Spurführungssystemen eine Fahrerunterstützung bei Querführung angeboten. Hierzu wird mit Hilfe einer Videokamera der vorausliegende Straßenabschnitt erfasst, um mittels Bildverarbeitung die Fahrstreifenmarkierung zu extrahieren und die relative Lage des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens zu berechnen. Droht das Fahrzeug den Fahrstreifen zu verlassen, was mit Hilfe einer Prädizierung der Solltrajektorie ermittelt wird, erhält der Fahrer entweder eine auditive oder haptische Warnung (bei LDW) oder es wird ein aktiver Eingriff (korrigierende Lenkmomente)<sup>39</sup> (bei LKA) durchgeführt. Jedoch sind die Detektionsgrenzen der Fahrstreifenmarkierungen mittels Videokamera schnell erreicht. So führen beispielsweise schneebedeckte Fahrbahnen, nicht einheitliche Markierungen (z. B. Baustellenbereich), schlechte Lichtverhältnisse (Sonneneinstrahlung) oder ausgebleichte Fahrstreifenmarkierungen zu einzelnen Fehldiagnosen oder zu einem Ausfall des Systems. Hier ist durch Nutzung der GNSS-Positionsdaten sowie der Ko-

<sup>34</sup>Bei einer Folgefahrt wird einem vorausfahrenden Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen bei annähernd gleicher Geschwindigkeit und relativ konstantem Abstand gefolgt. Filzek (2003): Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich S. 1

<sup>35</sup> $\kappa = 1/r$  wird wegen der Polstelle von  $r$  bei Geradeausfahrt verwendet.

<sup>36</sup>Winner (2001): Adaptive Cruise Control S. 31.6.

<sup>37</sup>Luh (2007): Untersuchung des Einflusses des horizontalen Sichtbereichs eines ACC-Sensors auf die Systemperformance S. 133.

<sup>38</sup>Jungmann: Paris 2004: Citroën präsentiert den neuen C4.

<sup>39</sup>Frank/Reichart (2000): Grenzen der Verkehrssicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz.

ordinaten des Fahrbahnverlaufes der laterale Versatz zwischen Fahrzeuglängsachse und Fahrstreifenmitte<sup>40</sup>, d. h. der relative Querversatz, prinzipiell bestimmbar. Somit kann als weitere relevante Betrachtungsgröße die Position abgeleitet werden.

Diese ist auch für den sich in der Forschung befindlichen Kreuzungs- und Abbiegeassistenten von großer Bedeutung, denn bei diesem System ist die genaue longitudinale Entfernung des eigenen Fahrzeugs von der Kreuzung entscheidend (Prädiktion des Abstandes des Fahrzeugs von der anvisierten Kreuzung). So ist z. B. mit Kenntnis der genauen Position der Fahrzeuge an den Kreuzungen und den lokal gültigen Verkehrsregeln durch Einsatz eines Kreuzungsassistenten eine Reduktion der Unfallzahlen im Kreuzungsbereich zu erwarten.<sup>41</sup> In bisherigen Forschungsarbeiten wird die Position fahrzeugautark über Integration der Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt, wodurch sich die bei der Fahrzeuggeschwindigkeit genannten Fehler aufintegrieren und es zu einem Anwachsen des Fehlers kommt.

Aus den gemachten Ausführungen ergeben sich folgende Betrachtungsgrößen, die durch eine Stützung infolge GNSS-Daten positiv beeinflussbar sein können:

- Gierrate  $\dot{\psi}$  bzw. Gierwinkel  $\psi$
- Geschwindigkeit  $v_{Fzg}$
- Kurskrümmung  $\kappa$
- Position  $x, y$

Da einige der ausgewählten und vorgestellten Fahrerassistenzsysteme die gleichen Betrachtungsgrößen für eine Aktion zugrunde legen, ist eine weitere Zusammenfassung (Gruppierung) der ausgewählten Assistenzsysteme möglich. So hat sich gezeigt, dass v. a. eine Offsetfehlerreduzierung bei dem Gierratensignal anzustreben ist. Derzeit sind die Möglichkeiten hierfür auf einen Stillstandsabgleich des Gierratensensors oder Langzeitstatistiken beschränkt.<sup>42</sup> Da der Stillstandsabgleich während einer normalen Fahrt nicht in der erwünschten Häufigkeit möglich ist, nehmen Langzeit-Drifteffekte über der Fahrzeit zu. Auch ein Abgleich über Langzeitstatistiken beinhaltet Unsicherheiten, die die Langzeit-Drifteffekte nicht verhindern können. Dieser Effekt könnte durch die Verwendung von GNSS-Daten (Kurswinkel, Geschwindigkeit) reduziert werden, um so beispielsweise die Bestimmung der Kurskrümmung (meist der Quotient aus Gierrate und Tangentialgeschwindigkeit) zu verbessern. Daher wird diese Gruppe "Sensorabgleich" genannt und die zu dieser Gruppe zählende Assistenzsysteme sind in Tabelle 1.1 aufgelistet. Die zweite Gruppe, "Genaue Positionierung", umfasst alle ausgewählten Systeme (siehe Tabelle 1.1), die eine genaue Positionierung erfordern. Da meist die Ermittlung der Position mit Hilfe der Koppelortung und somit aus der Integration von Fahrzeuggeschwindigkeit erfolgt, ist neben einer Stützung der Position bereits eine Stützung der Fahrzeuggeschwindigkeit, die

---

<sup>40</sup>Vorausgesetzt, diese ist aus einem Speicher heraus bekannt.

<sup>41</sup>Mages/Hopstock/Winner (2007): Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenten - Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen.

<sup>42</sup>Winner/Danner/Steinle (2009): Adaptive Cruise Control S. 497f.

aus den Raddrehzahlen der nicht angetriebenen Achse und dem dynamischen Reifenhalmesser  $r_{dyn}$  bestimmt wird, erstrebenswert. Daher werden auch solche Systeme, bei denen es meist um die Geschwindigkeitsermittlung geht, in dieser Gruppe mit eingeschlossen.

## 1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Der bekannteste Einsatzbereich für GNSS ist die Navigation. Dass auf diesem Bereich in den letzten Jahren eine starke Entwicklungstätigkeit stattgefunden hat, zeigen die Ausführungen in Kapitel 1.1. Daher sind Navigationssysteme einschließlich der integrierten GNSS-Empfänger nicht nur zu einem Hilfsmittel für viele Verkehrsteilnehmer geworden, um entspannter und sicher an das Ziel zu gelangen, sondern von Seiten der Nutzer werden auch immer größere Ansprüche in Bezug auf die Funktionalität und den Bedienkomfort gestellt, was sich ebenfalls bei anderen FAS niederschlägt. Aufgrund des Nachteils der nicht permanenten Verfügbarkeit der GNSS-Signale (z. B. Alleestraßen, Tunnel, Stadt- und Wohngebiet) werden Inertialsensoren des Fahrzeugs verwendet, um Aussetzer zu überbrücken und die Zielführung weiter zu gewährleisten. Hierzu wird durch Integration der Fahrzeugeschwindigkeit die zurückgelegte Strecke ermittelt. Zusammen mit dieser und der Gierwinkeländerung wird mittels der sog. Koppelnavigation<sup>43</sup> die neue Position bestimmt. Diesem Nachteil steht der Vorteil der Driftfreiheit<sup>44</sup> der GNSS-Signale gegenüber.

Im Gegensatz zu GNSS-Daten liefern Fahrdynamiksensoren Bewegungsgrößen, deren Offsets zu einem "Weglaufen" von beispielsweise Positionsdaten oder des Gierwinkels mit zunehmender Fahrzeit führen. Diese Bewegungsgrößen stehen allerdings durchgängig, auch für verschiedene Fahrerassistenzsysteme zur Verfügung. Aufgrund dieser komplementären Eigenschaften ist es vorstellbar, die Vorteile der GNSS-Daten für fahrzeugautarke Bewegungsgrößen zu nutzen, die für Fahrerassistenzsysteme zur Verfügung stehen und verwendet werden.

Bisher werden die durch das Navigationssystem im Fahrzeug vorhandenen Systeme nicht zur Unterstützung von FAS eingesetzt, sondern vielmehr wird der umgekehrte Weg beschritten, nämlich, dass GNSS-Daten, die die Datenbasis zur Navigation darstellen, deren Ungenauigkeiten, Fehler bzw. Aussetzer durch Inertialsensoren kompensiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es, diesem Umstand Rechnung zu tragen und zu untersuchen, inwiefern GNSS-Daten zur Stützung von Inertialsensoren im Fahrzeugbereich für Fahrerassistenzsysteme verwendbar sind. Hierzu werden neben der Festlegung der in dieser Arbeit zu untersuchenden Betrachtungsgrößen zunächst Versuche definiert bzw. reale Daten verwendet, die Aussagen über das Verhalten der GNSS-Daten in für den Fahrzeugbereich typischen Einsatzbereichen (Dynamikbereich) ermöglichen. Da durch die bisherige Vorgehensweise bzw. den bisherigen Kenntnisstand ein Teil der technischen

---

<sup>43</sup>Koppelnavigation liegt vor, wenn ausgehend von einer bekannten Ausgangsposition und bekanntem Ausgangswinkel durch Weg- und Winkelmessung und Addition der Wegvektoren die neue Position bestimmt wird.

<sup>44</sup>Als Driftfreiheit wird das Nichtvorhandensein eines Drifteffektes verstanden. Beispielsweise liegt ein Drifteffekt vor, wenn bei Stillstandsmessung die Messwerte mit zunehmender Zeit immer stärkere Abweichungen von dem Wert 0 zeigen.

Entwicklungen/Möglichkeiten für Fahrerassistenzsysteme durch GNSS ungenutzt bleibt, ist die Intention der vorliegenden Arbeit, diese Lücke zu schließen.

Wegen den in Kapitel 1.2.2 genannten Schwierigkeiten bei der Bestimmung der vorgestellten Betrachtungsgrößen mittels On-Bord-Sensorik liegt ein Fokus der Arbeit auf der Fehleranalyse der von den GNSS-Empfängern zur Verfügung gestellten Daten hinsichtlich deren Verwendbarkeit zur Fusion mit Fahrdynamikensensordaten im Automotivebereich. Ein zweiter Fokus liegt auf der Entwicklung eines geeigneten Datenfusionsansatzes für GNSS-Daten und den entsprechenden Fahrdynamikensensordaten. Ziel ist es dabei, eine einheitliche Struktur für die sich in der Empfängertechnologie unterscheidenden GNSS-Empfänger für Automotiveanwendungen zu entwickeln, bei der lediglich eine Parameteranpassung für das jeweils verwendete GNSS-Gerät erforderlich ist. Durch die Datenfusion wird eine Fehlerreduzierung der Betrachtungsgrößen erwartet. Die hierdurch entstehenden, verbesserten Betrachtungsgrößen könnten eine Performanceverbesserung der entsprechenden Fahrerassistenzsysteme erzielen. Denn für zukünftige FAS wie z. B. Fahrstreifenwechselassistenten ist die Genauigkeit herkömmlicher Navigationsverfahren, so wie sie in kommerziellen Routenplanungssystemen für Straßenfahrzeuge bereits eingesetzt werden, noch nicht ausreichend. Dies gilt nicht nur für die Fahrzeugortung, sondern auch für die geplante Route. Beide sind für die kombinierte Längs- und Querregelung des Fahrzeugs bisher zu ungenau.

Wegen des Ziels der Datenfusion von GNSS- und Fahrdynamikensensorsignalen wird in Kapitel 2 zunächst auf die beiden verschiedenen Systeme GNSS und Trägheitsnavigation, auf die auftretenden Fehler und deren Charakteristik näher eingegangen. Ferner wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung bzgl. Fehlermodellentwicklung für die Einzelsysteme sowie für die bei der Integrierten Navigation verwendeten Algorithmen dargestellt (siehe Kapitel 2.3). Die zentralen Erkenntnisse des Stands der Technik werden in Kapitel 2.4 zusammengefasst und es erfolgt die Konkretisierung der Aufgabenstellung, ehe auf die Versuchsmethodik (Kapitel 3.1) und auf die verwendete Messtechnik (Kapitel 3.2) eingegangen wird.

In Kapitel 4 werden zunächst die für die Signalanalyse erforderlichen Bewertungskriterien vorgestellt. Daran schließt sich die Analyse an, die sich in einen statischen und einen dynamischen Teil aufteilt. Hier findet neben einer Betrachtung des Witterungs- und Tageszeiteneinflusses auch eine Verfügbarkeitsanalyse statt. Aufbauend auf den abgeleiteten Erkenntnissen werden in Kapitel 5 zunächst mögliche Fusionsstrategien vorgestellt, aus denen eine Strategie für die selektierten Betrachtungsgrößen ausgewählt wird (Kapitel 5.1). Im zweiten Teil dieses Kapitels (Kapitel 5.2) werden die Anforderungen an die zu entwickelnden Fusionsansätze abgeleitet. Kapitel 5.3 betrachtet schließlich die Fusionsansätze sowie deren jeweilige Implementierung. Die durch den gewählten Fusionsansatz erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt und anschließend in Kapitel 7 diskutiert. Dabei werden neben den Aspekten der Übertragbarkeit und möglichen Performanceverbesserungen für ausgewählte Fahrerassistenzsysteme infolge GNSS-Datenfusion auch Empfehlungen ausgesprochen, die für die Umsetzung des Fusionsansatzes zu berücksichtigen sind. Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bildet eine Zusammenfassung (Kapitel 8).

---

## 2 Stand der Technik und Forschung

Die für diese Arbeit erforderlichen Grundlagen sowohl für die Satellitennavigation als auch für die Trägheitsnavigation werden in diesem Kapitel vorgestellt. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei auf den Fehlereinflüssen bzw. auf der Fehlercharakteristik für die in der Arbeit relevanten Systeme/Sensoren.

### 2.1 Globale Navigationsatellitensysteme

Der Aufbau und die Funktionsweise der verschiedenen GNSS sind grundsätzlich gleich. Daher wird für die Erklärungen des globalen Satellitennavigationssystems das amerikanische GPS herangezogen. Bei diesem System handelt es sich um das einzige zur Zeit im zivilen Bereich weltweit verwendete System.

Das GPS-System, offiziell als NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging)-GPS bezeichnet, ist ein weltweit verfügbares satellitenbasiertes Navigationssystem. Es besteht nominell aus 24 aktiven Satelliten (hinzu kommen drei Ersatzsatelliten)<sup>1</sup>, die auf festen Erdumlaufbahnen installiert sind. Die Satelliten bewegen sich in 20.200 km Höhe auf sechs verschiedenen, nahezu kreisförmigen Bahnen, wovon jede vier Satelliten enthält. Grundsätzlich ist an jeder Nutzerposition eine Verfügbarkeit von mehr als vier Satelliten mit zwei Frequenzen gegeben, jedoch wird seitens des Systembetreibers nur die Verfügbarkeit von vier Satelliten garantiert.<sup>2,3</sup>

Jeder Satellit sendet Funksignale in Form von elektromagnetischen Wellen aus, deren Frequenzen ( $L_1$ -Band: 1575,42 MHz,  $L_2$ -Band: 1227,60 MHz) durch Multiplikation der Grundfrequenz 10,23 MHz abgeleitet sind. Auf diese beiden Trägerwellen werden jeweils Codes aufmoduliert.<sup>4</sup> Beide Trägerfrequenzen werden von jedem Satellit ausgesandt, wobei mit der  $L_1$ -Frequenz der C/A-Code (Coarse/Acquisition) für die zivile Nutzung und der verschlüsselte<sup>5</sup> P/Y-Code<sup>6</sup> (Precision/encrypted) für die militärische Nutzung übertragen wird. Auf der  $L_2$ -Frequenz wird nur der P/Y-Code gesendet. Durch die doppelte Übertragung des P/Y-Codes können ionosphärische Störungen herausgerechnet werden, die zur Erhöhung der Laufzeit führen. Dadurch ergibt sich eine erhöhte Genauigkeit bei

---

<sup>1</sup>Zur Zeit sind 31 Satelliten (Stand: 03.09.2008) aktiv. Die genaue Anzahl aktiver Satelliten ist variabel und ist vom jeweiligen Systemzustand abhängig.

<sup>2</sup>Hofmann-Wellenhof/Lichtenegger/Collins (2007): Global Positioning System. Theory and Practice S. 12ff.

<sup>3</sup>Stenbid (2001): Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard.

<sup>4</sup>Seeber (2003): Satellite Geodesy S. 218ff.

<sup>5</sup>Die Vergabe des kryptografischen Schlüssels wird vom U.S. Verteidigungsministerium verwaltet und schließt in der Regel nichtmilitärische Nutzer aus.

<sup>6</sup>Wird der P-Code verschlüsselt, so wird der Code Y-Code genannt. Dieser Vorgang wird auch Anti-Spoofing (A/S) genannt.

Verwendung des militärischen Signals gegenüber dem zivilen. Auf beide Trägerwellen  $L_1$  und  $L_2$  wird zudem die so genannte Navigationsnachricht aufmoduliert. Diese enthält alle wichtigen Informationen des Satelliten (Datum, ID, Korrekturen und Bahnparameter). Wird nur der C/A-Code verwendet, liegt der Standarddienst von GPS (SPS - Standard Positioning Service) vor. Die zweite Standard-Dienstart, der PPS-Service (Precise Positioning Service) liegt vor, wenn die zweite Trägerwelle ( $L_2$ ) zusätzlich zum  $L_1$ -Träger genutzt und somit der P-Code verwendet wird. Zivile "high-end-Geräte" verwenden neben dem C/A-Code der  $L_1$ -Frequenz auch die Phasen und die ionosphärenfreie Linearkombination der beiden Trägerfrequenzen, um durch Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

In Automobilen werden jedoch meist GNSS-Geräte aus dem preiswerteren Segment ("low-end-Geräte") verwendet, die nur den C/A-Code ( $L_1$ -Frequenz) für die Ermittlung der GNSS-Daten verwenden.

Die durch die GNSS-Geräte zur Verfügung gestellte Position wird bei GPS durch Anwendung der Trilateration bestimmt, d.h. durch Entfernungsmessungen, die sich durch Bestimmung der Signallaufzeit ergeben. Unter der vereinfachten Annahme der Ausbreitung der Signale mit Lichtgeschwindigkeit ergibt sich die Pseudoentfernung  $d$  zu dem Satelliten  $i$ , ausgedrückt als Positionsdifferenz zwischen der Satellitenposition  $P_{S_i}$  und der Position des Empfängers  $P_E$ , wie folgt:

$$d_i = \sqrt{(P_{S_i,x} - P_{E,x})^2 + (P_{S_i,y} - P_{E,y})^2 + (P_{S_i,z} - P_{E,z})^2} + c \cdot \Delta t_l + e, \quad (2.1)$$

wobei  $d_i$  = Pseudoentfernung zum Satellit  $S_i$ ,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit,  $e$  = zusätzlicher Fehler im System,  $\Delta t_l$  = Empfängeruhrfehler und  $i = 1, 2, 3, \dots$  ist.

Hierbei ergeben sich zwei dominierende Fehlerquellen. Zum einen unterliegt das GPS-Signal aufgrund der Erdatmosphäre einer Laufzeitverzögerung (Signalgeschwindigkeit  $\neq$  Vakuumlichtgeschwindigkeit). Zum anderen wird die Signallaufzeit durch eine nicht genau gehende Uhr im GPS-Empfänger verfälscht.<sup>7</sup> Aus Gleichung 2.1 ist zu erkennen, dass der Empfängeruhrfehler neben den drei Raumkoordinaten(richtungen) die vierte Unbekannte im Gleichungssystem darstellt. Für die Lösung dieses algebraischen Systems mit vier Unbekannten werden mindestens vier Gleichungen benötigt, die sich aus den Entfernungsmessungen zu mindestens vier Satelliten ergeben. Die simultane Schätzung des Uhrfehlers minimiert den uhrfehlerbedingten Positionsfehler.

Neben der Bestimmung der Position der Antenne des GNSS-Empfängers durch dreidimensionale Trilateration ist über die Frequenzverschiebungen der Satellitensignale durch die Bewegung des Fahrzeugs (relativ zu den Satelliten) die Bestimmung der Geschwindigkeit mit Hilfe des Dopplereffektes möglich. Diese kann dann mit einer höheren Genauigkeit als die aus den Positionsdaten ermittelte Geschwindigkeit erfolgen.<sup>8</sup> Die wesentlichen Eigenschaften (Vor- und Nachteile) von GPS (bzw. GNSS) sind in Tabelle 2.1 zusammenfassend dargestellt. Für weitere Details wird auf KIPKA (2006)<sup>9</sup> verwiesen.

---

<sup>7</sup>Bei einer Abweichung von  $1 \mu\text{s}$  wird die Position um 300 m verfälscht.

<sup>8</sup>Ryu (2004): State and Parameter Estimation for Vehicle Dynamics Control Using GPS S. 4ff.

<sup>9</sup>Kipka (2006): Grossräumige GPS / INS Vermessung mittels virtueller Referenzstationen.



**Tabelle 2.1:** Eigenschaften GPS. Quelle: KIPKA (2006, S. 54).

Vorteile GPS	Nachteile GPS
Hohe Langzeitstabilität	Geringere Datenrate
Homogene Genauigkeit	Nicht in sich geschlossenes System
Vernachlässigbare Initialisierungszeiten	Lageinformationen (Orientierung) nur in einem Antennen-Array realisierbar
Inzwischen gute Kurzzeitstabilität	Empfindlich für Jamming, Signalabschattung sowie Multipath
	Bei dynamischer Bewegung bedingt einsatzfähig

Mit der dargestellten Positionierungsmethode SPS, auf dem das Beobachtungsverfahren Standalone-Navigation/Verfahren<sup>10,11</sup> basiert und das von den “low-end“-Geräten verwendet wird, können repräsentative Genauigkeiten von bis zu 10 m erreicht werden. Somit sind die von den GPS-Empfängern zur Verfügung gestellten Positionen mit einer Reihe von Fehlern behaftet. Diese werden grundsätzlich in Common-Mode-Fehler und Noncommon-Mode-Fehler eingeteilt und im Folgenden näher vorgestellt.

### 2.1.1 Common-Mode-Fehler

Common-Mode-Fehler treten innerhalb einer bestimmten Region bei jedem dort eingesetzten Empfänger auf. Diese räumliche Korrelation nimmt mit zunehmender Entfernung zwischen zwei Empfängern ab, daher werden diese Fehler oft auch als entfernungsabhängige Fehler bezeichnet.<sup>12</sup> Zu den Common-Mode-Fehler zählen:

- Atmosphärenfehler
- Satellitenbahnfehler
- Satellitenuhrfehler
- Satellitenkonstellation

Die *Atmosphärenfehler* setzen sich aus einem ionosphärischen und einem troposphärischen Anteil zusammen.

Die Ionosphäre, die sich in Höhen zwischen 50 km und 1000 km erstreckt, beeinflusst die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, da sie für die Mikrowellen ein dispersives Medium darstellt, wodurch eine Frequenzabhängigkeit gegeben ist. Durch die Wechselwirkungen zwischen den durch Sonneneinstrahlung ionisierten Elektronen und dem GPS-Signal wird die GPS-Signalausbreitung behindert, was bei GPS-Code-Signalen (Pseudorange-Messungen) zu einer Verzögerung, bei Trägerphasenwellen (Phasenmessung) zu einer Beschleunigung führt.<sup>13</sup> Der resultierende Laufzeiteffekt ist nicht konstant. Das Ausmaß wird von mehreren Parametern beeinflusst. Zum einen ist dies die Anzahl freier Elektronen

<sup>10</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 3.1.

<sup>11</sup>Stempfhuber (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen S. 37ff.

<sup>12</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 40.

<sup>13</sup>Dies kann nach BAUER (2003) bis zu 50 m in der GPS-Messung führen.

in der Ionosphäre, die selbst wiederum maßgeblich von den Faktoren Sonnenaktivität<sup>14</sup>, geographische Breite der Empfangsantennen und von der Tageszeit und jahreszeitlichen Periode<sup>15</sup> beeinflusst werden.

Zum anderen ist die Elevation der Satelliten ein weiterer Parameter. Durch einen geringeren Erhebungswinkel ist der von den Satellitensignalen zurückgelegte Weg durch die Ionosphäre länger und somit ergeben sich größere ionosphärische Laufzeitverzögerungen. Der hierdurch entstehende Fehler kann bei tiefen Erhebungswinkel bis zu 100 m betragen.<sup>16</sup> Eine Minderung dieses Fehlereinflusses ist mit folgenden beiden Methoden möglich:

1. Modelle:

Für die Korrektur der Laufzeitverzögerungen werden physikalische Korrekturmodelle verwendet. Als Modelle können solche verwendet werden, deren Koeffizienten mit der Satellitennachricht übermittelt werden (beispielsweise Klobuchar-Modell) oder aber es kommen Ionosphärenmodelle zum Einsatz, die für jeden Tag vom internationalen GNSS-Service für Geodynamik (IGS) zur Verfügung gestellt werden. Die aus dem Modell errechnete Korrektur wird additiv zur Laufzeit hinzugefügt. Jedoch ist eine Korrektur nur begrenzt möglich. Daher bietet diese Methode keine vollständige Korrektur ionosphärischer Fehler.

Üblicherweise werden diese Modelle meistens nur für  $L_1$ -Empfänger eingesetzt.<sup>17,18</sup>

2. Zwei-Frequenz-Empfänger:

Durch die Verwendung von GPS-Empfängern, die in der Lage sind, die beiden Trägerfrequenzen  $L_1$  und  $L_2$  zu empfangen und zu verarbeiten, ist ein Vergleich der Ankunftszeiten (Phasen- und auch Codeverschiebung) beider Signale möglich. Da das Maß der Streuung vom Quadrat der Signalfrequenz abhängt, ist eine exakte Bestimmung der Verzögerung möglich. Somit ist eine vollständige Eliminierung des Ionosphäreinflusses auf die Signallaufzeit gegeben.<sup>19</sup> Für nichtautorisierte Nutzer des SPS besteht diese Möglichkeit nicht, da der unverschlüsselte C/A-Code auf der  $L_2$ -Frequenz nicht gesendet wird.

Im Gegensatz zu den Ionosphärenfehlern werden unter Troposphärenfehler die für eine elektromagnetische Welle nicht dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung der Signale in der unteren Atmosphärenschicht (Troposphäre und Stratosphäre, Höhenbereich 0 km – 10 km) verstanden. Diese frequenzunabhängige Laufzeitverzögerung, die durch Streuung des Satellitensignals an in der Luft enthaltenen Wasseratomen entsteht, beträgt im Mittel 2,3 m und wird in einen trockenen und in einen feuchten Anteil untergliedert. Der trockene Anteil bestimmt rund 90 % des Gesamteffekts und ist vorwiegend vom Luftdruck (unterschiedliche Dichte der Troposphäre) abhängig. Da dessen Modellierung

---

<sup>14</sup>Sonnenaktivität (Anzahl der Sonnenflecken): Der Einfluss nimmt mit der Anzahl der Sonnenflecken zu. Zur Zeit herrscht die Phase der abnehmenden Anzahl der Sonnenflecken, weshalb der störende Einfluss der Ionosphäre auf die Satellitenpositionierung nicht mehr so stark ist. Die Sonnenaktivität unterliegt einem variablen, im Durchschnitt elfjährigen Zyklus (letztes Maximum: 2001/2002).

<sup>15</sup>Tagsüber kommt es zu einer Vergrößerung des ionosphärischen Effektes aufgrund der Sonneneinstrahlung. Nachts ist der Einfluss gering. Ferner ist die Sonnenaktivität im Winter geringer als im Sommer, wodurch es ebenfalls zu saisonalen Schwankungen kommen kann.

<sup>16</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.4.

<sup>17</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 175.

<sup>18</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.4.

<sup>19</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.4.

recht einfach durch Druckmessungen am Boden möglich ist, spielt dieser Anteil für das Fehlerbudget eine untergeordnete Rolle. Der feuchte Anteil, der vom Wasserdampfgehalt abhängt und wegen der schnellen zeitlichen und örtlichen Variation schwer erfassbar ist, kann zu einem Positionsfehler von bis zu 0,7 m führen.<sup>20</sup>

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Erhebungswinkel des Satelliten. Mit kleiner werdendem Erhebungswinkel ergibt sich ein längerer Weg durch die Troposphäre und somit ein größerer Fehler. Der Fehler kann bei einer Elevation von  $10^\circ$  über 10 m betragen.<sup>21</sup>

Eine Reduzierung des Troposphärenfehlers ist aufgrund der Frequenzunabhängigkeit mit Hilfe eines Zwei-Frequenz-Empfängers nicht möglich.

Da in der Navigation jedoch häufig Ein-Frequenz-Empfänger eingesetzt werden, kann die Zwei-Frequenz-Methode für den Ionosphäreinfluss meist auch nicht angewendet werden. Um dennoch eine begrenzte Korrektur der Atmosphärenfehler vorzunehmen, werden Fehlermodelle sowohl für die ionosphärische als auch für die troposphärische Verzögerung eingesetzt.<sup>22</sup>

Der *Satellitenbahndaten-(Ephemeriden-)fehler*<sup>23</sup> stellt bei der Positionsbestimmung einen weiteren Fehlereinflussfaktor dar. Dieser Fehler kann natürlichen Ursprungs oder auch künstlichen Ursprungs sein. Zu den natürlichen Faktoren zählen lokale Schwankungen im Gravitationsfeld der Erde, die Gezeitenkräfte und der Sonnenwind, welche eine geringfügige Änderung der Umlaufbahn der Satelliten hervorrufen. Bleibende Fehler der Umlaufbahn können von den Bodenstationen, die die Satellitenbahnen ständig vermessen, korrigiert werden<sup>24</sup>. Die Differenz zwischen angenommener und realer Satellitenbahn wird als *Ephemeridenfehler* bezeichnet. Somit resultiert aus kurzfristigen Schwankungen und damit fehlerhafter Angabe der aktuellen Satellitenposition eine fehlerhafte Positionsbestimmung im Empfänger. Die sog. *Selective Availability (SA)*, ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium angebrachte künstliche Verfälschung besteht aus zwei Effekten. Der erste Effekt ist die gezielte Veränderung der Ephemeridendaten, was für den Standardbenutzer ein Vortäuschen einer falschen Position bedeutet. Das Aufbringen von Oszillationen bei der Satellitenzeitreferenz stellt den zweiten Effekt dar. Das SA-Verfahren kann durch DGPS<sup>25</sup> vollständig umgangen werden und wurde am 01. Mai 2000 deaktiviert, was zu einer Genauigkeitsverbesserung um den Faktor 10 führte.

Neben den Satellitenbahnen verursachen die beiden Atomuhren an Bord jedes Satelliten den sog. *Satellitenuhrfehler*, der die Abweichung der Satellitenzeit von der GPS-Systemzeit

<sup>20</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.5.

<sup>21</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 175–176.

<sup>22</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 175.

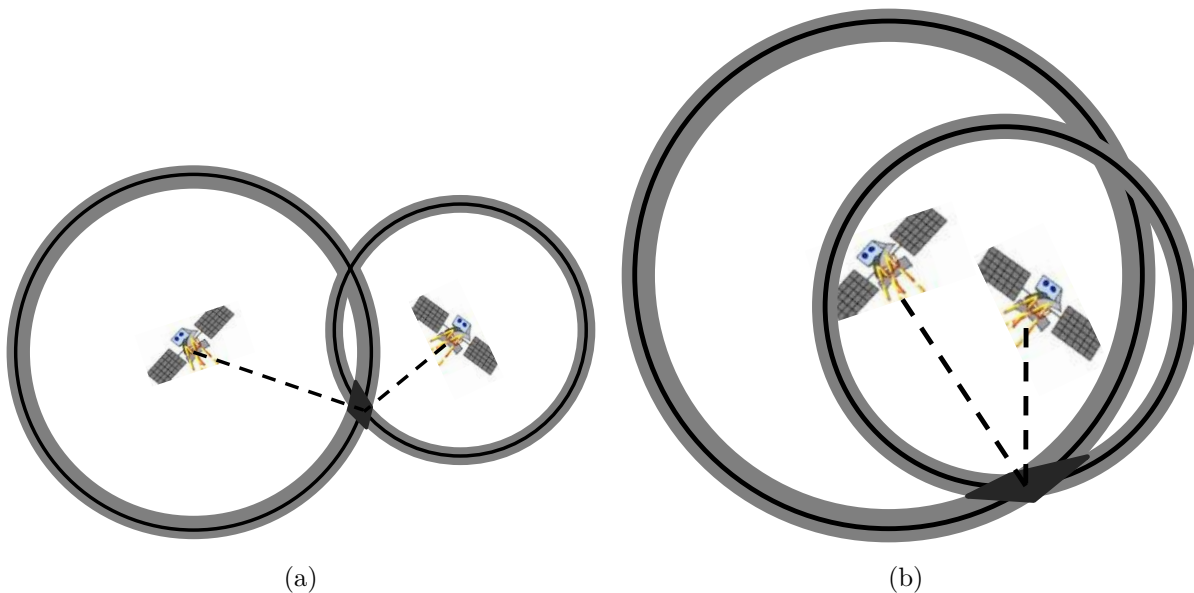
<sup>23</sup>Die Ephemeriden kennzeichnen die Satellitenbahndaten, d. h. sie ermöglichen die Berechnung der Koordinaten der Satellitenposition in Abhängigkeit von der Zeit.

<sup>24</sup>Für Nicht-Echtzeitanwendungen besteht die Möglichkeit präzise Bahndaten vom IGS (International GNSS Service) nach etwa zehn Tagen kostenlos im Internet herunterzuladen. Für Echtzeitanwendungen werden vom IGS prädierte Bahnen zur Verfügung gestellt, die zwar ungenauer als die exakt errechneten sind, jedoch um ca. Faktor 6 genauer als die Broadcast-Bahnen und haben eine Genauigkeit von 3 cm – 5 cm.

<sup>25</sup>Differential-GPS ist ein Differential-Messverfahren, mit dem aus den Differenzen der empfangenen Signale durch geeignete Algorithmen Messfehler bei systembedingten Fehlerursachen eliminiert und bei ausbreitungsbedingten Fehlern sowie bei Fehlern der Bahndaten reduziert werden.

beschreibt. Durch Gangungenauigkeiten in den Uhren des Satelliten werden die Berechnungen der Signallaufzeit verfälscht.<sup>26</sup> Aufgrund der hohen Signalgeschwindigkeit wirken sich minimale Zeitungenauigkeiten sehr stark auf die Entfernungsmessung aus. Die Größenordnung dieser Fehlerart beträgt üblicherweise etwa 1 m, entsprechend einer Zeitungenauigkeit von ca.  $1/300 \mu\text{s}$ . Die Zeitstabilität der eingesetzten Atomuhren beträgt mindestens  $10^{-13}$ . Somit ergibt sich für die Drift ein Wert von  $10^{-8} \text{ s/Tag}$ . Eine Korrektur ist durch Vergleichsmessungen auf den Bodenstationen möglich.<sup>27</sup> Da die Korrekturparameter in den Ephemeriden berücksichtigt werden, sind sie für Stand-Alone-Nutzer nicht weiter zu betrachten.

Zusätzlich zu den fehlerbehafteten Messungen und Berechnungen ist ferner die *Satellitenkonstellation* relativ zum Beobachter für die Güte der Positionsbestimmung ausschlaggebend. Dieser geometrische Einflussfaktor lässt sich anhand Abbildung 2.1 erklären. Aus Veranschaulichungsgründen wird eine zweidimensionale Betrachtung mit zwei Satelliten vorgenommen.



**Abbildung 2.1:** (a) Günstige Satellitenkonstellation, (b) ungünstige Satellitenkonstellation.

Der in Abbildung 2.1 dargestellte höher gelegene Schnittpunkt entspricht der erdfernen Lösung und wird nicht weiter betrachtet. Die schwarzen Kreislinien in den Abbildungen entsprechen den durch die Laufzeitmessungen berechneten Entfernungen zu den Satelliten, die hellgrauen Kreisringe stellen die Fehlerabschätzungen der berechneten Entfernungen dar. Die vom Empfänger bestimmte Position liegt innerhalb der dunklen Fläche, die der Schnittfläche der Kreisringe entspricht. Die Größe dieser Fläche entspricht dem zu erwartenden Fehler der Positionsbestimmung. In Abbildung 2.1a ist der Winkel zwischen den beiden Satelliten und dem Beobachter groß, die Schnittfläche ist klein. Daraus folgt, dass die zu erwartende Positionsgenauigkeit hoch ist. Die gegensätzliche Situation ist

<sup>26</sup>Die Ephemeridengenauigkeit wird durch die Zuordnung der Ephemeriden zu einer falschen Zeit aufgrund des Uhrfehlers verfälscht.

<sup>27</sup>Seeber (2003): Satellite Geodesy S. 304ff.

in Abbildung 2.1b gegeben. Hier ist der Winkel zwischen den beiden Satelliten und dem Beobachter klein, die dunkle Schnittfläche ist im Vergleich zu Abbildung 2.1a angewachsen. Der zu erwartende Fehler der Positionslösung ist somit größer geworden. Im Idealfall sind die Satelliten so positioniert, dass die Sichtlinien zu den Satelliten im Verhältnis zur Beobachterposition rechte Winkel bilden.

Ein Maß für die Güte der Satellitenkonstellation ist durch den sog. *Dilution of Precision* (DOP) gegeben. Dieser bezieht sich auf die räumliche Verteilung der Satelliten am Himmel und gibt an, um welchen Faktor sich der Positionsfehler gegenüber dem Fehler der gemessenen Entfernung erhöht. Er errechnet sich wie folgt:

$$DOP = \frac{\text{Standardabweichung des Positionsfehlers}}{\text{Standardabweichung des Entfernungsfehlers}} = \frac{\sigma_P}{\sigma_r} \quad (2.2)$$

Sind mehr als vier Satelliten am Himmel sichtbar, kann die geometrisch günstigste<sup>28</sup> Konstellation berechnet und damit die zu erwartende Qualität der Lösung angegeben werden.<sup>29,30,31</sup> Es hat sich bei der Betrachtung der Fehler und Fehlerursachen als vorteilhaft erwiesen, den DOP-Faktor in mehrere Faktoren zu unterteilen.<sup>32</sup> In dieser Arbeit ist der sog. *HDOP* (Horizontal DOP) von Relevanz, da nur die Betrachtung horizontaler Fahrzeugbewegungen erfolgt. Dieser HDOP-Faktor ist ein Maß für die Genauigkeit in horizontaler Richtung. Die Fehlerabschätzung für die entsprechenden Fehler erfolgt durch Multiplikation des entsprechenden DOP-Wertes mit dem theoretisch erreichbaren, minimalen Fehler. D. h. niedrige DOP-Werte (ca. 1) ergeben eine gute Genauigkeit, während große DOP-Werte (ca. > 7) eine schlechte ergeben.

### 2.1.2 Noncommon-Mode-Fehler

Im Gegensatz zu den Common-Mode-Fehlern handelt es sich bei den Noncommon-Mode-Fehlern um Fehler, die empfängerspezifisch oder von der spezifischen Empfängersituation abhängen.<sup>33</sup> Diese werden oftmals auch stationsabhängige Fehler genannt. Zu diesen Fehlern gehören:

- Mehrwegeausbreitung, Abschattung
- Empfängeruhrfehler
- Empfängerrauschen
- Antennenphasenzentrum

<sup>28</sup>Der günstigste Fall liegt vor, wenn ein vom Beobachter verfügbarer Satellit im Zenit steht und die restlichen drei Satelliten um 120° voneinander getrennt tief über den Horizont verteilt sind oder aber wenn alle Satelliten für die Berechnung eingesetzt werden können. Da die Satellitensignale jedoch bei niedrigen Elevationen stark von den genannten Fehlerquellen beeinflusst werden, gilt für präzise Messungen, dass Satelliten zu beobachten sind, die einen Mindestelevationswinkel von 15° aufweisen.

<sup>29</sup>Seeber (2003): *Satellite Geodesy* S. 300ff.

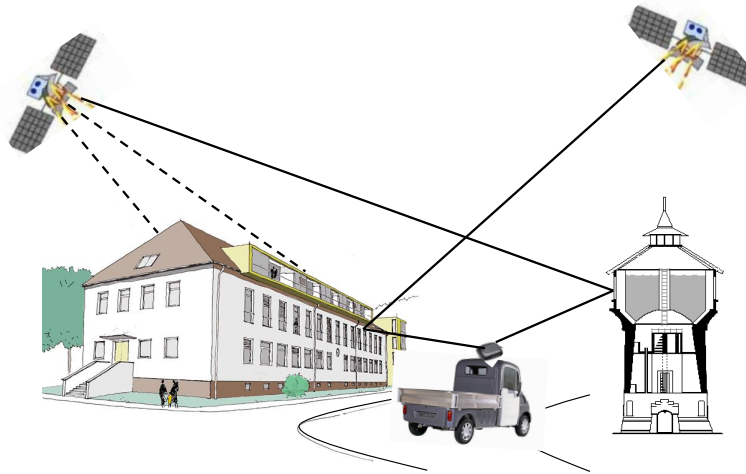
<sup>30</sup>Grewal/Weill/Andrews (2007): *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration* S. 39ff.

<sup>31</sup>Conley et al. (2006): *Performance of Stand-Alone GPS* S. 322ff.

<sup>32</sup>Gopi (2005): *Global Positioning System - Principles and Applications* S. 29–32.

<sup>33</sup>Wendel (2003): *Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme* S. 40.

*Mehrwegeeffekte*, auch als *Multipath* bezeichnet, treten auf, wenn das Signal des Satelliten nicht nur auf direktem, sondern auch auf indirektem Weg (Reflektion, Beugung) zur Empfangsantenne gelangt. Während die direkte Welle unmittelbar den Weg vom Satelliten zum Empfänger durchläuft, entstehen indirekte Wellen, wenn das Satellitensignal von einer großen, geeigneten Oberfläche (z.B. Gebäude, Häuserschluchten, Boden, Fahrzeugteile) in der Nähe der Antenne reflektiert oder an Hindernissen (z. B. Bäume) umgelenkt und dann empfangen wird (siehe Abbildung 2.2).



**Abbildung 2.2:** Multipatheffekte infolge Reflektionen.

Dies führt, falls die Dämpfung der reflektierten Satellitensignale nicht zu groß ist, zu einer Überlagerung der direkten und indirekten Signale. Die Signalamplitude sowie die Messung des Codes und der Trägermischphase werden dadurch verfälscht. Die indirekten Signale weisen dabei eine längere Laufzeit auf, so dass deren Auswertung eine zu große Entfernung ergibt und somit eine fehlerhafte Positionsangabe.

Da das auf direktem Wege eintreffende Signal immer früher als die Reflektionen eintrifft, kann durch entsprechenden Aufwand bei der Signalverarbeitung der Fehler durch den Multipatheffekt verringert werden. Problematisch ist allerdings der Fall, wenn die direkte Sicht zum Satelliten durch Hindernisse (z. B. Häuser, Bäume) verstellt ist (sog. *Abschattung*) und die Reflektion dieses Signals als gültiges Signal missinterpretiert wird. Neben den genannten Einflüssen kann auch Schnee, Nässe des Bodens u. ä. zum Multipatheffekt beitragen.<sup>34</sup>

Für die Reduzierung der Mehrwegeeffekte gibt es folgende Möglichkeiten:

- Art der verwendeten Antenne: Grundplatte oder Choke-Ring  
Hierdurch wird der Fehler durch Bodenreflektionen vermieden, da eine Abschirmung unterhalb der Antenne installiert ist.
- Auswahl der Messumgebung:  
Bei freiem Horizont ist kein reflektierendes Objekt in der Umgebung.

---

<sup>34</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.7ff.

- Länge des Beobachtungszeitraums:  
Wird ein Beobachtungszeitraum von mehr als 30 min gewählt, so ist eine Mittelung der Mehrwegefehler über die Beobachtungsdauer möglich.
- Differenzbildung:  
Durch Differenzbildung der Messergebnisse an aufeinander folgenden Tagen bei gleicher Satellitengeometrie.

Die entstehenden Multipath effekt-Fehler in den Code-Pseudoentfernungsmessungen liegen in einer typischen Empfangssituation im Bereich von 0,1 m bis 3 m. Im schlechtesten Fall können diese Fehler infolge Mehrwegeausbreitung Werte zwischen 5 m und 70 m annehmen.<sup>35,36</sup>

Eine weitere Störquelle sind Mikrowellensender. Eine Überlagerung der GPS-Signale durch Signale auf benachbarten Frequenzen kann zu einer so starken Störung der Satellitensignale führen, dass eine Auswertung nicht mehr möglich ist (Interferenz).<sup>37</sup>

Ebenso wie im Satelliten können auch im Empfänger *Uhrfehler* auftreten, die sich aus der Differenz zwischen der empfängerinternen Uhr und der GPS-Zeit ergeben. Durch diese Zeitdifferenz ergibt sich ein Offset, der für alle Pseudorange-Messungen zu einem Zeitpunkt identisch ist und der bei der Positionsbestimmung als die vierte Unbekannte berechnet wird, wenn mindestens vier Satellitensignale zur Verfügung stehen. Ist dies der Fall, ist die absolute Genauigkeit der Empfängerzeitreferenz unbedeutend, da nur die Zeitdifferenzen zwischen dem Eintreffen der Satellitensignale gemessen werden müssen. Die Zeitdifferenzen müssen jedoch aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale hochgenau gemessen werden.<sup>38</sup>

Das *Empfängerrauschen*, das von dem verwendeten GPS-Empfänger abhängig ist und als zufälliger Fehler behandelt wird, zählt ebenfalls zu den Noncommon-Mode-Fehlern. Zu diesem Fehler werden Messfehler zusammengefasst, die infolge des thermischen Rauschens und der Nichtlinearitäten der elektronischen Komponenten des eingesetzten Empfängers entstehen. Üblicherweise liegt die Standardabweichung bei aktuellen, den SPS-Dienst verwendenden GPS-Empfängern im Bereich von einigen Zentimetern.<sup>39</sup>

Der letzte zu den Noncommon-Mode-Fehlern zählende Fehler ist der *Antennenphasenzentrumsfehler*. Die Größenordnung dieses Fehlers liegt im Millimeterbereich, d. h. innerhalb der dieser Untersuchung zugrunde liegende Genauigkeitsanforderung und daher wird auf diesen Fehler nicht näher eingegangen. Für den interessierten Leser sei auf GÖRRES (2006) verwiesen.<sup>40</sup>

---

<sup>35</sup>Farrel/Barth (1999): The Global Positioning System and Inertial Navigation S. 150ff.

<sup>36</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 41.

<sup>37</sup>Rothacher/Zebhauser (2000): Tutorial Einführung in GPS S. 2.7.

<sup>38</sup>Kayton/Fried (1997): Avionics Navigation Systems.

<sup>39</sup>Wendel (2007): Integrierte Navigationssysteme S. 109.

<sup>40</sup>Görres et al. (2006): Absolute calibration of GPS-antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques.

### 2.1.3 Zwischenfazit

In den vorhergehenden zwei Unterkapiteln wurden die unterschiedlichen Fehlereinflüsse auf die GPS-Entfernungsmessung vorgestellt. Die Common-Mode-Fehler können beispielsweise unter Verwendung des Korrekturverfahrens DGPS<sup>41</sup> oder anderen satellitenbasierten Ergänzungssystemen (SBAS)<sup>42</sup> wie beispielsweise EGNOS reduziert werden.

Bei DGPS (Differential GPS) handelt es sich um Verfahren, die die Genauigkeit der GNSS-Navigation steigern können, indem Korrekturdaten (Bahn- und Zeitsystem) ausgestrahlt werden. Diese aus der Differenz der entsprechenden Signale gebildeten Korrekturdaten können sowohl von kommerziellen als auch von nichtkommerziellen Diensten bereit gestellt werden. Wie das DGPS liefert auch das SBAS (Satellite Based Augmentation Systems, z. B. EGNOS) zusätzliche Informationen, die allerdings von geostationären Satelliten ausgestrahlt werden. Weiterführende Angaben zu diesen Systemen sind beispielsweise in MANSFELD (2004)<sup>43</sup> zu finden. Tabelle 2.2 fasst die verschiedenen Fehlerarten zusammen und gibt Anhaltswerte für die Größe der Fehler. Hierbei wird die Größe des Common-Mode-Fehlers zum einen ohne DGPS bzw. SBAS und zum anderen mit DGPS/SBAS angegeben, da heutzutage schon "low-cost"-GNSS-Geräte EGNOS-fähig sind. D. h. bei Empfang von EGNOS-Daten werden diese im Empfangsgerät mitverarbeitet.

**Tabelle 2.2:** Positionsgenauigkeit ohne und mit DGPS/SBAS. Quelle: ZOGG (2006, S. 84).

Fehlerursache und Fehlerart	Fehler ohne DGPS/SBAS	Fehler mit DGPS/SBAS
Ephemeridendaten	2,1 m	0,1 m
Satellitenuhren	2,1 m	0,1 m
Einfluss der Ionosphäre	4,0 m	0,2 m
Einfluss der Troposphäre	0,7 m	0,2 m
Mehrwegempfang (Multipath)	1,4 m	1,4 m
Einfluss des Empfängers	0,5 m	0,5 m
Totaler RMS-Wert	5,3 m	1,5 m
Totaler RMS-Wert (gefiltert, d. h. gemittelt)	5,0 m	1,3 m
Horizontaler Fehler ( $1\sigma$ (68 %) HDOP=1,3)	6,5 m	1,7 m
<b>Horizontaler Fehler (<math>2\sigma</math> (95 %) HDOP=1,3)</b>	13,0 m	3,4 m

<sup>41</sup>DGPS = Differential GPS.

<sup>42</sup>SBAS = Satellite Based Augmentation Systems, satellitenbasierte Ergänzungssysteme.

<sup>43</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 194.



## 2.2 Trägheitsnavigation und Koppelortung

In diesem Abschnitt wird auf die im Rahmen der Trägheitsnavigation entstehenden Fehler eingegangen. Anschließend werden die Fehlereinflüsse auf die Betrachtungsgrößen abgeleitet.

### 2.2.1 Inertialnavigation

Inertiale Navigationssysteme<sup>44</sup> (INS) oder Trägheitsnavigationssysteme sind Messsysteme, die das Prinzip der Massenträgheit von Körpern gegenüber linearen Beschleunigungen und Drehbeschleunigungen nutzen. Aus den gemessenen Beschleunigungen (translatorisch und rotatorisch) werden durch einfache Integration die Geschwindigkeit und durch zweifache Integration die Position des Systems bestimmt. Die hierfür erforderlichen Sensoren sind Beschleunigungs- und Drehratensensoren.

Um Navigation im zweidimensionalen Raum wie beispielsweise bei fahrzeugtechnischen Anwendungen<sup>45</sup> zu ermöglichen, werden heutzutage in einem INS zwei Beschleunigungsmesser zur Bestimmung der Längs- und Querbewegung und ein Drehratensensor zur Ermittlung der Drehgeschwindigkeit um die Fahrzeughochachse, sog. *Gierrate*  $\dot{\psi}$  eingesetzt. Da diese Sensoren fest mit dem Fahrzeug verbunden sind, folgt das INS-System allen Bewegungen des Fahrzeugs und es ist keine aufwendige Mechanik (hohe Robustheit und Zuverlässigkeit) notwendig. Somit können diese Systeme wesentlich kompakter (kleiner) und günstiger hergestellt werden als konventionelle mechanische Systeme (sog. *Plattformsysteme*). Diesen Vorteilen steht jedoch der Nachteil des größeren Messbereiches gegenüber, um die volle Dynamik des Bewegungsspektrums des Fahrzeugs abzudecken. Dies hat zur Folge, dass die Messungen durch störende Nebeneffekte verfälscht werden können. Aus den genannten Gründen sowie aus Kosten- und Bauraumgründen werden im Kraftfahrzeugmassenmarkt vorwiegend mikroelektromechanische Sensoren (MEMS) eingesetzt. Auch der Einsatz wie beispielsweise aufwändigerer Sensorik ist jedoch aufgrund des Preis- und Miniaturisierungspotenzials in naher Zukunft nicht mehr auszuschließen. Daher ist es um so wichtiger, die Nachteile der heute vorhandenen, kostengünstigeren Sensoren zu beheben bzw. zu reduzieren, was beispielsweise durch Kombination von Fahrdynamiksensor- und GNSS-Daten erfolgen kann.<sup>46</sup>

In Tabelle 2.3 sind die Eigenschaften inertialer Navigationssysteme zusammengefasst, wobei zwischen herkömmlichen Inertialen Navigationssystemen und den ESP-Sensoren differenziert wird. Hierbei werden unter herkömmlichen Inertialen Navigationssystemen Strapdownsysteme verstanden, bestehend aus drei Beschleunigungs- und drei Drehratensensoren, die über einfache bzw. doppelte Integration, ohne Notwendigkeit des Bezugs zur äußeren Umgebung, kontinuierlich die Geschwindigkeit, Orientierung bzw. Position zur Verfügung stellen. Im Gegensatz hierzu wird unter ESP-Sensor der Gierratensensor verstanden, der die Drehrate des Fahrzeugs um dessen Hochachse kontinuierlich ausgibt.

<sup>44</sup>Stammt vom Lateinischen *inertia* ab und bedeutet Trägheit.

<sup>45</sup>Bei fahrzeugtechnischen Anwendungen ist üblicherweise die Positionsbestimmung in den x-/y-Raumebenen ausreichend.

<sup>46</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 2ff.

**Tabelle 2.3:** Eigenschaften inertialer Navigationssysteme. In Anlehnung an KIPKA (2006, S. 54).

Vorteile		Nachteile	
Herkömmliche INS	ESP-Sensoren	Herkömmliche INS	ESP-Sensoren
Gute Kurzzeitstabilität mit hoher Navigationsgenauigkeit	Gute Kurzzeitstabilität	Schlechte Langzeitstabilität	Schlechte Langzeitstabilität
Sehr hohe Bandbreite (> 10 Hz)	Hohe Bandbreite (> 5 Hz)	Starkes Driften	Starkes Driften
Vollständige Informationen über Lage, Beschleunigung und Geschwindigkeit der Trägerplattform	Vollständige Informationen über Lageänderung	Verschlechterung von Position und Geschwindigkeit mit zunehmender Betriebsdauer (vorausgesetzt: kein Korrekturabgleich)	Verschlechterung der Orientierung mit zunehmender Betriebsdauer (vorausgesetzt: kein Korrekturabgleich)
Agieren autonom (prinzipiell keine Stützung durch externe Sensoren notwendig)	Agieren autonom (prinzipiell keine Stützung durch externe Sensoren notwendig)	Hohe Anschaffungskosten für hochwertige INS	
Keine besonderen Sichtbarkeitsvoraussetzungen notwendig	Keine besonderen Sichtbarkeitsvoraussetzungen notwendig		
Betrieb prinzipiell überall	Betrieb prinzipiell überall		
Immun gegen Jamming	Immun gegen Jamming		
	Geringe Anschaffungskosten		

## 2.2.2 Betrachtungsgrößen und deren Fehler

### 2.2.2.1 Fehlercharakteristik

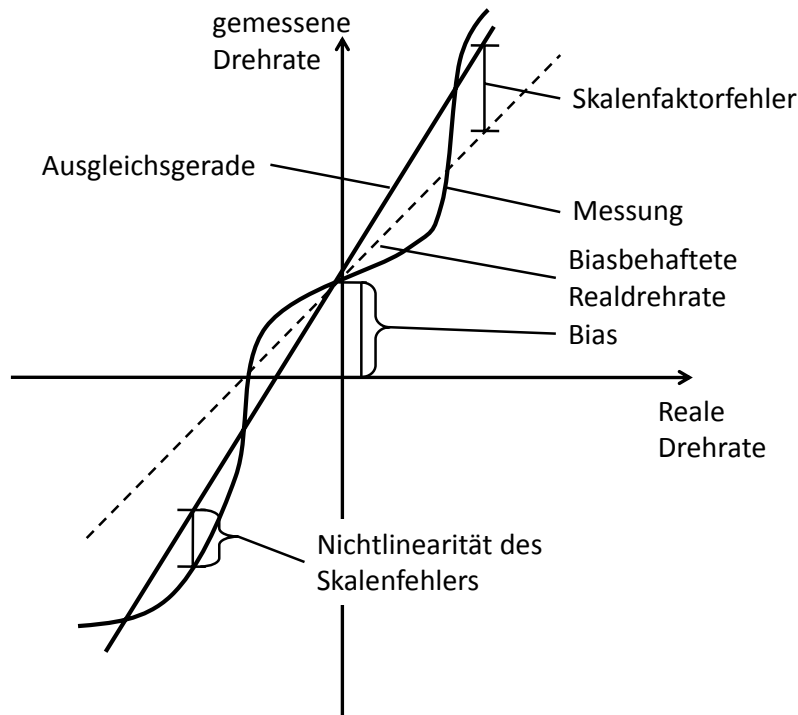
Die Ursachen für die in Tabelle 2.3 genannten Nachteile der Langzeitstabilität sowie des Driftverhaltens bilden folgende Fehlerquellen, die nachfolgend definiert werden.

- Bias und Skalenfaktorfehler der Inertialsensoren
- Nichtorthogonalität der sensitiven Achsen der Inertialsensoren (Misalignment)
- Wank- und Nickwinkel für Beschleunigungssensoren
- Fehler in der angenommenen Anfangsposition, -geschwindigkeit, -lage
- Zeitdiskrete Verarbeitung der Inertialsensordaten
- Rauschen der Inertialsensoren

Diese Fehlerquellen, die auch gleichzeitig auftreten können, werden grundsätzlich in deterministische und stochastische Fehler untergliedert, wobei zu den deterministischen Fehlern die nachfolgend aufgelisteten Fehler zählen:

- Bias: Als Bias oder Offset wird der Nullpunktfehler von Inertialsensoren bezeichnet. Dies ist eine konstante Abweichung zwischen gemessenem und dem Wert ohne Fehler. Er wird u. a. durch ungenaue Fertigung verursacht. Er kann seinen Wert während des Betriebes ändern (z. B. durch Temperatureinfluss) und auch Unterschiede von Tag zu Tag aufweisen (Day-To-Day Uncertainty, z. B. auf Grund von Alterserscheinungen, Stößen etc.). Der Bias wird durch Kalibrierung bestimmt und fließt in die Fehlerrechnung ein. Bei Drehratensensoren tritt häufig ein zusätzlicher Bias auf, dessen Wert von der einwirkenden Beschleunigung abhängt (siehe Abbildung 2.3).
- Skalenfehler: Dieser Messfehler besteht in der Regel aus einem linearen und einem nichtlinearen Anteil, wobei die lineare Abhängigkeit meist den dominanten Anteil darstellt (siehe Abbildung 2.3) und als Skalenfaktorfehler (SKF) bezeichnet wird. Besonders bei Drehratensensoren treten bei der Lageintegration die nichtlinearen Anteile in Erscheinung, da sich bei Vorliegen von oszillatorischen Rotationen die linearen Anteile, die proportional zum Messwert sind, aufheben, während die nichtlinearen Anteile ein Anwachsen des Lagefehlers verursachen. Die Angabe des nichtlinearen Skalenfehlers erfolgt meist durch Angabe der größten Abweichung des Skalenfehlers von einer Ausgleichsgerade. Diese Abweichung wird durch Messung bei verschiedenen Drehraten entweder auf die Drehrate, an der diese Abweichung auftritt, oder auf den gesamten Messbereich bezogen, bestimmt (siehe Abbildung 2.3).
- Fehlausrichtung: Diese Fehler entstehen, wenn die Inertialsensoren zu einer inertialen Messeinheit (IMU) zusammengefasst werden, da in der Realität eine exakt orthogonale Ausrichtung der sensitiven Achsen der Inertialsensoren nicht möglich ist. Die Fehlausrichtung der sensitiven Sensorachsen, auch *Misalignment* genannt, verursacht systematische Messfehler. Eine ähnliche Fehlercharakteristik ist auch bei Vorliegen der Empfindlichkeit der Inertialsensoren auf einwirkende Beschleunigungen bzw. Drehraten senkrecht zu den sensitiven Sensorachsen gegeben. In der Praxis

werden in der Regel diese Fehlausrichtungen vermessen und in einer Korrekturmatrix gespeichert, wodurch dieser Fehler nahezu vollständig eliminiert werden kann. Es verbleibt dennoch ein Restfehler, der mit der Zeit zu einem Anwachsen der Fehler führt.



**Abbildung 2.3:** Bias, Skalenfaktorfehler und Nichtlinearität des Skalenfehlers am Beispiel der Drehrate dargestellt. Quelle: WENDEL (2007), S.70.

Bei den stochastischen Fehlern handelt es sich um zufällige Fehler. Die für diese Arbeit erforderlichen stochastischen Fehler werden im Folgenden aufgelistet und kurz beschrieben:

- Sensorrauschen: Durch die verwendeten elektronischen Bauteile in den Sensoren wird in jeder Messung ein Rauschen verursacht oder aber es ist bereits dem zur Messung ausgenutzten physikalischen Prinzip (Phänomen) immanent.
- Biasstabilität/Offsetdrift: Vor allem durch Temperaturabhängigkeiten tritt neben dem konstanten Bias auch ein Anteil des Nullpunktfehlers auf, der zeitlichen Variationen unterliegt.

Wie groß die beschriebenen Fehler sind, ist stark von der verwendeten Sensortechnologie abhängig.<sup>47,48,49,50</sup>

<sup>47</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 18-22.

<sup>48</sup>Wendel (2007): Integrierte Navigationssysteme S. 61.

<sup>49</sup>Zabler (2001): Sensoren im Kraftfahrzeug S. 62ff.

<sup>50</sup>Titterton/Weston (2004): Strapdown Inertial Navigation Technology S. 59ff.

### 2.2.2.2 Fehler der Betrachtungsgrößen und deren Störgrößen

Die aus den beiden unterschiedlichen Systemen (GNSS, Fahrdynamiksensoren) erhaltenen Signale basieren auf unterschiedlichen Koordinatensystemen (Fahrzeug: fahrzeugfest nach DIN 70000, Index  $v$ , GNSS: körperfest, Index  $n$ ). Für einen Vergleich der Betrachtungsgrößen beider Systeme ist eine Überführung in ein einheitliches System unter Anwendung der entsprechenden Koordinatentransformationen erforderlich (Herleitungen siehe Anhang A.2). Zur eindeutigen Kennzeichnung wird für das fahrzeugfeste Koordinatensystem der hochgestellte Index  $v$  und für das globale, erdfeste der hochgestellte Index  $e$  und für das Navigationskoordinatensystem entsprechend der Index  $n$  verwendet. Im Folgenden werden die abgeleiteten Betrachtungsgrößen analysiert.

**2.2.2.2.1 Gierrate, Gier- und Kurswinkel** Die Gierrate  $\dot{\psi}$  ist die Drehgeschwindigkeit des Fahrzeugs um seine Hochachse. Sie wird fahrzeugseitig mit Hilfe eines Gierratensensors bestimmt, der eine Genauigkeit von mindestens  $2^\circ/\text{s}$  bei einem Messbereich von  $\pm 100^\circ/\text{s}$  hat.<sup>51</sup>

Alternativ kann die Gierrate aus dem Kurswinkel der GNSS-Daten  $\Theta_{GNSS}$ , also dem Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs und der nach Norden zeigenden Achse des Navigationskoordinatensystems bestimmt werden, indem der Kurswinkel der GNSS-Daten  $\Theta_{GNSS}$  differenziert wird. Da die so erhaltene Kursrate theoretisch nicht mit der Gierrate übereinstimmt, sondern sich noch durch die Schwimmrate  $\dot{\beta}$  unterscheidet, ist diese von der Kursrate abzuziehen. Somit wird die Gierrate aus den GNSS-Daten wie folgt ermittelt:

$$\dot{\psi}_{GNSS} = \frac{\partial \psi_{GNSS}}{\partial t} = \frac{\partial (\Theta_{GNSS} - \beta)}{\partial t} = \frac{\partial \Theta_{GNSS}}{\partial t} - \dot{\beta} \quad (2.3)$$

Die Schwimmrate  $\dot{\beta}$  ist die zeitliche Ableitung des Winkels, der von dem Geschwindigkeitsvektor in Fahrzeuginnenrichtung und von dem tangentialen Geschwindigkeitsvektor (tatsächliche Bewegungsrichtung des Fahrzeugschwerpunktes) eingeschlossen wird.

Während bei der fahrzeugseitigen Kursratenbestimmung neben Rauschen auch Windböen eine kurzzeitige Störgröße darstellen, spielen bei der Ermittlung des Kurswinkels aus den GNSS-Daten die in Kapitel 2.1 erläuterten Fehlerquellen eine Rolle. Das entsprechende Fehlerbudget ist in der einschlägigen Fachliteratur zu finden.<sup>52,53</sup>

Gerade für die Positionsbestimmung wird der Gier- bzw. der Kurswinkel benötigt. Da dies nicht direkt erfolgen kann, wird der Gierwinkel meist aus dem Gierratensensor über Integration ermittelt. Hieraus resultiert bereits allein ein Driftverhalten, da schon ein geringer Offsetfehler auf Dauer zu einem beträchtlichen Winkelfehler führen kann. Für die Bestimmung des Kurswinkels  $\nu$ , der sich nach Gleichung 2.4 bestimmt, ist zusätzlich der Schwimmwinkel<sup>54</sup>  $\beta$  erforderlich.

<sup>51</sup>Mörbe (2009): Fahrdynamik-Sensoren für FAS S. 104ff.

<sup>52</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 194.

<sup>53</sup>Beyer/Wigger (2001): Vorlesungsskript: Grundlagen der Navigation und Anwendungen S. 4.11.

<sup>54</sup>Schwimmwinkel ist der vom Geschwindigkeitsvektor in Fahrzeuginnenrichtung und vom tangentialen Geschwindigkeitsvektor (tatsächliche Bewegungsrichtung des Fzg.-schwerpunktes) eingeschlossene Winkel.

$$\nu = \psi + \beta \quad (2.4)$$

Dies bedeutet, dass sich neben den Gierwinkel- auch die Schwimmwinkelfehler (aufgrund der Integration aus der Schwimmwinkelrate) auf die Bestimmung des Kurswinkels auswirken.

Sehr häufig wird in Untersuchungen in erster Näherung der Schwimmwinkel vernachlässigt. Ob diese Annahme auch in der vorliegenden Arbeit Gültigkeit hat, wurde durch eine theoretische Abschätzung anhand des Einspur-Fahrzeugmodells<sup>55,56</sup> vorgenommen. Für die Analyse der Vernachlässigung des Schwimmwinkels bei den in dieser Arbeit untersuchten Versuchen wurden im Einspurmodell die im Anhang A.4.3 (Tabelle A.1) aufgelisteten Fahrzeugparameter verwendet. Als Eingangsparameter wurde der aus realen Versuchen gemessene Lenkradwinkel eingesetzt.

Die Simulation zeigt bei dem querdynamischen worst-case-Szenario "Slalom" einen Schwimmwinkelwert von  $\pm 1,1^\circ$  während er bei Konstantfahrt mit 40 km/h Werte im Bereich  $\pm 0,05^\circ$  annimmt. Diese Werte sind eher konservativ, da das Modell im Vergleich zu den Referenzdaten (z. B. Gierrate) etwas höhere Werte ausgibt, was auf die Modellvereinfachungen zurückzuführen ist. Aufgrund dieser Zahlenwerte wird in der vorliegenden Arbeit von kleinen Schwimmwinkeln und von einer Vernachlässigung der Schwimmrate in erster Näherung ausgegangen. Somit sind Gierwinkel und Kurswinkel gleich. Analoges gilt für die entsprechenden Winkelgeschwindigkeiten.

Neben diesen Annahmen ist für die fahrzeugseitige Gierratenoffsetkorrektur eine Unterteilung des Fahrzeuggeschwindigkeitsbereiches erforderlich, da der Kurswinkel und somit auch die Kurswinkelgeschwindigkeit bei sehr kleinen Fahrzeuggeschwindigkeiten nicht mehr zuverlässig bestimmt werden kann. Daher wird als kleinste noch zu betrachtende Geschwindigkeit ein Wert von 10 km/h gewählt, der aufgrund des Automatikbetriebs des Versuchsträgers gerade noch konstant gefahren werden kann.

Um die Lesbarkeit zu erhöhen und um Verwechslungen mit dem Symbol für die Geschwindigkeit zu vermeiden wird in der Arbeit statt dem für den Kurswinkel in der DIN 70000 vorgesehenen Symbol  $\nu$  (ny) das Symbol  $\Theta$  (Theta) verwendet.

**2.2.2.2 Fahrzeuggeschwindigkeit** Die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$  ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Fahrzeugschwerpunkt über Grund bewegt und errechnet sich über Modellannahmen (Einachsmodell, Herleitung: siehe Anhang A.3) aus den einzelnen Radgeschwindigkeiten  $v_{R,i}$  der nicht angetriebenen Räder  $i$ <sup>57</sup> wie folgt:

$$v_{\text{Fzg}} = \frac{v_{R,VL} + v_{R,VR}}{2} \quad (2.5)$$

---

<sup>55</sup>Mitschke/Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge S. 547ff.

<sup>56</sup>Die Gültigkeit dieses Modells ist auf den niedrigen Querbeschleunigungsbereich (bis ca. 4 m/s<sup>2</sup>) eingeschränkt und geht von weiteren Vereinfachungen aus, die beispielsweise in MITSCHKE (2004, S. 547ff) oder ZOMOTOR (1987, S. 87ff) zu finden sind.

<sup>57</sup> $i$  kann je nach Versuchsfahrzeug:  $VL$  (vorne links),  $VR$  (vorne rechts) oder  $HL$  (hinten links),  $HR$  (hinten rechts) sein. Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten Versuchsträger ist die nicht angetriebene Achse die Vorderachse und somit ist  $i = VL, VR$ .

Wird vorausgesetzt, dass sich die Antennen des GNSS-Empfängers direkt über dem Fahrzeugschwerpunkt befinden, gilt im Idealfall (Herleitung siehe Anhang A.2.2.1):

$$v_{GNSS}^n = v_{Fzg}^v \quad (2.6)$$

Die nicht direkt messbare Radgeschwindigkeit  $v_{R,i}$  ist von der Radkreisfrequenz  $\omega_{R,i}$ , die mittels Raddrehzahlsensor<sup>58</sup> bestimmt wird, und dem dynamischen Reifenhalmes  $r_{dyn}$  abhängig (siehe Gleichung 2.7).

$$v_{R,i} = r_{dyn} \cdot \omega_{R,i} \quad (2.7)$$

Die Beziehung (Gleichung 2.5) gilt nur für frei rollende Räder mit konstanter Geschwindigkeit auf einer ebenen Straße. Um nun Umfangskräfte (Antrieb, Bremsen) zwischen Reifen und Fahrbahn zu übertragen, erfolgt eine Formänderung des Reifenprofils in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn, in dem sog. *Latsch*, es tritt ein sog. *Schlupf*  $S$  (Antriebs-  $S_T$  bzw. Bremsschlupf  $S_B$ ) auf. Dieser kennzeichnet die Relativbewegung des Rades zur tatsächlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und ist wie folgt definiert.<sup>59,60,61</sup>

$$S_T = \frac{r_{dyn} \cdot \omega_R - v_{Fzg}}{r_{dyn} \cdot \omega_R} = 1 - \frac{v_{Fzg}}{r_{dyn} \cdot \omega_R} \quad (2.8)$$

$$S_B = \frac{v_{Fzg} - r_{dyn} \cdot \omega_R}{v_{Fzg}} = 1 - \frac{r_{dyn} \cdot \omega_R}{v_{Fzg}} \quad (2.9)$$

Somit ergibt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit gemäß Gleichung 2.10.<sup>62</sup>

$$v_{Fzg} = (1 - S) \cdot r_{dyn} \cdot \omega_R. \quad (2.10)$$

Folglich wird die Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit fahrzeugseitig zum einen von dem dynamischen Reifenhalmes  $r_{dyn}$  beeinflusst, der sich aus dem aktuellen Abrollumfang, der in der Regel fehlerbehaftet ist, ergibt (siehe Gleichung 2.11), und zum anderen von den Raddrehzahlen und dem Schlupf. Der Schlupf ist u. a. von der Fahrbahnoberfläche (z. B. trocken, nass) und von der Fahrgeschwindigkeit abhängig.<sup>63</sup> Aufgrund von Schlupfunterschieden zwischen angetriebenen und nicht angetriebenen Rädern sowie beim Bremsen kann die Fahrzeuggeschwindigkeit variieren. So beträgt beispielsweise die beim Bremsen durch Schlupf auftretende Verfälschung der Fahrzeuggeschwindigkeit ca.  $1\% \cdot a_x / (m/s^2)$ .<sup>64</sup> Ferner wird für die Differenzgeschwindigkeitsbestimmung (links - rechts) eine hohe Genauigkeit von  $10^{-3}$  m/s für die mittlere Radgeschwindigkeit gefordert.<sup>65</sup> Unter idealen Bedingungen (kein Schlupf) bedeutet dies, dass auch die Fahrzeuggeschwindigkeit eine Genauigkeit von mindestens  $10^{-3}$  m/s aufweist.<sup>66</sup> Die hohe Güte des Drehzahlmessens

<sup>58</sup>Zabler (2001): Sensoren im Kraftfahrzeug S. 56f.

<sup>59</sup>Mitschke/Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge S. 18.

<sup>60</sup>Reimpell/Betzler (2000): Fahrwerktechnik: Grundlagen S. 136.

<sup>61</sup>Backfisch (2006): Das große Reifenbuch - Technik, Sicherheit, Fahrdynamik, Tuning S. 84.

<sup>62</sup>Mitschke/Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge S. 497.

<sup>63</sup>Der höchste Kraftschluss ist durch den maximalen Kraftschlussbeiwert  $\mu_{max}$  gegeben, der zugehörige Schlupf, häufig "kritischer Schlupf"  $S_c$  genannt, liegt bei etwa 10% (siehe MITSCHKE (2004), S. 18). Der Schlupf liegt mit ABS bei etwa 5% bis 25% (siehe BACKFISCH (2006), S. 84).

<sup>64</sup>Winner (2006a): Vorlesungsskript: Fahrerassistenzsysteme Kap. 2, Folie 17.

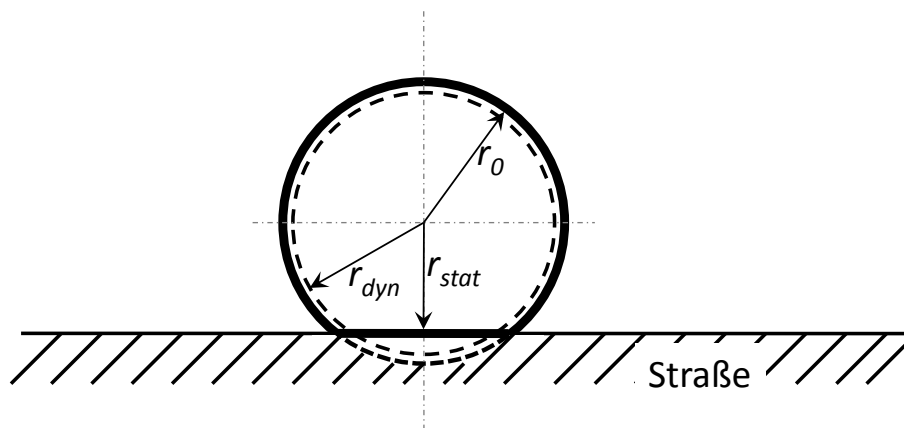
<sup>65</sup>Winner (2004): Vorlesungsskript: Kraftfahrzeuge II Kap. 8, Folie 19.

<sup>66</sup>Laut NOACK (2006, S. 21) kann unter Einsatz der Doppelfrequenzverschiebung der Satellitensignale die Fahrzeuggeschwindigkeit von landwirtschaftlichen Fahrzeugen über GPS-Sensoren, die auch zur Positionserfassung eingesetzt werden, nur mit einer Genauigkeit von 0,1 m/s erfolgen.

führt zur Konzentration auf den dynamischen Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  und den Schlupf. Da der Schlupf jedoch wegen der zeitlichen Dynamik nicht mit GNSS-Daten korrigiert werden kann, beschränkt sich die Verbesserungsmöglichkeit auf die Bestimmung des dynamischen Reifenhalmmessers  $r_{dyn}$ .

Eine weitere Störgröße bei der fahrzeugseitigen Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit ist die Fahrbahnbeschaffenheit. Durch Fahrbahnunebenheiten (Schlaglöcher, Straßenerhöhungen) entsteht ein Pseudoantriebsschlupf. Dieser führt zur Verfälschung der Fahrzeuggeschwindigkeit, da die Räder eine größere Radgeschwindigkeit aufweisen als es bei ebener Fahrbahn für die gleiche Fahrzeuggeschwindigkeit benötigt würde. Unter Beachtung von Gleichung 2.7 lässt sich festhalten, dass der dynamische Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  sowie gemäß Gleichung 2.10 der Schlupf einen Skalenfaktorfehler bei der Geschwindigkeitsbestimmung darstellen, den es mit Hilfe von GNSS-Daten zu bestimmen bzw. zu reduzieren gilt.

**2.2.2.2.3 Dynamischer Reifenhalmmesser** Bei einem Reifen handelt es sich um ein komplexes Bauteil, an dem grundsätzlich drei unterschiedliche Radien definiert sind. Diese sind der Außenradius des Reifens  $r_0$ , der statische  $r_{stat}$  und der kinematisch wirksame dynamische Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$ , die in Abbildung 2.4 dargestellt sind.



**Abbildung 2.4:** Definition der verschiedenen Reifenhalmmesser.

Während die beiden erstgenannten im Stillstand geometrisch ermittelbar sind, stellt der für die Fahrdynamik entscheidende dynamische Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  keine geometrisch am Reifen messbare Größe dar.<sup>67</sup> Er ist zwar durch den Abstand zwischen dem Radmittelpunkt und der Straßenoberfläche während der Fahrt gekennzeichnet (siehe Abbildung 2.4) und liegt im Regelfall zwischen dem statischen Reifenhalmmesser  $r_{stat}$  in der Reifenaufstandsfläche und dem unbelasteten Reifenhalmmesser  $r_0$ . Sein Wert ist allerdings nicht konstant. Er wird aus dem Abrollumfang  $U_{ab}$ , der die je Umdrehung eines schlupffrei rollenden Rades  $\varphi_0 = 2\pi \hat{=} 360^\circ$  zurückgelegte Wegstrecke ist, gemäß Gleichung 2.11

<sup>67</sup>Der Außenradius  $r_0$  wird im unbelasteten Zustand ermittelt. Der statische Reifenhalmmesser  $r_{stat}$  wird bei Stillstand sowie Luftdruck und Belastung entsprechend der Tragfähigkeit ermittelt. Aufgrund der radialen Nachgiebigkeiten des Reifens sind bei Fahrzeugreifen statische Deformationen von  $(r_0 - r_{stat})/r_0 = 5 \dots 10\%$  üblich (siehe AMMON (1997), S. 98).



ermittelt.<sup>68</sup> Hierbei ist zu beachten, dass der dynamische Reifenhalmmesser nur für eine Radgeschwindigkeit von 60 km/h aus dem Abrollumfang  $U_{ab}$  gemäß Gleichung 2.11 ermittelt wird, da dieser sich nach DIN 70020-5<sup>69</sup> immer auf die Reifengeschwindigkeit von 60 km/h bezieht.

$$r_{dyn,60\text{ km/h}} = \frac{U_{ab}}{2 \cdot \pi} \quad (2.11)$$

Der Abrollumfang und somit auch der dynamische Reifenhalmmesser sind von der Geschwindigkeit, der Radlast, vom Reifenluftdruck<sup>70</sup>, der Profiltiefe und der Umfangskraft abhängig, wobei die Geschwindigkeit den größten Einfluß hat.<sup>71,72</sup> Durch die Zunahme der Radgeschwindigkeit entstehen im Reifen größer werdende Fliehkräfte, die die Aufstandsfläche (Latsch) des Reifens verkleinern und gleichzeitig eine Vergrößerung des dynamischen Reifenhalmmessers bewirken. Somit muss der Reifendurchmesser vorab oder während der Fahrt kalibriert werden. Dies erfolgt heutzutage unter Verwendung von einem Radsensormodell mit einem Fehler von 3%.<sup>73</sup> Bei der Schätzung des dynamischen Reifenhalmmessers stellt die Profiltiefenvariation den Haupteinflussfaktor dar, der bei einer Variation von 6 mm<sup>74</sup> etwa  $2\% \cdot r_{dyn}$  entspricht. Laut TÜV Süddeutschland sind Toleranzen des Abrollumfangs von  $-2,5\%$  bis  $+1,5\%$  akzeptabel.<sup>75</sup> Weiterführende Informationen sind bei REIMPELL<sup>76</sup> sowie in der W.d.K.<sup>77</sup>-Leitlinie 107<sup>78</sup> zu entnehmen.

**2.2.2.2.4 Kurvenkrümmung** Die Kurvenkrümmung ist für das Fahrerassistenzsystem ACC von Bedeutung. Bei ungenauen Krümmungswerten besteht die Gefahr, dass das ACC das vorausfahrende Fahrzeug in einer Kurve verliert und das Fahrzeug (Egofahrzeug) auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt. Ebenso könnte das System ein Fahrzeug auf einem benachbarten Fahrstreifen detektieren und das Egofahrzeug fälschlicherweise abbremsen. Diese Falscherkennung, v. a. auf Geraden (Gierrate müsste einen Wert von  $0^\circ/\text{s}$  annehmen) stellt das Hauptproblem bei der Krümmungsermittlung dar. Unter der Voraussetzung  $\dot{\beta} = 0^\circ/\text{s}$  hat sich laut WINNER (2002) unter mehreren Kurvenbestimmungsmodellen folgende Berechnungsvorschrift am besten bewährt.<sup>79</sup>

$$\kappa_{Fzg} = \frac{\dot{\psi}_{Fzg}}{v_{Fzg}} \quad (2.12)$$

Aus Gleichung 2.12 geht hervor, dass eine mögliche Verbesserung der Krümmungsbestimmung über die Stützung der Gierrate und / oder der Fahrzeuggeschwindigkeit möglich ist. Somit kann unter dem Aspekt der Vernachlässigung der Schwimmrate bei

<sup>68</sup>Mitschke/Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge S. 19.

<sup>69</sup>DIN 70020-5: Kraftfahrzeugbau; Reifen und Räder; Begriffe und Meßbedingungen.

<sup>70</sup>Ein um 0,5 bar reduzierter Reifendruck ergibt 0,5 mm weniger Abrollumfang, was eine höhere Drehzahl bei gleicher Geschwindigkeit bedeutet (siehe BACKFISCH (2006), S. 78).

<sup>71</sup>Reimpell/Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder S. 178f.

<sup>72</sup>Pacejka (2006): Tyre and Vehicle Dynamics S. 66, S. 72.

<sup>73</sup>Winner (2001): Adaptive Cruise Control S. 31.3.

<sup>74</sup>Die Profiltiefe bei neuen Reifen beträgt 8 mm, die vom Gesetzgeber vorgeschriebene Mindestprofiltiefe beträgt 1,6 mm.

<sup>75</sup>Backfisch (2006): Das große Reifenbuch - Technik, Sicherheit, Fahrdynamik, Tuning S. 113.

<sup>76</sup>Reimpell/Betzler (2000): Fahrwerktechnik: Grundlagen S. 119.

<sup>77</sup>W. d. K. bedeutet Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie.

<sup>78</sup>W. d. K. -Leitlinie 107, Blatt 1: PkW-Reifen, Abrollumfang, Geschwindigkeitsabhängigkeit.

<sup>79</sup>Winner (2002): Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC S. 36f.

einer Gierratenoffsetkompensation der GNSS-Kurs zur Stützung eingesetzt werden. Somit gelten hier die in Kapitel 2.2.2.2.1 gemachten Ausführungen in gleicher Weise. Der GNSS-Kurs wird nach der Zeit abgeleitet und es ist ebenfalls eine Einteilung in den bereits genannten niedrigen ( $\leq 10$  km/h) und höheren Geschwindigkeitsbereich vorzunehmen. Für den höheren Geschwindigkeitsbereich errechnet sich die Krümmung nach Gleichung 2.12. Im Gegensatz hierzu wird für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich die Krümmung unter Verwendung des Einspurmodells aus dem Lenkwinkel und der Fahrzeuggeschwindigkeit für die Stützung bestimmt. Da dieser Bereich in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet wird, wird auf eine detaillierte Betrachtung des letztgenannten Vorgehens verzichtet.

**2.2.2.2.5 Positionsbestimmung (Koppelortung)** Eine der beiden vorgestellten Gruppierungen für FAS ist die präzise Positionierung (siehe Kapitel 1.2). Hierzu ist die Kenntnis der Längs- und Querposition erforderlich.

Während die GNSS-Daten direkt die absolute Position in Breiten- und Längengrad liefern, wird für die Positionsbestimmung aus den Fahrdynamikdaten die Koppelortung herangezogen.

Bei der Koppelortung handelt es sich um ein autarkes Verfahren, da es unabhängig von bordexternen Ortungen arbeitet. Bei diesem Verfahren, auch als *dead reckoning* bezeichnet, wird die Position aus den gemessenen Richtungsänderungen und Wegstrecken durch Addition (Koppelung) der einzelnen Wegvektoren bezogen auf ein ortsfestes Koordinatensystem zyklisch bestimmt (Position ergibt sich als offener Polygonzug aus Winkeln und Strecken)<sup>80</sup>. Die für die Koppelortung erforderlichen Informationen bezüglich der zurückgelegten Strecke und der durchgeführten Richtungsänderung werden aus den Impulsen der Sensoren zyklisch berechnet. Während sich Richtungsänderungen aus der Differenz des Gierwinkels errechnen, werden die Weginkremente durch Integration der aus der mittels Radgeschwindigkeiten approximierten Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Die erforderliche Startposition und -richtung muss über ein zusätzliches System (z. B. GPS und Kompass) gemessen werden.

Durch dieses Vorgehen kommt es zur Akkumulation von Fehlern, die bei längerer Fahrt stark anwachsen und deren Größenordnungen sich auf ca. 2 % der gefahrenen Strecke belaufen können.<sup>81</sup> Somit ist die erzielte Genauigkeit der Koppelortung, z. B. für Positionsangaben ohne weitere Hilfsmittel nicht ausreichend. Die Fehler können mittels Stützung durch ein anderes System reduziert werden. So erfolgt heutzutage für die Routenführung ein Vergleich des Ortungsergebnisses mit einer Digitalen Karte und, falls erforderlich, eine Korrektur. Dieser Abgleich mit dem digitalisierten Abbild des befahrenen Straßennetzes wird *Map Matching* genannt.

Die Position wird durch Integration der auf das Navigationskoordinatensystem bezogenen

---

<sup>80</sup>Dead Reckoning ist ein System, das zwar Positionen und Geschwindigkeiten nach Eingabe einer Anfangsgeschwindigkeit und Anfangsposition weiterberechnet, aber nicht direkt bestimmen kann.

<sup>81</sup>Bauer (1998): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch/Bosch S. 748.

Geschwindigkeit wie folgt bestimmt:

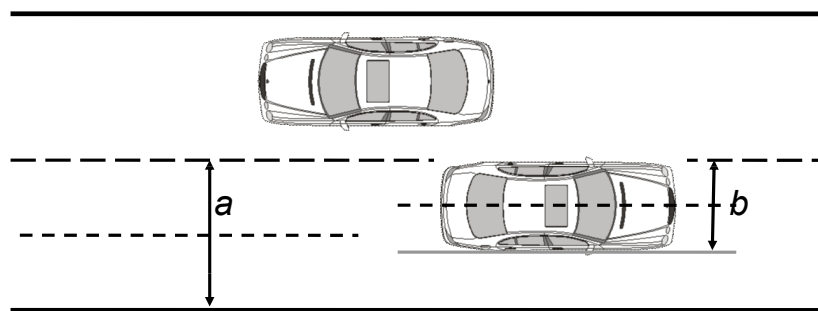
$$\begin{aligned} x^n &= \int v_x^n(t) dt = \int (v_{x,\text{Fzg}}^v(t) \cdot \cos \psi(t) - v_{y,\text{Fzg}}^v(t) \cdot \sin \psi(t)) dt \\ &= \int (v_{\text{Fzg}}^v \cdot \cos \psi) dt \quad \text{bei } \beta = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} y^n &= \int v_y^n(t) dt = \int (v_{x,\text{Fzg}}^v(t) \cdot \sin \psi(t) + v_{y,\text{Fzg}}^v(t) \cdot \cos \psi(t)) dt \\ &= \int (v_{\text{Fzg}}^v \cdot \sin \psi) dt \quad \text{bei } \beta = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Wie aus Gleichung 2.13 und Gleichung 2.14 ersichtlich, hängt die auf das Navigationskoordinatensystem bezogene Positionsbestimmung von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$  und von dem Gierwinkel  $\psi$  ab, der sich durch Integration der Gierrate ergibt (siehe Kapitel 2.2.2.2.1). Dies bedeutet, dass neben den Offsetfehlern der Gierratenbestimmung auch die Skalenfaktorfeder der Geschwindigkeit einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Position haben. Nähere Details bzgl. Transformation sind in Anhang A.2 zu finden.

Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen. So ist beispielsweise für eine Lane-Keeping-Assist-Anwendung eine Genauigkeitsbestimmung für den Querversatz von  $\pm 0,6 \text{ m}$ <sup>82</sup> erforderlich, um eine sichere Zuordnung zu dem eigenen Fahrstreifen zu ermöglichen. Dieser Wert ist nur unter Voraussetzung einer fehlerfreien prädierten Kursmitte und bei einer sicheren Ermittlung einer fehlerfreien lateralen Position gültig. Aus Funktionsbetrachtungsgründen für praxistaugliche Anwendungen ist jedoch ein lateraler Positionsfehler von maximal  $0,25 \text{ m}$  zulässig.

Für Fahrerassistenzsysteme, die eine fahrstreifengenaue Navigation benötigen, ist das Zuordnen der ermittelten Fahrzeugkoordinaten innerhalb des Fahrstreifens solange erforderlich, wie sich das Fahrzeug tatsächlich innerhalb des eigenen Fahrstreifens befindet.



**Abbildung 2.5:** Fahrzeugbezogene und fahrstreifenbezogene, geforderte Genauigkeit in Querrichtung.

<sup>82</sup>Dieser Wert ergibt sich aus der Betrachtung: Fahrstreifenbreite:  $3 \text{ m}$ , Fahrzeugbreite:  $1,8 \text{ m}$ ,  $(3 \text{ m} - 1,8 \text{ m})/2$ .

Fährt beispielsweise ein Fahrzeug am Rand des Fahrstreifens, so muss die Genauigkeit der Ortskoordinaten, bezogen auf die Fahrzeugmitte, in Fahrstreifenquerrichtung kleiner als die halbe Fahrzeugbreite (in Abbildung 2.5 mit  $b$  gekennzeichnet) sein. Bei einer Fahrzeugbreite von 1,8 m und einer Fahrstreifenbreite von 3 m<sup>83</sup> ergibt sich als Quertoleranz fahrzeugbezogen ein Wert von  $\pm 0,9$  m und fahrstreifenbezogen von  $\pm 1,5$  m. Für eine fahrstreifengenaue Navigation wird in Fahrzeuginnenrichtung eine Genauigkeit für die Fahrzeugposition von  $\pm 10$  m gefordert. Ferner darf sich ein Fahrzeug, ausgehend von der Mitte des Fahrstreifens, maximal um 0,6 m ( $3,0 \text{ m}/2 - 1,8 \text{ m}/2 = 0,6 \text{ m}$ ) nach links bzw. rechts innerhalb des Fahrstreifens bewegen ohne auf die Gegenfahrbahn zu kommen. Bei autonomen Systemen wird hingegen eine Spurgenauigkeit von 20 cm gefordert, die zur Zeit weder durch die in den Fahrzeugen serienmäßig vorhandenen Inertialsensordaten noch durch die GNSS-Daten alleine für fahrtechnischen Anwendungen erzielbar sind.<sup>84</sup>

Für Systeme wie beispielsweise Kreuzungsassistent steigen die Anforderungen an Genauigkeit von Positionsdaten mit geringer werdender Fahrzeuggeschwindigkeit. Die erforderlichen Genauigkeiten in Längsrichtung vor Kreuzungsbereichen sind von den adressierten Unfallszenarien und gewählter Eingriffsstrategie abhängig. So ist beispielsweise für den spätestmöglichen Warnzeitpunkt für einen sportlichen Fahrer bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h eine Genauigkeit des Kreuzungsabstands von weniger oder maximal  $\leq 1$  m anzustreben.<sup>85,86</sup>

Unter Berücksichtigung der Ausführungen sind die erforderlichen Genauigkeiten für die unterschiedlichen Anwendungen in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

**Tabelle 2.4:** Genauigkeitsanforderungen an FAS, die eine fahrstreifengenaue Navigation erfordern.

Genauigkeit / Toleranz	Wert
Fahrzeugposition in Längsrichtung	$\pm 10$ m
Fahrzeugposition in Querrichtung Fahrzeugmitten bezogen	Halbe Fahrzeugbreite: $\pm 0,9$ m bis $\pm 0,6$ m Aus Funktionsgründen: $\pm 0,2$ m
Fahrstreifenmitte bezogen	Halbe Fahrstreifenbreite: $\pm 1,5$ m

Diese Genauigkeiten werden aufgrund der standardmäßigen Verwendung von low-cost-Sensoren im Fahrzeugbereich und den damit verbundenen Fehlern in den Messgrößen und deren Aufintegration (Fehlerfortpflanzung) für die Bestimmung der erforderlichen Betrachtungsgrößen selten bzw. gar nicht erreicht.

Um die erforderlichen Positionsgenauigkeiten auch mit low-cost-Sensoren zu erzielen bzw. möglichst nahe an diese Forderungen zu gelangen, ist es möglich, für die Signale

<sup>83</sup>Die Regelfahrstreifenbreite liegt zwischen 2,75 m und 3,5 m. (Vgl. FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN(1996)).

<sup>84</sup>Simon (2003): Führung eines autonomen Straßenfahrzeugs mit redundanten Sensorsystemen S.7, S. 99ff.

<sup>85</sup>Mages/Hopstock/Winner (2007): Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistentz - Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen.

<sup>86</sup>Klanner/Ehmanns/Winner (2006): ConnectedDrive - Vorausschauende Kreuzungsassistentz.

Gierrate  $\dot{\psi}$  und Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  die bereits durch eine Fusion erhaltenen Signale zu verwenden. Hieraus resultiert fahrzeugseitig eine korrigierte Position, die jedoch auch mit fortschreitender Zeit in ihrem Fehler größer wird. Dieser Fehler könnte ebenfalls durch GNSS-Positionsdaten reduziert werden.

### 2.2.3 Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Inertiale Navigationssysteme (INS) autarke Systeme sind, d. h. sie sind auf keinerlei externe Systemkomponenten angewiesen. Diese Systeme liefern neben der Positionsinformation auch die Geschwindigkeits- und Neigungsinformationen mit einer hohen kurzzeitigen Genauigkeit und einer hohen Datenrate (20 ms). Jedoch bleibt die Systemgenauigkeit (bei Verzicht auf stützende externe Beobachtungen) nicht konstant, sondern es ist eine Verschlechterung mit fortschreitender Zeit und in Abhängigkeit von der Qualität der eingesetzten Sensorkomponenten zu beobachten.

Im Gegensatz hierzu liefern GPS-Messungen Positions-, Geschwindigkeits- und Lageinformationen, die sich durch eine hohe und konsistente Langzeitstabilität auszeichnen. Tabelle 2.5 fasst die Eigenschaften der beiden Systeme gegenüberstellend zusammen.

**Tabelle 2.5:** Gegenüberstellung der komplementären Eigenschaften des GPS- und des INS-Systems. Quelle: HANNUSCHKA (2007).

Eigenschaften	GPS	INS
Eigenständig (in sich geschlossen)	Nein	Ja
Verlässlichkeit	Gering	Hoch
Datenrate	Gering	Hoch
Dynamik	Gering Zeitverzögerung Amplitudendämpfung	Hoch
Lageinformation	Nur mit Antennenarray	Ja
Initialisierung	Nicht notwendig	Notwendig
Langzeitstabilität	Sehr gut	Schlecht
Kurzzeitstabilität	Akzeptabel	Sehr gut

Durch eine geeignete Integration beider Systeme ist somit eine Positions-, Geschwindigkeits- und Lagebestimmung mit gleichbleibend hoher Genauigkeit über das gesamte Messintervall vorstellbar, da durch eine GPS-/INS-Integration die langfristigen INS-Fehler detektiert und reduziert werden. Somit wird die Genauigkeit letztlich nur noch durch das Messrauschen der Sensoren vorgegeben.

## 2.3 Integrierte Navigation

Wie aus Tabelle 2.5 ersichtlich, ist durch eine Kombination der beiden Systeme GPS und INS aufgrund Komplementärredundanz<sup>87</sup> eine Steigerung der Genauigkeit und

<sup>87</sup>Komplementärredundanz liegt vor, wenn unterschiedliche Sensoren mit verschiedenen Fehlerquellen verwendet werden. Gegenteil hierzu ist die Parallelredundanz.

Verfügbarkeit vorstellbar. Durch diese sog. *Integrierte Navigation*<sup>88</sup>, deren Vorteile in Tabelle 2.6 dargestellt sind, wird eine Qualitätsverbesserung der Inertialnavigation möglich. Neben dieser Verbesserung ist auch eine Reduzierung der Kosten eines integrierten Navigationssystems erreichbar, da low-cost-Sensoren Verwendung finden, die alleine betrachtet weniger genau sind und geringere Anschaffungskosten verursachen.<sup>89</sup>

**Tabelle 2.6:** Vorteile der integrierten Navigation. Quelle: LÖFFELHOLZ (2003, S. 10).

	Koppelnavigation	GPS	integrierte Navigation
Position	–	sehr gut	sehr gut
Geschwindigkeit	sehr gut	gut	sehr gut
Dynamik	sehr gut	schlecht	sehr gut
Langzeitstabilität	schlecht	sehr gut	sehr gut
Störbarkeit	nicht störbar	leicht störbar	nicht störbar

Die große Relevanz der Forschung auf diesem Gebiet zeigen die Forschungsarbeiten von LEACH (2003), PETOVELLO (2003), WALCHKO (2002). Sie verfolgen alle das Ziel, Sensoren minderer Qualität in einem integrierten Navigationssystem zu verwenden, welche für sich betrachtet für hochpräzise “Stand-Alone“-INS nicht geeignet wären. Hierbei spielt die Stützung durch externe Sensoren (z. B. GPS) eine entscheidende Rolle, um die teilweise großen Sensorfehler zu kompensieren und die INS zu initialisieren.<sup>90</sup> Wird das Ziel verfolgt, diese Fehler mit Hilfe von GNSS-Daten zu reduzieren, werden entsprechende Fusionsansätze benötigt, die diese Fehler vermindern bzw. eliminieren.

Im Folgenden wird daher der aktuelle Stand der Technik und Forschung für die bei der Integrierten Navigation eingesetzten Algorithmen hinsichtlich Fehlermodellentwicklung vorgestellt. Aus der Betrachtung wird neben den Verkehrsleitsystemen und der Mauterfassung, die zum Bereich Infrastruktur zählen, auch der Bereich der geodätischen Anwendungen aufgrund ihres statischen Charakters für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Bei Durchsicht des Stands der Technik und Forschung zeigt sich bei der Integrierten Navigation eine hohe Genauigkeitsanforderung an die Position. Dies ist vor allem im Bereich des Schienenverkehrs zu beobachten, wo sich GNSS-gestützte Systeme aufgrund der an sie gestellten hohen Anforderungen noch nicht durchgesetzt haben. Besonders in der Sicherungs- und Leittechnik werden Genauigkeitsanforderungen im dynamischen Betrieb im cm-Bereich gefordert. Auch das Problem der Signalstörungen durch Abschattungen in dicht bebauten Gebieten oder bei Tunnelfahrten schränkt den Einsatz von GNSS stark ein. Daher wurden in jüngster Vergangenheit Pilotprojekte durchgeführt, die sich mit den genannten Problemen beschäftigen.

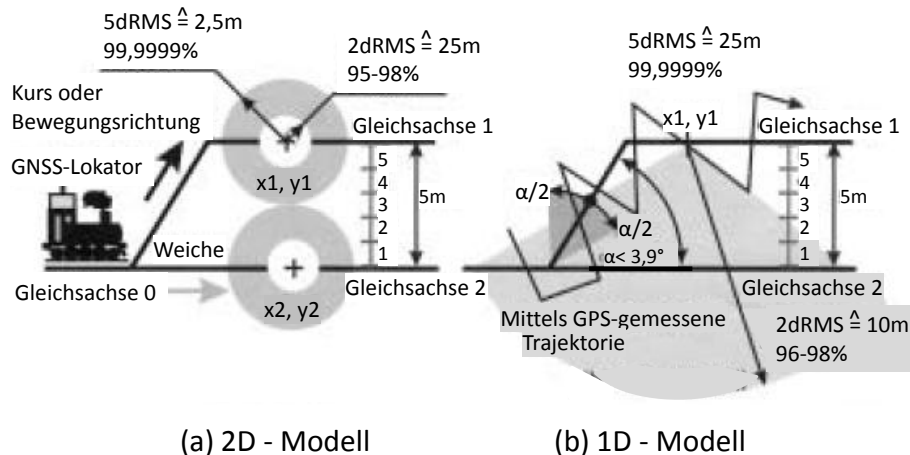
---

<sup>88</sup>Das Ziel der Integrierten Navigation ist unter Nutzung verschiedener Systeme/Sensoren und Verfahren die Herstellung einer Redundanz, die eine Steigerung der Genauigkeit und Verfügbarkeit bewirkt.

<sup>89</sup>Liang (1995): An overview of a generic multi-sensor integrated navigation system design.

<sup>90</sup>Söhne (1996): Ein hybrides System in der Geodäsie. Einsatz des NAVSTAR GPS mit dem Strapdown-Inertial-Navigationssystem LASERNAV II für kinematische Punktbestimmung und Orientierung.

Im Rahmen des Forschungsbereichs der Sicherungs- und Leittechnik in der Bahnindustrie wurde auf der Suche nach neuen und weniger kostenintensiven Methoden<sup>91</sup> in Richtung fahrzeugbasierter Systeme das Projekt Apollo<sup>92</sup> ins Leben gerufen. Es hat das Ziel die genaue Position bei einem Gleiswechsel an einer Weiche zu bestimmen. Für einen Einsatz von GPS in der Eisenbahnsicherungstechnik wird eine Wahrscheinlichkeit von 99,9999 % für die Zuordnung des Zuges zu einem von mehreren parallel verlaufenden Gleisen gefordert. Ferner muss gewährleistet sein, dass ein bereits lokalisierter Zug auf einer Strecke ohne Richtungsänderung (Gleichwechsel) zuverlässig erkannt wird und dass diese Informationen gespeichert werden. Somit ist ein möglicher Fehler detektierbar. Daher ist für eine zuverlässige Ortung des Zuges ein Gleiswechsel an einer Weiche am wichtigsten. Ferner wurde in diesem Projekt die Frage beantwortet, ob die Informationen von GPS-Empfängern über Ort und Fahrtrichtung des Fahrzeugs zusammen mit weiteren Daten von Sensoren im Fahrzeug für die Richtungserfassung an der Weiche benutzt werden können. Hierzu wurden zwei Grundmodelle der Zugrichtungserfassung analysiert, die in Abbildung 2.6 dargestellt sind.



**Abbildung 2.6:** Modelle der Erfassung der Zugrichtung: (a) Zweidimensionales Modell, (b) Eindimensionales Modell. Quelle: FILIP (2001, S.17).

Während das zweidimensionale Modell (Abbildung 2.6 a<sup>93</sup>) den Ort bestimmt, wird im eindimensionalen Fall (Abbildung 2.6 b) nur die Richtungsinformation der Fahrzeugbewegung ausgenutzt. Dieses 1D-Modell basiert auf der Idee, dass sich der Zug auf einer zuvor zentimetergenau vermessenen Bahnlinie bewegt und seine Bewegungsrichtung nur an definierten Stellen, den Weichen, ändert. Der von den GPS-Empfängern bereitgestellte Richtungswinkel wird als Grundinformation zur Erfassung des Übergangs von einem in das andere Gleis konzipiert. Dabei ist die Erfassung des Übergangs von zwei parallelen Gleisen am schwierigsten, wozu eine Streckenlänge von 30 m zur Verfügung steht. Für diese Untersuchung wurden zwei marktgängige GPS-Empfänger verwendet. Bei dem ersten Gerät handelte es sich um ein GPS/GLONASS<sup>94</sup>-Kombigerät mit einer im

<sup>91</sup>Gegenwärtig erfolgt die Zugortung hauptsächlich über streckenseitige Einrichtungen.

<sup>92</sup>Apollo steht für Advanced Position Locator.

<sup>93</sup>2dRMS = double distance root mean square, siehe Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation, S. 94.

<sup>94</sup>GLONASS ist das russische GNSS.

DGPS-Betrieb erreichbaren Genauigkeit von 1 m und ein low-cost-GPS-Gerät, das im Standardmodus GPS C/A eine Genauigkeit von 11 m erreicht.

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass mit Hilfe des Kombigerätes eine Erfassung der Bewegungsrichtung im Weichenbereich möglich ist. Zum anderen wird eine Unterscheidung von parallel verlaufenden Gleisen mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99,9999 % mit einem Ortungsfehler von kleiner als 1 m<sup>95</sup> erzielt. Dies entspricht einer Genauigkeitsanforderung von 2,5 m (Mindestabstände von parallelen Gleisachsen betragen 3,8 m).<sup>96</sup> Im Gegensatz hierzu erfüllt das C/A-Standardmodus-GPS-Gerät diese Anforderungen nicht. Hierfür müssten die beiden parallelen Gleise einen Abstand von mindestens 55 m aufweisen. Ferner konnte nicht geklärt werden, ob die mit dem C/A-Standardmodus-GPS-Gerät gemessenen Richtungswinkel zur Richtungserfassung einsetzbar sind.

Da sich jedoch mit Hilfe eines eingesetzten Lasergyroskops die Richtungsänderungen an der Weiche sehr gut reproduzieren ließen, wurde in einem ebenfalls im Apolo-Projekt integrierten Teilprojekt eine auf GPS/EGNOS<sup>97</sup>/DGPS und Inertialnavigation für sicherheitskritische Bahnapplikationen basierende Zugortung entwickelt. Hierzu wurde der Zuglokator namens Apolo sowie ein Odometer in die Versuchslokomotive eingebaut. Unter Normalbedingungen<sup>98</sup> wurde beim Apolo-Lokator im GPS C/A-Modus eine Genauigkeit von 3 m bis 4 m erzielt, die durch die Verwendung von EGNOS-Korrekturdaten bzw. von Lokaldifferenzkorrekturdaten auf unter 1 m sank. Bei einem GNSS-Ausfall (z. B. Brückendurchfahrt) wird die absolute Ortung des Apolo-Lokators durch die relative Ortung mittels einer Kalmanfilterung der Odometer- und Gyroskopinformationen gestützt, wobei bei kurzzeitigen GPS-Ausfällen die Ergebnisse nicht beeinflusst werden.<sup>99</sup>

Zwar wurde im Apolo-Projekt gezeigt, dass die Genauigkeitsanforderungen für sicherheitskritische Anwendungen im Bahnbereich von weniger als 2,5 m unter Verwendung von Korrekturdaten mittels GPS grundsätzlich erzielbar ist, aber die zur Zeit erreichbare Integrität und Verfügbarkeit einer Positionsbestimmung durch GPS (mit EGNOS) reichen für solche sicherheitskritischen Anwendungen nicht aus. In diesem Zusammenhang wird unter Integrität die Fähigkeit des Systems verstanden, den Nutzer rechtzeitig über das Überschreiten einer spezifizierten Grenze der auftretenden Fehler zu informieren.<sup>100</sup>

Genau an dieser Stelle setzt das Projekt INTEGRAIL<sup>101</sup> an. Das Projekt hatte die Bewertung der Systemleistungen von GPS/EGNOS bezüglich den Kriterien Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit unter realen Eisenbahnbedingungen zum Ziel. Hierzu wurde eine integrierte Lösung mit GNSS und zusätzlichen Sensoren eingesetzt, wobei die GNSS-Positionsbestimmung (GPS-Ortung) die Referenzwerte für die Initialisierung und Kalibrie-

---

<sup>95</sup>Unter Verwendung von DGPS und einer Geschwindigkeit von 8 km/h.

<sup>96</sup>Filip/Mocek/Bazant (2001): Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen S. 17.

<sup>97</sup>EGNOS = European Geostationary Overlay System ist ein allgemein verfügbares Korrekturdatensystem.

<sup>98</sup>Anzahl von mindestens fünf Satelliten, keine Tunnelfahrten, wenig Abschattung.

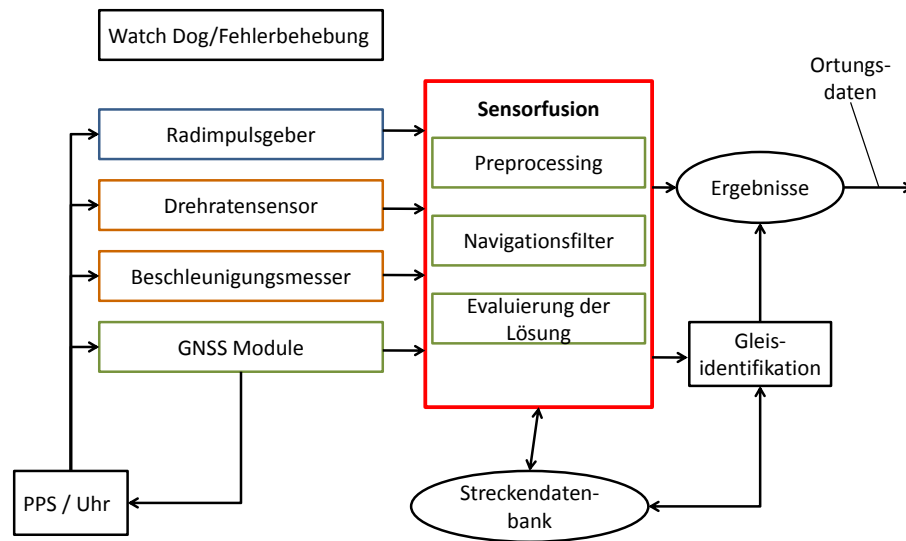
<sup>99</sup>Filip/Mocek/Bazant (2001): Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen S. 19f.

<sup>100</sup>Mansfeld (2004): Satellitenortung und Navigation S. 202.

<sup>101</sup>Dieses Projekt ist nicht mit dem Projekt InteGRail (Intelligent Integration of Railway Systems) zu verwechseln, das v. a. die Kommunikation Train2Train bzw. Train2Infrastructure zum Schwerpunkt hat und bis 01/2009 lief.



zung der Stützsensoren (Geschwindigkeits- und Entfernungsmessungen) liefern, die über die für die Zugortung geforderte Leistungsfähigkeit verfügen.



**Abbildung 2.7:** Konfiguration der Sensoren bei INTEGRAIL. Quelle: GU (2005) und KAYSERTHREDE (2007).

In Abbildung 2.7 ist die Konfiguration der Sensoren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass als Stützsensoren neben dem Radimpulsgeber, bei dem bei Brems- oder Beschleunigungsphasen Rutsch- oder Schlupfprobleme auftreten können, noch ein Drehraten (FOG<sup>102</sup>-Prinzip)- und ein Beschleunigungssensor eingesetzt werden. Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit zugrunde gelegten Voraussetzung (keine Digitale Karte, keine Datenbank) wird auch eine Streckendatenbank für die Fusion eingesetzt. Die Fusion selbst besteht aus drei Modulen. Neben dem Preprocessing ist das Navigationsfilter in Form eines Kalmanfilters das zweite Modul. Die sich aus diesem Filter ergebenden Daten werden einem Bewertungsmodul zugeführt, ehe die Daten zur Weiterverwendung zur Verfügung gestellt werden. Die in Tabelle 2.7 dargestellten Ergebnisse (bezogen auf die Referenzortung, die eine Genauigkeit von  $\pm 13$  cm besitzt) zeigen, dass die für die Zugortung erforderliche Längsgenauigkeit von  $\pm 5$  m + 2 % der zurückgelegten Wegstrecke<sup>103</sup> erfüllt ist. Jedoch ist eine Gleiserkennung nur für eingleisige Strecken mit nur wenigen parallel verlaufenden Gleisen in den Bahnhofsbereichen möglich, da in diesem Bereich die Gleisachsen ca. 4 m bis 5 m auseinander liegen.<sup>104</sup>

Bei den bisher vorgestellten Untersuchungen war bei den Ortungsszenarien immer voller Satellitenempfang (d. h. mindestens vier Satelliten) die Voraussetzung. Diese Annahme wurde in dem Projekt SATNAB<sup>105</sup> aufgehoben. Dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt hat die experimentelle Überprüfung der Ortungsbestim-

<sup>102</sup>FOG steht für Fiber Optic Gyroscope, d. h., Glasfaserkreisel.

<sup>103</sup>Gu (2005): Die Machbarkeit von GNSS/Galileo-basierter Zugortung für sicherheitsrelevante Anwendungen S. 10.

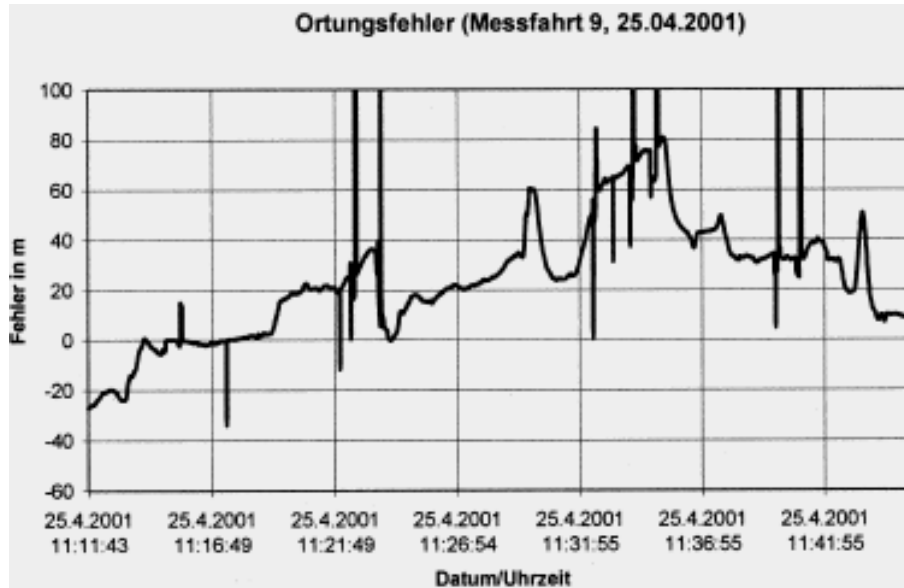
<sup>104</sup>Filip/Mocek/Bazant (2001): Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen S. 17.

<sup>105</sup>Die Abkürzung SATNAB steht für satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment.

**Tabelle 2.7:** Ortungsgenauigkeit des INTEGRAIL-Bordgeräts in Bezug auf die Referenzmessung. Quelle: GU (2005, S. 10).

	dPos
Proben	59330
Mittelwert [m]	3,635
Standardabweichung [m]	5,422
Median [m]	0,791

mung mit nur einem oder zwei Satelliten zum Ziel. Dies ist möglich, wenn die Zeit auf dem Fahrzeug mit einer hochpräzisen Uhr (Atomuhr) fortgeschrieben wird<sup>106</sup> und aus einer digitalen Karte zusätzlich die Informationen des Streckenverlaufs entnommen werden<sup>107</sup>. Daher bestand das erste Experiment des SATNAB-Projektes in der Genauigkeitsuntersuchung der Verfahren zur Schrägentfernungsbestimmung mittels Atomuhr durch ein satellitenunabhängiges Referenzmesssystem<sup>108</sup>, da keine Erfahrungen mit bewegten hochpräzisen Uhren (inklusive Vibrationen) existieren. Gegenstand des zweiten Experiments war die Ortung eines Schienenfahrzeugs mit nur einem oder mit zwei Satellitensignalen unter Verwendung einer digitalen Karte. Die Versuche für das zweite Experiment, die Ortungsbestimmung, wurden bei Geschwindigkeiten von 120 km/h und für drei Messfahrten bei etwa 200 km/h auf einer Strecke von 40 km durchgeführt. Abbildung 2.8 zeigt exemplarisch für eine Messfahrt den Ortungsfehler (Ortungsfehler in Fahrtrichtung, d. h. die Abweichung in Schienenrichtung) über der Zeit.



**Abbildung 2.8:** Ortungsfehler über der Zeit. Quelle: DÄUBLER (2002).

Es sind unkorrigierte Ortungsfehler im Bereich von etwa  $-20$  m bis ca.  $80$  m zu beobachten (siehe Abbildung 2.8). Der mittlere Fehler beträgt etwa  $25$  m und die Standard-

<sup>106</sup>Dies ersetzt einen von vier notwendigen Satelliten.

<sup>107</sup>Dies ersetzt zwei von vier Satelliten.

<sup>108</sup>Hier kam ein Lasertaster sowie Ultraschall- und Beschleunigungssensoren zum Einsatz.

abweichung beläuft sich auf etwa 20 m.<sup>109</sup> Ursachen für die sehr großen Schwankungen der Ortungsergebnisse sind neben der Drift der Atomuhr (die im 2-Satellitenszenario rechnerisch eliminiert werden konnte) die teilweise auftretenden Abschattungen sämtlicher Satellitensignale an streckenseitigen Einrichtungen. Dies ist in Abbildung 2.8 während der Zeit 11:11 Uhr und 11:16 Uhr zu beobachten, bei denen gerade eine Durchfahrt einer Unterführung stattfand. Unter Anwendung einer Nachverarbeitung der Messdaten in Form von Filterung und Verwerfen von Ortungsausreißern, die von der Referenzposition mehr als 100 m im positiven oder negativen Sinne abweichen<sup>110</sup> ergeben sich zwar Verbesserungen (Standardabweichung im 1-Satellitenbetrieb liegt für alle Messfahrten unter 20 m, im 2-Satellitenbetrieb sogar unter 15 m.), aber die geforderte Genauigkeit von 5 m bis 10 m konnte nur für Streckenlängen unter 4 km erzielt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Ortung im 1- und 2-Satellitenbetrieb im spurgebundenen Verkehr prinzipiell möglich ist, aber systembedingt eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Signalbeeinflussungen und -unterbrechungen aufweisen. Die Messgenauigkeiten betragen im 2-Satellitenbetrieb etwa 10 m, womit eine Längsortung im spurgebundenen Verkehr ausführbar ist. Die Rubidium-Atomuhrfehlerdriften im 1-Satellitenbetrieb für Streckenlängen von etwa 40 km sind zu groß, um damit eine ausreichende Messgenauigkeit für eine kontinuierliche Ortung zu erreichen. Lediglich für kurze Streckenabschnitte (1 km – 4 km) werden die Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

Wie aus den bisherigen Ausführungen ersichtlich, sind die hohen Anforderungen, gerade für sicherheitskritische Anwendungen wie im Schienenverkehr, ohne Nutzung von Ergänzungssystemen und nur durch GNSS nicht erzielbar. Genau dieser Aspekt wird in dem Projekt GLORIA<sup>111</sup> aufgegriffen, in dem es um die Entwicklung von hybriden Navigationsempfängern ging, welche eine Sensorfusion auf breiter Ebene realisieren. Für dieses Vorhaben wurden zwei Empfänger entwickelt und für Testzwecke wurden neben statischen und sog. Stop-and-Go-Tests<sup>112</sup> mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten<sup>113</sup> auch kinematische Tests auf Landstraßen durchgeführt. Während der erste Empfänger namens DURAN<sup>114,115</sup> durch die Kombination von GPS und des Radionavigationssystems LORAN-C<sup>116</sup> gekennzeichnet war, vereinte der zweite Empfänger namens MUSEN<sup>117</sup> GPS, LORAN-C und Koppelnavigation (Dead Reckoning) mit dem Ziel eine bestmögliche Navigationslösung zu generieren. LORAN-C diente bei beiden Empfängern als Stützkomponente.

<sup>109</sup>Däubler/Bikker/Schnieder (2002): SATNAB - Satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment S. 13.

<sup>110</sup>Solche Ausreißer sind auf die systembedingte Empfindlichkeit des Verfahrens zurückzuführen, da ein Fahrzeug aufgrund seiner kontinuierlichen Dynamik keine diskreten Sprünge aufweist.

<sup>111</sup>GNSS & Loran-C in Road and Rail Applications.

<sup>112</sup>Ein Straßenstück mit einer Länge von 800 m wurde mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgefahren, wobei an zuvor definierten Stellen das Fahrzeug stoppte, eine Standmessung durchführte und anschließend weiterfuhr.

<sup>113</sup>In der Literaturquelle sind keine Geschwindigkeitsangaben vorhanden.

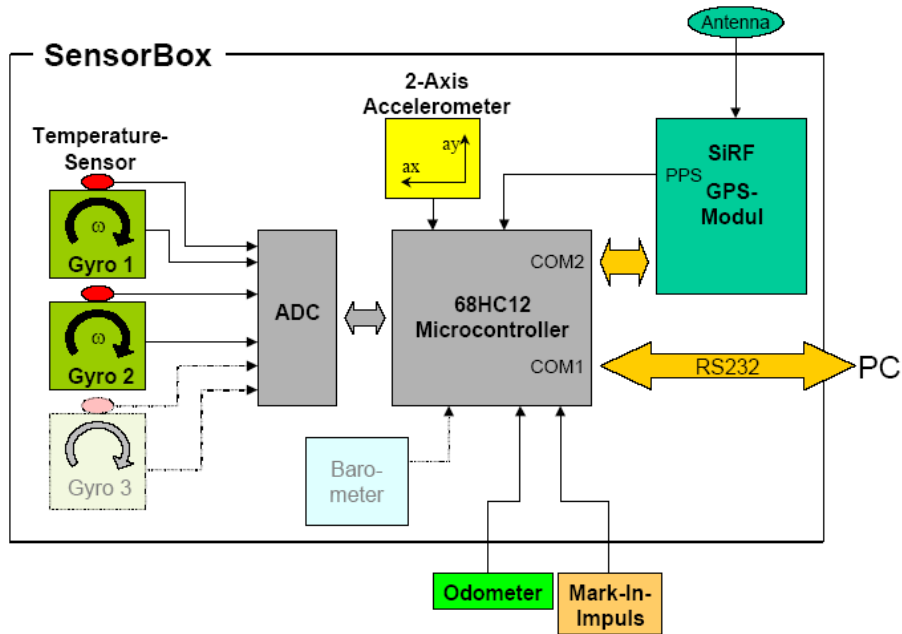
<sup>114</sup>DURAN steht für Dual Radio Navigation Receiver.

<sup>115</sup>Vallant (2002): GLORIA Hardwareinformationen, S. 1f.

<sup>116</sup>LORAN steht für Long Range Navigation und ist ein Funknavigationssystem, welches vorwiegend zu Navigationszwecken in der See- und Luftfahrt verwendet wird.

<sup>117</sup>MUSEN steht für Multi-Sensor-Navigation-Unit.

Neben dem LORAN-C-Modul und den in Abbildung 2.9 dargestellten Sensoren, die das Sensormodul bilden, besteht der MUSEN-Empfänger noch aus einem Sensorfusionsmodul.



**Abbildung 2.9:** Blockdiagramm der Sensorbox. Quelle: PFISTER (2002, S. 3).

Dieses Sensorfusionsmodul basiert auf einem iterativen, erweiterten Kalmanfilter und enthält einen sog. *Mathematischen Navigations-Monitor* (MNM) als Filterstruktur. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass alle Sensordaten als Messdaten behandelt werden. In der Folge beinhaltet das Navigationssystem nur noch Stützsensoren, die beliebig austauschbar sind und gleichberechtigt in das System einfließen.<sup>118</sup> Die Ergebnisse der Versuche, die in und um die Stadt Delft durchgeführt wurden und eine Wegstrecke von 16 km aufweisen, zeigen, dass bei Verwendung von GPS, Koppelnavigation und LORAN-C auch bei einem GPS-Ausfall über eine Länge von 5 km kein Driftverhalten eintritt im Gegensatz zur alleinigen Kombination von GPS und Koppelnavigation. Die RMS-Werte (für die Länge und Breite) für den 10-minütigen Ausfall betragen für GPS/Koppelnavigation 160 m und 220 m im Vergleich zu 17 m und 24 m für die GPS/Koppelnavigation/LORAN-C-Lösung. Auch wenn durch die Verwendung von LORAN-C nahezu 90 % der Positionsfehler kompensiert werden konnten<sup>119</sup>, bleibt die Verwendung von LORAN-C (im Schienenverkehr) noch offen, da LORAN-C in einigen Gebieten keine ausreichende Abdeckung aufweist und die Zukunft des LORAN-C-Systems eher ungewiss ist.<sup>120,121</sup>

<sup>118</sup>Pfister (2000): Sicherheitsrelevante Navigation für ein neues Rollführungskonzept am Flughafen Frankfurt/Main S. 117.

<sup>119</sup>Pfister et al. (2002): Design of a High End Navigation Unit applying GNSS, LORAN-C and Dead Reckoning Sensors S. 6.

<sup>120</sup>In Frankreich ist eine bessere Abdeckung gegeben als beispielsweise in Belgien.

<sup>121</sup>Lenz (1999): Reaktivierung von Schienennebenstrecken durch den Einsatz satellitengestützten Zugleitbetriebs S. 61f.

Nicht nur im Schienenverkehr, sondern auch in der Landwirtschaft spielt die genaue Positionsbestimmung eine große Rolle. So betragen nach STEMPFHUBER (2002)<sup>122</sup> die geforderten Genauigkeiten  $\pm 10$  m für die Zielsuche und bis  $\pm 0,01$  m für die Feldrobotik. Werden so hohe Genauigkeiten gefordert, die nur durch die Bildung eines Gesamtsystems erzielbar sind, wird dies weltweit auch als *Precision Farming* bzw. als *Präziser Ackerbau* bezeichnet. Das Gesamtsystem besteht aus der Zusammenführung und Vernetzung der Einzelsensoren mit allen verfügbaren Zusatzdaten wie Informationen der Geländegrenzen und -form, Bodenqualität sowie Bodenzustand. Für diese unterschiedlichen Genauigkeits- und Anforderungsklassen existieren bereits konzeptionelle Kalibrierungsmethoden (Grundlagen mit Lösungsansätzen), deren Umsetzung v. a. in den USA erfolgt sind.<sup>123</sup>

Anders als auf der Straße müssen bei landwirtschaftlichen Anwendungen aufgrund des hängigen, unebenen Geländes auch die Längs- und Querneigungen sowie Ablagen in Fahrtrichtungen und seitliche Verschwenkungen zwischen Anbaugerät und Zugmaschine berücksichtigt werden. Trotz dieser schwierigen Rahmenbedingungen haben sich automatische Lenksysteme, die das GPS als Ortungsverfahren nutzen, seit 2003 auf dem Markt etabliert und zahlreiche Hersteller<sup>124</sup> bieten solche Systeme an. Gründe für die Etablierung sind zum einen die Entlastung des Fahrers von arbeitsintensiven Arbeiten und eine deutliche Reduzierung des Saatgut- und Pestizitbekämpfungsmittelverbrauchs infolge Reduzierung von Überlappungsbereichen.

In einem von der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt wurden neben dem automatischen Lenken mit GPS auch die Genauigkeiten für verschiedene Fahrkurse ( $90^\circ$ -,  $180^\circ$ -,  $270^\circ$ - Wendeleitlinien) bzgl. Fehlwinkel, seitlicher Versatz für die Wendevorgänge und für das Anfahren der neuen Leitlinie untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass mit einem Feldhäcksler für gerade Leitlinien eine Standardabweichung von 3,5 cm und für Wendeleitlinien 10 cm (jeweils bezogen auf die relative Positionierung) erzielbar ist.<sup>125</sup> Sowohl bei den Forschungsarbeiten (z. B. Projekt "preargo") als auch bei den von den Herstellern angebotenen Systemen wird bei teilschlagspezifischer Flächenbewirtschaftung<sup>126</sup> die Positionsbestimmung ausschließlich durch Zwei-Frequenz-DGPS-Empfänger realisiert. Ferner zeigte sich in den von STEMPFHUBER (2002) durchgeführten Feldversuchen eine erreichbare Positionsgenauigkeit von etwa  $\pm 2$  m bis  $\pm 3$  m. Durch die implementierten Filter (meist konventionelle Kalmanfilter) und Algorithmen zur Pseudorange glättung ist die Relativgenauigkeit, bezogen z. B. auf eine Fahrgasse, um den Faktor 2 – 3 genauer.<sup>127</sup>

<sup>122</sup>Stempfhuber (2002): Kalibrierung GPS gestützter Positionsbestimmung in Precision Farming S. 4.

<sup>123</sup>Stempfhuber (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen S. 2ff.

<sup>124</sup>Kutzbach/Stoll (2004): Autonome Fahrzeuge - Mit Satellitennavigation präzise fahren S. 20.

<sup>125</sup>Kutzbach/Stoll (2000): Führung von Landmaschinen mit GPS S. 333ff.

<sup>126</sup>Die teilschlagspezifische Flächenbewirtschaftung basiert auf einer Grund- bzw. Arbeitskarte, die die notwendigen Ausgangsinformationen wie z. B. Grundstücksgrenzen, Hangneigung enthält und umfasst alle Maßnahmen, die mit Hilfe der Ortung die Inhomogenitäten eines Feldstückes berücksichtigt. Die Flächenbewirtschaftung ist ein Bestandteil des Precision Farming.

<sup>127</sup>Stempfhuber (2002): Kalibrierung GPS gestützter Positionsbestimmung in Precision Farming S. 5.

Die Weiterentwicklung hin zu autonomer Schlepperführung (Bodenbearbeitung ohne Maschinenführer)<sup>128</sup> fand seine Umsetzung im “AGRO NAV“-System der Fa. GeoTec<sup>129</sup>, das neben mehreren Neigungssensoren ein kombiniertes INS-RTKGPS-Ortungssystem mit Kalmanfilterung verwendet. Die kinematische Positionierung und die Synchronisierung der Sensoren werden in Echtzeit durchgeführt.<sup>130</sup> Angaben zu den hierbei erzielten Genauigkeiten sind bisher jedoch nicht veröffentlicht.

Bei allen diesen landwirtschaftlichen Anwendungen kommen neben mehreren GPS-Empfängern auch kostenintensive Neigungswinkelmesser und Kreiselplattformen zum Einsatz, die im Automotivebereich aus Kostengründen nicht eingesetzt werden können. Aber auch in der Landwirtschaft wird für einen breiten Einsatzbereich in Zukunft das Augenmerk auf der Gewinnung von Positionsinformationen mit “low-cost“-Sensoren gelegt.

Eine weiteres Anwendungsgebiet ist im Bereich des Hafenmanagements zu finden. Hier werden hohe Positionsgenauigkeiten gefordert, die seit Jahren mit Hilfe von automatisch gelenkten RTG's<sup>131</sup> (siehe Abbildung 2.10) und SC's<sup>132</sup> erfolgreich erzielt werden.



**Abbildung 2.10:** RTG während eines Beladevorgangs von einem Container auf einen LkW.  
Quelle: GOETTING (2006).

Diese Systeme (RTG, SC) eignen sich aufgrund ihrer Höhe besonders gut für GNSS-Anwendung, da hier eine freie Sicht zum Himmel den Empfang von Satellitensignalen quasi garantiert und der Empfang somit keinerlei Aussetzern oder Signalverschlechterungen durch Abschattungen unterworfen ist. Ferner führt der Kran nur geradlinige Bewegungen auf meist fest definierten Strecken aus. Die automatische Lenkung von RTG's und SC's basiert ausschließlich auf dem Prinzip des PDGPS (Präzisions-Differential-GPS), das eine Genauigkeit von  $\pm 3$  cm erzielt<sup>133</sup>, und der Kombination mit Odometern, die durch die Berechnung der Radumdrehungen die Position und die Winkeländerung des bewegten Kranes festlegen. Die aus dem odometrischen System berechnete und über der Zeit immer

---

<sup>128</sup>Huster/Hartmann/Diekhans (2004): Überladeassistenzsystem.

<sup>129</sup>Bittner (2000): Autonome Fahrzeuge - Aufbau und erste Erfahrungsberichte.

<sup>130</sup>Inoue et al. (2003): Guidance System for Farm Work using GPS and Adaptive Control Method for Autonomous Tractor.

<sup>131</sup>RTG steht für Rubber Tire Gantry Crane.

<sup>132</sup>SC steht für Straddle Carrier.

<sup>133</sup>Bei abschattungsfreiem Empfang ist die Genauigkeit größer.

ungenauer werdende Position wird über PDGPS korrigiert, indem die hochfrequenten Odometerdaten durch die niederfrequenten GPS-Messungen gestützt werden. Dieses System nutzt eine Kalmanfilterung und ist dadurch auch gegen kurze GPS-Ausfälle resistent.<sup>134</sup> Neben dem Beladevorgang wird heutzutage auch die Containerverfolgung über GPS realisiert.<sup>135</sup> Diese Anwendung kann jedoch nicht uneingeschränkt auf das in der Arbeit vorliegende Vorhaben übertragen werden, da zum einen bei der vorgestellten Hafenanwendung die Beladung innerhalb eines begrenzten Gebietes erfolgt und zum anderen die Rahmenbedingungen freie Sicht und keine Abschattungen bei den fahrzeugtechnischen Anwendungen nicht gegeben sind.

Die Positionsgenauigkeiten im Subdezimeterbereich sind auch im Automotivebereich, v. a. für ein autonomes Fahren erforderlich. Einen Schritt in diese Richtung beschreibt SIMON (2003) in seiner Arbeit. Er untersucht die Art der Bahnführung eines autonomen Fahrzeugs sowie die zusätzliche Verwendung von neuartigen, ursprünglich für spezielle Fahrerassistenzsysteme vorgesehene Sensoren für einen Einsatz für Navigationsaufgaben. Dabei zeigt sich, dass für die Erfüllung der geometrischen Anforderungen an die Nominaltrajektorie des Straßenfahrzeugs für die Bahnplanung die Verwendung von Bèziersplines 5.Ordnung erforderlich ist. Die für ein autonomes Straßenfahrzeug erforderliche Fahrzeugortung realisiert SIMON unter Verwendung von GPS-Messungen, Einsatz von fahrzeuginternen Sensoren, Umfeldsensoren zur Wahrnehmung von Objekten und Fahrbahnmarkierungen, deren Daten er unter Einsatz eines Kalmanfilters fusioniert. Die Qualität der Fusion ist jedoch stark abhängig von der Infrastruktur (z. B. fehlende Fahrbahnranderkennung, Abschattungen), die Messsignalausfälle verursacht. Diese Einbuße wird laut SIMON durch die erwartete Genauigkeitssteigerung von Ortungssystemen und Digitalen Karten sowie durch die wachsende Anzahl an Umfeldwahrnehmungssensoren reduziert. SIMON geht jedoch nicht auf die hierdurch entstehende Abhängigkeit von der Aktualität der Digitalen Karte und von den Systembetreibern der GNSS-Systeme ein.

Dass das autonome Fahren trotz den hohen geforderten Positionsgenauigkeiten prinzipiell möglich ist, zeigen zahlreiche Forschungsarbeiten.<sup>136,137</sup> Bei all diesen Aktivitäten werden jedoch Sensoren verwendet, deren Einsatz in Serienfahrzeugen aufgrund des Preises nicht realistisch erscheint (beispielsweise Kreiselplattformen mit GPS-Stützung im Wert von mehr als 60.000 Euro ).<sup>138</sup>

So zeigen beispielsweise aktuelle Projekte, dass eine selbstständige Routenführung unter enormem technischen Aufwand realisierbar ist. Gerade die militärischen Einrichtungen zeigen großes Interesse an unbemannten Schiffen, Fahrzeugen und Fluggeräten. Neben unbemannten Aufklärungs- und Angriffsdrohnen in der Luftfahrt wird unbemannten Landfahrzeugen, vor allem im Aufklärungsbereich, großes Potenzial zugeschrieben. Die DARPA<sup>139</sup> veranstaltet jährlich einen Wettbewerb zur Förderung autonomer Fahrzeuge. Im Jahr 2005 war die Aufgabe eine etwa 175 Meilen lange, nur durch wenige

<sup>134</sup>Götting: Automatische Lenkung von Kranen und Fahrzeugen mit Hilfe von DGPS S. 14.

<sup>135</sup>Koch (2004): Überwachungseinrichtung zur Überwachung von Containern.

<sup>136</sup>Dickmanns et al. (1994): The seeing passenger car "VaMoRs-P".

<sup>137</sup>N.N. (2001): Fahrerlose Lkw in Aktion, Automatisierung mit integriertem Antrieb.

<sup>138</sup>Bock et al. (2005): Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme S. 10ff.

<sup>139</sup>US-amerikanische Defense Advanced Research Projects Agency

Wegpunkte gekennzeichnete Wegstrecke mit einer vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit selbstständig und ohne menschliche Eingriffe durch die Mojave-Wüste in den USA in maximal 10 Stunden zurückzulegen. Durch den Einsatz von zahlreichen Sensoren und dem effizienten Einsatz von Software wurde diese Aufgabe erfolgreich gelöst.<sup>140</sup> Durch den Einsatz einer Inertialplattform und ihrer Sensoren war es möglich, auch bei einem ein- bis zweiminütigen Ausfall des GPS-Signals die vorgegebene Route zu halten. So konnte bei einer ohne GPS-Signal gefahrenen Strecke von 1,3 km eine Kursabweichung von lediglich  $1,7^\circ$  erreicht werden. Die allgemeine laterale Navigationsgenauigkeit lag bei etwa 30 cm. In 4,7 % der Fahrzeit lag die GPS-Abweichung bei 60 cm oder mehr, was ohne die Umfeldsensoren und aufgrund unzureichender Information zu den Wegpunkten auf der Digitalen Karte zu einem Ausfall des Fahrzeugs geführt hätte. Bereits hier wird deutlich, dass die Aktualität der Digitalen Karte und deren Genauigkeit einen großen Einfluss auf das erzielbare Ergebnis hat.

HAMBERGER (1999) hat in seiner Arbeit für ein adaptives Antriebsmanagement für die Streckenvorausschau den Ansatz verfolgt, Karten vollständig selbst aufzubauen, um dem Nachteil einer hohen Ungenauigkeit zu entgehen.<sup>141</sup> Dies ist seit 2001 durch die Versuchsfahrzeuge Mobile-Strassen-Erfassungs-System namens "MoSES"<sup>142</sup> oder "KISS" möglich. Hierbei handelt es sich um Multisensorsysteme, die aus einem Stereokamera paar mit zwei photogrammetrischen Messkameras, zwei digitalen Kameras zur Bilddokumentation, zwei Laserscannern und einem hochpräzisen DGPS-Empfänger zur Bestimmung einer Raumtrajektorie in Echtzeit bestehen. Hierdurch wird die Vermessung des Straßenverlaufs und die Positionsbestimmung von Objekten entlang der Straße sowie die Erstellung digitaler Modelle der Fahrbahnoberfläche oder von Höhenprofilen für Fahrstreifen bei Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h möglich. Der Einsatz solcher Systeme ist jedoch sehr kostenintensiv und somit ist die Aktualität Digitaler Karten, wie sie für FAS erforderlich sind, auf Dauer kaum zu gewährleisten. Jedoch könnte die Aktualisierung Digitaler Karten mittel- bis langfristig durch Serienfahrzeuge erfolgen, wenn diese ohnehin mit umfelderfassender Sensorik ausgestattet sind (Stichwort: Car2X-Kommunikation, weitere Informationen siehe FREYMAN (2004)<sup>143</sup>, NÖCKER (2005)<sup>144</sup>).

Neben der Position stellt die richtige Trajektorienwahl und die richtige Wahl der Einlenkpunkte (siehe Abbildung 2.11) eines der Hauptprobleme bei der Kreuzungsassistenz dar, die den Fahrer bei einem Abbiegevorgang unterstützen soll.

Für die Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit und für die Warnung des Fahrers ist die Kenntnis der Position und Geschwindigkeit sowohl des eigenen Fahrzeugs als auch fremder Fahrzeuge im Querverkehr erforderlich. Die im Kreuzungsbereich geforderten hohen Genauigkeiten, die auch im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (weniger als 30 km/h) noch eingehalten werden müssen, sind durch die Kombination von DGPS, Inertialsensorik sowie Car2Car-Kommunikation möglich.<sup>145</sup>

---

<sup>140</sup>Thrun (2005): Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford S. 9ff.

<sup>141</sup>Hamberger (1999): Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädikativen Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung.

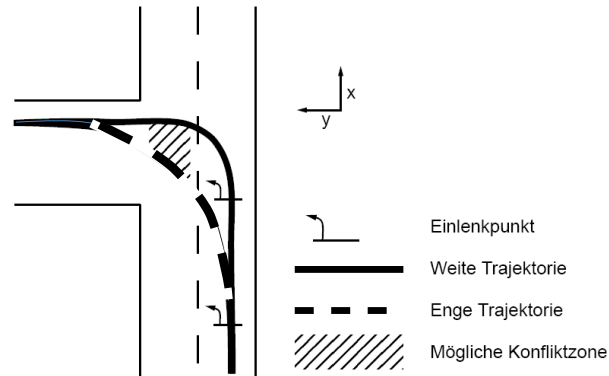
<sup>142</sup>Gräfe/Lang/Banemann (2005): Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme.

<sup>143</sup>Freyman (2004): BMW Group Forschung und Technik S. 15.

<sup>144</sup>Nöcker/Mezger/Kerner (2005): Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme S. 7ff.

<sup>145</sup>Mages/Hopstock/Winner (2007): Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenz - Erkennung von Gefah-





**Abbildung 2.11:** Problem der Trajektorienwahl und Einlenkpunkte.

Quelle: MEITINGER (2006, S. 7).

Ein vorgeschlagener Lösungsansatz für die Bestimmung der Fahrzeugposition ist die Verwendung eines DGPS mit einer Genauigkeit von zwei bis drei Metern. Da die Daten des DGPS nur mit einer Frequenz von ca. 1 Hz ausgewertet werden, erfolgt mittels Prädikationsschritt in einem Kalman-Filter eine Extrapolation dieser Daten. Zur Erhöhung der Genauigkeit muss die Fahrzeugeigenbewegung durch Geschwindigkeit und Lenkwinkel berücksichtigt werden.<sup>146</sup>

Ferner ist die Fusion von GNSS-Daten und Fahrdynamikdaten auf der Rohdatenebene möglich. So bestand beispielsweise bei DISCHER (2003) das Ziel seiner Arbeit in der Ableitung eines dynamischen Fehlermodells für einen Satellitenortungssensor. Hierzu stellte DISCHER (2003) die Hypothese auf, dass in einem integrierten INS/GNSS-Navigationssystem neben den betragsmäßig sicherlich größeren Fehleranteilen der Inertialsensoren auch diejenigen des Satellitenortungssensors für eine umfassendere und exaktere Systembeschreibung modelliert und berücksichtigt werden müssten.

Auf Doppeldifferenzbasis leitete DISCHER (2003) ein GNSS-Fehlermodell für ein integriertes System ab<sup>147</sup>, wozu er einen Empfänger verwendete, dessen Quellcode zur Verfügung stand. Somit war auch die Kenntnis bzgl. der internen Signalverarbeitung gegeben. Das Fehlermodell ist auf Basis von doppeldifferenzierten Pseudoentfernungsmessungen<sup>148</sup> (d. h. DGPS-Konzept) aufgebaut (siehe Abbildung 2.12).

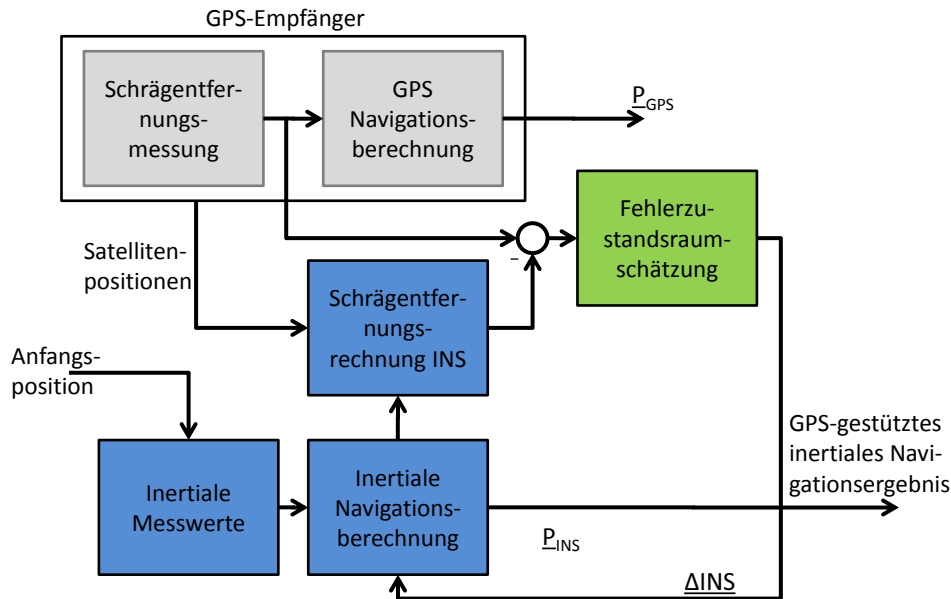
DISCHER (2003) ist es in seiner Arbeit mit Hilfe des von ihm entwickelten Fehlermodells gelungen, Restfehler in einer Größenordnung von ca. ein bis zwei Zentimetern pro Schrägentfernung zu erzielen. Dass die Fehleranteile von Satellitenortungssensoren für eine umfassendere und exaktere Systembeschreibung zu modellieren und zu berücksichtigen sind, hat DISCHER sowohl analytisch, in der Simulation sowie in wenigen Flugexperimenten nachgewiesen. Jedoch ist eine zuverlässige Verwendung von DGPS bzw. PDGPS

rensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen S. 11.

<sup>146</sup>Kaempchen et al. (2005): Vernetzte Fahrzeug-Umfelderfassung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme S. 147.

<sup>147</sup>Discher (2003): Ein dynamisches Fehlermodell für die Satellitenortung in einem integrierten INS/GNSS-Navigationssystem S. 14.

<sup>148</sup>Dies sind die in Kapitel 2.1 eingeführten Pseudoentfernungsmessungen



**Abbildung 2.12:** Vereinfachtes Blockschaltbild eines integrierten Navigationssystems auf Pseudoentfernungsbasis. Quelle: DISCHER (2003, S. 10).

unter Normalbedingungen nicht möglich, da die Genauigkeit der Korrekturdaten mit zunehmender Entfernung von der Referenzstation abnimmt und auch die Übertragung der Daten nicht absolut robust erfolgt.

Darüber hinaus sind in der vorliegenden Arbeit die bei DISCHER vorhandenen Rahmenbedingungen (Verfügbarkeit des Quellcodes und Kenntnis der internen Signalverarbeitung) i. a. aufgrund von Firmengeheimnissen nicht gegeben. Daher sind direkte Eingriffe in den Empfänger nicht möglich.<sup>149</sup>

Einen anderen Weg verfolgte MARKGRAF (2002) in seiner Arbeit, die den Fokus auf die automatische Querführung von gewöhnlichen Straßenfahrzeugen mit Hilfe von Magnetnageltechnik als kostengünstige Alternative zur Querführung mittels Satellitennavigation und Inertialplattform legt. Aufgrund dieses Aspektes wurde ein Versuchsfahrzeug mit einer nur rudimentären Sensorik (ein einziger Drei-Achsen Magnetfeldsensor, der vorne mittig am Stoßfänger befestigt ist und ein Steuerrechner mit A/D Umsetzertkarte und CAN Karte) zur Navigation ausgerüstet.

Für die Bestimmung der Relativposition zwischen Sensor und Magnet, welcher in die Fahrbahn integriert ist, werden verschiedene Verfahren wie beispielsweise Feldkartenverfahren zur Ermittlung der relativen Querabweichung unabhängig von der Sensorhöhe<sup>150</sup>, Verfahren zur Bestimmung des kompletten relativen Abstandsvektors auf Basis von Ersatzmodellen unter Anwendung bekannter mathematischer Zusammenhänge zwischen magnetischer Flussdichte und Aufpunkt<sup>151</sup> eingesetzt.

<sup>149</sup>Discher (2003): Ein dynamisches Fehlermodell für die Satellitenortung in einem integrierten INS/GNSS-Navigationssystem S. 8.

<sup>150</sup>Grundlage des Verfahrens ist das einmalig vermessene Magnetfeld eines Magnetnagels im theoretisch denkbaren Sensorbereich. Das mit den entsprechenden Querabweichungen in einer Tabelle abgelegte Magnetfeld steht als Referenz während der Fahrt zur Verfügung.

<sup>151</sup>Markgraf (2002): Autonomes Fahren mit Hilfe der Magnetnageltechnik S. 22ff.

MARKGRAF (2002) hat gezeigt, dass mit den entwickelten Verfahren das Messen der Querabweichung nur solange möglich ist, wie sie sich in einem Korridor der Breite  $\pm 30$  cm um die Magnetspur beläuft. Auch wird ersichtlich, dass bei Vorhandensein verschiedener Schikanen (d. h. zufälliger Verlauf des Magnetfeldes bei dem Überqueren der Schikanen) eine Analyse in Echtzeit erschwert wird und Fehler auftreten können.<sup>152</sup> Zwar ist dies durch Anpassung der entsprechenden Schwellwerte verhinderbar, jedoch ist dies mit einer Verengung des Messkorridors verbunden. Diese Verengung ist durch Einsatz mehrerer Sensoren nebeneinander am Stoßfänger reduzier- bzw. verhinderbar. Die relative Querabweichung wird bei den untersuchten Verfahren einmal pro Magnetnagel gemessen und der zukünftige Verlauf der Referenzlinie wird bis zum nächsten Magnetnagel auf Basis des linearen Einspurmodells geschätzt. MARKGRAF (2002) hat bis zu einer Geschwindigkeit von 40 km/h gezeigt, dass eine automatische Querführung auf Basis der Magnetnageltechnik möglich ist. Ein Durchfahren von Wendeschleifen war jedoch aufgrund des genannten schmalen Messkorridors nur mit Vorsteuerung und im Schritttempo unter den gewählten Versuchsbedingungen möglich. Trotz der Vorteile der Unabhängigkeit von äußeren Gegebenheiten (Regen, Schnee, Dunkelheit, Abschattungen durch hohe Häuser oder Bäume) konnte sich die Magnetnageltechnik aufgrund des Nachteils des Aufbaus einer aufwendigen Infrastruktur (durch die Magnetnägel) bislang noch nicht durchsetzen.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Autoren, die den Fokus auf die Positionsgenauigkeit legten, haben sich BEVLY und RYU mit der für den Fahrzeugbereich ebenfalls wichtigen Betrachtungsgröße Schwimmwinkel  $\beta$  beschäftigt. BEVLY (2004) hat unter Verwendung nur einer GPS-Antenne eine Methode zur Schätzung des Schwimmwinkels durch Integration der Inertialsensordaten (eines Stabilitätssystems) mit GPS-Daten entwickelt. Hierzu werden low-cost-Sensoren und GPS-Empfänger mit einer Abtastrate von 5 Hz eingesetzt. Diese Abtastrate ist laut BEVLY (2004) erforderlich, da die Fahrzustände eines Pkws in dem Bereich zw. 1 Hz – 5 Hz liegen.<sup>153</sup> Als Signal wird die GPS-Geschwindigkeit zur Beschleunigungsermittlung der Sensoren (MEMS<sup>154</sup>) verwendet. Für die Zielerreichung wird statt eines dynamischen Modells lediglich ein Schätzer/Filter für das Heading  $\Theta$  sowie für die Längs- und Querdynamik eingesetzt. Die Modellierung der Sensorfehler erfolgt durch ein Markov-Prozess erster Ordnung und die Umsetzung der Fusion wird mittels Kalmanfilter realisiert. In seiner Untersuchung berücksichtigte BEVLY (2004) keine Wank- und Nickbewegungen, da er das Einspurmodell verwendet, welches nur Bewegungen in der Ebene berücksichtigt. Die Frage nach erzielbarer Systemgenauigkeit und dem potentiellen Nutzen durch zusätzliche Abtastung lässt er offen. Er zeigt lediglich, dass das von ihm entwickelte System für die genannten Versuche funktionierte.

---

<sup>152</sup>Markgraf (2002): Autonomes Fahren mit Hilfe der Magnetnageltechnik S. 25, S. 98.

<sup>153</sup>Bevly (2004): Global Positioning System GPS: A Low-Cost Velocity Sensor for Correcting Inertial Sensor Errors on Ground Vehicles S. 256.

<sup>154</sup>Micro-Electrical-Mechanical Sensors

Den Aspekt der Berücksichtigung von Wank- und Nickbewegungen greift RYU in seinen Arbeiten auf.<sup>155,156,157</sup> Um eine um den Wank- (u. a. Straßenneigung) und den Nickwinkel korrigierte Bestimmung des Schwimmwinkels  $\beta$  zu ermöglichen, erweitert er das verwendete Einspurmodell um ein Wankzentrums-Modell mit Berücksichtigung der Straßenneigung und verwendet zwei in Querrichtung versetzte GPS-Antennen. RYU setzt für die Zustandsschätzung jeder Größe jeweils ein Kalmanfilter ein. In RYU (2002), RYU (2004a) und RYU (2004b) zeigt er, dass unter Verwendung der Kombination eines Zwei-Antennen-GPS-Gerätes mit den INS-Sensoren die steigungs- und neigungs-kompensierten Fahrzustände sowie die Steigungs- und Neigungsparameter geschätzt werden können. Ferner wird aufgezeigt, dass mit Hilfe der gewählten Hardware und Fusion die Bestimmung des Schwimmwinkels  $\beta$  durch die obige Kombination verbessert werden kann. Bei der Modellierung der Sensoren wird für die Bestimmung des Gieratenwertes im Kalmanfilter zusätzlich der Skalenfaktorfehler berücksichtigt. Daneben wird in RYU (2004b) eine Entkopplung der Gierrate bzw. des Gierwinkels von den Geschwindigkeitskomponenten vorgenommen. Diese umfassende Betrachtungsweise ist erforderlich, um den Einfluss des Wankens und der Straßenneigung zu reduzieren, um somit die Fahrzustände besser schätzen zu können. So wie bereits bei BEVLY bleibt auch bei den Ausführungen von RYU offen, für welchen Gültigkeitsbereich (Manöver) diese Fusion einsetzbar ist und eine Aussage bzgl. der erzielbaren Genauigkeit wird nicht getroffen.

Bei Betrachtung kürzlich abgeschlossener Kooperationsprojekte wie INVENT (v. a. Teilprojekte FUE, VAS, STA, FVM, VRA), PReVent (v. a. Teilprojekte MAPS&ADAS, WILLWARN, SASPENCE), und COOPERS, fällt auf, dass die Integration von GNSS-Daten kein eigenes Teilprojekt darstellt, sondern in übergeordnete Teilprojekte eingegliedert ist. In den entsprechenden Zwischen- und Abschlussberichten wird, wenn überhaupt, nur am Rande die Positionsbestimmung mit Hilfe von GPS erwähnt, aber Aussagen über die Umsetzung und über die erzielbare Genauigkeit sind nicht vorhanden. Erst im SFB Transregio 28 "Kognitive Automobile", der 2006 startete, sind explizit Teilprojekte definiert, die sich ausschließlich mit der Integration von GNSS und Fahr-dynamiksensorik beschäftigen. Diese Vielzahl an Projekten zeigt die zunehmende Bedeutung der GNSS-/Fahr-dynamiksensor-Fusion.

Diese Perspektive wird auch aus den Ergebnissen der Patentrecherche (nähere Informationen: siehe Anhang A.1) deutlich. Zum einen zeigt sich, dass auf dem GNSS-Gebiet die Forschungsarbeiten ab dem Jahr 2000 stark zugenommen haben. Ein möglicher Grund ist neben dem Preisverfall die Abschaltung der Selective Availability (SA), welche die Möglichkeit eröffnete, ohne Verwendung von Korrekturdaten eine um den Faktor 10 höhere Genauigkeit zu erzielen. Zum anderen wird aus den Ergebnissen deutlich, dass v. a. die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und auch mit der Infrastruktur zusammen mit den GNSS-Daten ein vielversprechendes Forschungsthema darstellt.

---

<sup>155</sup>Ryu/Rossetter/Gerdes (2002): Vehicle Sideslip and Roll Parameter Estimation using GPS.

<sup>156</sup>Ryu (2004): State and Parameter Estimation for Vehicle Dynamics Control Using GPS.

<sup>157</sup>Ryu/Gerdes (2004): Integration Inertial Sensors With Global Positioning System (GPS) for Vehicle Dynamics Control.

## 2.4 Fazit und Konkretisierung der Forschungsfragestellung

Bei dem autonomen Verfahren der inertialen Navigation wachsen ohne Stützung die Sensorfehler (z. B. Drift) ungünstigerweise mit der Zeit an. Bei Nichteinbindung von externen Daten können auch die von einem System geschätzten Größen (beispielsweise dynamischer Reifenhalmmesser) nur mit einer recht niedrigen Genauigkeit bestimmt werden. Zu diesen zeitlichen Fehlern addieren sich weitere Fehlerquellen wie Skalenfaktorf Fehler, Fehlausrichtung, Sensorrauschen und manöverabhängige Fehler, die direkt oder indirekt zu Fehlern in den berechneten Größen führen, die dann aufintegriert werden.<sup>158</sup>

Durch die komplementären Eigenschaften der GNSS-Daten im Vergleich zu den Fahrdynamikensensordaten und deren Kombination mit Inertialdaten (integrierte Navigation) ist dieser anwachsende Fehler reduzierbar.

Aus dem im Kapitel 2.3 dargestellten Stand der Technik und Forschung bzgl. Integrierter Navigation wurde deutlich, dass GNSS hauptsächlich zur Positionsbestimmung eingesetzt wird. Eine grundlegende Untersuchung bzgl. Performanceverbesserungen für den FAS-Bereich für Automotiveanwendungen fehlt bisher. Gerade für die Positionsbestimmung mittels Digitaler Karte, wie es heutzutage bei der Routenplanung erfolgt, ist zur Performanceverbesserung von FAS die Aktualität der Digitalen Karte Grundvoraussetzung, was bis jetzt aus Kostengründen noch nicht gewährleistet werden kann. Ferner fällt auf, dass fast alle Entwicklungen auf die Erzielung einer höheren Positionsgenauigkeit ausgerichtet sind. Jedoch ist hierfür und auch für die anderen von GNSS zur Verfügung gestellten Daten (beispielsweise Kurs) keine grundlegende Analyse realer Versuchsdaten im Dynamikbereich vorhanden. Hinzu kommt das Herausgreifen von vereinzelt Manövern, mit denen einmalig die Funktionsfähigkeit des entwickelten Systems bzw. Ansatzes aufgezeigt wird. Jedoch fehlt die Definition eines Standard-Versuchskataloges für die Untersuchung der Integrierten Navigation für dynamische Untersuchungen im Automotivebereich gänzlich. Auffallend ist auch, dass sich in der Literatur kaum Aussagen bzgl. erzielbarer Genauigkeit durch die Fusion von GNSS- und Fahrdynamikensensordaten im dynamischen Bereich finden. Die Fusion selbst wird stets mit einem Kalmanfilter in seiner Grundform oder als Extended Kalmanfilter realisiert. Dieser wird meist nur auf ein einziges Szenario angepasst und weist den Nachteil auf, dass er für den Anwender eine Gray-Box darstellt, die kaum Beeinflussungsmöglichkeiten zur Verfügung stellt. Andere Fusionsansätze wie beispielsweise die Verwendung von Hoch- und Tiefpassfilter werden nicht erwähnt und auch weitere Betrachtungsgrößen über Position und zum Teil Schwimmwinkel hinaus finden keine Beachtung.

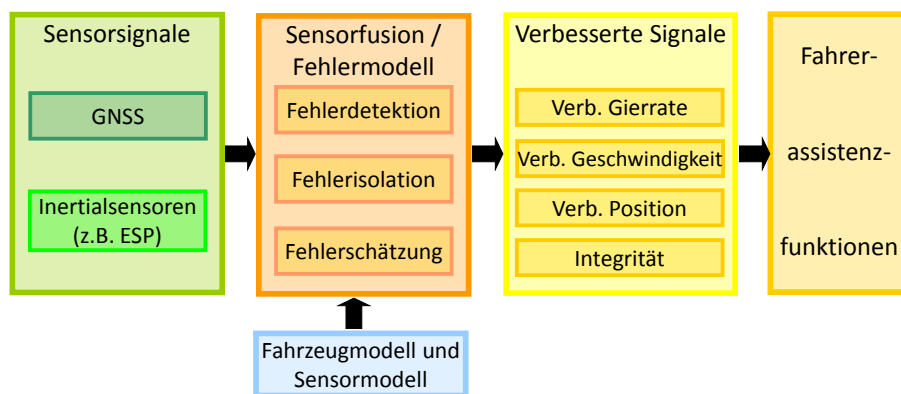
Auch wenn in anderen Bereichen zahlreiche Forschungsaktivitäten stattfinden, so sind die dort erzielten Genauigkeiten und Ansätze nicht uneingeschränkt auf den Automotivebereich übertragbar. Dies ist auf unterschiedliche Rahmenbedingungen (z. B. Schiene: fest vorgegebene Streckenverläufe, Landwirtschaft: niedrige Geschwindigkeiten, unwegsames Gelände, Flug: keine Abschattungen) zurückzuführen. Zwar existieren Untersuchungen zur Stützung des Schwimmwinkels mit GNSS-Daten (z. B. BEVLY (2004)), aber sie beziehen sich nur exemplarisch auf ein Manöver. Eine eingehende Analyse von allge-

---

<sup>158</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 25ff.

meinen Versuchsdaten, die auch den dynamischen Grenzbereich im Automotivbereich berücksichtigen, fehlt nach Kenntnisstand der Autorin. Ferner existieren bisher keine Untersuchungen, ob und inwieweit eine Fusion von GNSS und Fahrdynamiksensoren für Fahrerassistenzsysteme (bzgl. Reduzierung der Fahrdynamiksensordatenfehler) im Automotivbereich genutzt werden kann.

Genau diese Fragestellung wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Fusionsansatzes (siehe Abbildung 2.13), mit dem in einem frühen<sup>159</sup> Entwicklungsstadium unter Verwendung von Sensoren mit komplementären Sensoreigenschaften als Eingangsgrößen (GNSS, Fahrdynamiksensordaten) eine Abschätzung des Potenzials von GNSS für geplante Fahrerassistenzsystemfunktionen bzw. für Performanceverbesserungen von den in Kapitel 1.2 vorgestellten Fahrerassistenzsystemen möglich ist. Dabei ist bei der Entwicklung des Fusionsansatzes eine einheitliche Struktur für die verschiedenen GNSS-Empfänger anzustreben. Lediglich die in dem Fusionsansatz enthaltenen Filterparameter unterscheiden sich für die verschiedenen GNSS-Empfängergeräte. Somit werden in dieser Arbeit unterschiedliche GNSS-Empfänger betrachtet, die nach Möglichkeit das gesamte GNSS-Empfängersegment, das zur Zeit auf dem Markt kommerziell verfügbar ist, repräsentieren. Auf eine Verwendung der Digitalen Karte wird aufgrund der bereits mehrfach betonten Aktualitätsproblematik verzichtet (siehe Abbildung 2.13).



**Abbildung 2.13:** Fehlermodellstruktur

Nicht alle für das Vorhaben als relevant erachteten Betrachtungsgrößen (siehe Kapitel 1.2.2) sind Gegenstand dieser Arbeit. Der Fokus liegt vielmehr auf den beiden Betrachtungsgrößen Gierrate  $\dot{\psi}$  und Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$ , da diese, wie aus Kapitel 2.2.2 ersichtlich, für zahlreiche Fahrerassistenzsysteme die Basisgrößen darstellen (v. a. für Krümmungsbestimmung und Positionsermittlung). Hierbei werden die Störgrößen Fahrbahnbeschaffenheit sowie die Stützung der Gierrate im Niedriggeschwindigkeitsbereich aus den in Kapitel 2.2.2.2 genannten Gründen ausgeklammert.

Zusammenfassend lassen sich die in dieser Arbeit zu untersuchenden Fragestellungen wie folgt formulieren, wobei die Fahrdynamiksensoren als Basissensor den Ausgangspunkt für

<sup>159</sup>Unter frühem Entwicklungsstadium wird der Zeitpunkt verstanden, bei dem noch kein Prototyp vorliegt bzw. keine Versuche mit einem fertig aufgerüsteten Versuchsträger stattgefunden haben.

die Untersuchung bilden.

- Ist die GNSS-Verfügbarkeit für eine Stützung der Fahrdynamiksensordaten sowohl im Stadt- als auch im Überlandverkehr ausreichend?
- Ist eine positiv wirkende Stützung der Betrachtungsgröße Gierrate durch den GNSS-Kurswinkel  $\Theta$  für Normalfahrten möglich?
- Ist eine positiv wirkende Stützung der Betrachtungsgröße Fahrzeuggeschwindigkeit durch GNSS-Daten für Normalfahrten möglich?
- Ist die Entwicklung eines einheitlichen, nur in den Filterparametern sich unterscheidenden Fusionsansatzes für unterschiedliche (bezogen auf Empfängertechnologie, Abtastzeit) GNSS-Empfänger für einen Automotiveinsatz mit dem Ziel einer Verbesserung der Datenqualität der Betrachtungsgrößen Gierrate bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit möglich?
- Ist bei Vorliegen einer Verbesserung der beiden Betrachtungsgrößen bei gleicher Fusionsstruktur die erzielte Verbesserung durch ein "high-end"-Gerät größer als durch ein "low-end"-Gerät?

---

# 3 Versuchsmethodik und Messtechnik

## 3.1 Versuchsmethodik

Wie aus Kapitel 2.4 hervorgeht ist für die Fehleranalyse realer GNSS- und Fahrdynamik-sensordaten eine Manöverauswahl durchzuführen. Die hierzu zu definierenden Manöver haben sowohl in topographischer als auch in fahrdynamischer Hinsicht repräsentativ zu sein und gleichzeitig haben sie worst-case-Szenarien für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Betrachtungsgrößen darzustellen.

### 3.1.1 Ableitung der Versuche

Um sowohl der Anforderung nach Repräsentativität (bzgl. Normalfahrten, d. h. Fahrten, die vom Durchschnittsfahrer meist alltäglich durchgeführt werden) als auch unter dem Sicherheitsaspekt und der Reproduzierbarkeit von im fahrdynamischen Grenzbe-reich stattfindenden Manövern gerecht zu werden, werden die Versuche in zwei Grup-pen eingeteilt. Bei der ersten Gruppe handelt es sich um Fahrmanöver, die aufgrund des Sicherheitsaspektes auf einem abgeschlossenen Versuchsgelände durchzuführen sind. Die im öffentlichen Straßenverkehr stattfindenden Versuchsfahrten, welche die Normalfahrten abbilden, stellen die zweite Gruppe dar. Im Folgenden werden diese beiden Gruppen näher vorgestellt.

#### 3.1.1.1 Fahrdynamische Grenzbereichsmanöver

Für die Auswahl von worst-case Szenarien für den fahrdynamischen Grenzbereich (und so-mit sicherheitskritisch) werden als Manöver die in der Fahrzeugtechnik üblichen Standard-versuche<sup>1</sup> zur Untersuchung der Querdynamik herangezogen. Eine Anpassung aufgrund den geometrischen Gegebenheiten auf dem universitätseigenen Versuchsgelände in Darm-stadt/Griesheim ist allerdings erforderlich. Die hieraus abgeleiteten Manöver sind:

- Slalom mit konstanter Geschwindigkeit ( $v = 40 \text{ km/h}$  bzw.  $v = 50 \text{ km/h}$ ) und mittlere Spitzenquerbeschleunigung von  $4 \text{ m/s}^2$
- Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit (“Konstantfahrt“) ( $10 \text{ km/h}$ ,  $20 \text{ km/h}$ ,  $40 \text{ km/h}$ ,  $80 \text{ km/h}$ )
- Beschleunigungs- und Verzögerungsfahrten mit unterschiedlichen Zielgeschwindigkeiten
- “Bonanzfahrten“: Geradeausfahrten mit verschiedenen, ruckartigen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten

---

<sup>1</sup>DIN ISO 7401: Testverfahren für querdynamisches Übertragungsverhalten.



- Anreißen ( $v = 80 \text{ km/h}$ )
- Stationäre Kreisfahrt
- Stillstandsmessungen

Das Testmanöver “Slalom“ fasst alle Fahrmanöver zusammen, die durch eine schnelle, das Vorzeichen ständig wechselnde Folge von Lenkradbewegung gekennzeichnet sind. Neben dem äquidistanten Slalom (Abkürzung: “slalom“) wurden frequenz- (Abkürzung: “slalomf“) und amplitudenmodulierte (Abkürzung: “slaloma“) Slalomfahrten durchgeführt, deren Abmessungen in Anhang A.4.2 zu finden sind.

Die Auswahl des Manövers Slalom erfolgte aufgrund seiner Eigenschaft, bei entsprechender Wahl der Geschwindigkeit das dynamisch kritischste Manöver darzustellen, bei dem gerade noch kein Fahrdynamikregelsystem aktiv eingreift.

Die Konstantfahrt wurde als Vergleichsfahrt definiert und hat eine Länge von mindestens 600 m. Diese wird zur Beurteilung der Kurswinkeldifferenz verwendet.

Die Bonanzfahrten sind gekennzeichnet durch ständig wiederkehrende Beschleunigungs- und Verzögerungsfahrten. Bei den Beschleunigungsfahrten- und Verzögerungsfahrten erfolgt jeweils eine “Kick-Down-“Beschleunigung bis zur Erreichung einer zuvor festgelegten Geschwindigkeit (40 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 180 km/h). Dann wird eine maximal mögliche Verzögerung bis in den Stillstand eingeleitet, wobei ein Eingriff des Regelsystems ABS nicht auszuschließen ist. Um das Dynamikverhalten von GNSS-Empfängern bezüglich plötzlicher Richtungsänderung zu berücksichtigen, wird als worst-case-Fall das einmalige Anreißen des Lenkrades bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h als weiteres Manöver festgelegt.

Neben diesen dynamischen Fahrten wurden sog. Stillstandsversuche an unterschiedlichen Orten, zu unterschiedlichen Zeiten und bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen durchgeführt, um die Rauscheigenschaften der Positionsmessungen der GNSS-Empfänger zu quantifizieren und um die Rauschparameter zu bestimmen. Die statischen Tests erstreckten sich jeweils auf ein Messintervall von 15 min. Mit diesen Versuchen ist es darüber hinaus möglich, den Witterungs- und Tageszeiteneinfluss näher zu untersuchen.

### 3.1.1.2 Versuche im öffentlichen Straßenverkehr

Um der Anforderung nach Repräsentativität bzgl. der Normalfahrten gerecht zu werden, wurden Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. Hierbei setzte sich die Versuchsfahrt aus den Abschnitten Innenstadtbereich, Landstraße und Autobahn zusammen. Die Autobahnfahrt ist durch ein insgesamt gleichförmiges Bewegungsverhalten des Fahrzeuges und eine gute Qualität der GNSS-Datenerfassung gekennzeichnet. Im Gegensatz hierzu bewegt sich das Fahrzeug bei Stadtfahrten auf einer Trajektorie, die bei Abbiegevorgängen erhebliche Krümmungswechsel aufweisen, wodurch im Vergleich zu Autobahnfahrten stärkere Orientierungsänderungen des Fahrzeuges auftreten. Beschleunigungen und Verzögerungen im Stop&Go-Verkehr verursachen starke Geschwindigkeitsvariationen des Fahrzeuges. Aufgrund der dichten Bebauung im Stadtbereich wird

eine Verschlechterung der Qualität des GPS-Empfangs erwartet. Einen Kompromiss stellt die Überlandfahrt dar, die von beiden genannten Versuchsstrecken Anteile enthält.

Die Fahrten im Innenstadtbereich setzen sich aus mehreren Bereichen zusammen. Der erste Bereich (Bezeichnung Griesheim) ist durch eine sechsstreifige Fahrbahn charakterisiert, die sich zum Ende des Abschnittes in eine zweistreifige Fahrbahn verengt und von höheren Häuserblöcken umgeben ist. An diesen Abschnitt schließt sich der mit "tunnel-strecke" bezeichnete Bereich an, der neben einem Tunnel mit zwei 90°-Kurven, auch starke Richtungsänderungen (Abbiegevorgänge) aufweist. Der dritte Abschnitt (Bezeichnung "stadt") ist durch immer wiederkehrende Baumalleegebiete gekennzeichnet und der vorletzte Abschnitt bildet ein sog. "Caree", das z. T. von Universitätsgebäuden umgeben ist, aber sonst ebenes, unbebautes Gelände darstellt. Eine von Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern und teilweise von Bäumen gesäumte Straße bildet den letzten Abschnitt der mit Innenstadtfahrten bezeichneten Streckenabschnitte im öffentlichen Straßenverkehr. Als worst-case Szenarium für die Abschätzung von GNSS-Signalen wurde im Sommer eine am Stadtrand befindliche Straße befahren, deren eine Seite vom Waldrand begrenzt wird. Diese Strecke wird im Folgenden als Böllenfalltor bezeichnet.

Alle im öffentlichen Straßenverkehr stattfindenden Fahrten werden neben Verfügbarkeitsuntersuchungen auch zur Validierung des zu entwickelnden Fusionsansatzes und der Filterauslegung verwendet. Exemplarische Videobilder sowie Satellitenbilder der entsprechenden Strecke finden sich in Anhang A.4.1.

#### 3.1.2 Versuchsdurchführung

Aus den Ausführungen des vorhergehenden Kapitels und aus Kapitel 2.1 sind bei der Versuchsdurchführung folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Berücksichtigung unterschiedlicher Tageszeiten
- Berücksichtigung unterschiedlicher Witterungsverhältnisse
- Berücksichtigung möglicher Richtungsabhängigkeiten

Aus diesen Anforderungen ergab sich ein Zeitintervall für wiederkehrende Versuchsblöcke von mindestens 5 h, um eine Satellitenkonstellationsänderung sicherzustellen.<sup>2</sup>

Der "worst-case-Fall" bzgl. Wettereinfluss auf GNSS-Daten liegt vor, wenn innerhalb kurzer Zeit wechselnde Bedingungen herrschen (beispielsweise plötzlicher Platzregen (Gewitter), gefolgt von Sonnenschein), da hier neben wechselnder Luftfeuchtigkeit zusätzlich eine starke elektrische Aufladung der Atmosphäre gegeben ist. Da Gewitter lokale, meist nur kurzzeitig andauernde und schwer vorhersagbare Wetterphänomene sind, wird die Wettersituation Gewitter nicht systematisch untersucht. Jedoch sind während der Durchführung der Versuche solche Wettersituationen aufgetreten, sodass mehrere Manöverblöcke unter solchen Bedingungen stattfanden. Die Wetterbedingungen

---

<sup>2</sup>Fand ein Versuch morgens statt, so konnte der folgende Versuch nur am Nachmittag des gleichen Tages oder aber am Nachmittag an anderen Tagen stattfinden.

sind in drei Klassen eingeteilt. Liegt ein bewölkter Himmel vor (d.h. mittlere bis starke Bewölkung), wird von bewölktem Wetter gesprochen und mit der Abkürzung “S“ (schlecht) gekennzeichnet. Wenn kein Regen und keine Bewölkung vorliegen, so herrschen gute Wetterbedingungen (Abkürzung “G“). Für Regen wird die Abkürzung “R“ verwendet.<sup>3</sup>

Die Anzahl der durchzuführenden Messungen pro Manöver muss für die Verallgemeinerung der abzuleitenden Aussagen nach DIN ISO 7401<sup>4</sup> aus mindestens drei Messungen bestehen. In der vorliegenden Arbeit werden jeweils fünf Messungen herangezogen.

Die Repräsentativität (bezogen auf GNSS-Fehlereinflüsse) ist bei allen Versuchen aufgrund des über mehrere Monate verteilten Untersuchungszeitraumes als gegeben anzusehen. Da die Versuche mit einem Versuchsträger im Feldeinsatz durchgeführt werden, ist auch die Praxisnähe der Untersuchung gegeben.

Alle auf dem Versuchsgelände durchgeführten Manöver sind wie in Abbildung 3.1a dargestellt aufgebaut. Zunächst erfolgt eine Stillstandsmessung an einem definierten Punkt, um eine Offsetkorrektur bei den Messsignalen zu ermöglichen. Von diesem Punkt ausgehend wird der Versuchsträger auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt. Durch ein Lichtschrankensignal, das durch den in der Einfahrtsgasse positionierten Reflektor ausgelöst wird, beginnt in der sog. *Einfahrtsgasse* (siehe Abbildung 3.1b) der Manöverbereich, innerhalb dessen die jeweiligen Manöver durchgeführt werden. Dieser wird durch Einfahren in die sog. *Ausfahrtsgasse* durch ein zweites Lichtschrankensignal beendet und nach Verlassen dieser Gasse wird der Versuchsträger in den Stillstand abgebremst. Dieses Vorgehen ist beispielhaft in Abbildung 3.2 für die Gierrate dargestellt. Hieraus leitet sich eine Unterteilung in fünf Bereiche ab.

Zunächst liegt der in Abbildung 3.2 mit a) gekennzeichnete *Stillstandsbereich* vor. Daran schließt sich ein sog. *Übergangsbereich* an (in Abbildung 3.2 mit b) gekennzeichnet), gefolgt von dem mit c) gekennzeichneten Bereich, in dem das eigentliche *Manöver* stattfindet. Nach Beendigung des Manövers wird der Versuchsträger in den *Stillstand abgebremst* (Bereich d) und es wird erneut eine *Stillstandsmessung* von mind. 15 s durchgeführt (Bereich e) in Abbildung 3.2). Der Start (Bereich a)) und die Beendigung (Bereich e)) der Stillstandsmessungen sind jeweils durch ein manuelles Triggersignal gekennzeichnet.

Auch die Stillstandsversuche werden an verschiedenen, definierten, mm–genau eingemessenen Referenzpunkten durchgeführt, um einen möglichen Ortseinfluss auszuschließen.

---

<sup>3</sup>Händler (2006): Untersuchung der Verfügbarkeit von verschiedenen Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) im Fahrbetrieb und Bewertung der Genauigkeit der Daten zur Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) S. 64.

<sup>4</sup>DIN ISO 7401: Testverfahren für querdynamisches Übertragungsverhalten.

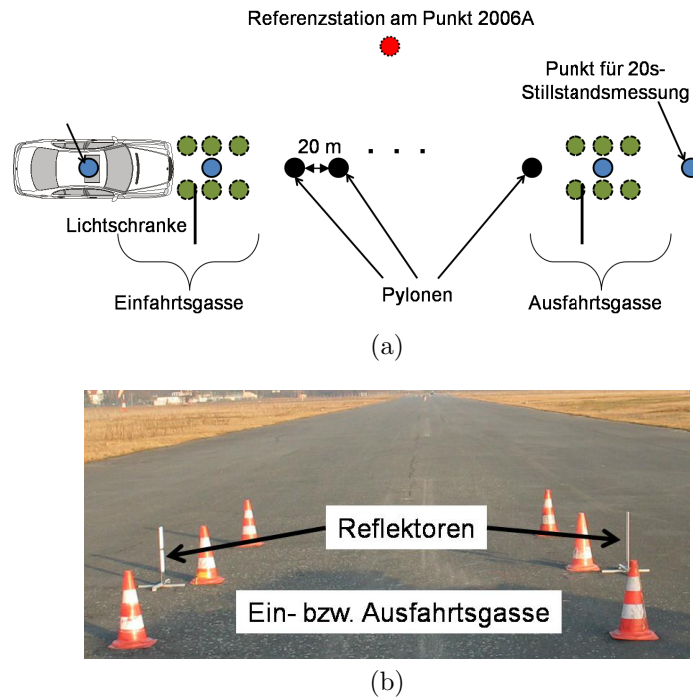


Abbildung 3.1: (a) Schematischer Versuchsaufbau, (b) Ein- bzw. Ausfahrtsgasse.

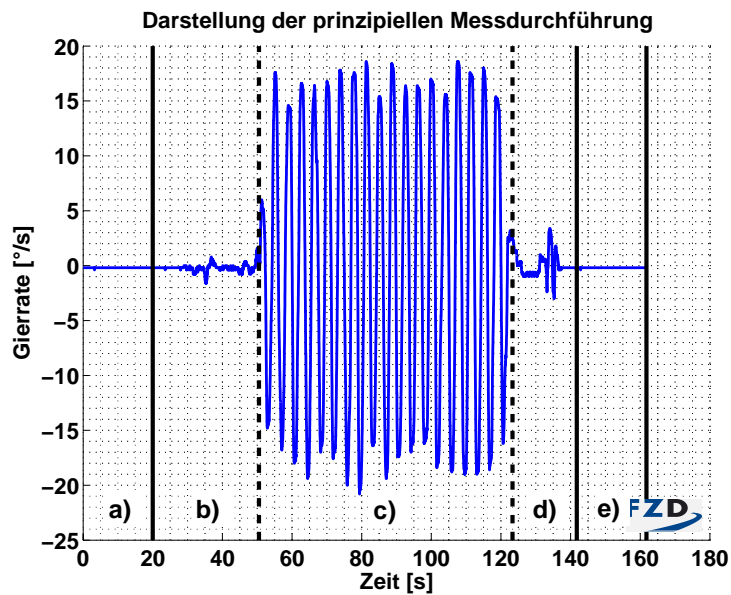


Abbildung 3.2: Untergliederung der Messungen in fünf Bereiche: a) Stillstandsbereich 1, b) Übergangsbereich 1, c) Manöverbereich, d) Übergangsbereich 2, e) Stillstandsbereich 2.

## 3.2 Messtechnik

Zur Aufzeichnung der in Tabelle 3.1 aufgeführten Größen wurde der Versuchsträger mit zusätzlicher Messtechnik ausgerüstet. Diese wurde zum Teil im Kofferraum, zum Teil auf der Rücksitzbank (Referenzsystem wegen Anforderung der horizontalen Einbaulage) und zum Teil auf dem Dachgepäckträger des Versuchsträgers (GNSS-Empfänger-Antennen) integriert.

**Tabelle 3.1:** Übersicht Messgrößen.

Messgrößen
Radgeschwindigkeiten (an allen vier Rädern)
Längsgeschwindigkeit
Quergeschwindigkeit
Gierrate (Giergeschwindigkeit)
Lenkradwinkel
Kurswinkel (gegenüber Nord)
Längengrad
Breitengrad

### 3.2.1 Eingesetzte Messwerkzeuge

Für die Ableitung allgemeingültiger Aussagen sind handelsübliche, auf dem Markt kommerziell erwerbbar GNSS-Empfänger für die Untersuchung zu berücksichtigen. Daher werden drei unterschiedliche GNSS-Geräte ausgewählt und eingesetzt, die sich neben der Abtastfrequenz  $f_{Abtast,GNSS}$  in der Empfängertechnologie und in der Genauigkeit unterscheiden. Die entsprechenden technischen Daten sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Während die beiden GNSS-Geräte  $L1_1$  und  $L1_2$  Empfänger für Navigationszwecke im Freizeitbereich darstellen und somit preisgünstig, jedoch recht ungenau<sup>5</sup> sind, ist das  $L1/L2$ -Empfangsgerät für geodätische Anwendungen geeignet. Dies bedeutet, dass der Empfänger durch Phasenauswertung genauer<sup>6</sup> ist. Daher werden die GNSS-Geräte  $L1_1$  und  $L1_2$  als "low-end" bzw. "low-cost"-Geräte und das GNSS-Gerät  $L1/L2$  als "high-end" bzw. als "high-cost"-Gerät bezeichnet. Alle drei GNSS-Empfänger sind so konfiguriert, dass sie neben dem GPS-Signal auch in der Lage sind, EGNOS-Daten zu empfangen und diese intern zu verarbeiten.

Die GNSS-Geräteantennen sind auf einem Grundträger im vorderen Bereich des Daches des Versuchsträgers, ein Mercedes Benz S430 (W220)<sup>7</sup>, wie in Abbildung 3.3a gezeigt, montiert. Die mittlere Antenne befindet sich über der Fahrzeuglängsachse und die beiden anderen Antennen haben jeweils einen Seitenabstand<sup>8</sup> von 47,5 cm (Abbildung 3.3d), um eine gegenseitige Beeinflussung (Signalschwächung) auszuschließen.

<sup>5</sup>Positionsungenauigkeit liegt mindestens im 10 m-Bereich.

<sup>6</sup>CEP beträgt maximal 1,8 m.

<sup>7</sup>Die technischen Daten sind in Anhang A.4.3 zu finden.

<sup>8</sup>Dieser Abstand entspricht  $5/2 \cdot \lambda$  mit  $\lambda = 19,05$  cm. Diese Wellenlänge entspricht der Wellenlänge der genutzten  $L_1$ -Frequenz von 1575,42 MHz.

**Tabelle 3.2:** Übersicht der wichtigsten technischen Daten der verwendeten GNSS-Empfänger.  
Quelle: DATENBLÄTTER DER ENTSPRECHENDEN HERSTELLER

GPS-Empfänger	L1_1	L1_2	L1/L2
Abtastfrequenz $f_{Abtast}$	1 Hz	0,5 Hz	10 Hz
Empfängertechnologie	SirfStar III	herstellerspez.	herstellerspez.
Empfangsfrequenz	$L_1$	$L_1$	$L_1 + L_2$ -Phase
Genauigkeit Position	10 m (2D RMS)	15 m (RMS)	1,8 m (CEP)
Genauigkeit Geschwindigkeit	0,1 m/s	0,05 m/s (RMS)	0,03 m/s (RMS)
Genauigkeit Zeit	1 ms	keine Angabe	20 ns
Hersteller	Haicom	Garmin	Novatel
Preis (inkl. Antenne) [Euro]	ca. 50 low-cost	ca. 450 low-cost	20.000 high-cost
<b>Merkmal</b>	<b>L1_1</b>	<b>L1_2</b>	<b>L1/L2</b>



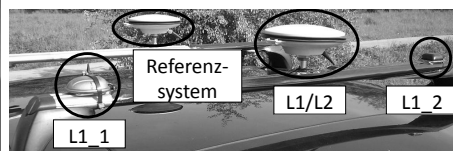
(a)



(b)



(c)



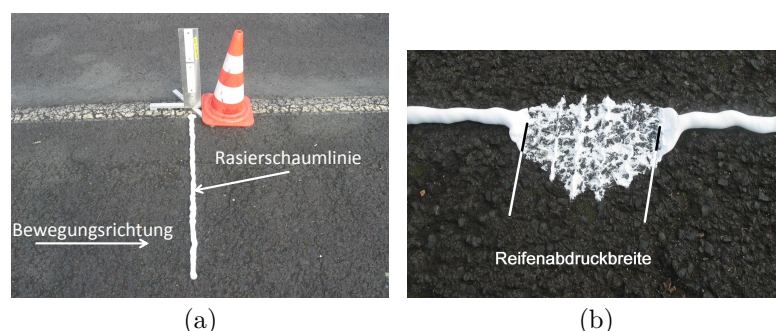
(d)

**Abbildung 3.3:** (a) Versuchsträger Mercedes Benz S-Klasse, (b) Geschwindigkeitsreferenzsystem Quelle: CORRSYS-DATRON, (c) GPS-gestützte Kreiselpattform - Referenz Quelle: GENESYS, (d) Antennen der drei verschiedenen GNSS-Empfänger.

Als Fahrdynamikensensoren werden die serienmäßigen Raddrehzahlsensoren sowie zwei Gierratensensoren eingesetzt. Ein Gierratensensor ist serienmäßig in dem Versuchsfahrzeug enthalten (Bezeichnung “Fzg“, Hersteller: Bosch), der zweite Sensor, im Folgenden mit “Fzg-ext“ bezeichnet, ist zusätzlich integriert (Hersteller: Continental). Alle verwendeten Fahrdynamikensensoren weisen eine Abtastrate von 50 Hz auf.

Zur Generierung von Aussagen bzgl. erreichbarer Genauigkeit mit/ohne GNSS-Datenstützung wird in dieser Arbeit ein berührungsloser optischer Geschwindigkeitssensor (siehe Abbildung 3.3b) als Geschwindigkeitsreferenz eingesetzt, der laut Hersteller eine Geschwindigkeitsunsicherheit von  $\leq 0,1\%$  für einen Messbereich von  $0,5 \text{ km/h} - 400 \text{ km/h}$  aufweist.<sup>9</sup> Als zweites Referenzsystem wird eine speziell für den Automotivebereich entwickelte GPS-gestützte Kreiselpattform der Firma Genesys eingesetzt (siehe Abbildung 3.3c). Von der Option einer externen Geschwindigkeitsstützung der Kreiselpattform wird in dieser Arbeit Gebrauch gemacht, da hierdurch der quadratische Anstieg der Positionsfehler bei reiner inertialer Positionsberechnung bei Ausfall von GNSS auf einen nur langsam proportional mit der Zeit zunehmenden Positionsfehler reduziert wird. Bei der Kreiselpattform handelt es sich um einen hochpräzisen Inertialsensorblock, der durch absolute Positionsdaten durch ein internes GPS-Gerät und Korrekturdaten von der fachgebietseigenen Referenzstation (siehe Abbildung A.10 in Anhang A.4.4) (nur bei Versuchen auf dem Versuchsgelände) gestützt wird. Diese Korrekturdaten werden über ein Funkmodem an den GNSS-Empfänger in dem Referenzsystem übertragen.

Um das Referenzsystem (Bezeichnung “Ref“) zuverlässig einsetzen zu können, wurde die Messtechnik zur Genauigkeitsbewertung von Trajektorien für die vorgestellten Versuche validiert. Hierzu wurde die Fahrzeugposition mittels Fahrspurmarkierungen und Lichtschranken bestimmt. Die Markierungen erfolgten mittels handelsüblichen Rasierschaums, der ausreichend witterungsrobust ist. Dieser Rasierschaum wurde senkrecht zur Bewegungsrichtung aufgebracht (siehe Abbildung 3.4a) und der Abstand der Reifenabdrücke (siehe Abbildung 3.4b) mittels Laserpeilung<sup>10</sup> ermittelt.



**Abbildung 3.4:** Das zur Validierung der Messtechnik eingesetzte Referenzsystem - Rasierschaum: (a) Rasierschaumlinie vor Versuch, (b) Rasierschaumlinie nach erfolgtem Versuch, wobei der Reifenabdruck gut abgebildet wird.

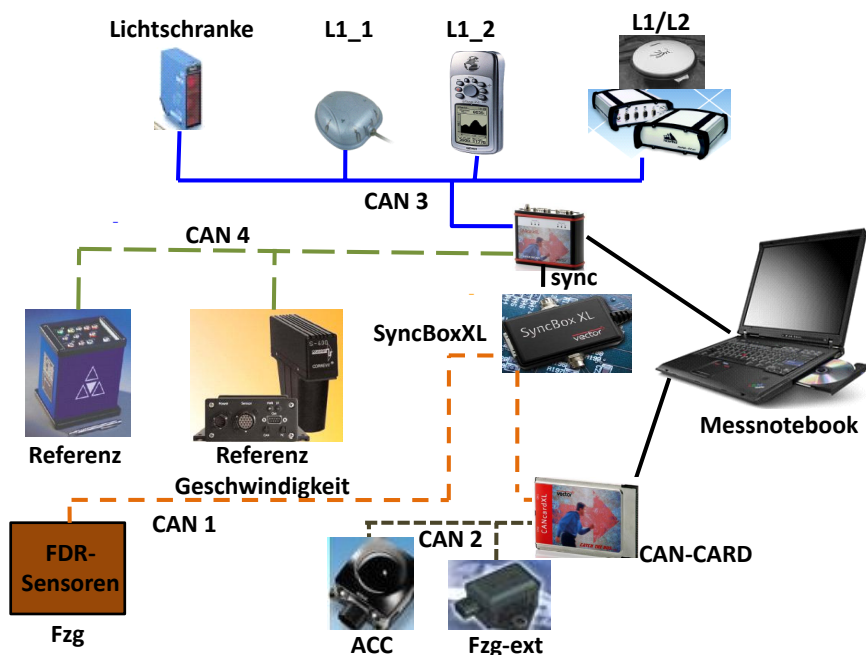
<sup>9</sup>CorrSYS/Datron (2002): Correvit S-400 Berührungsloser Optischer Sensor - Bedienungsanleitung S. 9.

<sup>10</sup>Das verwendete Laserentfernungsmessgerät von Leica hat eine Genauigkeit von 3 mm.

Es hat sich gezeigt, dass die Streuung der Reifenabdrücke 2 cm beträgt. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass die Positionsermittlung mittels der Kreiselpattform eine Genauigkeit von 6 cm bei Geradeausfahrt und 60 cm bei Slalomfahrt beträgt.<sup>11,12</sup>

### 3.2.2 Messdatenerfassung und -aufbereitung

Die Messdaten selbst stehen auf vier verschiedenen CAN<sup>13</sup>-Bussen zur Verfügung und die Messdatenaufzeichnung sowie Visualisierung erfolgt über ein Notebook. Die GNSS-Daten werden aus dem NMEA-Protokoll<sup>14</sup> über einen  $\mu$ -Controller (pro GNSS-Gerät jeweils einer) auf dem CAN-Bus zur Verfügung gestellt. Eine schematische Darstellung der physikalischen CAN-Topologie, d. h. des Aufbaus der CAN-Bus-Netzwerkarchitektur und die an den jeweiligen CAN-Bussen angeschlossenen Sensoren ist in Abbildung 3.5 illustriert.



**Abbildung 3.5:** CAN-Topologie und eingesetzte Messwerkzeuge.

Aus Abbildung 3.5 geht die gleichzeitige (parallele) Messung aller GNSS-Empfängerdaten und die Sicherstellung der Synchronität der Daten durch das Modul SynBoxXL hervor.

Die automatisierte, digitale Messdatenerfassung und -sicherung erfolgt mittels der auf dem Messnotebook aufgespielten Software *CANalyzer* der Firma Vector Informatik und die Messdaten liegen in Form von ASCII-Dateien vor. Diese werden durch ein Konvertierungstool automatisiert in eine MATLAB<sup>®15</sup>-Datei konvertiert, in der für alle GNSS-Signale der

<sup>11</sup>Müller (2007a): Validierung der Messtechnik zur Genauigkeitsbewertung von Trajektorien - Teil 1.

<sup>12</sup>Müller (2007b): Validierung der Messtechnik zur Genauigkeitsbewertung von Trajektorien - Teil 2.

<sup>13</sup>CAN steht für Controller Area Network und ist ein im Fahrzeug typisches Bussystem.

<sup>14</sup>Es werden die beiden Botschaften/Sentences GGA (Global Positioning System Fix Data, Time, Position and x related data for a GPS receiver), VTG (Track made good and Ground Speed mit der aktuellen Spur und der Geschwindigkeit) verwendet.

<sup>15</sup>MATrix LABoratory. Es wurde die Matlabversion 6.5, Release 13 eingesetzt.



unterschiedlichen Geräte und für die entsprechenden Fahrdynamiksensordaten einheitliche Ausgangsgrößenbezeichnungen für die Auswertung zur Verfügung stehen. Die Weiterverarbeitung und Auswertung der aufgezeichneten und konvertierten Messdaten erfolgt mit dem Softwareprodukt MATLAB®. Die Datenrate der Rohdatenaufzeichnung ist abhängig von den eingesetzten Sensoren und die Zyklusdauer ist für den jeweiligen Sensor in Tabelle 3.3 aufgelistet.

**Tabelle 3.3:** Übersicht Zyklusdauer der eingesetzten Sensoren.

Sensor	Zyklusdauer
Radgeschwindigkeiten	20 ms
Gierratensensor	20 ms
Referenzsensor(en)	10 ms
GNSS-Empfänger <i>L1_1</i>	1000 ms
GNSS-Empfänger <i>L1_2</i>	2000 ms
GNSS-Empfänger <i>L1/L2</i>	100 ms

Für die Berechnung der für die Auswertung erforderlichen Betrachtungsgrößen werden die hierzu benötigten Messsignale (Berechnungsvorschriften: siehe Kapitel 2.2.2.2) einer Offsetkorrektur unterzogen. Hierbei wird der Offsetwert aus der Stillstandsmessung zu Beginn jeder Messung ermittelt (siehe Abbildung 3.2, Bereich a)). Die GNSS-Daten werden in geographischen Koordinaten (Länge/Breite) bezogen auf das WGS84 Ellipsoid gespeichert und anschließend in metrische Daten (Ost/Nord) transformiert (siehe Anhang A.2).

Für die Signalanalyse bzw. für den Vergleich der Signale untereinander ist eine Anpassung des Referenzsignals wegen seiner deutlich höheren Abtastung (siehe Kapitel 3.2.1) auf die jeweilige Frequenz der zu untersuchenden Signale erforderlich. Dies erfolgt durch lineare Interpolation und durch Synchronisierung auf die Zeitpunkte der langsameren Signale.

---

## 4 Signalanalyse

Um die Grundlage für die Filterauslegung zur Fusion von Fahrdynamiksensordaten mit GNSS-Daten bereitzustellen, erfolgt in diesem Kapitel eine Analyse der Betrachtungsgrößen auf Basis von realen Versuchsdaten. Zunächst werden die für die Signalanalyse verwendeten Bewertungskriterien vorgestellt, ehe auf die Ergebnisse von Stillstandsmessungen und auf das Dynamikverhalten eingegangen wird.

### 4.1 Bewertungskriterien

Für die Entwicklung einer Datenfusion zur Verbesserung der Datenqualität ist die Bestimmung der erreichbaren Genauigkeit und Dynamik, d. h. bis zu welchem dynamischen Grenzbereich GNSS-Daten noch sinnvoll zur Performancesteigerung von FAS eingesetzt werden können, wichtig.

Um diesen Bereich bestimmen zu können, sind geeignete Bewertungskriterien notwendig, die eine Zusammenfassung oder Verdichtung der zahlreichen Messungen (beobachtete Einzeldaten) ermöglichen. Dies ist durch die Berechnung statistischer Maßzahlen möglich. Zu den wichtigsten gehören der Mittelwert  $\mu$  (Lageparameter) sowie das Streuungsmaß.<sup>1</sup> Der Mittelwert kennzeichnet das Zentrum einer Verteilung und stellt somit ein Maß für den Versatz (Offset) des Mittels aller Messwerte im Verhältnis zum Sollwert dar. Das Streuungsmaß hingegen dient zur Beschreibung der Streuung (Variabilität, Variation) der Einzelwerte um das Zentrum. In dieser Untersuchung wird die Varianz  $\sigma^2$  (arithmetisches Mittel der Abweichungsquadrate) bzw. die empirische Standardabweichung<sup>2</sup>  $\sigma$  als Streuungsmaß herangezogen.

Zur Generierung von Aussagen bzgl. Genauigkeit erfolgt die Betrachtung der auftretenden Fehler der jeweiligen Betrachtungsgröße  $BG$ . Für die Auswertung der Stillstandsversuche wird der Fehler gemäß Gleichung 4.1 bestimmt, während für die Auswertung der dynamischen Versuche der Fehler der um  $\tau_i$  aufeinanderfolgenden Werte der entsprechenden Betrachtungsgrößen verwendet wird, dessen Ermittlung sich gemäß Gleichung 4.2 ergibt. Bei  $\tau_i$  handelt es sich um einen Variationsparameter, der angibt, in welchem Sekundenabstand die Differenzen zu bilden sind (weitere Details siehe Anhang A.5.1).  $i$  kennzeichnet den entsprechenden Sekundenabstand.

$$e_{BG}(t_k) = BG(t_k) - BG_{Ref}(t_k) \quad (4.1)$$

$$e_{\Delta BG}(\tau_i) = \underbrace{(BG(t_k + \tau_i) - BG(t_k))}_{\Delta BG(\tau_i)} - \underbrace{(BG_{Ref}(t_k + \tau_i) - BG_{Ref}(t_k))}_{\Delta BG_{Ref}(\tau_i)} \quad (4.2)$$

---

<sup>1</sup>Bleymueller/Gehlert/Gülicher (2004): Statistik für Wirtschaftswissenschaftler S. 19.

<sup>2</sup>Die Standardabweichung  $\sigma$  ist die positive Quadratwurzel aus der Varianz.

Folglich berechnen sich empirischer Mittelwert  $\mu$  sowie empirische Standardabweichung  $\sigma$  des jeweiligen Fehlers wie folgt:<sup>3</sup>

$$\mu(e_{BG}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n e_{BG}(t_k) \quad (4.3)$$

$$\sigma(e_{BG}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (e_{BG}(t_k) - \mu(e_{BG}))^2} \quad (4.4)$$

$$\mu(e_{\Delta BG}(\tau_i)) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n e_{\Delta BG,k}(\tau_i) \quad (4.5)$$

$$\sigma(e_{\Delta BG}(\tau_i)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (e_{\Delta BG,k}(\tau_i) - \mu(e_{\Delta BG}(\tau_i)))^2} \quad (4.6)$$

Da jedoch durch die statistische Größe Standardabweichung  $\sigma$  die Erfassung der in der Praxis aufgrund der in Kapitel 2 genannten Störeinflüsse auftretenden Ausreißer<sup>4</sup> nicht möglich ist, wird neben den beiden Kriterien zur Beschreibung der zufälligen Fehler in dieser Arbeit zusätzlich der Mean Square Error (*MSE*), d. h. das quadratische Mittel der Fehler verwendet. Dieser unterscheidet nicht zwischen Rauschanteil und deterministischem Fehler. Durch die quadratische Mittelung wird den größeren Fehlern ein stärkerer Einfluss als den kleineren (siehe Gleichung 4.7, bzw. Gleichung 4.8) eingeräumt. Durch Anwendung der Wurzeloperation auf *MSE* liegt der sog. *Root Mean Square Error (RMSE)* vor, der ein weiteres Bewertungskriterium darstellt.

$$MSE_{BG} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (e_{BG,k})^2 \quad (4.7)$$

$$MSE_{\Delta BG}(\tau_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (e_{\Delta BG,k}(\tau_i))^2 \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Die angegebenen Werte werden im Regelfall als Mittelwert aus fünf Messungen gebildet. Bei Abweichungen von diesem Vorgehen wird explizit darauf hingewiesen.

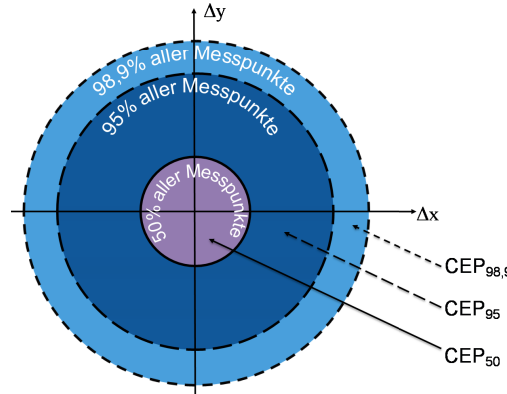
Da die Positionierung mittels GNSS auf statistischen Verfahren basiert und eine eindeutige Beschreibung der Angabe zur Positionsgenauigkeit nur in Form statistischer Werte mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten<sup>5</sup> möglich ist, wird für die zweidimensionale Betrachtungsgröße Position (x- und y-Richtung) als weiteres Beurteilungskriterium die Circular Error Probability, kurz *CEP*, verwendet. Der *CEP* kennzeichnet die zweidimensionale Genauigkeit und wird oft als Fehlerkreis (Streukreisradius) bezeichnet. Der *CEP<sub>X</sub>*, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist, beschreibt den Radius um einen Punkt, in dessen

<sup>3</sup>Bronstein et al. (1997): Taschenbuch der Mathematik S. 727.

<sup>4</sup>Ausreißer sind einzelne Messwerte, die überdurchschnittlich große Abweichungen aufweisen.

<sup>5</sup>Weltzien (2003): GPS-Empfänger Vergleich - Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung S. 3.

eingeschlossener Kreisfläche  $X\%$  aller Werte einer Stichprobe  $N$  liegen, wobei der umschlossene Prozentwert ( $X$ ) als Suffix zur Angabe CEP geschrieben wird. Erfolgt keine Suffixangabe, so ist immer der  $CEP_{50}$  gemeint.



**Abbildung 4.1:** Fehlerkreis CEP für unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten.

Allgemein wird der Prozentwert  $X$  durch folgendes Doppelintegral definiert:<sup>6</sup>

$$X = P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Phi|}} \cdot \int \int_{x^2+y^2 < r^2} e^{-\frac{1}{2}(x,y) \cdot \Phi^{-1} \cdot (x,y)^T} dx dy \quad (4.10)$$

Hierbei kennzeichnet  $P_r$  die Wahrscheinlichkeit, dass die Werte einer Zufallsverteilung  $N(0, \Phi)$  innerhalb eines Kreises mit dem Radius  $r$  liegen und  $\Phi$  stellt die Varianz-Kovarianz-Matrix des Zufallvektors  $(x, y)$  dar<sup>7</sup>.

In der vorliegenden Arbeit wird der  $CEP_{95}$  verwendet, da laut STANAG 4278<sup>8</sup> bei der Positionsbestimmung von einer 95% Wahrscheinlichkeit auszugehen ist. Somit kennzeichnet der  $CEP_{95}$  zweier stochastischer Betrachtungsgrößen  $BG_x$  und  $BG_y$  den Streukreisradius, der 95% aller zufälligen normalverteilten Ereignisse beinhaltet.<sup>9</sup> Die Gültigkeit von Gleichung 4.10 ist streng genommen nur bei einer Normalverteilung der Zufallsvariablen  $BG_x, BG_y$  gegeben<sup>10</sup>, was bei realen Versuchsdaten nicht immer gewährleistet ist. Dennoch kann Gleichung 4.10 laut WELTZIEN (2003)<sup>11</sup> zur Bewertung von GNSS-Empfängern herangezogen werden, da die getroffene Annahme der Verteilung in erster Näherung gegeben ist (siehe Anhang A.5.2).

<sup>6</sup>Nelson (1988): Use of Circular Error Probability in Target Detection S. 3 ff.

<sup>7</sup>Die Varianz-Kovarianz-Matrix des Zufallvektors  $(x, y)$  ist wie folgt definiert:

$$\Phi := \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$$

<sup>8</sup>STANAG 4278 (1993): Method of Expressing Navigation Accuracies.

<sup>9</sup>Beyer/Wigger (2001): Vorlesungsskript: Grundlagen der Navigation und Anwendungen S. 2.39.

<sup>10</sup>Beyer/Wigger (2001): Vorlesungsskript: Grundlagen der Navigation und Anwendungen S. 2.39.

<sup>11</sup>Weltzien (2003): GPS-Empfänger Vergleich - Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung S. 3 und S. 11.

Für die Ableitung von Aussagen bzgl. der vorhandenen Verfügbarkeit von GNSS-Daten bei Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr werden neben dem Mittelwert auch die Minimal- bzw. Maximalwerte der entsprechenden Betrachtungsgröße der jeweils untersuchten Streckenabschnitte herangezogen, wobei diese das absolute Minimum bzw. das absolute Maximum aus allen identischen Streckenabschnitten darstellen.

Darüber hinaus ist für die Filterauslegung der Datenfusion die Prüfung eines existierenden Zeitverzuges der GNSS-Signale im Verhältnis zu den Fahrdynamikensorsignalen erforderlich. Als Zeitverzug wird hier das Nacheilen des GNSS-Signals gegenüber dem Fahrdynamikensorsignal verstanden. Hierzu wird für die Ermittlung der Zeitdifferenz  $t_{\text{Verzug}}$  für jedes Gerät eine Zeitspanne von 0,0 s bis zur doppelten Abtastzeit  $T_{\text{Abtast, GNSS}}$  des jeweiligen Gerätes betrachtet. In  $\Delta t = \frac{T_{\text{Abtast, GNSS}}}{10}$ -Schritten wird das entsprechende Sensorsignal für die unterschiedlichsten Manöver verzögert und es erfolgt gemäß Gleichung 4.11 jeweils eine Differenzbildung zwischen dem verzögerten Fahrdynamikensorsignal und dem jeweiligen GNSS-Sensorsignal pro Zeitpunkt, die quadriert und über die gesamte Messdatei aufsummiert wird. Durch Suchen des Summenminimums ergibt sich ein Zeitverzug pro Datensatz. Durch Mittelwertbildung über alle betrachteten Datensätze ergibt sich schließlich der zu verwendende Zeitverzug für die entsprechende Betrachtungsgröße für jedes der drei GNSS-Geräte. Diese Methode wird in der vorliegenden Arbeit als sog. *Minimummethode* bezeichnet.

$$\sum_{k=1}^n (\text{Signal}_{GNSS}(t_k) - \text{Signal}_{Fzg}(t_k - \Delta t))^2 \stackrel{!}{=} \min \quad (4.11)$$

mit  $\Delta t = 0, \frac{T_{\text{Abtast, GNSS}}}{10}, \dots, 2 \cdot T_{\text{Abtast, GNSS}}$

## 4.2 Statisches Verhalten sowie Witterungs- und Tageszeiteinfluss

Um Aussagen bzgl. des Witterungs- und Tageszeiteinflusses ableiten zu können, werden statische Versuche untersucht. Parameter dieser Stillstandsversuche sind Witterung, Ort und Uhrzeit. Die Durchführung der Stillstandsversuche erfolgte im Dezember 2006 und Juni 2007 auf dem Versuchsgelände der TU Darmstadt. Hierbei wurden die GNSS-Empfänger auf dem Dachträger des Versuchsfahrzeuges (siehe Abbildung 3.3a, Kapitel 3.2.1) befestigt. Die verwendete Messtechnik wurde in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die Versuchsauswertung erfolgt für die Messgrößen Position und Kurswinkel  $\Theta$ , die die Grundgrößen bezüglich GNSS hinsichtlich der beiden zu untersuchenden Betrachtungsgrößen Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit darstellen. Die Messdauer pro Stillstandsmessung beträgt jeweils 15 min.

### 4.2.1 Position

Der Positionsfehler errechnet sich gemäß Gleichung 4.1. Die Mittelwerte, die Standardabweichung der Positionsfehler sowie der  $CEP_{95}$  sind für die drei GNSS-Geräte und für das Referenzsystem für drei unterschiedliche *Wetterbedingungen*<sup>12</sup> (gut, bewölkt, regnerisch) in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Orte der Stillstandsmessungen, die sog. *Referenzpunkte* sind geodätisch<sup>13</sup> vermessen und die Annahme der Normalverteilung der Positionsfehler ist gegeben. Nähere Informationen sind in Anhang A.5.2 zu finden.

Aus Abbildung 4.2a und Abbildung 4.2c wird ersichtlich, dass der mittlere Positionsfehler bei bewölktem Wetter mit Ausnahme des  $L1_1$ -Empfängers am größten ist und eine Positionsfehlerschwelle von 1,5 m wird für alle drei Wetterbedingungen nicht überschritten (Herstellerangabe für  $L1_2$ : < 15 m,  $L1/L2$ : 1,8 m). Das GNSS-Gerät  $L1_1$  hat seine Positionsfehlerschwelle bei 3,1 m (Herstellerangabe für  $L1_1$ : 10 m). Anhand Abbildung 4.2a und Abbildung 4.2c lässt sich mit Ausnahme des Gerätes  $L1_1$  ableiten, dass der Mittelwert der Positionsfehler bei Bewölkung am größten, bei Regen am geringsten ist. Dies bedeutet, dass eine eindeutige Zunahme der Positionsfehler mit schlechter werdendem Wetter (bis einschl. Regen) nicht abgeleitet werden kann. Auf den  $L1_1$ -Empfänger und seine Eigenschaften wird später näher eingegangen.

Anders verhält es sich bei der Betrachtung der Standardabweichungen und der  $CEP$ 's. Aus Abbildung 4.2b, 4.2d und Abbildung 4.2e ist ein Anstieg von  $\sigma$  und  $CEP_{95}$  mit zunehmend schlechter werdender Wetterbedingung für die beiden Geräte  $L1_2$  und  $L1/L2$  erkennbar. Die größten Streuungs- und  $CEP_{95}$ -Werte werden bei regnerischem Wetter erreicht, deren Werte in Tabelle 4.1 aufgelistet sind.

Auffällig in Abbildung 4.2 ist die Nichtsichtbarkeit der Standardabweichung und des  $CEP$ 's für den  $L1_1$ -Empfänger ( $\sigma_{L1_1} = 0$ ). Der Grund hierfür liegt in der Ausgabe des immer gleichen Positionswertes bei Stillstand. Somit besteht die Vermutung, dass dieses Gerät einen sog. *Fehlerkreis* besitzt. Dies bedeutet, solange die Positionsänderung einen Schwellenwert nicht überschreitet, wird immer der alte Positionswert ausgegeben. Da die Messungen an unterschiedlichen Tagen (wegen Wetter) stattfanden, hat der  $L1_1$ -Empfänger immer einen anderen Wert abgespeichert, so dass eine Aussage bzgl. Witterungseinfluss (Abbildung 4.2) nicht möglich ist.

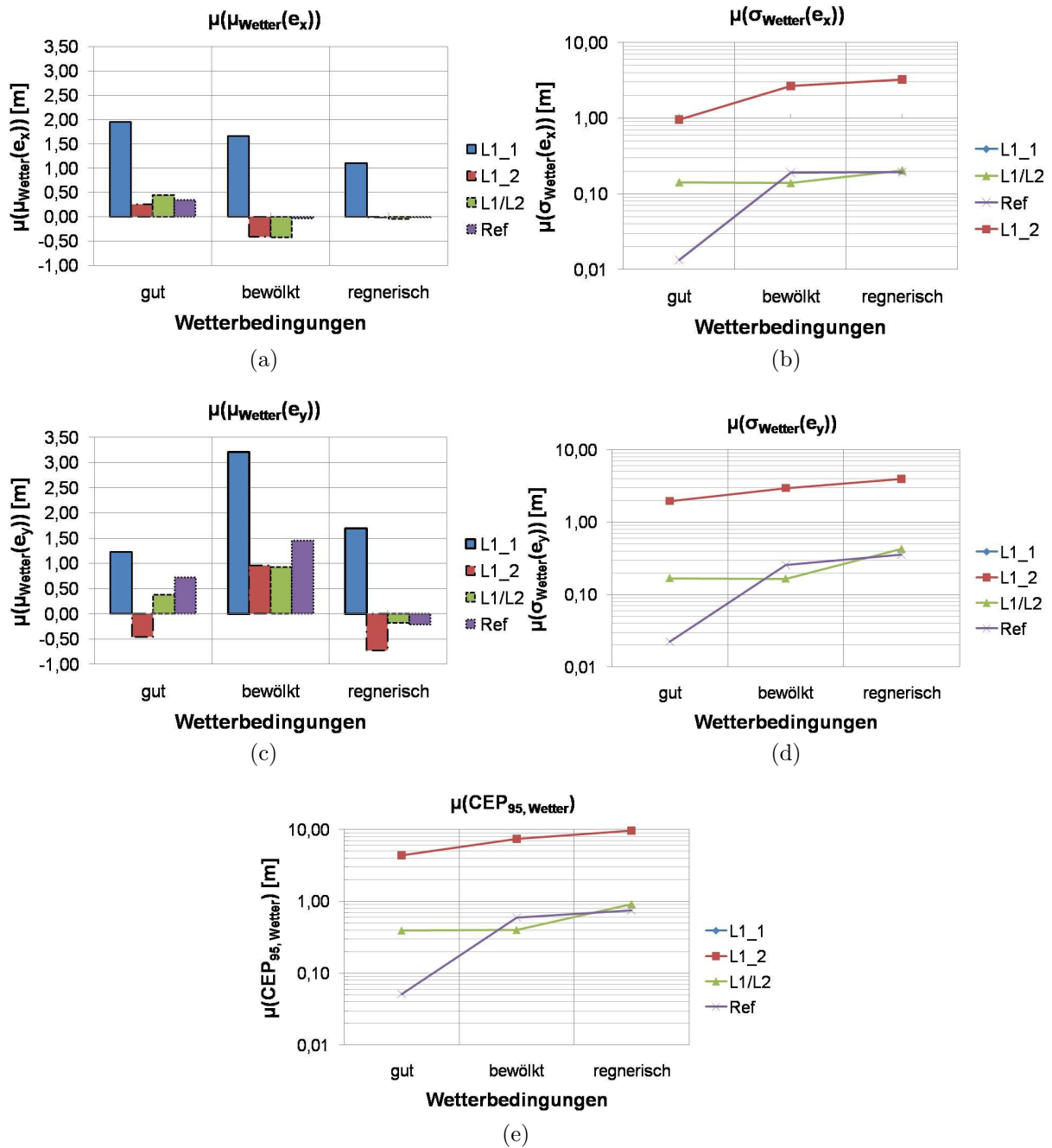
**Tabelle 4.1:** Maximaler  $CEP_{95}$  und maximale Standardabweichung  $\sigma$ , ermittelt bei regnerischem Wetter zu unterschiedlichen Zeitpunkten und an unterschiedlichen Orten.

Größe	L1_1	L1_2	L1/L2	Ref
$CEP_{95,max}$	–	9,5 m	0,9 m	0,9 m
$\sigma_{max}$	–	4,0 m	0,5 m	0,5 m

Aus Tabelle 4.1 ist zum einen zu erkennen, dass die Referenz und der  $L1/L2$ -Empfänger die gleichen Werte annehmen, was mit der Erwartung korreliert, da es sich hierbei um ty-

<sup>12</sup>Diese Bedingungen sind quantitativ anhand der Wetterklassen (siehe HÄNDLER (2006, S. 173)) einteilbar und somit objektiv voneinander abgrenzbar.

<sup>13</sup>Die Messungenauigkeit beträgt maximal 2 mm.

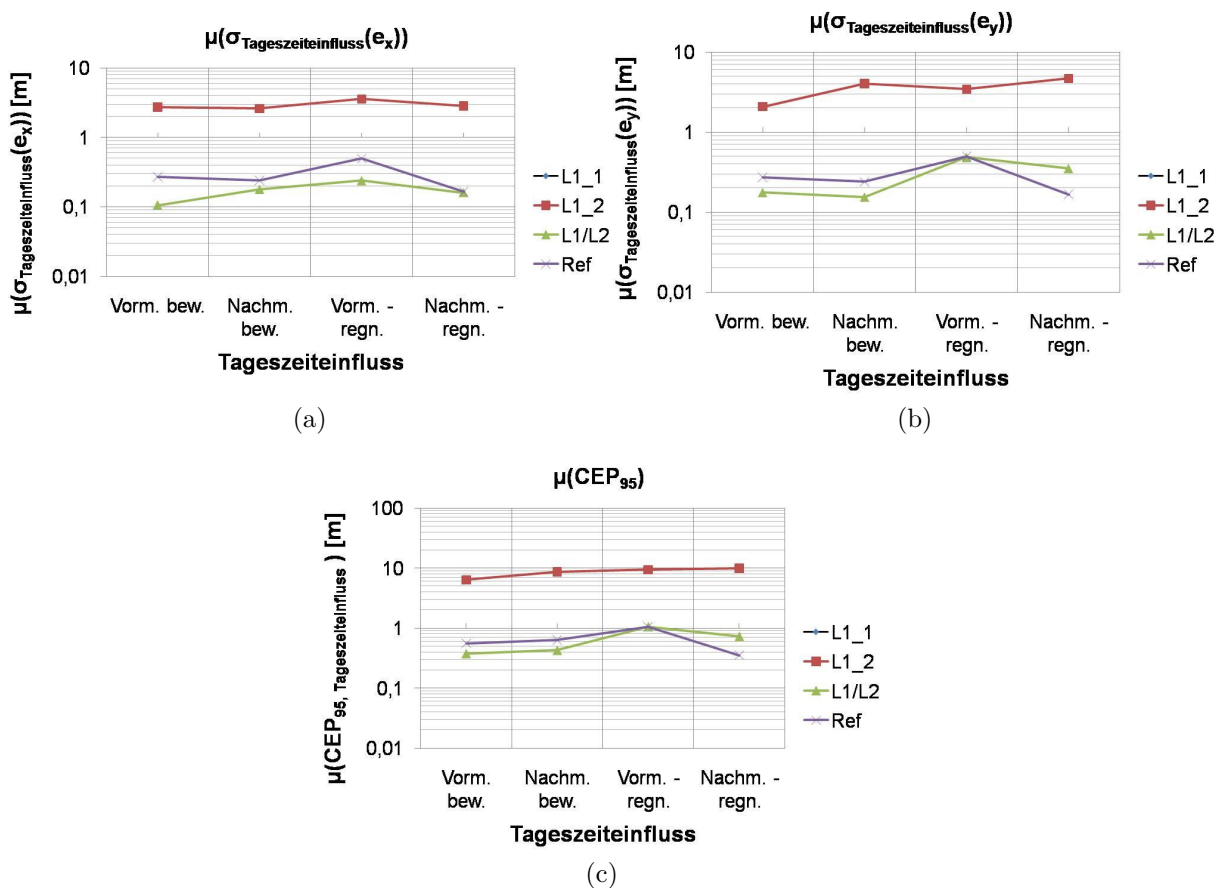


**Abbildung 4.2:** (a) Mittelwert und (b) Standardabweichung für die Positionsabweichung in Richtung x, (c) Mittelwert und (d) Standardabweichung für die Positionsabweichung in Richtung y sowie (e)  $\text{CEP}_{95}$  für Stillstandsmessung an unterschiedlichen Referenzpunkten und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen, Messdauer 15 min.

pengeleiche GNSS-Empfänger handelt. Zum anderen wird eine deutliche Verschlechterung (Faktor 10) sowohl des  $CEP$ 's als auch der Standardabweichung beim Übergang zu dem  $L1_2$ -Empfänger deutlich, was durch Vergleich der beiden Herstellerangaben ( $L1_2$ :  $< 15$  m,  $L1/L2$ : 1, 8 m) ebenfalls der Erwartung entspricht.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich zusammenfassend, dass eine geringe Wetterabhängigkeit zu bestehen scheint. Dennoch liegen die aus den Versuchen ermittelten Werte der Standardabweichung stets in den von den Geräteherstellern angegebenen Genauigkeitsbereichen. Damit erscheint eine explizite Berücksichtigung der herrschenden Wetterbedingungen als nicht erforderlich.

Neben dem Wettereinfluss ist ein *Tageszeiteinfluss* aufgrund der sich ändernden Satellitenkonstellation denkbar. Die sich aus der Tageszeiteinfluss-Untersuchung ergebenden Resultate (Standardabweichungen,  $CEP_{95}$ ) sind in Abbildung 4.3 dargestellt, wobei die Zeiteinteilung in vormittags (00 : 00 Uhr – 12 : 00 Uhr) und nachmittags (12 : 00 Uhr – 24 : 00 Uhr) erfolgt. Die Messungen enthalten die Wetterbedingungen bewölkt und regnerisch.

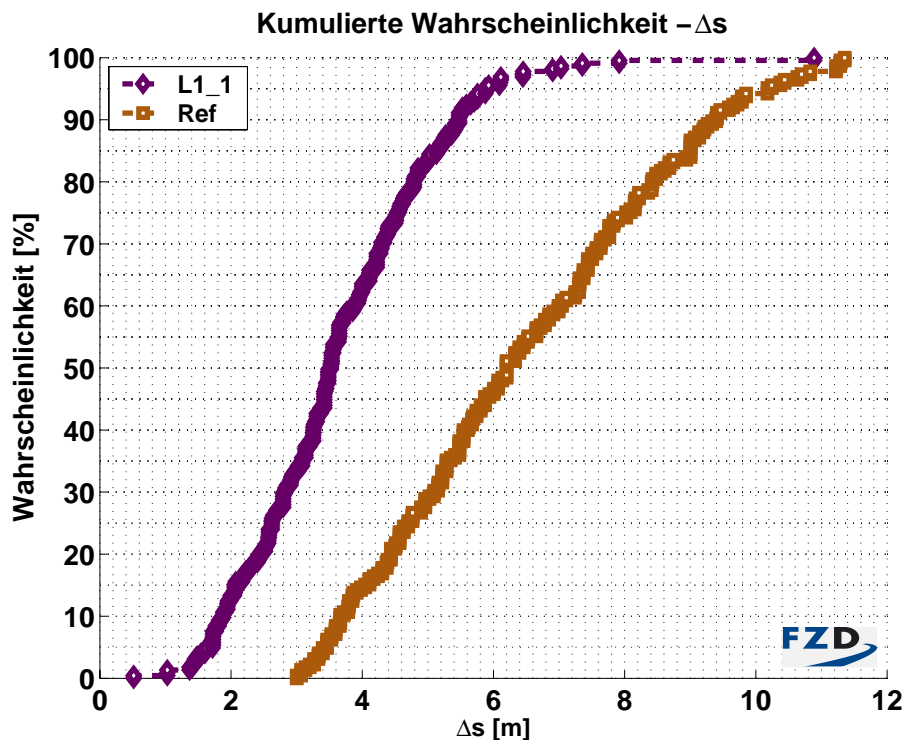


**Abbildung 4.3:** Standardabweichung für die Positionsabweichung in (a) x-Richtung und in (b) y-Richtung sowie (c)  $CEP_{95}$  für Stillstandsmessung an unterschiedlichen Referenzpunkten zu verschiedenen Tageszeiten und bei regnerischem und bewölktem Wetter, Messdauer 15 min.



Bei Betrachtung der Streuung der Positionsfehler um den Mittelwert ist aus Abbildung 4.3 für alle GNSS-Geräte (Ausnahme  $L1_1$ <sup>14</sup>) kein merklicher Tageszeiteinfluss erkennbar. Wie auch bei dem Witterungseinfluss sind beim Tageszeiteinfluss die Streuungswerte für den  $L1_2$ -Empfänger stets um den Faktor 10 größer als für die Referenz und das Gerät  $L1/L2$ .

Das Empfangsgerät  $L1_1$  stellt bei dieser Untersuchung eine Ausnahme dar und die Vermutung der Existenz eines Positionsschwellenwertes wird nun näher analysiert, da dessen Kenntnis für die Datenfusion erforderlich ist. Daher werden alle verfügbaren Manövermessungen (mehr als 200 Messungen) untersucht, die eine mindestens 15-sekündige Stillstandsphase zu Beginn besitzen und an die sich eine Beschleunigungsphase auf gerader Strecke auf die jeweils für die unterschiedlichen Manöver erforderlichen Geschwindigkeiten anschließt. Die Schwellenwertbestimmung erfolgt durch Ermittlung des Zeitpunktes, bei dem das  $L1_1$ -Gerät erstmalig eine Positionsänderung ausgibt. Sowohl diese Positionsänderung in Form des zurückgelegten Weges als auch die bis zu diesem Zeitpunkt aus den Referenzdaten zurückgelegte Wegstrecke werden ermittelt. Die entsprechenden kumulierten Verteilungen für das  $L1_1$ -Gerät sowie für die Referenz sind in Abbildung 4.4 dargestellt.



**Abbildung 4.4:** Kumulierte Wahrscheinlichkeit der zurückgelegten Strecke des  $L1_1$ -Gerätes sowie der Referenz bis Positionsänderung des  $L1_1$ -Gerätes.

Aus Abbildung 4.4 ist eine zurückgelegte Wegstrecke von mindestens 3,1 m erkennbar, die erforderlich ist, bis eine Positionsänderung seitens des  $L1_1$ -Empfängers ausgegeben wird. Der obere Grenzwert (bei 100 % kumulierter Wahrscheinlichkeit) beträgt 11,48 m

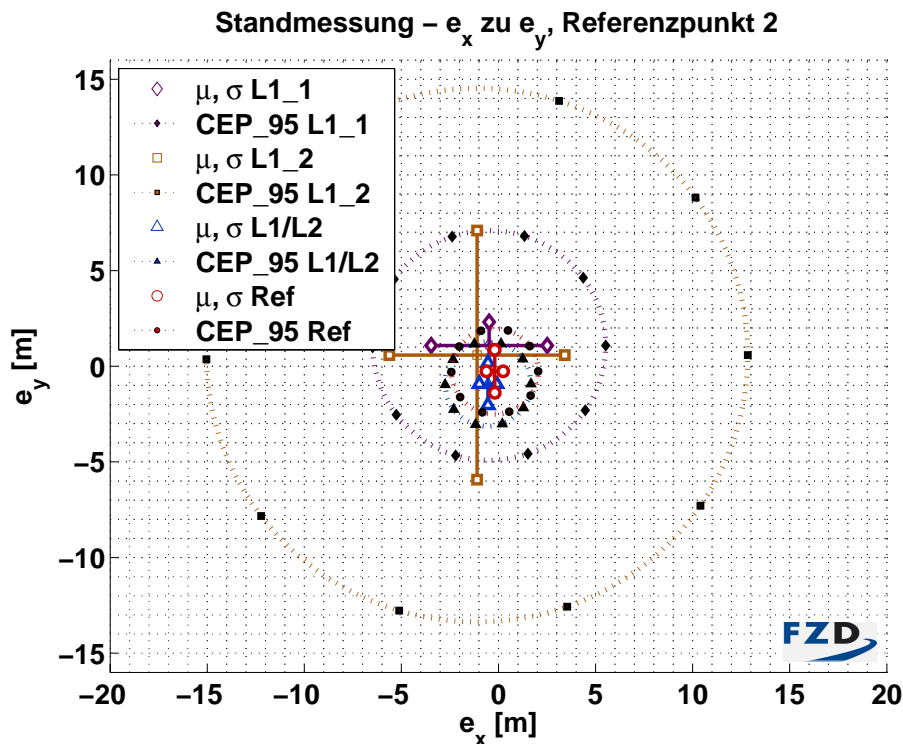
<sup>14</sup>Hier gilt die gleiche Beobachtung wie bereits bei dem Witterungseinfluss.

und der Median (bei 50 % kumulierter Wahrscheinlichkeit) nimmt einen Wert von 6,5 m an (siehe Abbildung 4.4).<sup>15</sup> Dieser Wert ist ungefähr um den Faktor 2 bei Betrachtung des sich aus der Positionsänderung des L1\_1-Gerätes ergebenden zurückgelegten Weges (siehe Abbildung 4.4) geringer.

Auch die Durchführung detaillierter Versuche, bei denen ausgehend von einer mindestens einminütigen Stillstandsmessung eine gerade Strecke bei Schritttempo (ca. 1,6 km/h) bzw. bei einer Geschwindigkeit von ca. 10 km/h zurückgelegt wurde (sog. *Slowforward*-Versuche), hat die Positionsgrenze von 3,1 m bestätigt.

Somit lässt sich auf Basis dieser Beobachtung vermuten, dass das L1\_1-Gerät eine Positionsschwelle integriert hat, die im Bereich von 3 m liegt. Bei Unterschreitung dieser Schwelle erfolgt die Ausgabe des letzten aktuellen (d. h. gespeicherten) Positionswertes.

Für die Generierung einer Aussage über die *Rangfolge* der eingesetzten Geräte bzgl. der erzielbaren Genauigkeit erfolgt eine Zusammenfassung aller vorhandenen Messungen pro Referenzpunkt für jedes Gerät. Die Ergebnisse in Form von  $CEP_{95}$ , Mittelwert der Positionsfehler ( $\mu(e_x), \mu(e_y)$ ) sowie Standardabweichungen ( $\sigma(e_x), \sigma(e_y)$ ) sind exemplarisch für einen Referenzpunkt in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Zahlenwerte für alle Referenzpunkte sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.



**Abbildung 4.5:**  $CEP_{95}$ , Mittelwert und Standardabweichung für die Positionsfehler exemplarisch für den Referenzpunkt 2 (Stillstandsmessung) für alle Geräte, Messdauer pro Messdatei 15 min.

<sup>15</sup>Dieser Wert ergibt sich auf Basis der Referenzdaten.

**Tabelle 4.2:** Mittelwert, Standardabweichung und  $CEP_{95}$  für die Positionsfehler an unterschiedlichen Referenzpunkten (Stillstandsmessung) für alle GNSS-Empfänger und das Referenzsystem, Messdauer pro Messdatei 15 min.

Referenzpunkt 1					
Gerät	$\mu(e_x)$ [m]	$\mu(e_y)$ [m]	$\sigma(e_x)$ [m]	$\sigma(e_y)$ [m]	$CEP_{95}$ [m]
L1_1	-1,95	1,49	–	–	–
L1_2	0,45	-0,54	3,60	4,47	10,00
L1/L2	-0,71	0,72	0,30	0,34	0,78
Ref	-0,35	1,17	0,32	0,51	1,08
Referenzpunkt 2					
Gerät	$\mu(e_x)$ [m]	$\mu(e_y)$ [m]	$\sigma(e_x)$ [m]	$\sigma(e_y)$ [m]	$CEP_{95}$ [m]
L1_1	-0,48	1,09	–	–	–
L1_2	-1,10	0,58	4,52	6,51	13,94
L1/L2	-0,54	-0,93	0,44	1,10	2,21
Ref	-0,19	-0,27	0,43	1,12	2,24
Referenzpunkt 3					
Gerät	$\mu(e_x)$ [m]	$\mu(e_y)$ [m]	$\sigma(e_x)$ [m]	$\sigma(e_y)$ [m]	$CEP_{95}$ [m]
L1_1	4,26	3,61	–	–	–
L1_2	-0,18	0,40	3,41	4,06	9,21
L1/L2	0,18	1,03	0,51	0,57	1,32
Ref	0,29	1,18	0,26	0,67	1,33

Bei idealem Verhalten (keine Störungen, höchste Präzision) müssten die Mittelwerte beider Richtungen den Wert Null annehmen. Wie aus Abbildung 4.5 und Tabelle 4.2 hervorgeht, ist dies nicht gegeben. Vielmehr fällt auf, dass die Ergebnisse der beiden Geräte *L1/L2* und *Ref* sehr nahe beieinander liegen, was aufgrund gleichen GNSS-Empfängertyps<sup>16</sup> mit der Erwartung übereinstimmt. Ferner wird die Vermutung bestätigt, dass sowohl das Referenzsystem als auch das “high-end“-Gerät *L1/L2* deutlich kleinere Positionsfehler (max. 1 m) aufweisen als die “low-end“-Geräte *L1\_1* und *L1\_2*, wobei der mit *L1\_2* gekennzeichnete Empfänger den größten Positionsfehlerkreis ( $CEP_{95} = 10$  m) besitzt. Diese Beobachtungen gelten für alle drei Referenzpunkte (siehe Tabelle 4.2). Darüber hinaus ist für die untersuchten Geräte keine Ortsabhängigkeit bei den durchgeführten Versuchen auf dem Versuchsgelände erkennbar.

#### 4.2.2 Geschwindigkeit, Gierrate und Kurswinkel

Wie im vorigen Kapitel dargestellt, geben die untersuchten GNSS-Empfänger mit Ausnahme des *L1\_1*-Empfangsgeräts auch im Stillstand kontinuierlich gemessene Positionswerte aus. Es wird erwartet, dass bei Vorhandensein eines Zusammenhangs zwischen Position und Geschwindigkeit in den Empfängern (Geschwindigkeit ergibt sich als Ableitung der Position nach der Zeit<sup>17</sup>) aufgrund der Positionsfehler auch Geschwindigkeitsfehler auftreten. Nach Aussage von Experten wird nur für ganz speziell entwickelte GNSS-Empfänger

<sup>16</sup>siehe Tabelle 3.2.

<sup>17</sup>Lau (2008): Gut gespurt – GPS-Tracks auswerten und bearbeiten S. 119.

(beispielsweise Raketenmissionen) die Geschwindigkeit über Dopplerauswertung ermittelt.<sup>18</sup> Bei Betrachtung der Geschwindigkeit über der Zeit für die Stillstandsmessung (Abbildung siehe Anhang A.5.3) ergibt sich eine starke Oszillation im Geschwindigkeitssignal des *L1/L2*-Empfängers (Mittelwert  $\mu = 0,13$  m/s, Streuung  $\sigma = 0,07$  m/s) während das Geschwindigkeitssignal des *L1\_2*-Empfängers und die Fahrzeuggeschwindigkeit den Wert 0 m/s annehmen. Dies legt die Vermutung nahe, dass in dem *L1\_2*-GNSS-Empfänger entweder eine Stillstandserkennung für die Geschwindigkeit oder ein stark gedämpftes Tiefpassfilter für die Position integriert ist.

Ferner geht aus der Geschwindigkeitsbetrachtung eine extrem sensible Reaktion des “high-end“-Gerätes *L1/L2* im Stillstand hervor.

Die Oszillationen bzw. Streuung der Geschwindigkeitsmesswerte des *L1/L2*-Empfängers sind auch bei der Analyse des Kurswinkels (siehe Anhang A.5.3) zu beobachten, während die restlichen Geräte einen konstanten Kurswinkelwert ausgeben, der sich jedoch bei den verschiedenen Geräten unterscheidet. Somit ist eine Verwendung des Kurswinkels für einen Gierratenabgleich im Stillstand nicht geeignet. Diese Beobachtung stimmt mit der Erwartung überein, denn bei einer Antenne im Stillstand gibt es keine zuverlässige Information zum Kurswinkel. Erst wenn ein bestimmtes Geschwindigkeitsniveau überwunden ist, ist aus der Positionsänderung ein Kurswinkel sinnvollerweise berechenbar.

Im Gegensatz hierzu wird im Fahrzeug die Gierrate direkt von dem Gierratensensor gemessen. Unter Nichtberücksichtigung des Mittelwertes, der wie auch der Messwert selbst unter Idealbedingungen den Wert  $0^\circ/\text{s}$  annehmen müsste, wird der absolute Fehler durch die Wurzel des MSE (Mean Square Errors, vgl. Gleichung 4.7), d. h. durch RMSE (Root Mean Square Error) beschrieben und aus Stillstandsmessungen bestimmt. Die erzielten Werte sind für das Referenzsystem sowie für die beiden Gierratensensoren “Fzg“ und “Fzg-ext“ in Tabelle 4.3 angegeben, wobei der maximale Wert aus allen Stillstandsmessungen eingetragen ist.

**Tabelle 4.3:** Absoluter Fehler (RMSE) sowie Sekundendrift der Gierrate, ermittelt aus Stillstandsmessungen mit einer Messdauer von mindestens 15 min.

	<b>Fzg</b>	<b>Fzg-ext</b>	<b>Ref</b>
abs. Fehler (RMSE) [ $^\circ/\text{s}$ ]	0,19	0,20	0,02
Sekundendrift [ $^\circ/\text{s}^2$ ]	$\leq 0,00017$	$\leq 0,00017$	$\leq 0,00004$

Aus Tabelle 4.3 gehen neben der Gleichwertigkeit der beiden Fahrdynamiksensoren auch die um den Faktor 10 größeren maximalen *RMSE*-Gierratenwerte der Fahrdynamiksensoren im Vergleich zum Referenzsystem hervor.

Eine weitere Signalverfälschung entsteht durch die Drift. Für deren Einfluss wird der Sekundendriftwert (Drift pro Sekunde) nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt: Nach zeitlicher Ableitung des Signals einer mindestens 15 min langen Standmessung ist der gleitende Mittelwert mit einer Intervallbreite von 500 ms zu bilden. Durch Differenzbildung

<sup>18</sup>Fachgespräche mit Mitarbeitern der Fachgebiete Flugsysteme und Regelungstechnik, Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie der TU Darmstadt sowie mit Konferenzteilnehmern auf der Konferenz Navigation im Fahrzeug 2006 in Augsburg und auf dem Symposium Positionierung und Navigation 2007 in Magdeburg.

zwischen allen jeweils um 500 ms verschobenen Messpunkten wird ein Hilfssignal generiert, dessen absolutes Maximum die Sekundendrift ergibt.

Diese über die komplette Messdauer ermittelten Werte sind ebenfalls in Tabelle 4.3 angegeben. Es ist ein um den Faktor vier größere Sekundendriftwert für die mit Fzg bzw. Fzg-ext gekennzeichneten Spalten im Vergleich zu dem Referenzsystem (Spalte Ref) erkennbar.

## 4.3 Dynamikverhalten

Für die Untersuchung des Einsatzes von GNSS-Messungen zur Stützung von Fahrdynamik-sensordaten im dynamischen Bereich wird im Folgenden die Verfügbarkeit der GNSS-Daten anhand realer Messungen näher beleuchtet. Hierbei sind die Begriffe Nichtverfügbarkeit und Nichtverwendbarkeit als gleichwertige Begriffe anzusehen. Im Anschluss erfolgt die Analyse der realen GNSS-Daten (Position, Geschwindigkeit und Kurswinkel) hinsichtlich des dynamischen Verhaltens. Hierzu zählt auch die Verzugszeitermittlung.

### 4.3.1 Verfügbarkeitsuntersuchung

Zur Ableitung von Aussagen über die Verfügbarkeit der GNSS-Daten im Straßenverkehr werden für die Ermittlung der Ausfall- bzw. Nichtverfügbarkeitsintervalle (bezogen auf gefahrene Strecke  $s_{ges}$ ) von GNSS-Daten die Kriterien Anzahl der Satelliten (Abkürzung:  $\#Sat$ ) und  $HDOP$ -Faktor, der ein Maß für die Genauigkeit in horizontaler Richtung darstellt, herangezogen. Folgende Ungleichungen werden als Kriterien für die Nichtverfügbarkeit angesehen:

$$HDOP > 4 \quad (4.12)$$

$$\#Sat < 4 \quad (4.13)$$

Nach Untersuchungen von SOLIMENO ist für Luftfahrtanwendungen ein Wert von kleiner als 2 für den  $HDOP$ -Faktor als geeignet anzusehen.<sup>19</sup> Die bei den Luftfahrtanwendungen herrschenden idealen Bedingungen (keine Abschattungen, gute Geometrien) sind bei einem Automotiveneinsatz nicht gegeben. Daher wird ein Wert von 4 als geeigneten Grenzwert für den  $HDOP$ -Faktor angesehen. Bedingung 2 (Gleichung 4.13) leitet sich von dem Aspekt ab, dass bei weniger als vier Satelliten die GNSS-Empfänger in einen 2D-Ersatzmodus umschalten. Wegen den nicht im einzelnen bekannten Eigenschaften wird der 2D-Ersatzmodus nicht weiter betrachtet.

Ferner wird geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den beiden Kriterien besteht. Aus theoretischen Überlegungen wird erwartet, dass der  $HDOP$ -Prozentwert (an nicht verfügbaren Werten) mindestens gleich oder größer dem  $\#Sat$ -Prozentwert ist, denn auch bei einer Verfügbarkeit von mindestens vier Satelliten ist ein  $HDOP$ -Wert von mehr als vier möglich.

Die ermittelten Nichtverfügbarkeitsintervalle werden mit der in diesem Bereich herrschenden Geschwindigkeit multipliziert und auf die gesamte Fahrstrecke bezogen. Der

<sup>19</sup>Solimeno (2007): Low-Cost INS/GPS Data Fusion with Extended Kalman Filter for Airborne Applications S. 98.

sich hieraus ergebende Prozentwert wird im Folgenden als Nichtverwendbarkeitsstreckenprozentanteil, kurz  $NV$  bezeichnet und gemäß Gleichung 4.14 bestimmt, wobei der Zähler die Summe der Ausfallteilstrecken des gefahrenen Streckenabschnitts und  $i$  die  $i$ -te Messdatei darstellt. Auf die Angabe der Ausfallzeit wird aufgrund unterschiedlicher Stillstandszeiten infolge von unterschiedlichen Ampel-Rot-Phasen verzichtet.

$$NV_i = \frac{\sum_{k=1}^N v_{NV,i}(t_{k,\text{Nichtverfügbarkeit},i}) \cdot \Delta t_k}{s_{\text{gesamt},i}} \cdot 100\% \quad (4.14)$$

$$NV = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (NV_i), i = 1, \dots, 5 \text{ (Messdatei)} \quad (4.15)$$

$$NV_{\min} = \min(NV_i), i = 1, \dots, 5 \text{ (Messdatei)} \quad (4.16)$$

$$NV_{\max} = \max(NV_i), i = 1, \dots, 5 \text{ (Messdatei)} \quad (4.17)$$

Unter Anwendung der genannten Kriterien ergeben sich die in Tabelle 4.4 für Stadtfahrten und in Tabelle 4.5 für Überlandfahrten angegebenen Mittelwerte (siehe Gleichung 4.15), Minimas (siehe Gleichung 4.16) und Maximas (siehe Gleichung 4.17) der auftretenden Nichtverwendbarkeitsstreckenprozentanteile  $NV$  für die verschiedenen Streckenabschnitte. Diese Tabellen enthalten ferner die durchschnittliche Fahrzeit  $t_{ges}$  und die durchschnittliche Streckenlänge  $s_{ges}$  der jeweiligen Streckenabschnitte.

**Tabelle 4.4:** Mittelwert, Minimum und Maximum der prozentualen Nichtverfügbarkeitsstrecke für die drei untersuchten GNSS-Empfänger  $L1_1$ ,  $L1_2$  und  $L1/L2$  für die verschiedenen Streckenabschnitte innerhalb des Stadtbereiches.

Geräte	Kennwert	Tunnel		nur Tunnel		Stadt		Caree		Wohn		Böllenfalltor	
		#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP
$L1_1$	$\mu$ [%]	0,88	0,91	17,52	15,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	min [%]	0,69	0,69	14,14	13,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	max [%]	1,01	1,13	20,65	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$L1_2$	$\mu$ [%]	0,34	6,91	0,00	13,75	0,00	0,92	0,00	0,00	0,00	1,00	1,10	7,09
	min [%]	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	max [%]	1,36	13,61	0,00	54,99	0,00	2,03	0,00	0,00	0,00	3,01	4,40	14,28
$L1/L2$	$\mu$ [%]	25,15	46,42	43,46	66,84	14,90	42,03	1,43	4,77	14,07	28,85	63,64	46,87
	min [%]	13,15	27,96	34,48	35,97	4,79	14,87	1,00	1,35	7,37	8,78	46,93	3,26
	max [%]	39,25	66,11	67,37	96,58	26,67	59,21	2,57	12,31	22,21	44,81	83,74	76,41
$s_{ges}$	$\mu$ [m]	4905	4905	248	248	4277	4277	1022	1022	5456	5456	2026	2026
$t_{ges}$	$\mu$ [s]	700	700	17	17	590	590	147	147	808	808	235	235

**Tabelle 4.5:** Mittelwert, Minimum und Maximum der prozentualen Nichtverfügbarkeitsstrecke für die drei untersuchten GNSS-Empfänger  $L1_1$ ,  $L1_2$  und  $L1/L2$  für Überlandfahrten.

Geräte	Kennwert	Autobahn		Wald		Land2		Land3		Land4		Griesheim	
		#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP
$L1_1$	$\mu$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
	$min$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$max$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
$L1_2$	$\mu$ [%]	0,00	0,00	0,24	2,42	0,00	1,97	0,08	0,98	0,00	0,03	0,00	0,27
	$min$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$max$ [%]	0,00	0,00	0,89	4,72	0,00	3,97	0,33	2,28	0,00	0,12	0,00	1,26
$L1/L2$	$\mu$ [%]	9,23	6,38	43,02	42,87	23,35	23,52	33,95	34,67	6,03	11,84	1,99	6,59
	$min$ [%]	3,16	1,46	25,77	19,40	11,92	15,79	16,09	9,62	1,19	2,08	1,06	3,19
	$max$ [%]	26,74	20,35	93,14	73,65	45,52	31,95	66,46	61,07	15,75	21,20	3,18	9,98
$s_{ges}$		23296	23296	10747	10747	11565	11565	10033	10033	11329	11329	5057	5057
$t_{ges}$		791	791	721	721	793	793	737	737	956	956	456	456



Aus beiden Tabellen (Tabelle 4.4, Tabelle 4.5) ist erkennbar, dass der *L1\_1*-Empfänger nur für die Tunnelstrecke und den Tunnelabschnitt (in Tabelle 4.4 mit “nur Tunnel“ bezeichnet) für beide Kriterien Nichtverfügbarkeitsbereiche aufweist. Gerade im Tunnelabschnitt erscheint ein nahezu 100 %-iger Ausfall plausibel, der nur von dem *L1/L2*-Empfänger und auch nur für das Kriterium *HDOP* (Maximumwert) erreicht wird. Der *L1\_1*-Empfänger erkennt lediglich 1/5 (Maximumwert) der Nichtverwendbarkeit. Diese Beobachtung ist auf das Empfängermodell zurückzuführen. Da es sich bei dem *L1\_1*-Gerät um einen Navigationsempfänger handelt (C/A-Code-Empfänger), ist dieser auf möglichst sensitiven Empfang (Sirf III-Chip) und konstante Positionsabgabe (d.h. Fortschreibung der alten Position) ausgelegt. Ferner ist zu vermuten, dass dieser Empfänger gefilterte Daten ausgibt, was geglättete Trajektorien zur Folge hat. Eine genaue Untersuchung dieses Zusammenhangs ist aufgrund fehlenden Zugangs zum Quellcode nicht möglich.

Ein etwas anderes Verhalten zeigt das *L1\_2*-Gerät, das zwar auch ein Navigationsempfänger (C/A-Code-Empfänger) ist, jedoch einen herstellerspezifischen Chipsatz enthält. Bei diesem wird ansatzweise eine Nichtverwendbarkeit der GNSS-Daten angezeigt, allerdings nur anhand des Kriteriums *HDOP*. Somit besteht auf Basis von realen Versuchsdaten bei dem *L1\_2*-Empfänger kein direkt erkennbarer Zusammenhang zwischen *HDOP* und *#Sat* auf Basis der von dem Empfänger ausgegebenen *HDOP*- und *#Sat*-Werten, was anhand des Tunnelabschnittes zu erkennen ist. Da bei der Tunneldurchfahrt keine direkte Sichtbarkeit zu den Satelliten besteht, wird für dieses Kriterium, ein von 0 verschiedener Wert bei den entsprechendem GNSS-Gerät erwartet.

Der störungsempfindlichste Empfänger ist das *L1/L2*-Gerät, ein geodätischer Empfänger, der durch Genauigkeit und “Ehrlichkeit“, d.h. kein Fortschreiben der alten Position, charakterisiert ist. In Tabelle 4.4 ist zu erkennen, dass in den durch mehrstöckige Häuser und Bewaldung gekennzeichneten Streckenabschnitten eine Nutzung der GNSS-Daten bei max. 84 % der gefahrenen Strecke nicht zur Stützung geeignet ist. Bei Landstraßen, die nicht sehr stark von Bewaldung umgeben sind (in Tabelle 4.5 mit Land2, Land3, Land4 gekennzeichnet) fällt die Nichtnutzbarkeitsgrenze auf einen maximalen Wert von 66 %, der Durchschnittswert beträgt 35 %. Diese Werte erreichen bei Autobahnfahrten ihr Minimum, was zu einer GNSS-Daten-Nutzbarkeit von mindestens 73 %, bzw. durchschnittlich von 90 % führt.

Dass eine Verwendung beider Kriterien (*#Sat*, *HDOP*) als Hinweis auf die Nichtnutzbarkeit der GNSS-Daten notwendig ist, zeigen die entsprechenden Spalten für den *L1/L2*-Empfänger und teilweise auch für den *L1\_1*-Empfänger in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5. Hier bestätigt sich die Erwartung  $\#Sat [\%] \leq HDOP [\%]$  nicht durchgehend. Während die Erwartung bei dem *L1\_1*-Gerät lediglich bei der reinen Tunnelbetrachtung nicht erfüllt wird, tritt die Nichterfüllung bei dem *L1/L2*-Empfänger auf den Strecken “Autobahn“, teilweise “Landstraße“ und “Böllenfalltor“ auf, d.h. bei höheren Geschwindigkeiten und bei stark bewaldeten Strecken.

Wie groß der maximal zusammenhängende Nichtverwendbarkeitsstreckenabschnitt (Angabe in m) für jeden Abschnitt ist, zeigt Tabelle 4.6. Die Ermittlung der hierin dargestellten Ergebnisse basieren auf Gleichung 4.18.

$$NV_{max} = \max_i(\max(NV_i)), i = 1, \dots, 5 \text{ (Messdatei)} \quad (4.18)$$

**Tabelle 4.6:** Maximal zusammenhängender Nichtverwendbarkeitsstreckenabschnitt für die drei untersuchten GNSS-Empfänger *L1\_1*, *L1\_2* und *L1/L2* für verschiedene Streckenabschnitte (Überland- und innerstädtische Fahrten).

Gerät	L1_1		L1_2		L1/L2	
	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP	#Sat	HDOP
-						
Autobahn [m]	0,0	0,0	0,0	0,0	1674,9	2171,2
Wald [m]	0,0	0,0	70,9	236,4	7864,7	7877,6
Land2 [m]	0,0	0,0	0,0	194,3	1497,7	1497,7
Land3 [m]	0,0	0,0	33,0	117,4	3048,0	4754,6
Land4 [m]	0,0	9,1	0,0	13,6	559,7	443,0
Griesheim [m]	0,0	0,0	0,0	64,7	38,4	85,0
Tunnel [m]	66,7	47,1	66,7	299,7	336,5	542,9
Stadt [m]	0,0	0,0	0,0	37,6	108,2	444,8
Caree [m]	0,0	0,0	0,0	0,0	15,2	39,9
Wohn [m]	0,0	0,0	0,0	62,7	200,2	682,5
Böllenfalltor [m]	0,0	0,0	89,1	258,7	695,7	622,2

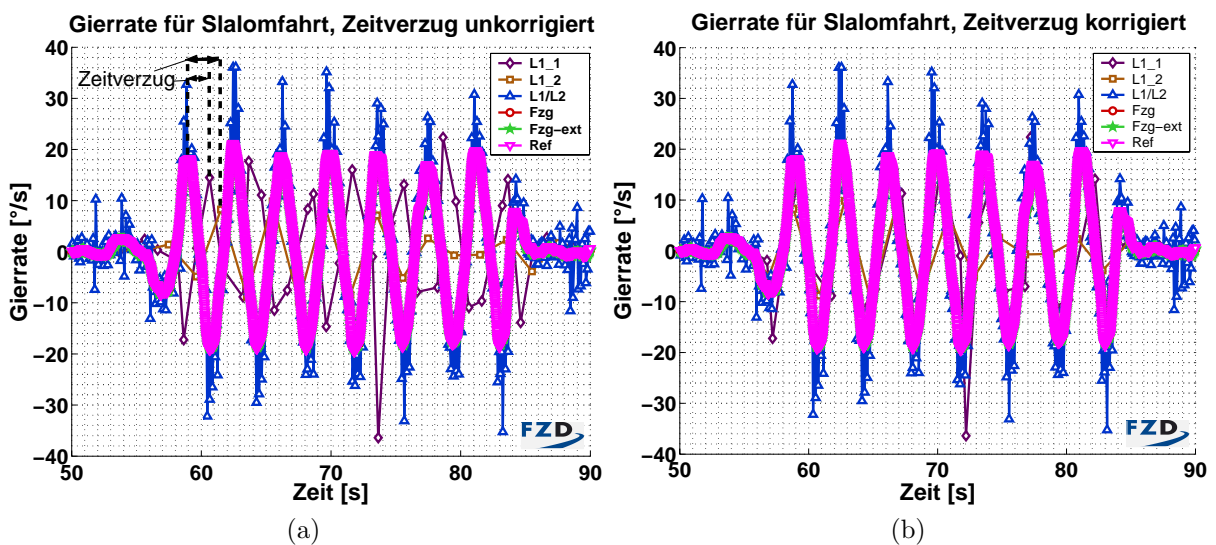
Anhand der Zahlenwerte aus Tabelle 4.6 ergibt sich für nicht extrem bewaldete Landstraßen, Autobahn und für den Innenstadtbereich ein maximal zusammenhängender Streckenausfall der GNSS-Daten von 1498 m. Sind die Strecken an beiden Seiten von Bäumen umgeben, so steigt der Anteil des maximal zusammenhängenden Nichtverwendbarkeitsstreckenanteils der GNSS-Daten auf bis zu 7878 m an.

Es wird davon ausgegangen, dass die Häufigkeit dieser extremen von Bäumen umgebenen Straßen geringer ist und für die restlichen Streckentypen die maximal zusammenhängenden Ausfälle 1498 m betragen. Daher ergibt sich aus der Verfügbarkeitsbetrachtung zum einen die Erkenntnis, dass eine Stützung der Fahrdynamiksensordaten mit GNSS-Daten für den üblichen Automotiveneinsatz aufgrund der Verfügbarkeit der GNSS-Daten möglich ist. Zum anderen wurde abgeleitet, dass hinsichtlich einer Fusion als Plausibilitätskriterium sowohl die Anzahl der Satelliten als auch der *HDOP*-Faktor zu verwenden sind. Auch hat sich gezeigt, dass Signalabschattungen von den "low-end"-Geräten (Navigationsempfänger, d. h., C/A-Code-Empfänger) zum größten Teil anhand der genannten Kriterien aufgrund ihres Empfängermodells überbrückt werden. Detaillierte Aussagen erfordern die Kenntnis des Quellcodes, der jedoch von den Herstellern nicht offengelegt wird.

Zusammenfassend lässt sich auf Basis der Analyse des störungsempfindlichsten GNSS-Empfängers *L1/L2* festhalten, dass auf Autobahnen die durchschnittliche Verwendbarkeit 90 %, höchstens aber 97 % beträgt, während diese Werte für Überlandfahrten auf 65 % bzw. 84 % und für Strecken, gekennzeichnet durch starke Bewaldung oder mehrstöckige Häuser, auf 34 % bzw. 53 % sinken können.

### 4.3.2 Verzugszeitbestimmung

Voruntersuchungen dynamischer Messungen (beispielsweise Beschleunigungs- bzw. Slalomfahrten) haben das Vorhandensein von Verzugszeiten zwischen GNSS-Daten und Fahr-dynamikensordaten gezeigt, wie in Abbildung 4.6a exemplarisch anhand der Gier- bzw. Kursrate für die verschiedenen GNSS-Empfänger dargestellt. Die Fusion nicht-synchroner Daten macht eine zeitliche Zuordnung der unterschiedlichen Messwerte zueinander und somit die Kenntnis des vorhandenen Zeitverzugs der GNSS-Daten erforderlich. Da für die beiden Betrachtungsgrößen Geschwindigkeit und Gier- bzw. Kursrate die Messsignale Position sowie Kurswinkel von seiten des GNSS-Empfängers relevant sind, beschränkt sich die quantitative Ermittlung des Zeitverzugs, die gemäß Gleichung 4.11 erfolgt, auf diese genannten Messsignale.



**Abbildung 4.6:** Gier- bzw. Kursrate für GNSS-Geräte, Fahrzeug und Referenzsystem (Ausschnitt) für eine Slalomfahrt bei einer Geschwindigkeit von  $v = 40\text{km}/h$ , (a) Zeitverzug für L1.1 und L1.2-Gerät deutlich erkennbar. (b) Zeitverzug entsprechend korrigiert.

Die Analyse des Zeitverzugs zwischen Referenzsignal und entsprechendem Fahrzeugsensorsignal durch die in Kapitel 4.1 vorgestellte *Minimummethode* (Gleichung 4.11) ergab keine Verzugszeit zwischen diesen beiden Signalen. Daher wird im Folgenden für die Verzugszeitermittlung der entsprechenden GNSS-Signale als Referenz das Fahrzeugsensorsignal verwendet.

Unter Anwendung der Minimummethode zur Ermittlung des Zeitverzuges für die Kursrate wird das worst-case-Szenario ‘‘Slalom‘‘ mit seinen Abwandlungen betrachtet, wobei sich hierfür folgende Hypothese ergibt: ‘‘Wird der Kurswinkel aus den Positionswerten bestimmt<sup>20</sup>, so ist die Verzugszeit der Kursrate gleich der Summe aus Verzugszeit der Positionswerte und der Zykluszeit. Falls ein GNSS-Empfänger den Kurswinkel unter Anwendung der Phasenbestimmung bzw. des Dopplereffektes ermittelt, so stellt sich nahezu keine<sup>21</sup> Verzugszeit ein.’’

<sup>20</sup>Durch Ableitung des Kurswinkels durch Differenzierung über  $\Delta t$  wird die Kursrate bestimmt.

<sup>21</sup>Nahezu keine bedeutet hier, dass der Verzug maximal die Hälfte der Zykluszeit beträgt.

Die sich aus den Versuchen ergebenden Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Verzugszeiten für die Kursrate sind in Tabelle 4.7 aufgeführt. Neben diesen sind in Klammern zusätzlich die aufgrund der Hypothese erwarteten Verzugszeiten angegeben. Die Auflistung der Mittelwerte und der Standardabweichung für die einzelnen Manöver sind in Anhang A.5.4, Tabelle A.7 zu finden. Hier sind keine gravierenden Abweichungen feststellbar.

**Tabelle 4.7:** Gemittelter Zeitverzug sowie dessen Standardabweichung für Betrachtungsgröße Kursrate für unterschiedliche GNSS-Empfänger aus den Manövern Slalom mit Geschwindigkeiten 40 km/h und 50 km/h sowie den amplituden- bzw. frequenzmodulierten Slalom.

L1_1		L1_2		L1/L2	
$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$
1,75 (1,79)	$\pm 0,04$	2,97 (2,61)	$\pm 0,21$	0,05 (0,16)	$\pm 0,02$

Aus Tabelle 4.7 geht hervor, dass für die Empfänger *L1\_1* und *L1\_2* die Erwartung (siehe eingeklammerte Werte) erfüllt ist. Bei Vergleich der Erwartung mit dem ermittelten Wert tritt maximal eine Abweichung von 2,2 % bzw. 13,8 % auf, während das “high-end“-Gerät *L1/L2* eine ermittelte Verzugszeit aufweist, die exakt der Hälfte der Zykluszeit entspricht. Somit ist zu vermuten, dass die Ermittlung des Kurswinkels bei diesem Gerät aus der Phasenbestimmung oder unter Nutzung des Dopplereffektes erfolgt.

Unter Berücksichtigung dieser ermittelten Verzugszeiten ist der sich ergebende Verlauf für die Gier- bzw. Kursrate in Abbildung 4.6b beispielhaft für das Manöver “Slalom“ dargestellt. Hier ist eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzsignal im Vergleich zu Abbildung 4.6a erkennbar.

Für die Ermittlung der Verzugszeit der Positionswerte wird ein analoges Vorgehen gewählt (siehe Gleichung 4.11). Es wird erwartet, dass die Verzugszeiten im Bereich der Abtastung des jeweiligen GNSS-Gerätes liegen. Als Manöver wird hierfür das worst-case-Szenario Beschleunigung mit anschließender Verzögerungsfahrt mit Zielgeschwindigkeiten 80 km/h, 100 km/h und 180 km/h sowie “Bonanza“ herangezogen. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 4.8 dargestellt (Details siehe Tabelle A.8 in Anhang A.5.4).

**Tabelle 4.8:** Gemittelte Verzugszeit sowie deren Standardabweichung für das Messsignal Position / Weg für unterschiedliche GNSS-Empfänger aus den Manövern Beschleunigung mit anschließender Verzögerungsfahrt und Bonanza.

L1_1		L1_2		L1/L2	
$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$
0,79	$\pm 0,16$	0,61	$\pm 0,03$	0,06	$\pm 0,004$

Mit Ausnahme des *L1\_2*-Gerätes wird die Erwartung bzgl. der Verzugszeit für die Positionswerte bestätigt, während sich für das *L1\_2*-Empfangsgerät ein um den Faktor 3 geringerer Zeitverzug ergibt. Somit ist vor dem erstmaligen Einsatz eines GNSS-Gerätes stets die Verzugszeit zu ermitteln.

Ein Nachteil bei der Verwendung der Minimummethode besteht in der sehr schwierigen Bestimmung des globalen Minimums bei einem sehr flachen Kurvenverlauf der Summe der quadrierten Abweichungen (siehe Abbildung A.14 in Anhang A.5.4). Dies hat zur Folge, dass eine hohe Sensitivität bei der Verzugszeitermittlung besteht. Auf diese Sensitivität wird in Kapitel 4.3.4 näher eingegangen, in dem eine alternative Methode zur Verzugszeitermittlung vorgestellt wird.

### 4.3.3 Qualitätsuntersuchung Kurswinkel

Für die Koppelortung hat der Gierratenoffsetfehler durch die zeitliche Integration einen großen Einfluss (siehe Kapitel 2.2.2.2). Um diesen Offsetfehler mithilfe des GNSS-Kurswinkels zu stützen, ist eine Analyse dieser Größe erforderlich. Daher wird im Folgenden die Kurswinkeländerung  $\Delta\Theta$  näher betrachtet, indem deren Streuungen sowie das Quadrat der Kurswinkeländerungen untersucht werden. Als zu untersuchende Manöver werden Geradeausfahrten mit konstanten, unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrachtet, da sich bei diesem Manöver bei Vorliegen von idealen Bedingungen keine Kurs- bzw. Gierwinkeländerungen ergeben. Die Betrachtungsgröße ist jeweils die Kurswinkeländerung  $\Delta_k\Theta_{\tau_i}$  innerhalb des Zeitintervalls  $\tau_i$ , wobei  $\tau_{i,min}$  der Wert der jeweiligen Geräte-Abtastzeit  $T_{Abtast, \text{Gerät}}$  und  $\tau_{i,max}$  die halbe Messdauer sind und sich wie folgt berechnet:

$$\Delta_k\Theta_{GNSS,\tau_i} = \Theta_{GNSS}(t_k + \tau_i) - \Theta_{GNSS}(t_k) \quad (4.19)$$

Der Kurswinkel bzw. die Kurswinkeländerung werden nicht direkt von den Fahr-dynamikensordaten bereitgestellt. Da diese jedoch mit den GNSS-Werten zu vergleichen sind, erfolgt deren Ermittlung aus der Gierrate gemäß Gleichung 4.20 und wird in den entsprechenden Diagrammen mit "Fzg" gekennzeichnet.

$$\Delta_k\psi_{Fzg,\tau_i} = T_{Abtast, \text{Gerät}} \cdot \sum_{l=t_k}^{t_k+\tau_i} \left( \dot{\psi}_{Fzg}(l) - \dot{\psi}_{mittel,offset} \right) \quad (4.20)$$

$$\text{mit } \dot{\psi}_{mittel,offset} = \frac{\psi_n(T_{Messdauer,gesamt})}{T_{Messdauer,gesamt}} \quad (4.21)$$

Hierbei kennzeichnet  $\dot{\psi}_{Fzg}$  die Fahrzeuggierrate.  $\dot{\psi}_{mittel,offset}$  beschreibt einen Korrekturwert, der sich aus dem Gierwinkel am Ende der Messung und der Zeitdauer der Messung  $T_{Messdauer,gesamt}$  gemäß Gleichung 4.21 ergibt. Diese Korrektur ist in Gleichung 4.20 aufgrund der  $\tau$ -Betrachtung zu berücksichtigen, da sonst unterschiedlich große Mittelwerte (aufgrund der unterschiedlich langen Zeitintervalle, Driftverhalten) den  $\tau$ -Vergleich verfälschen würden. Eine Darstellung des Sachverhaltes sowie die Herleitung von Gleichung 4.20 findet sich im Anhang A.5.5.

Die Vernachlässigung des Schwimmwinkels und somit der Differenz des Gierwinkels zum Kurswinkel ist zulässig, da der Schwimmwinkel bei konstanter Geradeausfahrt und keiner Querneigung sowie nur minimalem Seitenwind und korrekter Fahrwerkeinstellung den Wert  $0^\circ$  annimmt. D. h. es gilt  $\Delta_k\Theta_{GNSS,\tau_i} = \Delta_k\psi_{Fzg,\tau_i}$ .

In Abbildung 4.7 sind die Ergebnisse dargestellt, wobei links die Streuungen der Kurswinkeländerungen (vgl. Gleichung 4.4) und rechts die Mittelwerte der quadrierten Kurswinkeländerungen ( $MSE$ , vgl. Gleichung 4.7) dargestellt sind. Auf die Ergebnisdarstellung des mit “Fzg-ext“ bezeichneten Sensors wird verzichtet, da im Vergleich zu den mit “Fzg“-bezeichneten Sensordaten kein weiterer Erkenntnisgewinn besteht.

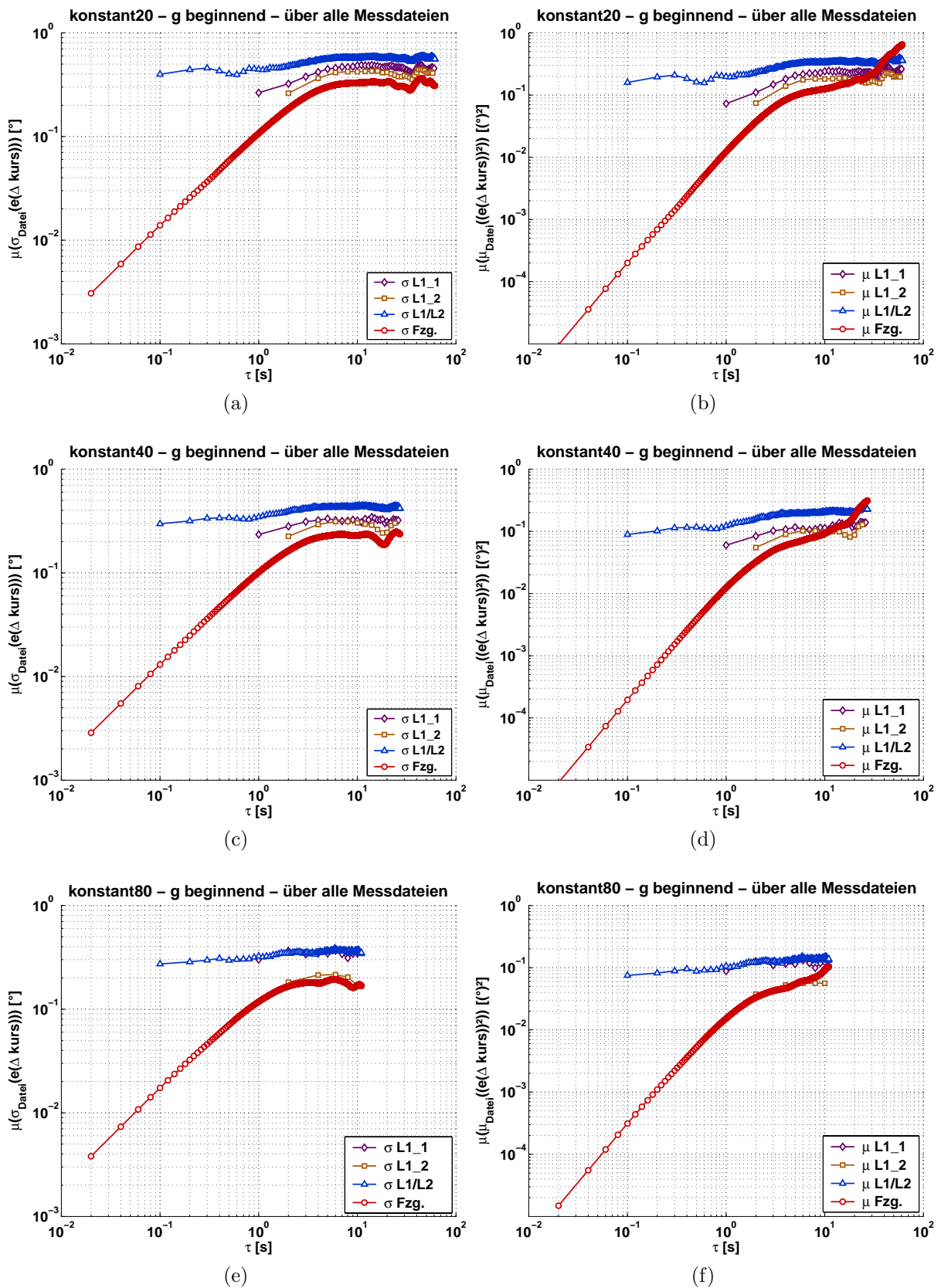
Aus Abbildung 4.7 geht hervor, dass für alle untersuchten Geschwindigkeiten und für alle Zeitintervalle  $\tau_i$  die Standardabweichung sowie der mittlere quadratische Kurswinkeldifferenzwert ( $MSE$ ) für den mit  $L1/L2$  gekennzeichneten GNSS-Empfänger stets höher ist als die Werte für die beiden anderen Empfänger. Werden die Verläufe für die Standardabweichung und den  $MSE$  für die GNSS-Geräte näher betrachtet, so weisen diese für alle drei GNSS-Geräte bei Geschwindigkeiten von  $v = 20$  km/h (Abbildung 4.7a, Abbildung 4.7b) bis zu einem Zeitintervall  $\tau = 10$  s bzw. bei Geschwindigkeit  $v = 40$  km/h (Abbildung 4.7c, Abbildung 4.7d) und  $v = 80$  km/h (Abbildung 4.7e, Abbildung 4.7f) bis zu einem  $\tau = 5$  s einen leichten Anstieg auf. Für größere Zeitintervalle zeigen beide Fehlermaße einen konstanten Verlauf. Dies bedeutet, dass ab einem  $\tau$  von 10 s das Endniveau für die Kurswinkeldifferenz bei Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit für die GNSS-Empfänger vorliegt, unabhängig von der Geschwindigkeit.

Bei Betrachtung der Anfangs- und Endniveaus der Streuungsmittelwerte der GNSS-Kurswinkeldifferenzen (Abbildung 4.7a, Abbildung 4.7c, Abbildung 4.7e) ist folgendes zu beobachten. Während die Streuungswerte des  $L1/L2$ -Empfängers und des  $L1_2$ -Empfangsgerätes für alle Geschwindigkeiten sowohl für das Anfangs- als auch das Endniveau abnehmen (mit zunehmender Geschwindigkeit weniger stark) ist bei dem  $L1_1$ -Empfänger lediglich eine Reduzierung des Streuungsmittelwertes beim Übergang von 20 km/h auf 40 km/h zu erkennen. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h fallen die Verläufe des  $L1_1$ -Empfängers sowie des  $L1/L2$ -Gerätes fast zusammen. So weisen die “low-end“-Geräte im niedrigen Geschwindigkeitsbereich für alle  $\tau$ -Werte stets eine niedrigere mittlere Kurswinkeldifferenzstreuung auf als das “high-end“-Gerät.

Anders verhält es sich dagegen bei Betrachtung der Kurswinkeldifferenz der Fahrdynamikensordaten. Hier ist für die Standardabweichung (linke Spalte von Abbildung 4.7) ein Anstieg mit Steigung 1 bis  $\tau = 2$  s zu beobachten, der anschließend abfällt und ab  $\tau = 4$  s in einen nahezu horizontalen Verlauf übergeht.

Für die gesamte  $\tau$ -Betrachtung sind die mittleren Streuungswerte stets geringer als die aus den GNSS-Daten ermittelten. Im Gegensatz zu den GNSS-Daten ist hier eine eindeutige Reduzierung des Streuungsendniveaus bestimmbar. Der Reduzierungsbetrag  $\Delta_{red}$  (beispielsweise  $\Delta_{red,20-40} = \Delta\Theta(v 20 \text{ km/h}) - \Delta\Theta(v 40 \text{ km/h})$ ) verringert sich mit Verdoppelung der Geschwindigkeit jeweils um die Hälfte, d. h.  $\Delta_{red,20-40} = 0,1^\circ$  und  $\Delta_{red,40-80} = 0,05^\circ$ .

Für den  $MSE$ -Verlauf (Abbildung 4.7b, Abbildung 4.7d, Abbildung 4.7f) ergibt sich für die aus der Fahrzeuggierrate ermittelten Werte insgesamt ein etwas anderes Verhalten als für die untersuchten GNSS-Empfänger. Bis zu einem  $\tau$  von  $= 2$  s weist der Anstieg eine Steigung von 2 auf, danach verflacht die Kurve bis ein Wendepunkt bei  $\tau_i \approx 10$  s erreicht ist. Ab diesem Wendepunkt vergrößert sich der Steigungswert erneut, wobei der Anstieg geschwindigkeitsabhängig zu sein scheint. Dies ist daran zu erkennen, dass der  $MSE$ -



**Abbildung 4.7:** Standardabweichung der Kurswinkeldifferenzen ((a), (c), (e)) und Mittelwert der quadratischen Kurswinkeldifferenzen ((b), (d), (f)), aufgetragen für unterschiedliche Zeitintervalle  $\tau_i$  für Geradeausfahrten mit verschiedenen, konstanten Geschwindigkeiten (20 km/h, 40 km/h, 80 km/h).

Verlauf für die Geschwindigkeit  $v = 20$  km/h ab  $\tau_i = 40$  s, für  $v = 40$  km/h ab  $\tau_i = 20$  s und für  $v = 80$  km/h ab  $\tau_i = 10$  s erneut den Anfangssteigungswert von 2 annimmt. Durch diesen erneuten Anstieg kommt es zu einem Schneiden der Kurvenverläufe der Fahrdynamiksensoren mit denen der GNSS-Empfänger. Dies bedeutet, dass die GNSS-Empfänger-Datenfehler ab dem sog. "Break-Even-Point"  $\tau_{BEP}$ , der quantitativ für die verschiedenen Geschwindigkeiten in Tabelle 4.9 aufgelistet ist, geringer sind als die der Fahrdynamiksensordaten. Aufgrund dessen ist eine Stützung der Fahrzeuggierate durch GNSS-Kursrate möglich.

**Tabelle 4.9:**  $\tau$ -Wert für den Schnittpunkt der Mittelwerte der quadrierten Kurswinkeldifferenzwerte in Abhängigkeit unterschiedlicher Geschwindigkeiten, ermittelt für konstante Geradeausfahrten.

Geschwindigkeit	L1_1	L1_2	L1/L2
$v = 20$ km/h	40 s	40 s	60 s
$v = 40$ km/h	20 s	20 s	30 s
$v = 80$ km/h	20 s	10 s	20 s

Auffällig ist eine Halbierung von  $\tau_{BEP}$  bei Verdoppelung der Geschwindigkeit von 20 km/h auf 40 km/h. Bei weiterer Verdoppelung der Geschwindigkeit ist die Reduzierung von  $\tau_{BEP}$  vom betrachteten GNSS-Empfänger abhängig. Während der "Break-Even-Point" des "low-cost"-Gerätes L1\_1 seinen Wert beibehält, kommt es bei dem zweiten "low-cost"-Empfänger L1\_2 erneut zu einer Halbierung bzw. bei dem "high-end"-Empfangsgerät L1/L2 zu einem um ein Drittel geringeren  $\tau_{BEP}$ . Dies ist auf die Abnahme der Absolutwerte der horizontalen Verläufe (Endniveau) bei den GNSS-Geräten zurückzuführen, während das Anfangsniveau sich nur geringfügig ändert. Dies bedeutet eine Reduzierung der Anfangssteigung mit zunehmender Geschwindigkeit, v. a. für die "low-end"-Geräteverläufe.

Wird von einer Verdoppelung von  $\tau_{BEP}$  bei Halbierung der Geschwindigkeit im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (von 20 km/h auf 10 km/h) ausgegangen und ein gemeinsamer Wert für alle drei GNSS-Empfänger angestrebt, so stellt ein  $\tau_{BEP}$  von 100 s einen guten Kompromiss dar. Die Betrachtung von Realfahrten im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 km/h und 90 km/h<sup>22</sup> bestätigt diesen Wert. Dies führt zu der Erkenntnis, dass oberhalb von  $\tau_{BEP} = 100$  s eine Stützung der Fahrzeuggierate möglich ist. Grund hierfür ist, dass ab diesem Wert der Mittelwert der quadrierten Kurswinkeldifferenzen kleiner ist als der aus den Fahrdynamiksensordaten ermittelte.

Aus den Ausführungen lässt sich eine Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Break-Even-Point vermuten. Werden die entsprechenden Werte ( $MSE$ ,  $\sigma$ ) über dem zurückgelegten Weg betrachtet (siehe Anhang A.5.5), so ist ein Grenzwert für den zurückgelegten Weg bestimmbar, ab dem eine Stützung der Fahrzeuggierate durch den GNSS-Kurs sinnvoll ist. Dieser beträgt für diese Untersuchungen (worst-case-betrachtet) 300 m.

<sup>22</sup>Diese Realfahrten beinhalten konstante Geschwindigkeitsphasen.



### 4.3.4 Radgeschwindigkeitsfaktor

#### 4.3.4.1 Theoretische Grundlage

Wie in Kapitel 2.2.2.2 dargestellt, ist die Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit neben der Raddrehzahl und dem Schlupf auch von dem dynamischen Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  abhängig.

Unter der Annahme einer fehlerfreien Raddrehzahl ergibt sich die Fahrzeugradgeschwindigkeit gemäß Gleichung 4.22.<sup>23</sup> Es ist erkennbar, dass diese von einem dynamischen Reifenhalmmesserskalenfaktor  $(1 + \rho)$  mit  $\rho \neq 0$  und bei einem nicht freirollenden Rad infolge Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn von einem Schlupffaktor  $(1 + S)$  bestimmt wird. Das Produkt aus Schlupffaktor und Reifenhalmmesserskalenfaktor wird im Folgenden *Radgeschwindigkeitsfaktor* bzw. kurz  $k_v$  genannt.

$$\begin{aligned} v_R &= (1 + S) \cdot v_{R, \text{freirollend}} \\ &= (1 + S) \cdot r_{dyn, \text{fehlerhaft}} \cdot \omega = \underbrace{(1 + S) \cdot (1 + \rho)}_{k_v} \cdot \underbrace{r_{dyn} \cdot \omega}_{v_{R, \text{ideal}}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Unter Anwendung des Einachsmodells (siehe Anhang A.3) ergibt sich aus Gleichung 4.22 für die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  der in Gleichung 4.23 dargestellte Zusammenhang. Durch Quotientenbildung aus der zurückgelegten Wegstrecke  $\Delta s(\tau_i)$  und dem Produkt aus der über dem Zeitraum  $\tau_i$  gemittelten Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg, \text{gemittelt}}(\tau_i)$  und  $\tau_i$  ergibt sich der Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  für das nicht angetriebene Rad gemäß Gleichung 4.25. Hierbei wird die zurückgelegte Wegstrecke  $\Delta s(\tau_i)$  auf Basis von GNSS-Positionsdaten  $(x_{GNSS}, y_{GNSS})$  gemäß Gleichung 4.24 gewonnen. Durch die Kenntnis des  $k_v$ -Faktors ist eine Korrektur des fehlerbehafteten dynamischen Reifenhalmmessers möglich.

$$v_{Fzg} = (1 + S) \cdot (1 + \rho) \cdot r_{dyn} \cdot \omega \quad (4.23)$$

$$\Delta s(\tau_i) = v_{Fzg}(\tau_i) \cdot \tau_i = (1 + S) \cdot (1 + \rho) \cdot v_{Fzg, \text{gemittelt}}(\tau_i) \cdot \tau_i$$

$$\text{mit } \Delta s_{GNSS}(\tau_i) = \sqrt{[(x_{GNSS}(t_k + \tau_i) - x_{GNSS}(t_k))^2] + [(y_{GNSS}(t_k + \tau_i) - y_{GNSS}(t_k))^2]} \quad (4.24)$$

$$\rightarrow \underbrace{(1 + S) \cdot (1 + \rho)}_{k_v} = \frac{\Delta s_{GNSS}(\tau_i)}{v_{Fzg, \text{gemittelt}}(\tau_i) \cdot \tau_i} \quad (4.25)$$

Im Folgenden wird auf Basis von Gleichung 4.25 der Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  sowohl bei geradlinigen als auch bei kurvenförmigen Bewegungen näher untersucht.

#### 4.3.4.2 Radgeschwindigkeitsfaktor bei geradliniger Bewegung

Die Ermittlung der Haupteinflussfaktoren auf den Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  erfolgt am besten bei Geradeausfahrt, da hier die geringsten Nebeneinflüsse auftreten. Daher beschränken sich die Ausführungen zunächst auf diese Fahrten. Hierbei werden sowohl Konstant- als auch Beschleunigungsfahrten (bestehend aus Beschleunigungs- und Verzögerungsanteilen) betrachtet. Ein Beschleunigungsverlauf dieser Fahrten ist exemplarisch in Anhang A.5.6.1 dargestellt.

<sup>23</sup>Mitschke/Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge S. 497.

#### 4.3.4.2.1 Beschleunigungs- und Verzögerungsfahrt

Bei einer fehlerfreien Geschwindigkeitsbestimmung (d. h. bei korrekter Schätzung von  $r_{dyn}$  und Verwendung des korrekten Schlupfwertes) wird unter der Voraussetzung der fehlerfreien Bestimmung der zurückgelegten Wegstrecke durch die GNSS-Daten erwartet, dass der Term  $(1 + \rho)$  den Wert 1 annimmt, d. h.  $\rho = 0$ . Für den Schlupf  $S$  werden bei Beschleunigungsfahrten bei mit ABS/ESP ausgestatteten Fahrzeugen Werte bis zu 25 % erwartet<sup>24</sup>, denn in diesem Bereich findet die maximal mögliche Kraftübertragung bei noch stabilem und lenkfähigen Fahrzustand statt.

Da laut AMMON (1997)<sup>25</sup> in erster Näherung im normalen Betriebsbereich die Annahme eines konstanten Abrollumfangs gerechtfertigt ist, ergibt sich für den Term  $(1 + \rho)$  der Wert 1, d. h. der Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  entspricht dem Schlupffaktor  $1 + S$ . Somit wird die Fahrzeuggeschwindigkeit bei einer ersten Abschätzung durch die Ungenauigkeiten bei der Schlupfbestimmung verfälscht. Entsprechend würde sich selbst als Folge einer Längsverzögerung von  $10 \text{ m/s}^2$  eine Verfälschung von 10 % einstellen.<sup>26</sup> Durch eine fehlerhafte Schlupfbestimmung, gerade in dem Bereich der maximal übertragbaren Kraft zwischen Reifen und Fahrbahn (Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung), ist eine genaue Kenntnis des Schlupfwertes von besonderer Bedeutung.

Ob eine Schlupfermittlung unter Verwendung der GNSS-Positionsdaten für Beschleunigungsfahrten auf eine zuvor definierte Zielgeschwindigkeit mit anschließender maximal möglicher Verzögerung (ABS-Eingriff möglich) unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.3.2 ermittelten Zeitverzugswerte möglich ist, wird durch Bestimmung des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  in Abhängigkeit von der Beschleunigung für unterschiedliche Zeitintervalle  $\tau_i$ <sup>27</sup> untersucht. Es wird für positive Beschleunigungswerte ein nahezu konstanter Verlauf um den Wert 1 und für größer werdende Verzögerungswerte ein ansteigender linearer Werteverlauf erwartet.

Abbildung 4.8a zeigt exemplarisch den Verlauf für das Gerät L1\_L1, der nicht mit der Erwartung übereinstimmt. Durch die bereits beobachteten Verzögerungen in den GNSS-Empfängern und dem genannten Nachteil der Minimummethode bei der Positionsverzugszeitermittlung (siehe Kapitel 4.3.2) besteht die Vermutung, dass der Verlauf stark von der Verzugszeit abhängig ist. Wird nun die Verzugszeit der GNSS-Positionsdaten verändert, so ergeben sich die in Abbildung 4.8b und Abbildung 4.8c dargestellten Verläufe.

Diese Diagramme (analog auch für die übrigen GNSS-Geräte) zeigen eine deutliche Verzögerungszeitsensitivität. Unter Anwendung einer Verzugszeitvariation und Ermittlung des Steigungswertes (aus der Regressionsgerade) für den Beschleunigungszweig ergeben sich für alle drei Geräte die in Abbildung 4.9 dargestellten Verläufe. Diese sind jeweils für konstante  $\tau_i$ 's aufgetragen.

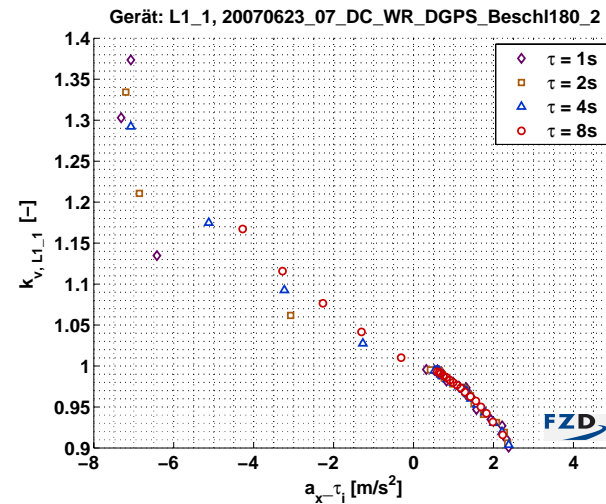
Aus Abbildung 4.9 ist ein zunehmender Steigungswert (von negativ nach positiv) mit steigender Verzugszeit  $t_{Verzug}$  für alle drei untersuchten GNSS-Empfänger zu beobachten. Die optimale Verzugszeit für alle drei GNSS-Empfangsgeräte entspricht dem Schnittpunkt

<sup>24</sup>Backfisch (2006): Das große Reifenbuch - Technik, Sicherheit, Fahrdynamik, Tuning S. 84.

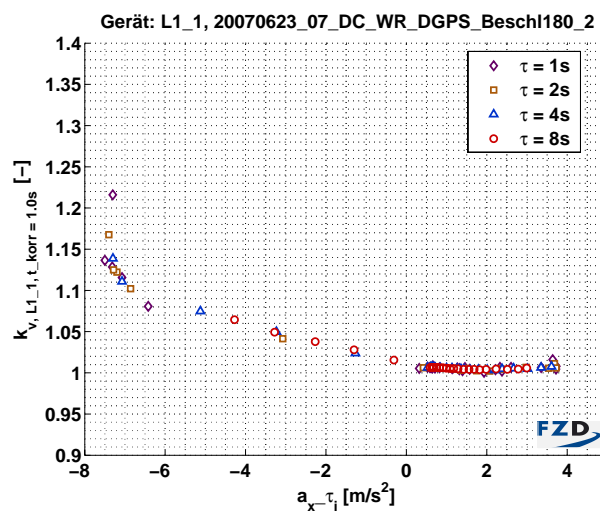
<sup>25</sup>Ammon (1997): Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik S. 99.

<sup>26</sup>Laut WINNER (2006, Kap. 2, Folie 17) beträgt die Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung beim Bremsen durch Schlupf in etwa  $1\% \cdot a_x / (\text{m/s}^2)$ .

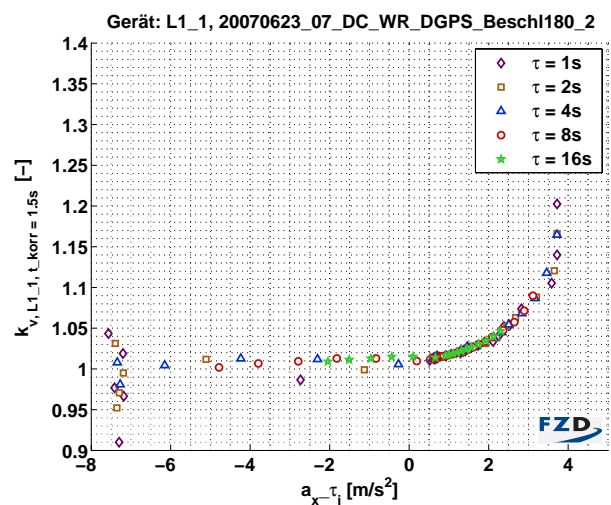
<sup>27</sup>Hierbei erfolgt die  $\tau_i$ -Betrachtung über den gesamten Beschleunigungs- und Verzögerungsbereich.



(a)

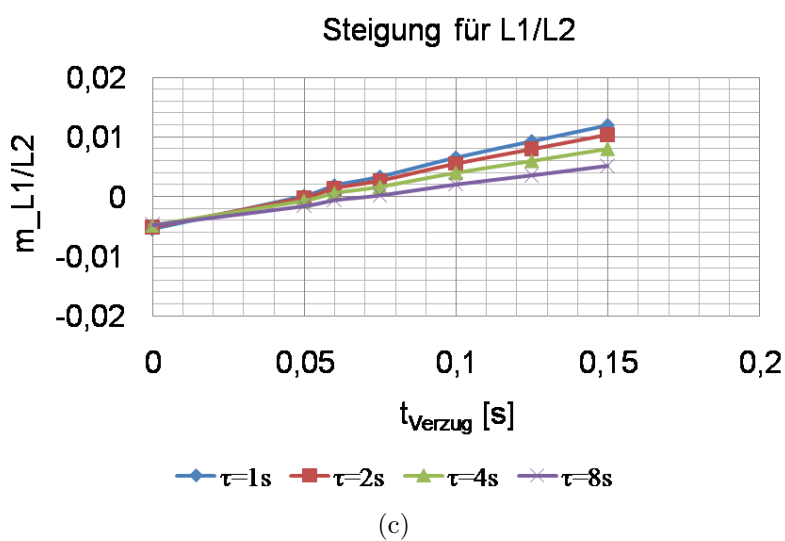
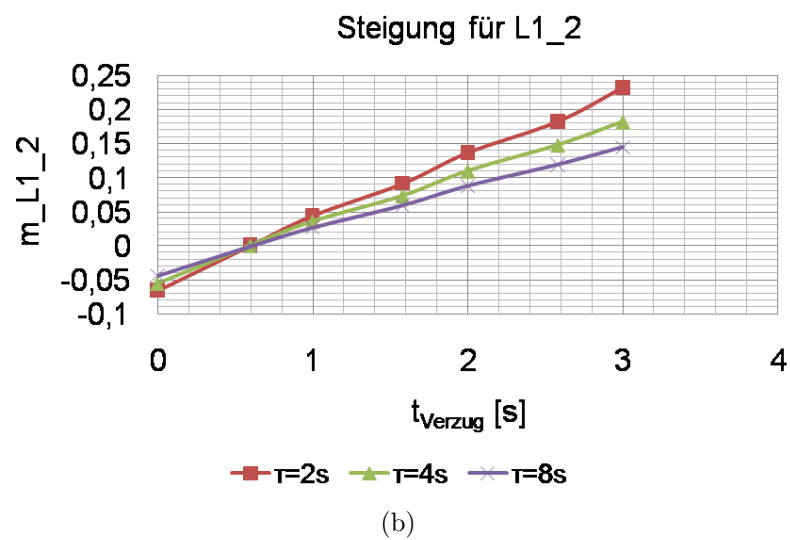
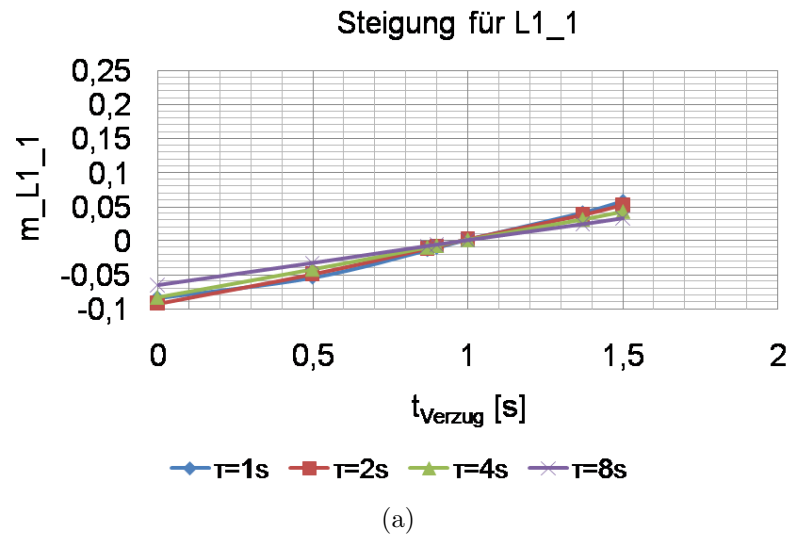


(b)



(c)

**Abbildung 4.8:** Empfindlichkeit des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  infolge Variation der Verzugszeit, exemplarisch für eine Beschleunigungs- mit anschließender Verzögerungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 180 km/h für das Gerät L1\_1. (a)  $t_{\text{Verzug}} = 0,0s$ , (b)  $t_{\text{Verzug}} = 1,0s$  und (c)  $t_{\text{Verzug}} = 1,5s$ .



**Abbildung 4.9:** Steigung der Regressionsgeraden in Abhängigkeit von der Verzugszeit für jeweils  $\tau_i = const.$  für den reinen Beschleunigungszweig der Beschleunigungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 180 km/h für Geräte (a) L1\_1, (b) L1\_2 und (c) L1/L2.

der Linien für unterschiedliche  $\tau_i$ 's mit der Abszisse bei einem Ordinatenwert von 0. Die sich hieraus ergebenden Werte sind in Tabelle 4.10 quantitativ angegeben.

**Tabelle 4.10:** Positionsverzugszeiten für die drei untersuchten GNSS-Empfangsgeräte.

Gerät	Verzugszeit $t_{\text{Verzug}}$
L1_1	1 s
L1_2	0,6 s
L1/L2	0,05 s

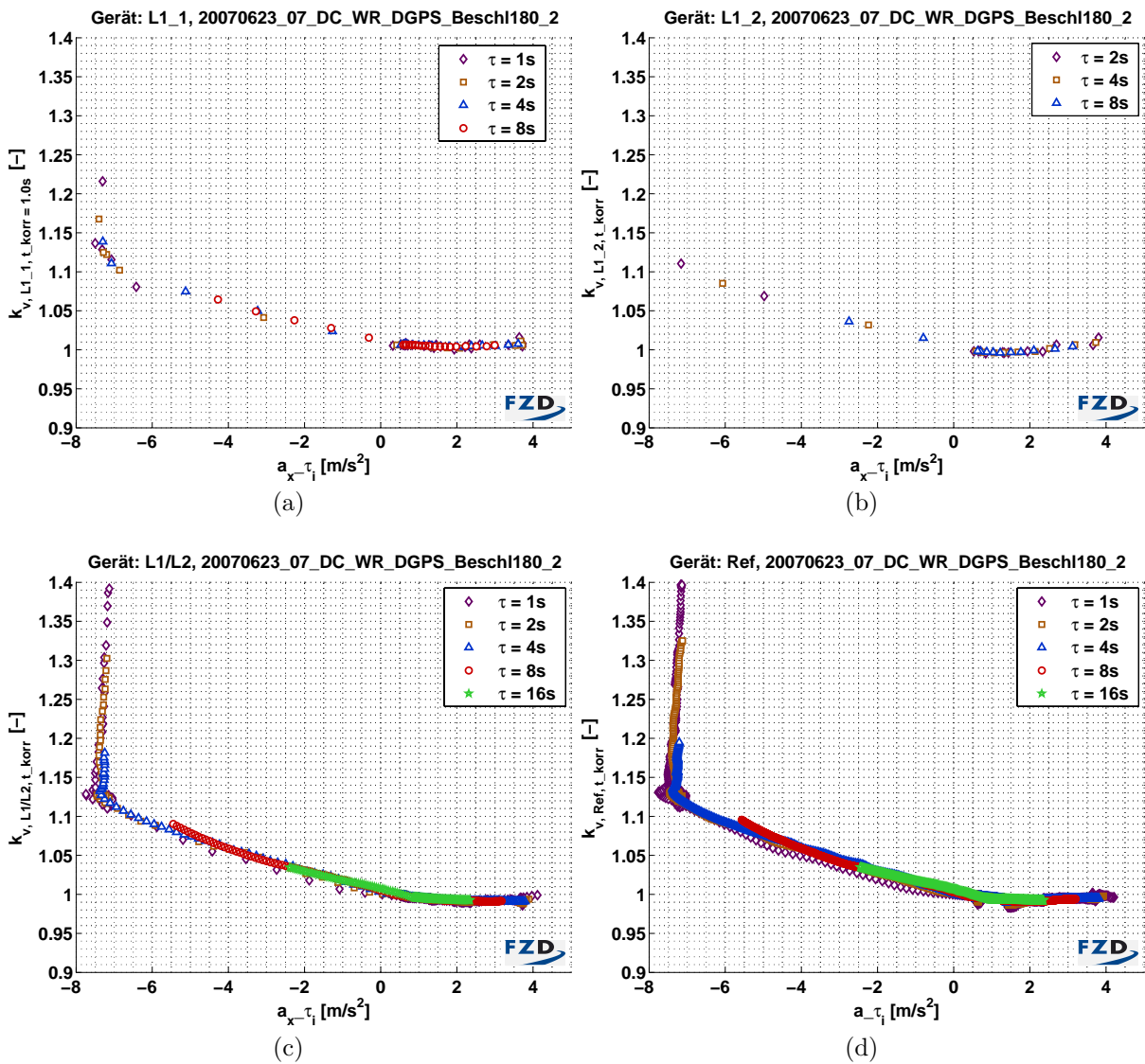
Im Gegensatz zum L1\_1-Gerät, dessen Verzugszeit  $t_{\text{Verzug}}$  gleich der Abtastung des Gerätes ist, entspricht die ermittelte Verzugszeit des L1/L2-Empfängers der halben Abtastung, nämlich  $t_{\text{Verzug, L1/L2}} = 0,05$  s während die L1\_2-Verzugszeit 0,6 s beträgt. Der Vergleich dieser Werte mit denen der Minimummethode (vgl. Tabelle 4.8, Kapitel 4.3.2) zeigt geringe Abweichungen. Diese sind auf den flachen Kurvenverlauf der Summe der quadrierten Abweichungen in der Nähe des Minimums bei der Minimummethode zurückzuführen. Somit ist die Bestimmung der Positionsverzugszeiten durch Anwendung dieser sog. *Schlupfmethode* besser als die Minimummethode geeignet.

Unter Berücksichtigung dieser ermittelten Verzugszeiten ergeben sich für die verschiedenen GNSS-Geräte sowie für die Referenz die in Abbildung 4.10 dargestellten Verläufe des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$ . Dieser ist über der gemittelten Beschleunigung für unterschiedliche  $\tau_i$ 's, exemplarisch für eine Messung, aufgetragen.

Aus Abbildung 4.10 geht zum einen hervor, dass bei Berücksichtigung der entsprechenden Verzugszeit eine Schlupfermittlung in dem Längsbeschleunigungsbereich von  $-7 \text{ m/s}^2$  bis  $4 \text{ m/s}^2$  unter Verwendung der GNSS-Positionsdaten möglich ist und auch den erwarteten Verlauf zeigt. Zum anderen ist eine Unabhängigkeit der Schlupfermittlung von dem gewählten  $\tau_i$  feststellbar. Für Längsbeschleunigungswerte  $a_x \leq -7 \text{ m/s}^2$  ergibt sich ein starker Anstieg der Schlupfwerte, was auf eine Vollverzögerung mit teilweise blockierenden Rädern zurückzuführen ist. Während die "low-end"-Geräte wegen ihrer geringeren Abtastung diese hohen Verzögerungen nicht bzw. nur ansatzweise abbilden können (siehe Abbildung 4.10a bzw. Abbildung 4.10b), ist dies für den "high-end"-Empfänger (Abbildung 4.10c) noch möglich.

Die gemachten Ausführungen sind auch für Fahrten mit Zielgeschwindigkeit 100 km/h zu beobachten (siehe Anhang A.5.6.1) und es ergeben sich die gleichen Verzugszeiten wie für die Beschleunigungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 180 km/h.

Zusammenfassend ist als Ergebnis der Beschleunigungsfahrten eine Verzögerungszeit-sensitivität bei der Schlupfbestimmung auf Basis von GNSS-Positionsdaten feststellbar. Aufgrund dieser Tatsache und der Kenntnis des Schlupfkurvenverlaufes über der Beschleunigung ist eine Bestimmung der Verzugszeit der Positionsdaten der verschiedenen GNSS-Empfänger besser möglich als bei Anwendung der Minimummethode. Somit ist ein Verfahren gefunden, mit dem eine Verzugszeitbestimmung der GNSS-Positionsdaten für die verschiedenen GNSS-Empfangsgeräte erfolgen kann.



**Abbildung 4.10:** Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  über der Längsbeschleunigung für jeweils feste  $\tau_i$ 's, exemplarisch für eine Beschleunigungs- mit anschließender Verzögerungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 180 km/h für die Geräte (a) L1\_1, (b) L1\_2, (c) L1/L2 und (d) Ref. Hierbei sind die entsprechenden Verzugszeiten berücksichtigt.

#### 4.3.4.2.2 Konstantfahrten

Im Gegensatz zu den Beschleunigungsfahrten wird bei Konstantfahrten, bei denen eine geringe Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn erfolgt, ein geringer Schlupfwert erwartet. So stellt sich für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Konstantfahrten mit den Geschwindigkeiten 10 km/h, 20 km/h, 40 km/h und 80 km/h ein ungefährer Schlupf von 0,1 % ein. Bei Analyse dieser Fahrten erscheint die Bedeutung der Rauschcharakteristik daher von größerer Bedeutung. Deshalb werden im Folgenden Mittelwert sowie Varianz des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  der einzelnen GNSS-Empfangsgeräte unter Variation des Zeitintervalls  $\tau_i$  betrachtet.

Die Mittelwerte von  $k_v$  sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Es zeigt sich eine Abnahme des Mittelwertes von  $k_v$  mit zunehmender Geschwindigkeit, d. h. bei Voraussetzung einer genauen Wegstrecke  $\Delta s$  kann auf eine Erhöhung des dynamischen Reifenhalbmessers  $r_{dyn}$  geschlossen werden, was qualitativ mit der Erwartung übereinstimmt.

Während der L1\_1-Empfänger für alle Geschwindigkeiten maximal eine Änderung in der Größenordnung von 3 ‰ aufweist, die noch im Soll<sup>28</sup> und somit als tolerierbar angesehen wird (entspricht einer Ungenauigkeit von 1 m, vergleiche Abbildung 4.11a), wird diese Grenze jedoch beim Übergang von  $v = 10$  km/h auf  $v = 20$  km/h von den übrigen GNSS-Empfängern überschritten. Es tritt etwa eine 4 ‰-Änderung von  $k_v$  auf. Da bei allen drei Empfängern die gleichen Raddrehzahlen herrschen und die Positionsermittlung bei dem L1\_1-Empfänger gut mit denen des L1/L2-Gerätes übereinstimmt, widerspricht dieses Verhalten den Erwartungen.

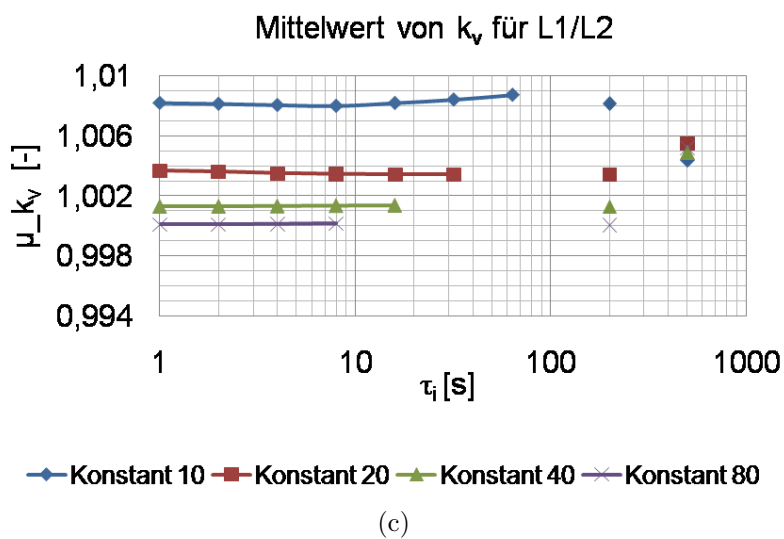
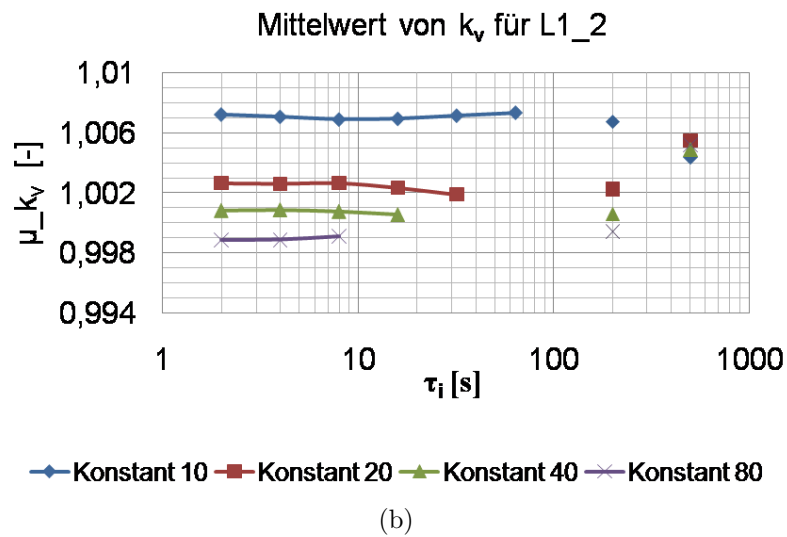
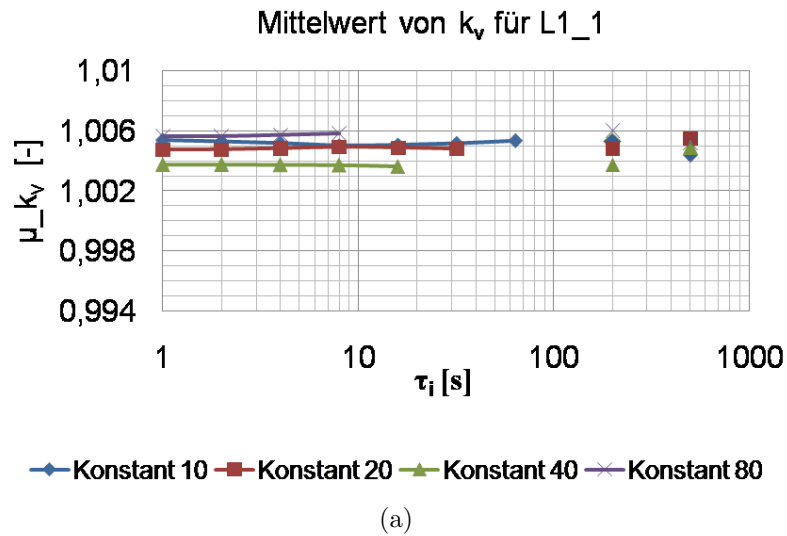
Auch die  $k_v$ -Faktorwerte, die über die gesamte Messdauer<sup>29</sup> gemäß Gleichung 4.26 gebildet werden, entsprechen den  $k_v$ -Werten der einzelnen  $\tau_i$ 's pro Geschwindigkeit. Diese sind aus Übersichtlichkeitsgründen in den Abbildungen 4.11a bis 4.11c jeweils bei  $\tau_i = 200$  s dargestellt.

$$k_v = \frac{s_{\text{Bereich}}(t_{\text{Ende}}) - s_{\text{Bereich}}(t_{\text{Anfang}})}{\sum_{k=t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}} v_{\text{Bereich}}(k) \cdot \Delta t} \quad (4.26)$$

Um mögliche Erwärmungseffekte des Reifens ausschließen zu können, die zu einer Verfälschung des  $k_v$ -Faktors führen, sind in Abbildungen 4.11 jeweils bei  $\tau_i = 500$  s die sich gemäß Gleichung 4.27 ergebenden  $k_{v,v}$ -Faktoren dargestellt.  $v_{Ref}$  wird hier aus den Daten des Correvitsensors gebildet. Es zeigt sich eine minimale Veränderung zwischen den Geschwindigkeiten, wobei die maximale Spreizung beim Übergang von 10 km/h auf 20 km/h vorliegt und einen Wert von 2 ‰ einnimmt. Jedoch ist keine eindeutige Verringerung des  $k_{v,v}$ -Faktors mit zunehmender Geschwindigkeit zu erkennen, so dass ein Erwärmungseffekt ausgeschlossen wird. Somit kann das unerwartete Verhalten des L1\_2- sowie des L1/L2-Empfängers nicht abschließend geklärt werden.

<sup>28</sup>Dieser Wert ist bei größtem  $\tau$  abgeschätzt, zurückgelegte Wegstrecke 333 m,  $v = 10$  m/s.

<sup>29</sup> $\tau_i$  entspricht der gesamten Messdauer.



**Abbildung 4.11:** Mittelwert des Radgeschwindigkeitsvektors  $k_v$  für die Geräte (a)  $L1_1$ , (b)  $L1_2$  und (c)  $L1/L2$  bei Konstantfahrt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zeitverzögerungen sind entsprechend berücksichtigt. Die  $k_v$ -Werte bei  $\tau_i = 200\text{ s}$  gemäß Gleichung 4.26 werden für  $\tau_i =$  gesamte Messdauer gebildet, während die Werte bei  $\tau_i = 500\text{ s}$  die Referenzwerte gemäß Gleichung 4.27 darstellen.



$$k_{v,v} = \mu \left( \sum_{k=t_{\text{Anfang}}}^{t_{\text{Ende}}} \frac{v_{\text{Ref}}(k)}{v_{\text{Fzg}}(k)} \right) \quad (4.27)$$

Wird nun die Varianz des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  für die jeweiligen GNSS-Geräte in Abhängigkeit der unterschiedlichen Geschwindigkeiten über  $\tau_i$  betrachtet, so wird erwartet, dass die Varianz bei Verdoppelung der Geschwindigkeit um den Faktor 4 sinkt und mit größer werdendem  $\tau_i$  ebenfalls abnimmt. Abbildung 4.12 zeigt die durchschnittlichen Varianzwerte aller fünf Messungen, aufgetragen über unterschiedliche  $\tau_i$ 's, wobei die entsprechenden Zeitverzögerungen berücksichtigt sind.

Es ist gemäß Abbildung 4.12 für alle Geräte eine Reziprozität zwischen Varianz und Zeitintervall  $\tau$  bei allen Geschwindigkeiten zu beobachten. Ferner wird die Erwartung der Viertelung des Varianzwertes bei Verdoppelung der Geschwindigkeit für die Geschwindigkeiten 20 km/h bis 80 km/h erfüllt. Bei der Geschwindigkeit  $v = 10$  km/h ist dies hingegen nicht der Fall. Dies ist auf die technischen Grenzen der Nutzung des Tempomats<sup>30</sup> sowie auf den bei dieser Geschwindigkeit herrschenden Übergang zwischen Stillstand und Bewegung (abhängig von der Beschaffenheit der Fahrbahn) zurückzuführen. Somit können durchaus bei dieser geringen Geschwindigkeit Geschwindigkeitsschwankungen infolge der Nachregelung durch den Fahrer auftreten, die somit stärkere Varianzen und einen höheren Mittelwert zur Folge haben. Es ist zu vermuten, dass sich diese Erwartung bei Verwendung des Tempomats auch bei niedriger Geschwindigkeit bestätigt.

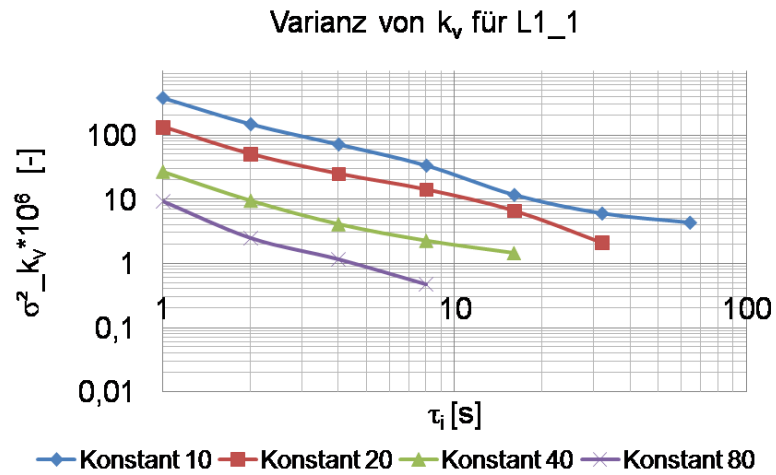
Somit lässt sich insgesamt festhalten, dass die Varianz des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  für die hier untersuchten Geräte sowohl für zunehmende  $\tau_i$  als auch mit steigender Konstantgeschwindigkeit abnimmt.

#### 4.3.4.3 Radgeschwindigkeitsfaktor bei kurvenförmiger Bewegung

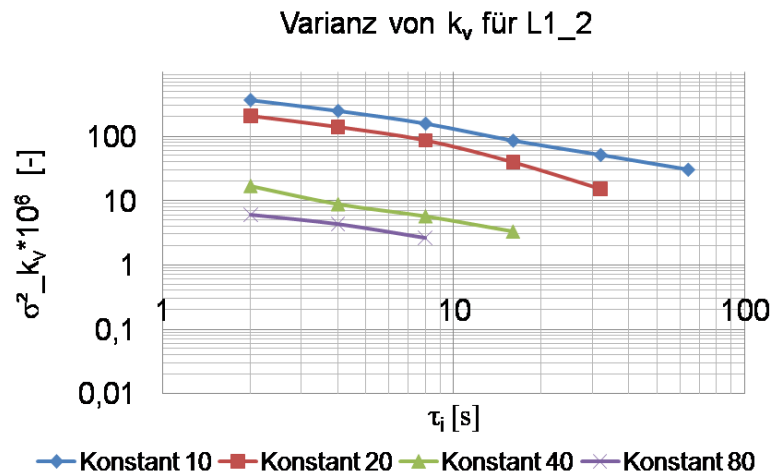
Bisher wurde bei allen Auswertungen eine lineare Verbindung der Positions- bzw. Streckenwerte angenommen, was für die Beschleunigungs- und Konstantfahrten auf gerader Strecke zulässig ist. Da das Fahrzeug jedoch in der Realität kurvenförmige Fahrspuren aufweist, entsteht durch die getroffene Annahme ein Streckenfehler, den es abzuschätzen gilt, ehe die Radgeschwindigkeitsfaktorbetrachtung erfolgt. Abbildung 4.13 zeigt exemplarisch den exakten Fahrspurverlauf (durchgezogene Kreislinie) sowie die linearen Approximationen (strichpunktierte Linien) hierzu.

Wird nun der in Abbildung 4.13 dargestellte kurvenförmige Verlauf gedanklich zu einem Kreis erweitert (siehe gestrichelte Linie in Abbildung 4.13), so entspricht die Approximation durch die GNSS-Positionen einem  $n$ -Eck. Der durch die Approximation entstehende Fehler ist von der Eckenanzahl  $n$  abhängig. So ist in Abbildung 4.13 exemplarisch eines von vier bzw. acht Fehlersegmenten für ein Vier- bzw. Achteck (mit Segment 3a bzw. 4b gekennzeichnet) dargestellt. Der sich ergebende Fehler stellt die Differenz zwischen dem Umfang des Kreises  $U_{\text{Kreis}}$  (exakter Verlauf) und der Summe der Kantenlängen des  $n$ -Ecks dar. Somit ergibt sich der relative Streckenfehler  $e_{n\text{-Eck},\text{relativ},\text{exakt}}$  unter Verwendung der

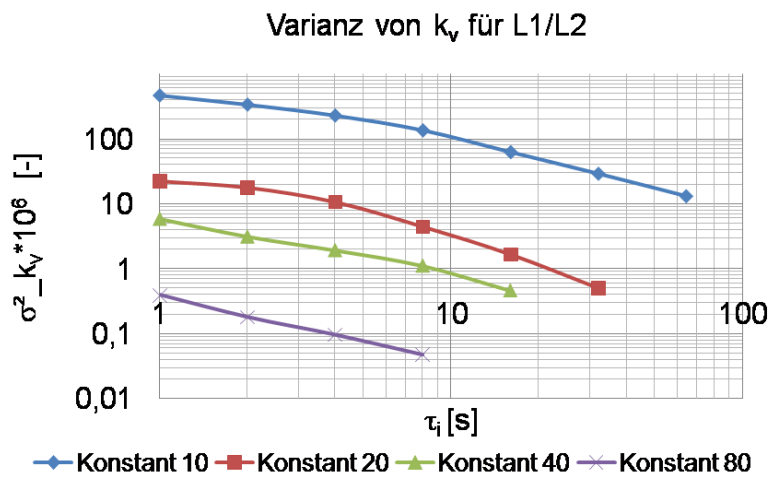
<sup>30</sup>Tempomat ist in dem Versuchsträger erst ab einer Geschwindigkeit von  $\geq 30$  km/h benutzbar.



(a)

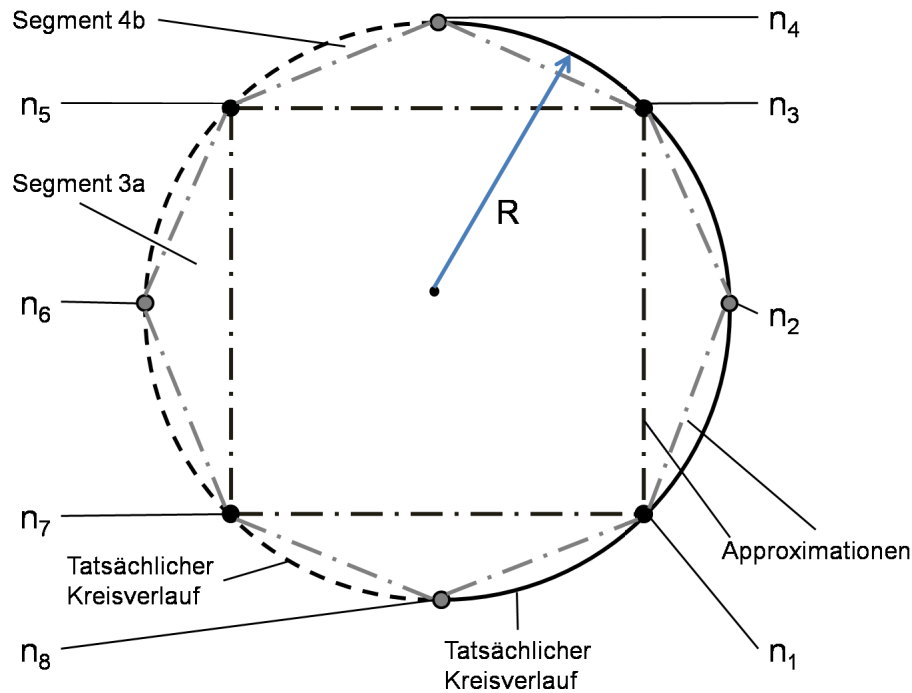


(b)



(c)

**Abbildung 4.12:** Varianz des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  jeweils für die verschiedenen GNSS-Geräte (a) L1\_1, (b) L1\_2, (c) L1/L2, aufgetragen über  $\tau_i$ , wobei die dargestellte Varianz den Mittelwert aus allen Messungen darstellt. Die Zeitverzögerungen sind entsprechend berücksichtigt.



**Abbildung 4.13:** Exakter sowie approximierter Verlauf einer zurückgelegten Fahrstrecke, schematisch.

folgenden Gleichungen zu:

$$e_{n-Eck,relativ,exakt} = \frac{\Delta U}{U_{Kreis}} = \frac{U_{Kreis} - U_{n-Eck}}{U_{Kreis}} \quad (4.28)$$

mit  $U_{n-Eck} = 2 \cdot n \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)$   
und  $U_{Kreis} = 2 \cdot \pi \cdot R = v \cdot n \cdot T_{Abtast,GNSS}$

Die Eckenanzahl  $n$  selbst bestimmt sich über Gleichung 4.29, die eingesetzt in Gleichung 4.28 den in Gleichung 4.30 dargestellten Zusammenhang ergibt. Hierbei kennzeichnet  $T_{Abtast,GNSS}$  die Abtastung des entsprechenden GNSS-Empfängers.

$$n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v \cdot T_{Abtast,GNSS}} \quad (4.29)$$

$$\Rightarrow e_{n-Eck,relativ,exakt} = 1 - \frac{2 \cdot R}{v \cdot T_{Abtast,GNSS}} \cdot \underbrace{\sin\left(\frac{v \cdot T_{Abtast,GNSS}}{2 \cdot R}\right)}_A = 1 - \frac{\sin A}{A} \quad (4.30)$$

Unter Anwendung der Taylorreihenentwicklung für  $\sin A$  gemäß BRONSTEIN<sup>31</sup> ergibt sich folgende Vereinfachung:

$$e_{n-Eck,relativ,exakt} = \frac{1}{6} \cdot A^2 - \underbrace{\frac{1}{120} \cdot A^4 + \dots - \frac{(-1)^n \cdot A^{2n}}{(2n+1)!}}_{S_{Schätz}} \quad (4.31)$$

<sup>31</sup>Bronstein et al. (1997): Taschenbuch der Mathematik S. 948.

Wird nun die Reihenentwicklung nach dem ersten Glied abgebrochen, d. h.  $e_{n-Eck,relativ,exakt} \approx \frac{1}{6} \cdot A^2$ , so entsteht die in Gleichung 4.31 mit  $S_{Schätz}$  gekennzeichnete Ungenauigkeit. Diese ist am größten, wenn  $A$  (siehe Gleichung 4.30) den größten Wert annimmt. Unter Verwendung von Gleichung 4.32 und der Annahme eines Wendekreisdurchmessers von 10 m sowie einer maximalen Querbeschleunigung  $a_y$  von  $10 \text{ m/s}^2$  ergibt sich  $A$  zu einem maximalen Wert gemäß Gleichung 4.33.

$$v^2 \leq \frac{a_{y,max}}{\kappa} \quad (4.32)$$

$$\Rightarrow A_{max} = \frac{v_{max} \cdot T_{Abtast,GNSS} \cdot \kappa_{max}}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot T_{Abtast,GNSS} \cdot \frac{1}{s} \quad (4.33)$$

Die durch den Abbruch der Taylorreihenentwicklung entstehenden Fehler sind, wie aus Tabelle 4.11 ersichtlich, für das L1\_1- sowie für das L1/L2-Gerät aufgrund des sehr geringen Wertes zu vernachlässigen (nähere Details siehe Abbildung A.19 in Anhang A.5.6.2). Der für den L1\_2-Empfänger bestimmte, maximale Fehler von 3,3 % ist hingegen nicht mehr zu vernachlässigen. Allerdings verfügt dieser Empfänger über eine sehr niedrige Abtastrate, die aufgrund der rasanten Empfängerentwicklung immer weniger zum Einsatz kommt. Daher wird dem Verstoß gegen die Vernachlässigbarkeit für Empfänger L1\_2 eine geringere Bedeutung beigemessen und der Fehler durch Abbruch der Taylorreihe wird vereinfachend für alle drei GNSS-Geräte vernachlässigt. Folglich ist der Positionsfehler durch die in Gleichung 4.34 bzw. Gleichung 4.35 dargestellten Zusammenhänge beschreibbar.

**Tabelle 4.11:** Ungenauigkeitsfehler infolge des Abbruchs nach dem ersten Glied bei der Taylorreihenentwicklung von  $\sin A/A$  für die drei untersuchten GNSS-Empfangsgeräte.

Gerät	$T_{Abtast,GNSS}$	$A_{max}$	$S_{Schätz}$
L1_1	1 s	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	0,208 %
L1_2	2 s	$\sqrt{2}$	3,3 %
L1/L2	0,1 s	$\frac{1}{20}\sqrt{2}$	0,0000208 %

$$e_{n-Eck,relativ,approx.} = \frac{1}{6} \cdot \underbrace{\left( \frac{v \cdot \kappa \cdot T_{Abtast,GNSS}}{2} \right)^2}_A \quad (4.34)$$

$$\text{bzw. } e_{n-Eck,relativ,approx.} = \frac{1}{6} \cdot \underbrace{\left( \frac{a_y \cdot T_{Abtast,GNSS}}{2 \cdot v} \right)^2}_A \quad (4.35)$$

Dies bedeutet, dass sich der zu berücksichtigende *Streckenkorrekturfaktor*  $k_s$  aufgrund der Vereinfachung (Linearisierung) zu dem in Gleichung 4.36 dargestellten Zusammenhang ergibt.<sup>32</sup> Mit diesem Korrekturfaktor ist der Streckenzug  $U_{n-Eck}$  zu multiplizieren, um den Approximationsfehler auszugleichen.

Der ursprüngliche Streckenfehler  $e_{n-Eck,relativ,exakt}$  sowie der sich gemäß Gleichung 4.37

<sup>32</sup>Basiert auf dem Zusammenhang  $1 - \frac{\sin A}{A} \approx \frac{1}{6} \cdot A^2$ .

ergebende Reststreckenfehler nach Korrektur  $e_{n-Eck,Rest,kor,approx.}$  aufgrund der Vereinfachung sind in Abbildung 4.14 exemplarisch für die Quereschleunigungswerte  $3 \text{ m/s}^2$  sowie  $10 \text{ m/s}^2$  für alle in dieser Arbeit eingesetzten GNSS-Empfangsgeräte dargestellt. Die Beschriftung in der Legende entspricht der Reihenfolge der Kurven (von oben beginnend) in Abbildung 4.14. Die untere Grenzgeschwindigkeit ermittelt sich durch Gleichung 4.38, wobei  $R$  der Hälfte des Wendekreisdurchmessers  $D_{Wendekreis} = 10 \text{ m}$  entspricht.

$$k_s = \frac{1}{1 - \frac{1}{6} \cdot A^2} \quad (4.36)$$

$$e_{n-Eck,Rest,kor,approx.} = 1 - \left( \frac{\sin A}{A} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{6} \cdot A^2} \right) \quad (4.37)$$

$$v_{min} = \sqrt{a_y \cdot R} \quad (4.38)$$

In Abbildung 4.14 ist eine Abnahme des Streckenfehlers mit zunehmender Geschwindigkeit zu beobachten. Dies bedeutet, dass der größte relative Streckenfehler bei der unteren Grenzgeschwindigkeit auftritt.

Beim Vergleich von Abbildung 4.14a und Abbildung 4.14b ist eine starke Verringerung des Streckenfehlers zu erkennen. Während sich für die “low-cost“-Geräte ein Reduzierungsfaktor von 10 ergibt (Ausnahme  $L1\_2$  bei  $a_y = 10 \text{ m/s}^2$ ), beträgt dieser für den  $L1/L2$ -Empfänger mindestens 100. Bei der Betrachtung von Normalfahrten (d. h.  $a_y = 3 \text{ m/s}^2$ ) wird durch Linearisierung bei der Streckenermittlung unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors  $k_s$  im schlechtesten Fall maximal ein Fehler von 1 % bei  $L1\_2$ , 0,1 % bei  $L1\_1$  und 0,01 % bei  $L1/L2$  erzielt. Folglich ist durch die Berücksichtigung des Korrekturfaktors  $k_s$  die Verwendung der hier eingesetzten Linearisierung für die Fahrstreckenermittlung zulässig.

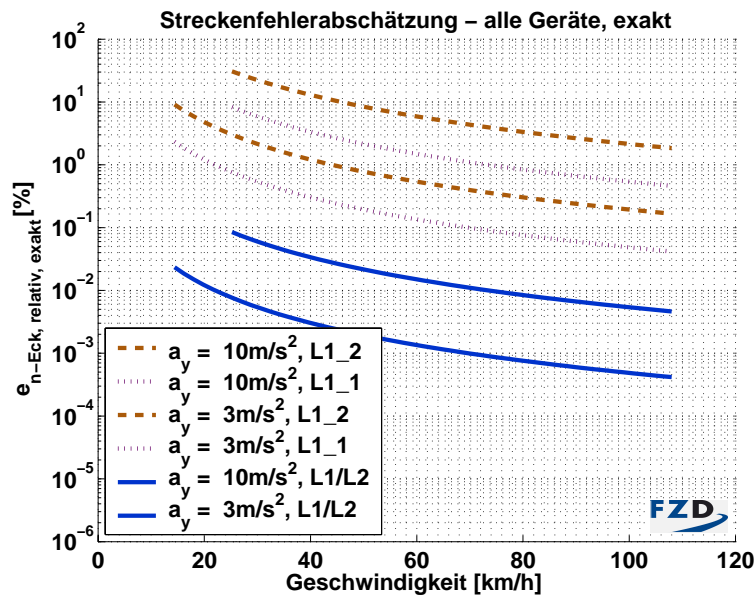
Mit Kenntnis des Approximationsfehlers wird nun anhand realer Versuchsdaten das Manöver Kreisfahrt mit einer Geschwindigkeit von  $25 \text{ km/h}$  näher untersucht, die den querdynamischen “worst-case“-Fall darstellt.

Unter Verwendung der entsprechenden Fahrdynamiksensordaten bzw. der Referenzdaten ergeben sich die in Tabelle 4.12 aufgelisteten Werte für die einzelnen Größen. Enthält die Spaltenbeschriftung in Tabelle 4.12 neben der Abkürzung “Fzg“ bzw. “Ref“ noch die Kennzeichnung  $\dot{\psi}$ , so erfolgt die Berechnung gemäß Gleichung 4.39, bei Zusatz  $a_y$  gemäß Gleichung 4.40. Bei den **fett** dargestellten Werten handelt es sich um Messwerte, die direkt von den entsprechenden Sensoren ausgegeben werden. Die in der Tabelle 4.12 angegebenen Abweichungen ergeben sich gemäß Gleichung 4.41.

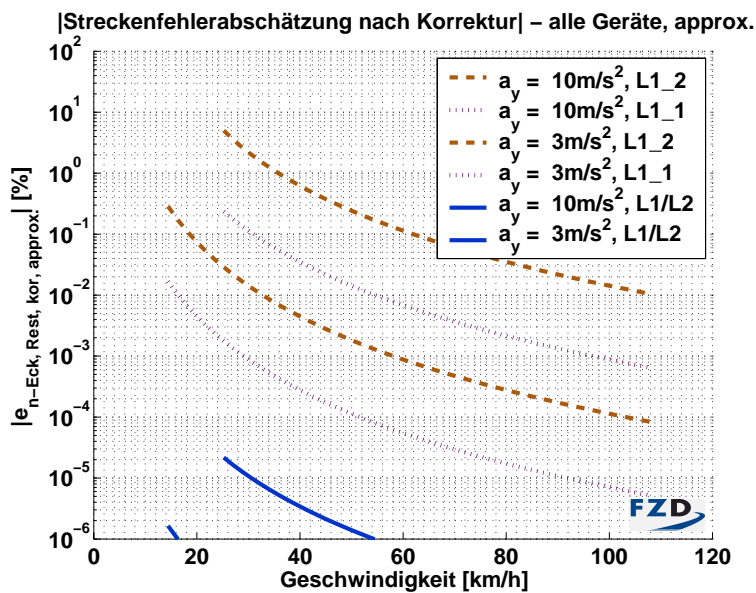
$$\kappa = \left| \frac{\dot{\psi}}{v} \right| \quad (4.39)$$

$$\kappa = \left| \frac{a_y}{v^2} \right| \quad (4.40)$$

$$\underbrace{\max}_{i=1-5} (Messwert_i - \mu_{i=1-5}) \quad (4.41)$$



(a)



(b)

**Abbildung 4.14:** (a) Exakter Streckenfehler, (b) Restfehler nach Korrektur aufgrund der Vereinfachung für alle eingesetzten GNSS-Empfänger mit Querbeschleunigung von  $3\text{ m/s}^2$  bzw.  $10\text{ m/s}^2$ .

**Tabelle 4.12:** Messwerte und ermittelte Kennwerte aus entsprechenden Fahrdynamiksenordaten bzw. aus Referenzdaten für Kreisfahrt mit Geschwindigkeit  $25\text{ km/h}$ .

	$Fzg, a_y$	$Fzg, \psi$	$Ref$	$Ref, a_y$	$Ref, \psi$
$\dot{\psi} [^\circ/\text{s}]$	-	$34,3 \pm 0,5$	-	-	$35,0 \pm 0,6$
$a_y [\text{m/s}^2]$	$4,5 \pm 0,1$	-	-	$3,9 \pm 0,1$	-
$v [\text{m/s}]$	$6,9 \pm 0,1$	-	$6,9 \pm 0,0$	-	-
$\kappa \cdot 100 [\text{m}^{-1}]$	9,4	8,6	8,7	8,3	8,9

Die sich mit den in Tabelle 4.12 aufgelisteten Messwerten ergebenden Werte für  $A$  ( $A_{a_y} = \frac{a_y \cdot T_{\text{Abtast,GNSS}}}{2 \cdot v}$ ,  $A_{\dot{\psi}} = \frac{\dot{\psi} \cdot T_{\text{Abtast,GNSS}}}{2}$ ) sowie die sich durch die lineare Polygonapproximation ergebenden relativen Fehler  $e_{n-Eck,relativ,approx.}$  gemäß Gleichung 4.34 bzw. Gleichung 4.35 sind für die verschiedenen Geräte der Kreisfahrt in Tabelle 4.13 aufgelistet.

**Tabelle 4.13:** Faktor A und relative Fehler gemäß Gleichung 4.35 bzw. Gleichung 4.34 aufgrund der linearen Polygonapproximation bei Manöver Kreisfahrt mit 25 km/h.

Manöver	Gerät	$ A_{a_y} $	$ A_{\dot{\psi}} $	$e_{n-Eck,relativ,approx.,a_y}$ [%]	$e_{n-Eck,relativ,approx.,\dot{\psi}}$ [%]
Kreis	L1_1	0,3	0,3	1,8	1,5
	L1_2	0,7	0,6	7,1	6,0
	L1/L2	0,0	0,0	0,0	0,0

Aus Tabelle 4.13 ist der Anstieg des relativen Fehlers  $e_{n-Eck,relativ,approx.}$  durch lineare Polygonapproximation mit abnehmender Abtastfrequenz erkennbar. Der hierdurch entstehende, maximale relative Fehler  $e_{n-Eck,relativ,approx.}$  beträgt im schlechtesten Fall<sup>33</sup> für das Gerät L1\_1 1,8 %, für L1/L2 0,0 %. Somit ergibt sich für das “high-end“-Empfangsgerät, wenn überhaupt, nur im Nachkommastellenbereich des Promillebereichs, ein Streckenapproximationsfehler. Im Gegensatz hierzu ergibt sich für den L1\_2-Empfänger ein Streckenfehlerschätzwert von 7,1 %, welcher aufgrund der geringeren Abtastung dieses Gerätes einerseits erwartungskonform und andererseits nicht auf die Leistungsdaten aktueller Chipsätze übertragbar ist. Somit wird unter Berücksichtigung des Antennenquerversatzes  $y_{\text{Hebelarm}}$  bzgl. der Schwerpunktslängsachse gemäß Gleichung 4.42 und der in Tabelle 4.13 genannten Fehlerwerte für das L1\_1-GNSS-Gerät ein  $k_v$ -Wert von 0,982, für den L1\_2-Empfänger ein  $k_v$ -Wert von 0,929 sowie für das “high-end-Gerät“ L1/L2 ein  $k_v$ -Wert von 1,0 erwartet.

$$\Delta s_{kor}(\tau_i) = \Delta s(\tau_i) + y_{\text{Hebelarm}} \cdot \dot{\psi}_{\text{gemittelt}}(\tau_i) \cdot \tau_i \quad (4.42)$$

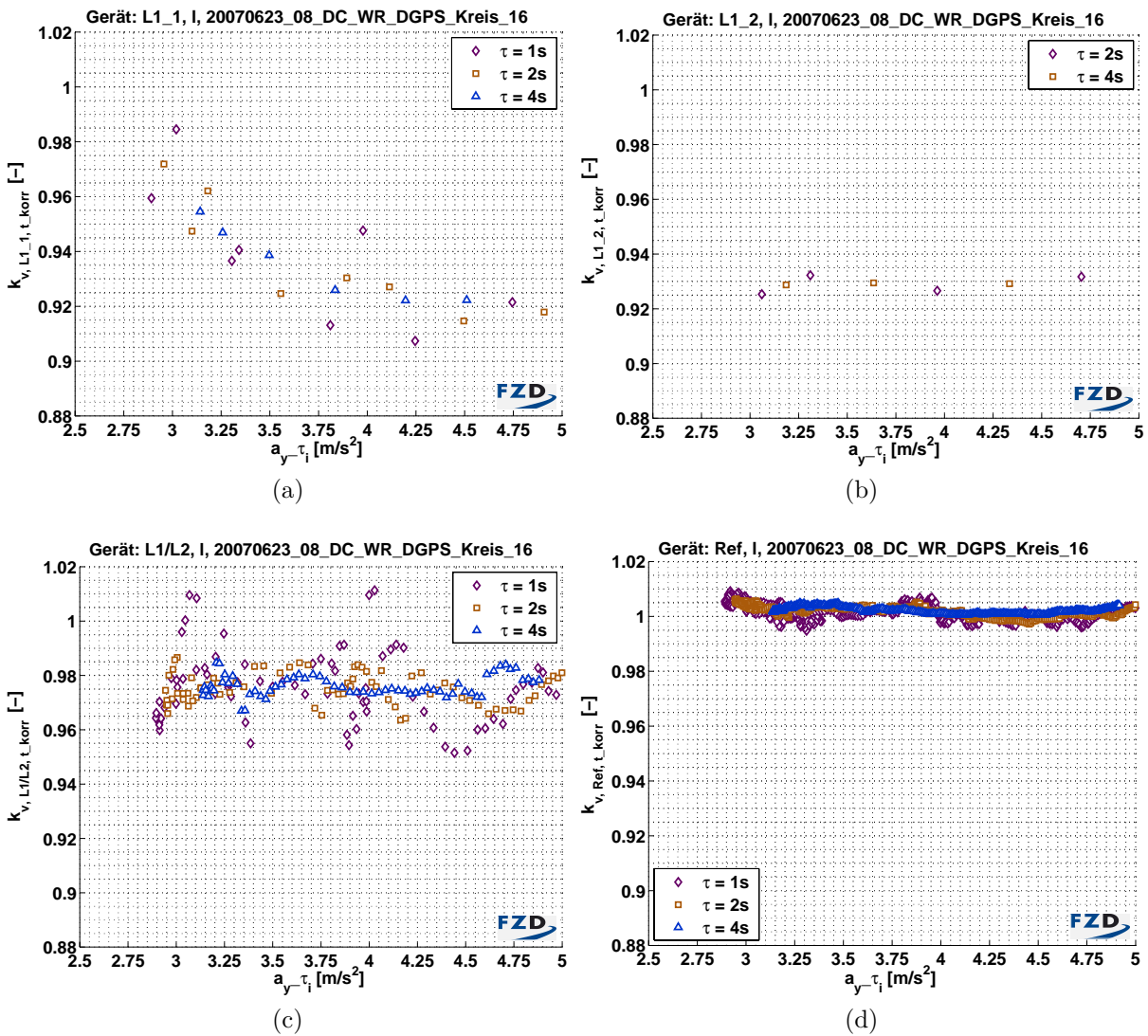
Der sich aus den realen Kreisfahrten ergebende Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  ist in Abbildung 4.15 exemplarisch für eine ausgewählte Messung mit Geschwindigkeit 25 km/h über der Querbeschleunigung dargestellt.

Wird nun der auf Basis von realen Versuchen ermittelte Radgeschwindigkeitsfaktor (Abbildung 4.15) mit dem erwarteten Radgeschwindigkeitsfaktor verglichen, so ist festzustellen, dass sowohl die Referenz als auch das L1\_2-Gerät diese Erwartung erfüllen. Bei dem L1/L2-Gerät ist eine Abweichung von 2,7 % festzustellen. Diese Abweichung ist auf eine Radiusvergrößerung infolge der Vernachlässigung des Schwimmwinkels zurückzuführen. Eine Abschätzung der Größenordnung ist in Anhang A.5.6.2 zu finden. Mit Ausnahme des “low-cost“-Empfängers L1\_1 zeigen die beiden anderen Empfangsgeräte einen konstanten Radgeschwindigkeitsfaktor über den dargestellten Querbeschleunigungsbereich. Bei dem L1\_1-Empfänger ist ein Abfall mit zunehmender Querbeschleunigung erkennbar und somit wird auch der Erwartungswert für  $k_v$  nicht erfüllt. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten ist die vermeintlich intelligente Filterung des Gerätes, die

<sup>33</sup>Durch die Manöverwahl ist die Gültigkeitsgrenze des verwendeten Einspurmodells erreicht. Der hier gewählte Grenzbereich entspricht auch dem Grenzbereich eines Normalfahrers.

sich jedoch hier als eher störend erweist. Eine detailliertere Aussage ist aufgrund fehlenden Zugriffs auf den Quellcode nicht möglich.

Für alle drei GNSS-Empfänger ist jedoch eine Unabhängigkeit vom Zeitintervall  $\tau$  in Abbildung 4.15 zu beobachten. Die Streuungen der Radgeschwindigkeitsfaktorwerte der Referenz und des  $L1\_2$ -Empfängers sind sehr gering, während bei den übrigen GNSS-Empfängern deutlich größere Schwankungen zu beobachten sind. Der Grund für die geringe Schwankung des  $L1\_2$ -Gerätes ist die geringe Datenanzahl bei Kreisfahrt aufgrund der geringen Abtastrate.



**Abbildung 4.15:** Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  über Quereschleunigung für jeweils feste  $\tau_i$ 's aufgetragen, exemplarisch für Kreisfahrt mit Fahrzeuggeschwindigkeit 25km/h für die Geräte (a)  $L1\_1$ , (b)  $L1\_2$ , (c)  $L1/L2$  sowie (d)  $Ref$ . Hierbei sind die entsprechenden Verzugszeiten berücksichtigt.



## 4.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde anhand von Stand- und Stillstandsmessungen eine detaillierte Fehleranalyse durchgeführt, wobei der Einfluss von Wetterbedingungen sowie Tageszeit näher beleuchtet wurde. Auf Basis der vorliegenden Daten konnte keine eindeutige Zunahme der Mittelwerte der Positionsfehler mit schlechter werdendem Wetter (einschließlich Regen) aufgezeigt werden. Vielmehr hat sich gezeigt, dass der Mittelwert der Positionsfehler bei Bewölkung am größten, bei Regen am geringsten ist. Bzgl. den Standardabweichungen war eine geringe Wetterabhängigkeit zu beobachten (Verslechterung von gut  $\rightarrow$  bewölkt  $\rightarrow$  regnerisch), jedoch liegen alle diese Werte im Rahmen der vom Hersteller allgemein angegebenen Positionsungenauigkeit. Somit ist eine explizite Berücksichtigung der herrschenden Wetterbedingungen nicht notwendig.

Ebenso ist eine Beachtung des Tageszeiteinflusses für das weitere Vorgehen nicht erforderlich, da die Streuungen der Positionsfehler konstantes Verhalten für die unterschiedlichen Tageszeiten aufweisen.

Durch den Positionsfehlervergleich der GNSS-Geräte untereinander hat sich die erwartete Rangfolge bestätigt: Eine Zunahme der Positionsgenauigkeit von  $L1.2$  über  $L1.1$  bis hin zu  $L1/L2$ . Die “low-end“-Geräte weisen durchschnittlich eine um den Faktor vier schlechtere Positionsgenauigkeit auf als das untersuchte “high-end“-Gerät. Da die beiden Geräte  $L1/L2$  sowie der in der Referenz integrierte GNSS-Empfänger vom gleichen Empfängertyp sind, besteht zwischen diesen kein Unterschied in der Positionsgenauigkeit. Ferner lässt sich aufgrund der Untersuchungen ein Positionsschwellenwert bei dem  $L1.1$ -Empfangsgerät von 3,1 m vermuten. Wird dieser Wert nicht überschritten, gibt der Empfänger stets den zuletzt gespeicherten Positionswert aus, weshalb die Wetter- und Tageszeiteinflussbetrachtung für diesen Empfänger nicht sinnvoll ist.

Durch die Standmessungen war ein Nachweis der erwarteten Nicht-Verwendbarkeit des Kurswinkels für einen Gierratenabgleich im Stillstand möglich.

Nicht nur das statische, sondern auch das dynamische Verhalten der Betrachtungsgrößen Kurs-/Gierrate und Position unter normalen Fahrbedingungen ist von Interesse. Aufgrund der nicht ständigen Verfügbarkeit der GNSS-Daten lag ein Fokus dieser Untersuchung auf dem Finden geeigneter Verfügbarkeitskriterien, anhand derer die GNSS-Daten plausibilisiert werden können. Es hat sich gezeigt, dass beide Verfügbarkeitskriterien, nämlich  $\#Sat$  sowie der  $HDOP$  herangezogen werden müssen, da nicht durchgängig die Erwartung  $\#Sat [\%] \leq HDOP [\%]$  (Prozentwerte) erfüllt wird und kein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden zu beobachten ist. Auf Basis dieser Kriterien hat sich eine durchschnittliche Verwendbarkeit der GNSS-Daten von 90 %, maximal 97 % auf Autobahnen ergeben, während diese Werte für Überlandfahrten auf Werte von 65 % bzw. 84 % und für durch starke Bewaldung oder mehrstöckige Häuser gekennzeichnete Strecken, auf 34 % bzw. 53 % sinken.<sup>34</sup>

Als Ergebnis dieser Betrachtung erscheint eine Stützung der Fahrdynamikensordaten mit GNSS-Daten für den üblichen Automotiveinsatz hinsichtlich der Verfügbarkeit der GNSS-Daten über einen längeren Streckenbereich möglich.

---

<sup>34</sup>Diese Werte orientieren sich am  $L1/L2$ -Empfänger, da dieser der sensibelste ist. Die anderen Empfänger schreiben die Werte bei schlechten Bedingungen fort.

Ein zweiter Fokus der dynamischen Betrachtung war die Untersuchung der Existenz von Verzugszeiten zwischen GNSS-Messdaten und den entsprechenden Fahrdynamik-sensordaten. Da Verzugszeiten vorliegen, die in der Datenfusion zu berücksichtigen sind, ist deren quantitative Ermittlung erforderlich. Während die Bestimmung der Verzugszeit für die Gierrate auf Basis der Minimummethode gute Ergebnisse liefert, wurde durch Einführung des sog. *Radgeschwindigkeitsfaktors*  $k_v$  ein neues Verfahren, die sog. *Schlupf-methode* abgeleitet. Diese basiert auf der Kenntnis des Schlupfcurvenverlaufes bei Beschleunigungsfahrten und der Verwendung von GNSS-Positionsdaten. Dieses Verfahren bildet die Verzögerungszeitsensitivität im Vergleich zur Minimummethode besser ab und ist daher besser für die Positionsverzugszeitenermittlung geeignet. Durch Anwendung dieser Methode ist unter Verwendung der GNSS-Positionsdaten eine positive Stützung der Fahrzeuggeschwindigkeit möglich.

Die Korrektur des dynamischen Reifenhalbmessers  $r_{dyn}$  durch Nutzung von GNSS-Positionsdaten ist das Ziel des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$ . Dieser stellt den Quotienten aus zurückgelegter Wegstrecke auf Basis von GNSS-Positionsdaten innerhalb eines Zeitintervalls und dem Produkt aus über dem Zeitintervall gemittelter Fahrzeuggeschwindigkeit und entsprechendem Zeitintervall dar. Für die Zielerreichung wurde zur Ermittlung der kurvenförmigen Wegstrecken eine Linearisierung durchgeführt. Der hierdurch entstehende Streckenfehler wird durch Einführung des sog. *Streckenkorrekturfaktors*  $k_s$  nahezu eliminiert. Unter Berücksichtigung dieses Faktors stimmt der aus den Versuchsdaten ermittelte Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  mit dem erwarteten überein, so dass dieser Faktor für alle hier untersuchten GNSS-Geräte bis zu Längsverzögerungen von  $7 \text{ m/s}^2$  bzw. Längsbeschleunigungen von  $4 \text{ m/s}^2$  sowie für Querbeschleunigungen von  $5 \text{ m/s}^2$  (Kreisfahrt mit  $25 \text{ km/h}$  bei Radius  $10 \text{ m}$ ) für eine Korrektur des dynamischen Reifenhalbmessers  $r_{dyn}$  und somit der Fahrzeuggeschwindigkeit einsetzbar ist. Der “high-end“-Empfänger liefert auch für höhere Längsverzögerungen noch plausible  $k_v$ -Werte. Ferner hat sich bei dieser Untersuchung eine Unabhängigkeit bzgl. des gewählten Zeitintervalls ( $\tau_i$ -Unabhängigkeit) bei stationären Fahrten gezeigt. Darüber hinaus wurde für Konstantfahrten eine Varianzabnahme des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  für die in dieser Arbeit eingesetzten GNSS-Empfangsgeräte mit zunehmendem  $\tau_i$  und mit steigender Geschwindigkeit beobachtet.

Auf Basis der durch die durchgeführte Fehleranalyse abgeleiteten Erkenntnisse wird im nächsten Kapitel auf die Fusionsansätze und deren Implementierung näher eingegangen.

---

# 5 Sensordatenfusion

Nach erfolgter Durchführung der Signalanalyse für die relevanten Betrachtungsgrößen in Kapitel 4, befasst sich dieses Kapitel mit der Fusion der Fahrdynamiksensor- und GNSS-Daten. Die Bezeichnung Sensordatenfusion lässt sich hier aus der ursprünglichen Bedeutung des Begriffs Fusion (= Verschmelzung oder Zusammenschluss)<sup>1</sup> auf die in der Arbeit beschriebene Aufgabenstellung anwenden, da das Ziel der Sensordatenfusion die Stützung der Basissensoren durch Eingangsdaten aus weiteren Sensoren ist.

Zunächst werden mögliche INS-/GNSS-Fusionsstrategien vorgestellt und bewertet. Aus diesen Strategien wird die vielversprechendste ausgewählt und es werden Anforderungen an den Fusionsansatz für die jeweiligen Betrachtungsgrößen abgeleitet. Auf Basis der ausgewählten Fusionsstrategie und den vorgestellten Anforderungen werden der Gierraten- und Geschwindigkeitsfusionsansatz entwickelt. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Implementierung der gewählten Fusionsansätze.

## 5.1 INS-/GPS Fusionsstrategien und deren Auswahl

Nach Sichtung der Signale und Betrachtung der Fehlereinflüsse auf die Betrachtungsgrößen wird die Frage bzgl. der Fusionsstrategie von Fahrdynamiksensor- und GNSS-Daten beantwortet. Prinzipiell kann die Integration auf der Hard- bzw. auf der Softwareseite erfolgen. Der Ansatz einer hardwareseitigen Integration, bei der beide Systeme in einer von außen nicht zugänglichen “Black-Box“ kombiniert werden, wird aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur nachträglichen Modifikation des Gesamtsystems nicht weiter verfolgt. Vielmehr wird auf die softwareseitige Integration gesetzt, die hinsichtlich der verwendeten Stützinformationen mehrere Fusionsarten ermöglicht. Diese sind durch zwei Charaktereigenschaften beschreibbar: Eine Eigenschaft betrifft den Umfang, um welchen sich die Sensordaten gegenseitig stützen. Die Art und Weise der Vereinigung der Daten stellt die zweite Charaktereigenschaft dar. Hierzu werden grundsätzlich folgende vier Fusionsarten unterschieden:<sup>2,3</sup>

- Uncoupled Integration
- Loosely Coupled Integration
- Tightly Coupled Integration
- Ultra-Tight oder Deep Integration

---

<sup>1</sup>Dudenredaktion (1990): Duden, Band 5 - Das Fremdwörterbuch.

<sup>2</sup>Wendel (2007): Integrierte Navigationssysteme S. 192ff.

<sup>3</sup>Kipka (2006): Grossräumige GPS / INS Vermessung mittels virtueller Referenzstationen S. 55ff.

Während bei der Uncoupled Integration die Berechnung von autonomen Positionslösungen durch die beiden Systeme getrennt erfolgt, werden bei dem Loosely Coupled System die GPS-Positions- und Geschwindigkeitsmessungen als Stützinformationen verwendet, wobei die beiden Systeme eigenständig bleiben. Dieses System ist das am weitesten verbreitete und wird auch als *Cascaded Integration* bezeichnet, da mehrere Filter hintereinander geschaltet werden.<sup>4</sup> Einen Schritt weiter gehen die Tightly und Ultra-Tight oder Deep Integration Systems, die Rohdaten verarbeiten. Bei dem Tightly Coupled System werden Pseudorange- und Deltarange-Messungen als Stützinformationen verwendet und der GPS-Empfänger wird durch INS-Daten ebenfalls gestützt<sup>5</sup>. Im Gegensatz hierzu findet bei der Ultra-Tight oder Deep Integration die Signalverarbeitung auf der Hardware-Ebene statt<sup>6</sup>, was einen Eingriff in die empfängerinterne Signalverarbeitung erfordert. Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Strategien ist in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Da nicht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung eines verbesserten GNSS-Empfängers liegt und der Ausgangspunkt für die Fusion die von kommerziellen GNSS-Empfängern zur Verfügung (ohne Eingriff in den Empfänger) gestellten Daten ist, scheidet die Tightly Coupled Integration (wegen Nutzung von Rohdaten) sowie die Ultra-Tight oder Deep Integration (wegen Zugriff auf Quellcode) aus. Aus den zwei verbleibenden Varianten wird in dieser Arbeit die in Abbildung 5.1 schematisch dargestellte Loosely Coupled Integration verfolgt.

Bei dieser Strategie werden ausgehend von den INS-Messgrößen über ein mechanisches Modell die entsprechenden INS-Kenngrößen bestimmt. Von diesen werden die in Abbildung 5.1 mit GPS-Kenngrößen bezeichneten Werte subtrahiert. Die hierdurch entstehende Differenz  $\Delta$  Kenngröße bildet den Eingang für den in Abbildung 5.1 mit Filterung gekennzeichneten Block. In dem Block findet die Fehlerschätzung statt. Die ermittelte Fehlerschätzung wird von den INS-Kenngrößen subtrahiert und es ergeben sich die entsprechenden korrigierten Kenngrößen. Die GPS-Kenngrößen selbst werden über eine geräteabhängige, interne GPS-Filterung aus den Pseudorange und dem Zeitstempel ermittelt.

Diese vorgestellte Loosely Coupled Integration hat gegenüber der Uncoupled Integration die vorteilhafte Eigenschaft des kontinuierlichen Informationsaustausches zwischen beiden Systemen.

Neben der gewählten INS-/GPS-Fusionsstrategie ist ferner die Festlegung einer geeigneten Filtermethode erforderlich, die eine Kombination der beiden Systeme ermöglicht. Somit ist der in Abbildung 5.1 mit "Filterung" gekennzeichnete Block näher zu spezifizieren. Hierzu stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung, die in Abbildung 5.2 bzgl. den Kriterien Performance und Systemvoraussetzung eingruppiert sind.

---

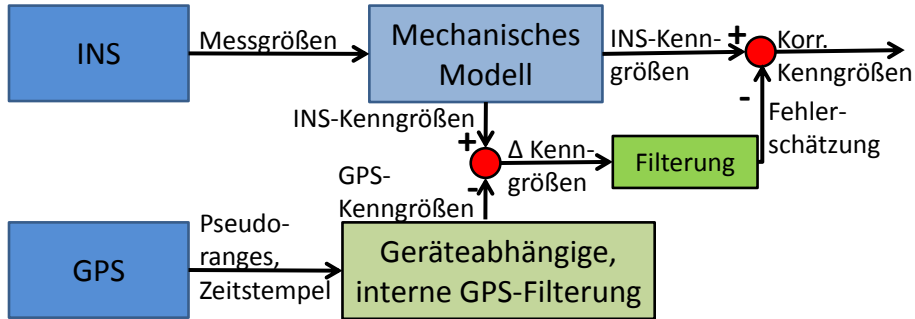
<sup>4</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 96.

<sup>5</sup>Sollte dies nicht der Fall sein, so liegt ein Closely Coupled System vor.

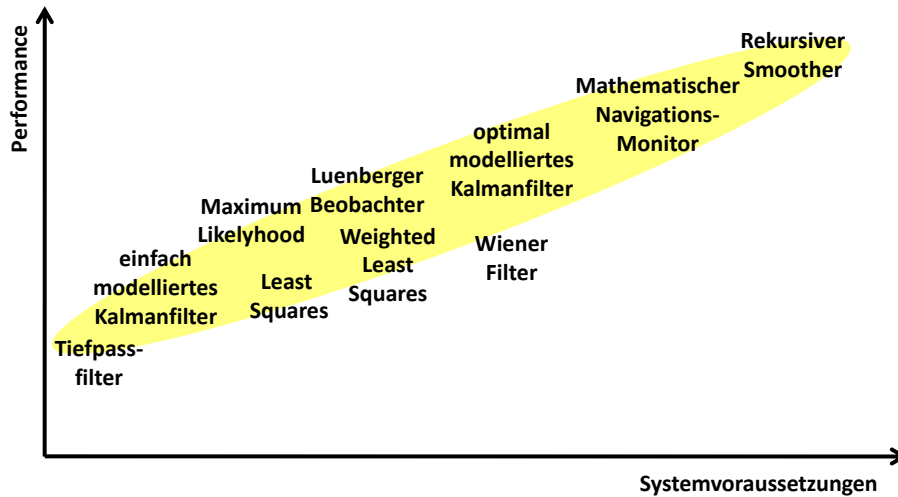
<sup>6</sup>Wendel (2003): Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme S. 95.

**Tabelle 5.1:** Vor- und Nachteile verschiedener GPS/INS Integrationsstrategien. In Anlehnung an WENDEL (2007, S. 192ff) und KIPKA (2005, S. 55ff).

Integrationsstrategien	Vorteile	Nachteile
Uncoupled System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringster Entwicklungsaufwand</li> <li>• geringste Komplexität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GPS-Lösungen kompensieren zwar die INS-Fehler, üben aber keinen Einfluss auf das Fehlverhalten des INS aus ⇒ bei GPS-Ausfall: rasche Abnahme der mittels INS geschätzten Positionsgenauigkeit</li> </ul>
Loosely Coupled System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringer Entwicklungsaufwand gegenüber anderen Ansätzen</li> <li>• Softwareerweiterung aufgrund anderer externer Sensoren mit geringem Aufwand möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Stützung der Inertialnavigation bei weniger als vier sichtbaren Satelliten</li> <li>• Völlige Loslösung der GPS-Verarbeitung von dem Rest des Systems</li> </ul>
Tightly Coupled System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingeschränkte Stützung der INS anhand der Pseudorange- und Delta-rangemessungen auch bei weniger als vier sichtbaren Satelliten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutlich größerer Integrationsaufwand</li> <li>• Nur noch ein einzelnes Filter, was einen Anstieg der Verarbeitungszeit zur Folge hat</li> </ul>
Ultra-Tight und Deep Integration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesteigerte Genauigkeit der Navigationslösung</li> <li>• Tolerierung eines schlechteren Signal-Rauschverhältnisses des GPS-Signals</li> <li>• Größere Jamming-Robustheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingriff in empfangernerne Signalverarbeitung (meist nur Empfängerherstellern vorbehalten)</li> <li>• Enormer Integrationsaufwand</li> </ul>



**Abbildung 5.1:** Loosely Coupled Integration - Schema. Quelle: in Anlehnung an GODHA (2006, S. 66).



**Abbildung 5.2:** Überblick über Algorithmen zur Sensorfusion. Quelle: PFISTER (2006, Folie 12).

Aus Abbildung 5.2 ist zu erkennen, dass bei Verwendung eines Tiefpass-Filters zwar geringe Systemvoraussetzungen erforderlich sind, jedoch ist laut PFISTER (2006) die damit erzielbare Performance im unteren Bereich anzusiedeln.<sup>7</sup> Es wird gezeigt, dass selbst mit dem vom Rechenaufwand geringsten Ansatz schon signifikante Vorteile erzielt werden können.

## 5.2 Anforderungen an den Fusionsansatz

Nach erfolgter Festlegung der Fusionsstruktur (Kapitel 5.1) werden, auf Basis der in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse, die bei der Entwicklung des Fusionsansatzes für die Betrachtungsgrößen Gierrate und Geschwindigkeit zu berücksichtigenden Aspekte bzw. Anforderungen abgeleitet.

Wie anhand von realen Versuchsdaten gezeigt (Kapitel 4.3.1), besteht für die GNSS-Daten keine vollständige Verfügbarkeit und die Existenz von Ausreißern ist möglich. Daher werden die für die Fusion zu verwendenden GNSS-Daten zunächst einer Plausibilisierungsabfrage unterzogen. Durch diese Abfrage wird entschieden, ob dem GNSS-Signal  $Signal_{GNSS, mess}$  in seiner Genauigkeit vertraut werden kann. Die Güteabfrage erfolgt vor jeder möglichen Fusionierung. Für die Beurteilung sind signalunabhängige und signalabhängige Kriterien zu verwenden. Als signalunabhängige Kriterien eignen sich die Anzahl der Satelliten (mit  $\#Sat$  abgekürzt) sowie der  $HDOP$ -Wert<sup>8</sup>, der eine Aussage über die horizontale Genauigkeit der Messsignale liefert. Ist die Anzahl der Satelliten  $\geq 4$  und der  $HDOP$ -Wert  $\leq 4$ , so sind die signalunabhängigen Kriterien als erfüllt anzusehen.<sup>9,10</sup> Erst wenn neben diesen Kriterien auch die signalabhängigen (siehe Kapitel 5.3.1 und Kapitel 5.3.2) erfüllt sind, steht das geprüfte GNSS-Signal zur Fusionierung zur Verfügung. Dies bedeutet, dass das Plausibilitätssignal einen Schalter  $S$  zu steuern hat, der die Verwendung der GNSS-Daten für die Fusion koordiniert.

Nicht nur die zu verwendenden GNSS-Daten sind zu bearbeiten, sondern auch das fahrzeugseitige Signal  $Signal_{Fzg, mess}$ , da das GNSS-Signal gegenüber dem Fahrzeugsensorsignal nacheilt. Daher muss der für die Ermittlung der Korrekturwerte erforderliche Zweig des Fahrzeugsensorsignals einem Filter zugeführt werden, das die Aufgabe der Sicherstellung einer konstanten Gruppenlaufzeit zu erfüllen hat, welche derjenigen Verzugszeit der entsprechenden GNSS-Signale (geräteabhängig) entspricht.

---

<sup>7</sup>Pfister et al. (2006): Galileo Systemsimulation zur Bewertung kombinierter Methoden der Positionsbestimmung.

<sup>8</sup>Siehe Kapitel 4.3.1.

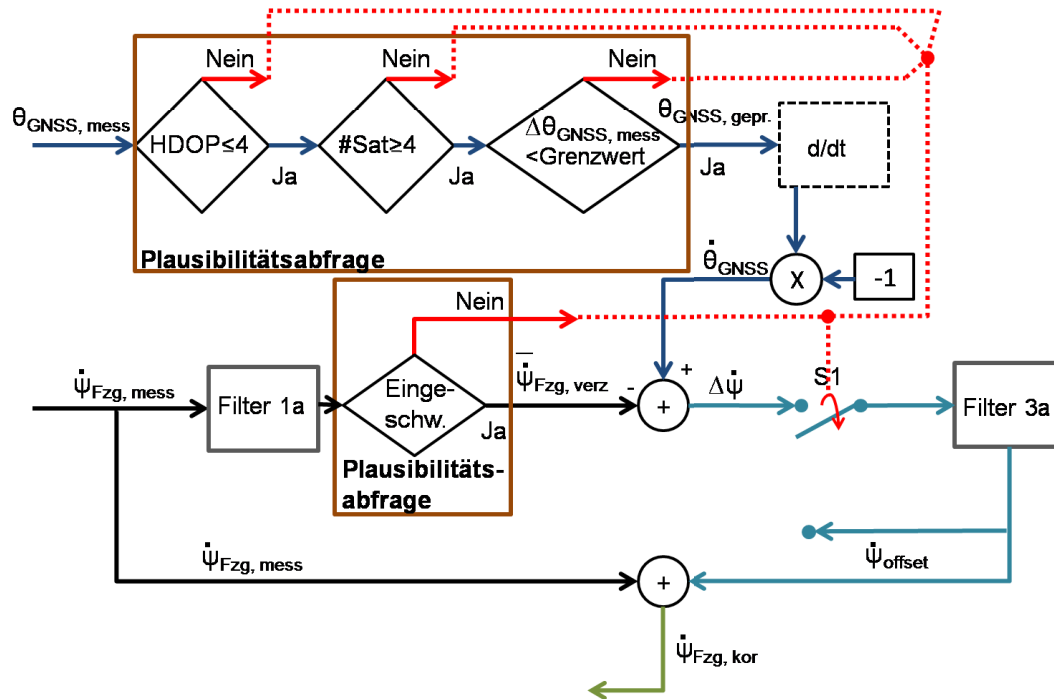
<sup>9</sup>Zwar ist für eine zweidimensionale Positionierung die Betrachtung von drei Satelliten ausreichend, jedoch wird in der vorliegenden Arbeit die Grenze auf vier Satelliten festgelegt, da Unklarheit bzgl. des Verhaltens der Empfänger bei der Umschaltung in eine zweidimensionale Positionierung (Notprogramm) herrscht.

<sup>10</sup>Solimeno (2007): Low-Cost INS/GPS Data Fusion with Extended Kalman Filter for Airborne Applications S. 98.

## 5.3 Fusionsansatz und dessen Implementierung

### 5.3.1 Gierrate

Der Aufbau des Gierratenfusionsansatzes ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Hier ist die bereits erläuterte Aufspaltung der Plausibilitätsabfrage in einen signalunabhängigen und in einen signalabhängigen Teil zu erkennen.



**Abbildung 5.3:** Blockschaltbild des Fusionsansatzes für die Betrachtungsgröße Gierrate.

Die signalabhängige Abfrage basiert auf der Überprüfung des absoluten Gierratenwertes. Überschreitet dieser einen Grenzwert, sind die Daten bis zur erneuten Erfüllung der Plausibilitätsbedingung nicht mehr zu verwenden. Der Grenzwert für die Plausibilitätsabfrage ergibt sich aus der Analyse des gleichmäßig gefahrenen Slaloms und des Manövers “Anreißen 80“<sup>11</sup>. Hier treten maximale Werte für die Referenzgierrate von etwa  $20^\circ/\text{s}$  auf, so dass unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit sowie der Trägheit der GNSS-Geräte der Grenzwert auf  $40^\circ/\text{s}$  festgesetzt wird.

Bevor jedoch das Fahrzeuggierratensignal von dem plausibilisierten GNSS-Kursratensignal subtrahiert werden kann, ist aufgrund des Zeitverzuges des GNSS-Signals eine Filterung des Fahrzeuggierratensignals erforderlich, was in Filter 1a (siehe Abbildung 5.3) erfolgt.

Aufgrund der Plausibilitätsbedingung des Vorhandenseins des eingeschwungenen Zustandes von Filter 1a und der Anforderung gemäß Gleichung 5.1 bietet sich für die Wahl von Filter 1a ein Filter an, dessen Einschwingdauer der ermittelten Verzugszeit entspricht.

<sup>11</sup>Vergleiche Kapitel 3.1.1.1



Dies ist bei Vorliegen eines reinen Totzeitgliedes der Fall. Daher wird für Filter 1a ein reines Totzeitglied verwendet.

$$\text{Phasenverzug}_{\text{Filter } 1a} \stackrel{!}{=} t_{\text{Verzug, ermittelt}} \quad (5.1)$$

Das nun um den Zeitverzug korrigierte Signal wird einem Plausibilitätsblock (siehe Abbildung 5.3) zugeführt, in dem der Einschwingstatus des Filters 1a abgefragt wird. Anschließend wird das am Ausgang des Plausibilitätsblocks anliegende Gierratensignal  $\psi_{\text{Fzg, verz}}$  einer Differenzbildung unterzogen, wobei die verschiedenen Abtastungen des Fahrzeuggierraten- und des GNSS-Kursratensignals zu berücksichtigen sind. Da in der Arbeit das GNSS-Signal stets eine geringere Abtastfrequenz als das des Fahrzeugsensors besitzt, wird für die Differenzbildung vor Filter 3a der Wert des Gierratensensorsignals verwendet, der den jüngsten in der Vergangenheit darstellenden Wert zum Zeitpunkt des Vorhandenseins des GNSS-Kursratensignals kennzeichnet.

Nachfolgend wird diese Differenz Filter 3a zugeführt. Seine Aufgabe besteht in der Mittelung der Differenz, wenn die Plausibilitätsprüfung erfolgreich war (UND-Verknüpfung aller Plausibilitätsabfragen), d. h. Schalter  $S1$  geschlossen ist. Sobald eine Schalteröffnung  $S1$  eintritt, wird der zuletzt gültige Offsetwert  $\dot{\psi}_{\text{offset}}$  fortgeschrieben.

Filter 3a selbst wird aufgrund der Anforderung Tiefpassfilter zu verwenden, als einpoliges Tiefpassfilter mit der Berechnungsvorschrift gemäß Gleichung 5.3 ausgeführt. Die erforderliche Zeitkonstante  $t_{\text{Verzug, ermittelt, GNSS, Fil3a}}$  wurde bereits in Kapitel 4.3.3 als Break-even-Punkt  $\tau_{BEP}$  bestimmt und findet hier Verwendung.

$$\dot{\psi}_{\text{offset}}(t_k) = (1 - \alpha) \cdot \dot{\psi}_{\text{offset}}(t_{k-1}) + \alpha \cdot \Delta\dot{\psi}(t_k) \quad (5.2)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{T_{\text{Abtast, GNSS}}}{t_{\text{Verzug, ermittelt, GNSS, Fil3a}}} \quad (5.3)$$

Das nun am Ausgang von Filter 3a zur Verfügung stehende Signal  $\dot{\psi}_{\text{offset}}$  wird dem Fahrzeuggierratensignal  $\psi_{\text{Fzg, mess}}$  aufsummiert. Ergebnis dieser Addition ist das Signal  $\psi_{\text{Fzg, kor}}$ , welches das verbesserte, fusionierte Gierratensignal darstellt. Die durch diese Fusion erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 6 näher vorgestellt.

### 5.3.2 Geschwindigkeit

Der prinzipielle Aufbau des Geschwindigkeitsfusionsansatzes ist mit dem Gierratenfusionsansatz vergleichbar, jedoch findet keine Differenzbildung statt und es müssen noch weitere Umrechnungen vollzogen werden. Der für die Geschwindigkeit entwickelte Fusionsansatz ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Wie bereits bei der Gierrate erfolgt auch bei der Geschwindigkeitsfusion zunächst eine Überprüfung der GNSS-Positionsdaten, die ebenfalls aus drei Kriterien besteht. Neben den beiden Kriterien  $\#Sat$  und  $HDOP$ -Faktor werden die Wegstrecken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten betrachtet. Da es sich bei der Fahrzeugbewegung um eine kontinuierliche Bewegung handelt, sind Sprünge in der zurückgelegten Wegstrecke unrealistisch und dürfen nicht vorkommen. Somit wird der Grenzwert durch die maximale

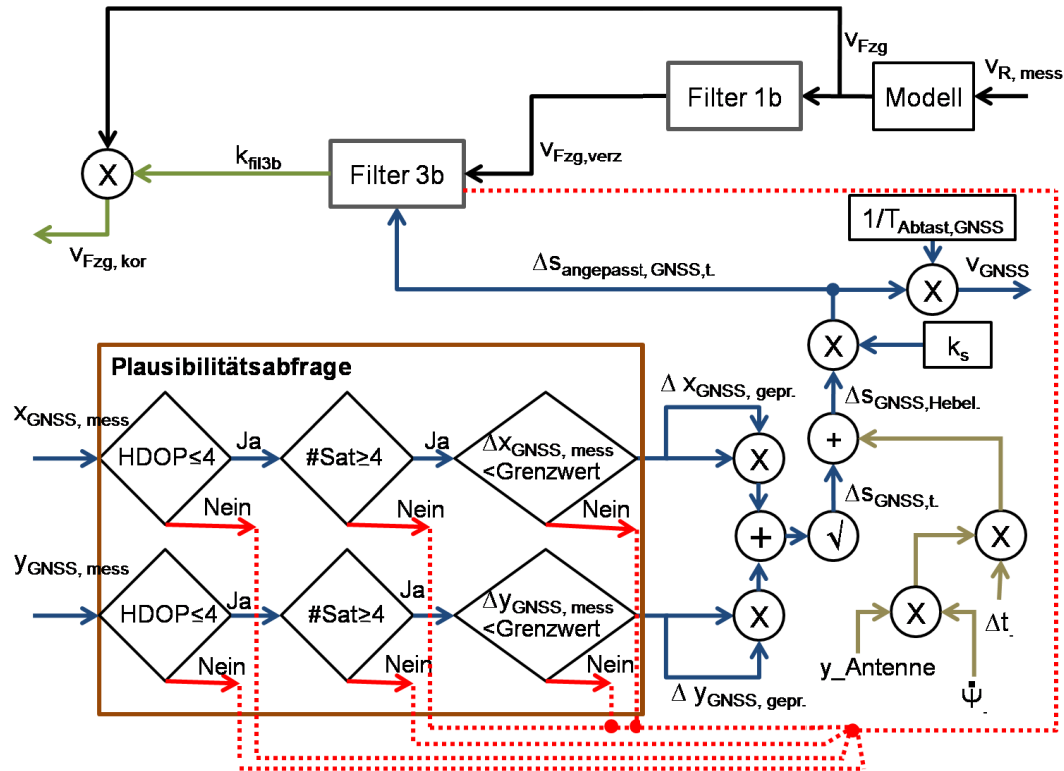


Abbildung 5.4: Blockschaltbild des Fusionsansatzes für die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Geschwindigkeit vorgegeben. Der Grenzwert für die zurückgelegte Wegstrecke innerhalb einer Zykluszeit nimmt unter Annahme einer maximalen Geschwindigkeit von 300 km/h einen Wert von  $83 \text{ m/s} \cdot T_{\text{Abtast,GNSS}}$  an. Dieser Wert ergibt sich aus der heutzutage üblichen abgeregelten Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h<sup>12</sup> und einer Sicherheitsreserve von 50 km/h. Aufgrund der Position der GNSS-Antennen auf dem Fahrzeug sind entsprechende Werte in die Fahrzeuginnenachse zu transformieren und wie in Kapitel 4.3.4 gezeigt, mit dem Streckenkorrekturfaktor  $k_s$  aufgrund der Vereinfachung der linearen Wegsegmentbestimmung zu multiplizieren bevor die für die Fusion erforderlichen Wegstreckenstücke  $\Delta s_{\text{angepasst, GNSS,t}}$  zur Verfügung stehen.

Ebenso wie bei den GNSS-Positionsdaten ist fahrzeugseitig eine Umrechnung vorzunehmen, die sich auf die Fahrzeuggeschwindigkeit bezieht. Durch Anwendung des Einachsmodells<sup>13</sup> erfolgt die Umrechnung der Radgeschwindigkeiten in die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$ . Diese wird aufgrund des Nacheilens der aus den GNSS-Positionsdaten abgeleiteten Geschwindigkeit Filter 1b zugeführt. Erst jetzt wird die verzögerte Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg, verz}}$  sowie die angepassten Wegstreckenstücke  $\Delta s_{\text{angepasst, GNSS,t}}$  in das Filter 3b geleitet.

Filter 3b selbst wird wie Filter 3a bereits als einpoliges Filter (siehe Abbildung 5.5) mit der Berechnungsvorschrift gemäß Gleichung 5.4 ausgeführt.

<sup>12</sup>Dieser abgeregelte Geschwindigkeitswert wird von zahlreichen Automobilherstellern in leistungsstarken Fahrzeugen realisiert.

<sup>13</sup>Nähere Informationen finden sich im Anhang A.3.

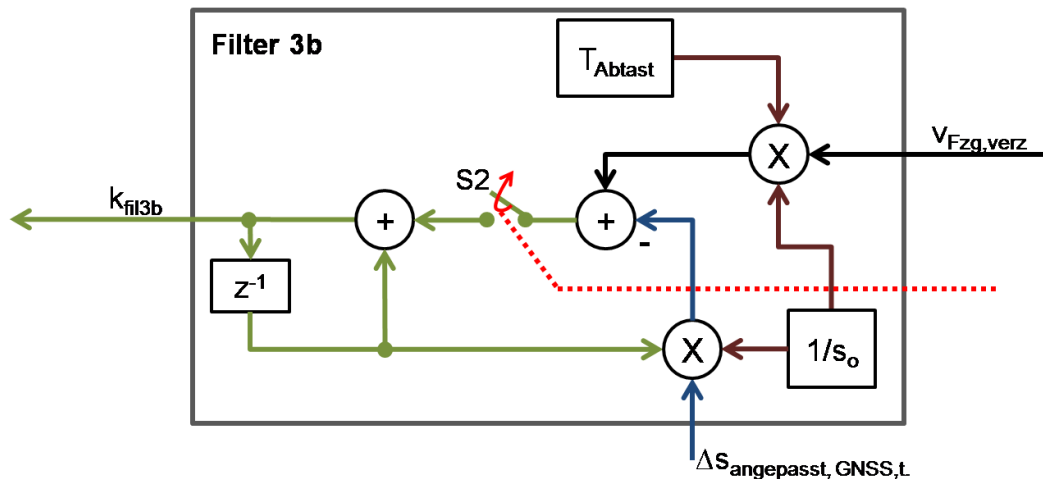


Abbildung 5.5: Detailansicht des Filters 3b.

$$k_{fil3b}(t_k) = v_{Fzg}(t_k) \cdot \frac{T_{Abtast}}{s_0} + \left(1 - \frac{\Delta s_{angepasst, GNSS, t}}{s_0}\right) \left(1 - \frac{v_{GNSS}(t_k) \cdot T_{Abtast}}{s_0}\right) \cdot k_{fil3b}(t_{k-1}) \quad (5.4)$$

Hierbei ist Faktor  $v_{Fzg}(t_k) \cdot \frac{T_{Abtast}}{s_0}$  möglichst klein, d. h.  $\ll 1$  zu wählen, was über den Parameter  $s_0$ , der eine Gedächtnislänge darstellt, möglich ist. Bei der Festlegung dieses Parameters ist jedoch ein Kompromiss zwischen Vermeidung von Rauschen und möglichst kurzem Weg einzugehen, weshalb sich ein Wert von 1000 m als geeignet ergibt. Um die ausschließliche Verwendung von gültigen GNSS-Positionswerten sicherzustellen, wird ein Schalter  $S2$  eingeführt, der diese Bedingung übernimmt. Solange alle drei Plausibilitätskriterien gleichzeitig (UND-Verknüpfung) erfüllt sind, ist der im Filter 3b integrierte Schalter  $S2$  geschlossen, andernfalls ist er geöffnet und der alte Wert ( $k_{fil3b}(t_{k-1})$ ) wird fortgeschrieben.

Der sich aus Filter 3b ergebende Korrekturfaktor  $k_{fil3b}$  wird schließlich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  multipliziert und das korrigierte Signal  $v_{Fzg, kor}$  entsteht. Auf die mit diesem Fusionsansatz erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 6.3 näher eingegangen.

## 5.4 Fazit

Basis für die Auswahl eines geeigneten Fusionsansatzes war zunächst die Gegenüberstellung von vier verschiedenen INS-/GPS-Fusionsstrategien. Aufgrund der Rahmenbedingung keine Verwendung von GNSS-Rohdaten sowie fehlender Zugriff auf den Quellcode der GNSS-Geräte wurde die Loosely-Coupled Integration ausgewählt, die den Vorteil des kontinuierlichen Datenaustausches zwischen den beiden Systemen (GNSS- und Fahrzeugsensordaten) besitzt.

Für die Umsetzung der gewählten Fusionsstruktur galt es die Anforderungen zu berücksichtigen, welche auf Basis der in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse abgeleitet wurden. Bei diesen Anforderungen handelte es sich um die Verwendung von nur als gültig,

d. h. als plausibel erachtete GNSS-Daten und um die Berücksichtigung des Zeitverzugs der entsprechenden GNSS-Daten.

Die Prüfung der Verwendbarkeit des jeweiligen GNSS-Wertes wurde über eine zweigeteilte Plausibilitätsprüfung gelöst. Der erste Teil bildet die fahrzeugunabhängige Prüfung der GNSS-Daten. Dies bedeutet, hier wird anhand der zwei GNSS-Kriterien Anzahl an verfügbaren, d. h. sichtbaren Satelliten und *HDOP*-Faktor-Wert entschieden, ob die GNSS-Daten zu verwenden sind. Im zweiten Teil der Plausibilitätsabfrage wird überprüft, ob eine plausible Bewegung vorliegt. Dies bedeutet im konkreten Fall, dass bei der Betrachtungsgröße Position bei der Ermittlung der zurückgelegten Wegstreckenstücke eine kontinuierliche Bewegung vorhanden ist, d. h. keine unrealistischen Sprünge.

Bei der Kursrate wird eine Überschreitung eines Grenzwertes von  $40^\circ/\text{s}$ , der sich aus einem "worst-case-Slalom" ergibt, geprüft. Liegen die entsprechenden Werte unterhalb des jeweiligen Grenzwertes, so werden diese als gültig bewertet und stehen für die Fusion zur Verfügung. Sind die Werte als unplausibel bewertet, so wird ein Schalter betätigt, der die Verwendung der GNSS-Daten für die Fusion unterbindet. Die Berücksichtigung der Verzugszeiten wurde durch die Verwendung eines reinen Totzeitgliedes realisiert, da dieses Filter die geringste Einschwingdauer aufweist.

Während bei dem Gierratenfusionsansatz die gebildete Differenz aus verzugszeitangepassten GNSS-Signal und Fahrzeuggierrate direkt dem Fusionsfilter zugeführt wurde, waren bei dem Geschwindigkeitsansatz noch einige Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, ehe die angepassten Wegstreckenstücke in das Fusionsfilter fließen. Diese Korrekturfaktoren ergaben sich zum einen durch die außermittige Lage der GNSS-Antennen bzgl. der Fahrzeuglängsachse und zum anderen aus der getroffenen Vereinfachung der Linearisierung der Wegstreckenstücke. Der Ausgang des jeweiligen Fusionsfilters bildete schließlich zusammen mit dem entsprechenden Fahrzeugsensorsignal das korrigierte, d. h. im Vergleich zum unfusionierten Fahrzeugsensorsignal verbesserte Signal.

Das Fusionsfilter selbst wurde aufgrund der Eigenschaft der geringen Systemperformance als Tiefpassfilter erster Ordnung realisiert. Die hierzu erforderlichen Parameterwerte wurden bereits bei der Analyse in Kapitel 4.3 ermittelt.

## 6 Fusionsergebnisse

Gegenstand dieses Kapitels ist die Darstellung der Ergebnisse der realisierten Sensorfusion. Hierzu werden zunächst die für die Beurteilung erforderlichen Bewertungskriterien vorgestellt, bevor auf die erzielten Ergebnisse näher eingegangen wird.

### 6.1 Beurteilungskriterien

Zur Beurteilung der umgesetzten Fusionsansätze sind Gütekriterien erforderlich, wobei sowohl die nicht gestützten als auch die gestützten Betrachtungsgrößen mit der Referenz zu vergleichen sind.

Für die Betrachtungsgröße Gierrate und Geschwindigkeit wird zur Gütebeurteilung für jede Messung  $j$  die Summe der quadrierten Abweichungen ( $quad\_e\_BG_{xxx,yyy,j}$ ) herangezogen. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitdauer ( $t_E$  Endzeitpunkt der Messung) der jeweiligen Messung wird die Summe durch die Anzahl der Messpunkte dividiert und somit normiert. Hierdurch ist eine Mittelwertbildung über alle Messungen möglich. Die sich ergebenden Kriterien für die fusionierte Betrachtungsgröße (Index: Fzg, kor), das reine Messsignal des Fahrzeugsensors (Index: Fzg, Mess) und des jeweiligen GNSS-Gerätes (Index: GNSS, Mess) sind in den Gleichungen 6.1, 6.2 und 6.3 für Messung  $j$  allgemein für die Betrachtungsgröße  $BG$  dargestellt.

In Gleichung 6.3 werden für die Berechnung nur gültige GNSS-Werte verwendet. Gültig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die GNSS-Daten alle Plausibilitätsbedingungen erfüllen.

$$quad\_e\_BG_{Fzg, kor,j} = \frac{T_{Abtast,Fzg}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,Fzg}}} (BG_{Fzg,kor,j}(t_k) - BG_{Ref,j}(t_k))^2 \quad (6.1)$$

$$quad\_e\_BG_{Fzg, Mess,j} = \frac{T_{Abtast,Fzg}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,Fzg}}} (BG_{Fzg,Mess,j}(t_k) - BG_{Ref,j}(t_k))^2 \quad (6.2)$$

$$quad\_e\_BG_{GNSS, Mess,j} = \frac{T_{Abtast,GNSS}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,GNSS}}} (BG_{GNSS,Mess,j}(t_k) - BG_{Ref,j}(t_k))^2 \quad (6.3)$$

Während bei der Gierratenbetrachtung eine Offsetanpassung erfolgt, liegt bei der Geschwindigkeit eine Gainanpassung vor. Für solch eine Anpassung eignet sich der relative Fehler zwischen fusioniertem Geschwindigkeitssignal und Referenzsignal. Aufgrund der Singularität im Nenner<sup>1</sup> bei Fahrzeugstillstand ist darauf zu achten, dass der im Nenner

<sup>1</sup> $e_{relativ} = \frac{v_{Fzg,kor} - v_{Ref}}{v_{Ref}}$

stehende Referenzgeschwindigkeitswert nicht zu gering ist. Dies würde sonst zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen, da sich die Fehler bei niedrigen Geschwindigkeiten stärker auswirken würden als bei höheren Geschwindigkeiten. Um diesen Einfluss auszugleichen ist der relative Fehler mit dem Referenzgeschwindigkeitswert zu gewichten, wodurch sich somit als zusätzliches Beurteilungskriterium für die Geschwindigkeitsfusion die mittleren Abweichungen gemäß Gleichung 6.4 bis Gleichung 6.6 ergeben.

$$\mu_j(e_{-v_{Fzg, kor,j}}) = \frac{T_{Abtast,Fzg}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,Fzg}}} (v_{Fzg, kor,j}(t_k) - v_{Ref,j}(t_k)) \quad (6.4)$$

$$\mu_j(e_{-v_{Fzg, Mess,j}}) = \frac{T_{Abtast,Fzg}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,Fzg}}} (v_{Fzg, Mess,j}(t_k) - v_{Ref,j}(t_k)) \quad (6.5)$$

$$\mu_j(e_{-v_{GNSS, Mess,j}}) = \frac{T_{Abtast,GNSS}}{t_{E,j}} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{E,j}}{T_{Abtast,GNSS}}} (v_{GNSS, Mess,j}(t_k) - v_{Ref,j}(t_k)) \quad (6.6)$$

Ebenso wie bereits bei Gleichung 6.3 finden in Gleichung 6.6 nur als gültig angesehene GNSS-Werte (alle Plausibilitätsbedingungen sind erfüllt) Berücksichtigung.

Um aus diesen Kriterien eine objektive Rangfolge zu erhalten, wird ein sog. *Verbesserungsfaktor VF* eingeführt, der sich für die Summe der quadrierten Abweichungen als eine Art Effektivwert gemäß Gleichung 6.7 bzw. für den Mittelwert gemäß Gleichung 6.8 bestimmt. Je größer der Zahlenwert des Verbesserungsfaktors ist, desto höher ist die eingenommene Rangfolge des entsprechenden Gerätes.

$$VF_{quad\_e\_BG_{Fus,GNSS,j}} = \sqrt{\frac{quad\_e\_BG_{Fzg, Mess,j}}{quad\_e\_BG_{Fzg, kor,j}}} \quad (6.7)$$

$$VF_{\mu_j}(e_{-v_{Fus,GNSS}}) = \frac{\mu_j(e_{-v_{Fzg, Mess,j}})}{\mu_j(e_{-v_{Fzg, kor,j}})} \quad (6.8)$$

Ferner ist mit Hilfe des Verbesserungsfaktors *VF* ersichtlich, um welchen Faktor der Fehler des unkorrigierten Messsignals im Vergleich zu dem Fehler des fusionierten Signals der entsprechenden Betrachtungsgröße größer ist.

## 6.2 Ergebnisse der Gierratenfusion

Für die Beurteilung der Effektivität der Signalfusion bzgl. einer Genauigkeitssteigerung sind wegen der Forderung des eingeschwungenen Zustandes von Filter 1a und der großen Zeitkonstante von Filter 3a Fahrten mit großer zurückgelegter Strecke (mindestens 2000 m) erforderlich. Daher werden Überland- sowie Stadt- und Autobahnfahrten (im Gegensatz zu Manöverfahrten wie beispielsweise Slalom) betrachtet. Des Weiteren müssen die Messungen auch GNSS-Aussetzer bzw. Ausreißer aufweisen, welche v. a. bei Stadt- und Überlandfahrten auftreten. Die angegebenen Zahlenwerte stellen jeweils den Mittelwert

aus vier Messungen mit einer durchschnittlichen Messdauer von jeweils 20 min dar, wobei bei der Auswahl auch verschiedene Tageszeiten berücksichtigt wurden.

Für das Gütekriterium “Summe der quadrierten Abweichungen“  $quad.e.\dot{\psi}$  (Gleichungen 6.1, 6.2, 6.3) sind in Tabelle 6.1 die Werte für die verschiedenen Empfänger für Stadt-, Land- und Autobahnfahrten dargestellt. In den letzten beiden Zeilen, jeweils mit “Realfahrt 1“ und “Realfahrt 2“ bezeichnet, handelt es sich um verschiedene Fahrten, die sich sowohl aus Stadt- als auch aus Land- und Autobahnanteilen zusammensetzen.

**Tabelle 6.1:** Mittelwert der quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Gierrate mit Offsetabgleich zu Beginn jeder Messungsauswertung.

$quad.e.\dot{\psi}_{mOffsetabgl.}$	Fzg, kor [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]			Fzg, Mess [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]	GNSS, Mess [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]		
Manöver	L1_1	L1_2	L1/L2	Fzg	L1_1	L1_2	L1/L2
Stadt	0,067	0,063	0,085	0,049	22,4	34,5	60,0
Land	0,059	0,051	0,059	0,044	21,8	22,1	44,4
Autobahn	0,043	0,026	0,030	0,025	6,7	6,8	23,3
Realfahrt 1	0,058	0,048	0,057	0,043	19,0	25,8	54,8
Realfahrt 2	0,072	0,058	0,079	0,046	23,8	29,1	56,9

Der Vergleich der Summe der quadrierten Abweichungen der Fusion (Spalten in Tabelle 6.1 mit Überschrift *Fzg, kor*) mit den unfusionierten, d. h. mit den gemessenen Gierratenwerten (Spalte in Tabelle 6.1 mit Überschrift *Fzg, Mess*) lässt eine Verschlechterung erkennen. Dies ist bei der Auswertung auf den zu Beginn jeder Messung durchgeführten Offsetabgleich zurückzuführen, der eine Mittelwertfreiheit bei den verwendeten Messungen hervorruft. Wird auf diesen Abgleich bei der Auswertung verzichtet, so ergeben sich die in Tabelle 6.2 dargestellten Werte.

**Tabelle 6.2:** Mittelwert der quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Gierrate ohne Offsetabgleich zu Beginn jeder Messungsauswertung.

$quad.e.\dot{\psi}_{oOffsetabgl.}$	Fzg, kor [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]			Fzg, Mess [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]	GNSS, Mess [[ $^{\circ}/s$ ] <sup>2</sup> ]		
Manöver	L1_1	L1_2	L1/L2	Fzg	L1_1	L1_2	L1/L2
Stadt	0,070	0,066	0,084	0,085	22,4	34,5	60,0
Land	0,060	0,052	0,062	0,077	21,8	22,1	44,4
Autobahn	0,045	0,028	0,032	0,056	6,7	6,8	23,3
Realfahrt 1	0,063	0,050	0,066	0,078	19,0	25,8	54,8
Realfahrt 2	0,074	0,061	0,075	0,076	23,8	29,1	56,9

Die Betrachtung der Summe der quadrierten Abweichungen der reinen GNSS-Kursratenwerte (mit *GNSS, Mess* in Tabelle 6.2 gekennzeichnet) zeigt einerseits einen deutlich größeren Wert bei allen Empfängern im Vergleich zu der quadrierten Abweichungen des Fahrzeugsensorsignals. Andererseits wird die Erwartung bestätigt, dass eine Reduzierung des quadratischen Fehlers beim Übergang von Stadt- über Land- bis zu Autobahnfahrten eintritt. Ursache hierfür sind die geringeren Abschattungen und geringeren Mehrwegeeffekte auf Landstraßen und Autobahnen.

Ferner geht aus Tabelle 6.2 stets eine geringere Summe der quadrierten Abweichungen für die Fusionswerte für alle untersuchten Manöver hervor.

Somit stellt der hier vorgestellte und realisierte Fusionsansatz ohne Durchführung eines Offsetabgleichs zu Beginn jeder Messungsauswertung ein verbessertes Gierratensignal zur Verfügung. Wie groß der Verbesserungsfaktor  $VF$  durch Berücksichtigung der GNSS-Kursrate des jeweiligen GNSS-Gerätes ist, zeigt Tabelle 6.3.

**Tabelle 6.3:** Verbesserungsfaktor  $VF$  für die quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Gierrate (ohne Offsetabgleich zu Beginn jeder Messungsauswertung).

$VF_{quad, e_{\psi_{Offsetabgl.}}}$	Fzg, kor		
Manöver	L1_1	L1_2	L1/L2
Stadt	1, 10	1, 14	1, 01
Land	1, 13	1, 22	1, 11
Autobahn	1, 12	1, 41	1, 32
Realfahrt 1	1, 11	1, 25	1, 09
Realfahrt 2	1, 01	1, 12	1, 01

Die Gegenüberstellung der Verbesserungsfaktoren der Geräte (Tabelle 6.3) zeigt, dass, bis auf das Manöver Autobahnfahrt, eine Rangfolge hinsichtlich der erreichbaren Reduzierung des Fehlers aus der Summe der quadrierten Abweichungen ableitbar ist. Unter Nutzung der Kurswerte des “low-end“-Gerätes *L1\_2* ist die Reduzierung des Fehlers am größten, gefolgt von dem des *L1\_1*-Gerätes. Den Abschluss bildet das “high-end“-Gerät *L1/L2*, mit dem die geringste Reduzierung erzielt wird, was auf die hohe Messsensitivität des Gerätes zurückzuführen ist. Möglicherweise könnte für den *L1/L2*-Empfänger durch optimierte Filter eine Performancesteigerung erzielt werden.

Für das Manöver Autobahnfahrt nimmt der *L1/L2*-GNSS-Empfänger den zweiten Platz ein. Ein möglicher Grund hierfür ist das Vorhandensein eines eher stationären Zustandes, gekennzeichnet von nicht so schnell aufeinanderfolgenden Richtungsänderungen. Dieser Zustand entspricht eher dem Anwendungsbereich des *L1/L2*-Gerätes.

Aufgrund des Einflusses des Offsetabgleichs auf das Ergebnis des hier vorgestellten Gierratenfusionsansatzes ist eine Parameterstudie erforderlich. Ziel dieser Studie ist es, einen Grenzwert für den Offset zu ermitteln, ab dem der in dieser Arbeit vorgestellte Fusionsansatz profitabel arbeitet. Das Ergebnis dieser Studie ist in Tabelle 6.4 dargestellt. Aufgelistet sind hier die Mittelwerte der quadrierten Abweichungen infolge Addition eines zeitkonstanten Gierratenoffsets auf das zuvor offsetbereinigte Fahrzeuggierratensignal.



Die **fett**-markierten Werte in Tabelle 6.4 kennzeichnen diejenigen Differenzwerte zwischen Fahrzeuggierratenmesssignal und Referenz, die stets gleich oder größer sind als diejenigen infolge der Fusion. Aus Tabelle 6.4 lässt sich mit Ausnahme der reinen Stadtfahrten ein Driftratenoffset von  $0,15^\circ/\text{s}$  ableiten, ab dem stets eine Verbesserung infolge der Fusion auftritt. Bei einem Offsetwert von  $0,175^\circ/\text{s}$  liefert der umgesetzte Gierratenfusionsansatz auch für den aus Sicht der GNSS-Daten kritischsten Stadtbereich stets geringere Abweichungen als ohne Fusion.

**Tabelle 6.4:** Mittelwert der quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Gierrate mit Addition verschiedener Gierratenoffsets ( $0,1^\circ/\text{s}$ ,  $0,15^\circ/\text{s}$ ,  $0,16^\circ/\text{s}$ ,  $0,175^\circ/\text{s}$ ).

$quad_e-\psi_{\text{Offsetadd.}}$	Fzg, kor [[ $^\circ/\text{s}$ ] <sup>2</sup> ]			Fzg, Mess [[ $^\circ/\text{s}$ ] <sup>2</sup> ]			
	L1_1	L1_2	L1/L2	$0,1^\circ/\text{s}$	$0,15^\circ/\text{s}$	$0,16^\circ/\text{s}$	$0,175^\circ/\text{s}$
Manöver							
Stadt	0,067	0,063	0,085	0,060	0,074	0,074	<b>0,085</b>
Land	0,059	0,051	0,059	0,058	<b>0,072</b>	<b>0,072</b>	<b>0,081</b>
Autobahn	0,043	0,026	0,030	0,040	<b>0,054</b>	<b>0,054</b>	<b>0,063</b>
Realfahrt 1	0,058	0,048	0,057	0,056	<b>0,069</b>	<b>0,069</b>	<b>0,078</b>

Somit ist zusammenfassend festzustellen, dass der hier vorgestellte und umgesetzte Gierratenfusionsansatz ab einem Driftratenoffsetgrenzwert von  $0,175^\circ/\text{s}$  für die untersuchten Manöver stets ein im Vergleich zu dem reinen Mess-Gierratensignal besseres (bezogen auf die Referenz), d. h. fehlerreduziertes Gierratensignal zur Verfügung stellt, das von entsprechenden Fahrerassistenzsystemen genutzt werden kann. Ferner hat sich gezeigt, dass der vorgestellte Fusionsansatz auch den Stillstandsabgleich übernimmt. Somit ist festzuhalten, dass durch Stützung der Gierrate mit Hilfe des GNSS-Kurswinkels ein fehlerreduziertes Gierratensignal verfügbar ist, was für eine Performanceverbesserung von FAS genutzt werden kann.

## 6.3 Ergebnisse der Geschwindigkeitsfusion

Bei der Betrachtung des Gütekriteriums für die Geschwindigkeitsfusion werden die gleichen Messungen zugrunde gelegt wie bei der Gierratenbetrachtung. In Tabelle 6.5 sind die Mittelwerte der jeweiligen Fehler gemäß Gleichung 6.4 bis Gleichung 6.6 für die verschiedenen Szenarien dargestellt. Es wird erwartet, dass die Mittelwerte der Fusionsfehler in der Größenordnung derer aus den gemessenen GNSS-Werten liegen.

Es ist aus Tabelle 6.5 einerseits zu erkennen, dass der in dieser Arbeit realisierte Fusionsansatz stets bessere Werte liefert als ohne Fusion und dass diese in der Größenordnung der GNSS-Geschwindigkeiten liegen. Andererseits sind die Differenzen immer negativ. Dies bedeutet, dass der fusionierte bzw. der unfusionierte Wert stets geringer ist als der Referenzwert. Weiter geht aus dieser Tabelle hervor, dass die Differenz aus den GNSS-Messdaten des L1/L2-Empfängers nur bei Autobahnfahrt, d. h. bei gleichförmiger,

**Tabelle 6.5:** Mittelwert der Geschwindigkeitsfehler für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Geschwindigkeit.

$e_v$	Fzg, kor [m/s]			Fzg, Mess [m/s]	GNSS, Mess [m/s]		
	L1_1	L1_2	L1/L2	Fzg	L1_1	L1_2	L1/L2
Manöver							
Stadt	-0,002	-0,058	-0,08	-0,120	0,003	0,145	0,136
Land	-0,066	-0,095	-0,140	-0,168	-0,066	-0,082	-0,274
Autobahn	-0,159	-0,216	-0,317	-0,437	-0,157	-0,218	-0,319
Realfahrt 1	-0,068	-0,087	-0,078	-0,089	-0,070	-0,086	-0,119
Realfahrt 2	-0,046	-0,042	-0,220	-0,255	-0,041	-0,042	-0,274

konstanter Bewegung über einen längeren Zeitraum stets geringer ist als bei den beiden anderen Empfängern. Auffällig ist beim Vergleich der Manöver untereinander auch, dass bei Stadtfahrten stets ein positiver Wert für die GNSS-Abweichungen resultiert. Dies ist auf die üblicherweise in der Stadt herrschenden schlechteren GNSS-Bedingungen zurückzuführen. Im Gegensatz hierzu ist die Differenz bei dem Fahrzeugmesssignal bei reinen Autobahnfahrten am größten, was zu erwarten ist, da bei diesem Manöver die größten Strecken (pro Zeiteinheit) zurückgelegt werden. Folglich steigt auch der sich ergebende Streckenfehler.

Darüber hinaus zeigt sich anhand des Verbesserungsfaktors  $VF$  in Tabelle 6.6, dass unter Nutzung der GNSS-Daten der “low-end“-Geräte eine größere Fehlerreduzierung erzielt wird als bei dem “high-end“-Gerät.

**Tabelle 6.6:** Verbesserungsfaktor  $VF$  für den Mittelwert der Geschwindigkeitsfehler für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Geschwindigkeit.

$VF_{e_v}$	Fzg, kor		
	L1_1	L1_2	L1/L2
Manöver			
Stadt	60,000	2,069	1,500
Land	2,545	1,768	1,200
Autobahn	2,748	2,023	1,379
Realfahrt 1	1,309	1,023	1,141
Realfahrt 2	5,543	6,071	1,159

Wird nun neben den Mittelwerten der Abweichungen auch die Summen der quadrierten Abweichungen ( $quad_{e_v}$ ) betrachtet, wird erwartet, dass die der fusionierten in der Größenordnung der unfusionierten Fahrzeuggeschwindigkeit liegen. Die für die verschiedenen Manöver erhaltenen Summen der quadrierten Abweichungen sind in Tabelle 6.7 dargestellt.

Dass die Summen der quadrierten Abweichungen der reinen GNSS-Daten um den Faktor 10 größer sind als die des Fahrdynamikensors bzw. des fusionierten Signals

**Tabelle 6.7:** Mittelwert der quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe einer GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Geschwindigkeit.

<i>quad_e_v</i>	Fzg, kor [(m/s) <sup>2</sup> ]			Fzg, Mess [(m/s) <sup>2</sup> ]	GNSS, Mess [(m/s) <sup>2</sup> ]		
	Manöver	L1_1	L1_2	L1/L2	Fzg	L1_1	L1_2
Stadt	0,028	0,035	0,039	0,040	0,973	1,459	6,293
Land	0,017	0,043	0,046	0,057	0,502	1,832	6,877
Autobahn	0,059	0,158	0,205	0,335	0,590	1,347	6,708
Realfahrt 1	0,019	0,030	0,018	0,032	0,539	1,155	6,096
Realfahrt 2	0,029	0,106	0,082	0,098	1,072	2,128	6,979

und dass die beiden letztgenannten (Fahr-dynamiksensor, fusioniertes Signal) in der gleichen Größenordnung liegen geht aus Tabelle 6.7 hervor. Auch hier zeigt sich, bis auf den L1\_2-Empfänger für das Manöver Realfahrt 2, dass die Summe der quadrierten Abweichungen des fusionierten Geschwindigkeitssignals  $quad\_e\_v_{Fzg, kor}$  für alle Manöver stets geringer ist als die der unfusionierten ( $quad\_e\_v_{Fzg, Mess}$ ).

Wie bereits bei der Gierrate, so zeigt auch der in Tabelle 6.8 aufgelistete Verbesserungsfaktor  $VF$  für die Summe der quadrierten Abweichungen, dass durch den gewählten Ansatz der Verbesserungsfaktor von der Stadt- über die Überlandfahrten bis hin zu den reinen Autobahnfahrten ansteigt. Auch bei diesem Bewertungskriterium ist eine Rangfolge der GNSS-Geräte bzgl. Verbesserungsfaktor für die "reinen" Manöver (d.h. keine Mischung) erkennbar. Im Gegensatz zur Gierrate belegt nun das "low-cost"-Gerät L1\_1 den ersten Rang, gefolgt von dem zweiten "low-cost"-Empfänger. Den letzten Rang nimmt erneut das "high-end"-Gerät L1/L2 ein. D.h. bereits mit "low-cost"-Daten ist in dieser Untersuchung eine Reduzierung der Fehleranteile der entsprechenden Betrachtungsgröße infolge der Fusion erzielbar, wodurch sich ein Potenzial zur Performanceverbesserung von FAS ergibt, das im Folgenden diskutiert wird.

**Tabelle 6.8:** Verbesserungsfaktor  $VF$  für die quadrierten Abweichungen für Fahrten (mehrere Messungen) im öffentlichen Straßenverkehr mit Hilfe GNSS-Stützung der verschiedenen Empfänger für die Betrachtungsgröße Geschwindigkeit.

$VF\_quad\_e\_v$	Fzg, kor		
	Manöver	L1_1	L1_2
Stadt	1,195	1,069	1,013
Land	1,831	1,151	1,113
Autobahn	2,383	1,456	1,278
Realfahrt 1	1,298	1,033	1,333
Realfahrt 2	1,838	0,962	1,093

---

# 7 Diskussion und Ausblick

## 7.1 Gültigkeit, Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Nach BORTZ (2005) sind zur Beurteilung der Reichweite der Ergebnisse die Versuchsbedingungen unter den wissenschaftlichen Kriterien Objektivität, Reproduzierbarkeit und Validität vor dem Hintergrund des Versuchsziels zu kontrollieren.<sup>1</sup>

Die Objektivität, d. h. die Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Versuchsfahrer, die Auswahl der Versuche sowie deren Durchführung (beispielsweise konstante Geschwindigkeit) sind zu diskutieren.

Die Auswahl der für die Untersuchung erforderlichen Manöver orientierte sich an dem in der Fahrzeugtechnik üblichen Fahrmanöverkatalog für Längs- und Querdynamikversuche, wobei auch die kritischen Situationen bzgl. der GNSS-Daten Berücksichtigung fanden. Bei der Auswahl von Strecken im öffentlichen Straßenverkehr wurde darauf geachtet, dass zum einen kritische Bereiche bzgl. des GNSS-Signalempfangs vorlagen und dass es sich zum anderen um vom Normalfahrer üblicherweise befahrene Strecken handelte. Dieses Vorgehen war erforderlich, da bisher noch kein allgemein gültiger Versuchskatalog zum Testen der GNSS-Daten für Automotiveanwendungen existiert. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass für weitere Untersuchungen zusätzliche Manöver bzw. Strecken erforderlich sind.

Die bei der Versuchsdurchführung erforderlichen konstanten Geschwindigkeiten wurden mittels Tempomat (Ausnahme: Geschwindigkeiten  $< 30$  km/h) eingestellt. Die Manöver wurden von verschiedenen Fahrern durchgeführt, so dass eine Abhängigkeit der Ergebnisse von einem einzelnen Fahrer ausgeschlossen werden kann. Systematische Einflüsse seitens der Messtechnik wurden durch den Versuchsleiter durch Kalibration der Sensoren vor den Versuchen ausgeschlossen. Somit kann festgehalten werden, dass die Objektivität der Versuche gegeben ist.

Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit, wurde das Versuchsfahrzeug vor jedem Versuchstag konditioniert (Reifenfülldruck, Betankung) sowie die Versuchseinrichtung (Messtechnik) überprüft.

Die Wiederholungen der Messungen, die zu unterschiedlichen Tageszeiten, bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden, zeigen Varianzen. Eine diesbezüglich durchgeführte Untersuchung ergab, dass sich diese genannten Einflüsse innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsangaben bewegen und somit keiner Extrabehandlung bedürfen.

---

<sup>1</sup>Bortz (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler S. 30.

Nicht nur zur Gewährleistung der Objektivität bei der Auswertung der Ergebnisse, sondern auch für deren Validität wurden Kennwerte, die in der Literatur als valide anerkannt sind (nach DIN 70000, STANAG 4278 und DIN 1319) angewendet. Die dort zitierten und in dieser Arbeit angewendeten Kenngrößen beschreiben anerkanntermaßen die für die Fehleranalyse erforderlichen Eigenschaften.

Die Einhaltung der oben angeführten wissenschaftlichen Kriterien beschränkt sich jedoch auf die in der Arbeit gewählten Versuchsparameter, weshalb die Gültigkeit der Ergebnisse nur unter den genannten Bedingungen gegeben ist. Die Übertragbarkeit auf weitere GNSS-Empfänger und Fahrmanöver sowie auf Performanceverbesserung ist zu diskutieren.

Die Übertragbarkeit der gefundenen Ergebnisse ist nicht uneingeschränkt möglich, auch wenn es sich bei den in der vorliegenden Arbeit gewählten GNSS-Empfängern um vergleichsweise verbreitete Modelle von unterschiedlicher Güte (Genauigkeit, Preis, Empfängertechnologie) handelt, die in mehr als 700 Versuchen untersucht wurden. So ist eine Einschränkung bei den Empfängern gegeben, die sich deutlich von den als Stichprobe gewählten Modellen unterscheiden, wie beispielsweise militärische GNSS-Empfänger oder mit Inertialsensorik gekoppelte GNSS-Empfänger.

Ferner ist denkbar, dass zukünftige GNSS-Empfänger eine Schnittstelle für den täglichen Empfang aktueller Ionosphärenmodelle besitzen und / oder alle Geräte als Zweifrequenzempfänger ausgeführt sind, die beide Frequenzen zur Positionsermittlung verwenden. Unter diesen Aspekten ist eine Verbesserung der Datenqualität der von den GNSS-Empfängern ausgegebenen Daten möglich. Somit können die Ergebnisse bei Berücksichtigung von GNSS-typischen Fehlern<sup>2</sup> (bereits im Empfangsgerät) von den hier vorgestellten abweichen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bzgl. der Übertragbarkeit der Daten sind neben den ausgewählten Versuchen und Empfängertypen auch die an den Versuchsorten herrschenden Rahmenbedingungen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurden die Versuche sowohl auf dem Versuchsgelände in Darmstadt/Griesheim als auch auf öffentlichen Straßen durchgeführt. Die dort herrschenden Bedingungen (Straßenbeschaffenheit, Abschattungen, Witterung) entsprechen der Realität, so dass eine Einschränkung der Übertragbarkeit der Fahrzeug- und GNSS-Empfängerreaktionen auf reale Straßen- und Umgebungsbedingungen nicht zu erwarten ist. Hierbei ist bei der Auswahl von einer durchschnittlichen Benutzung der verschiedenen Straßentypen von Autofahrern ausgegangen. Werden jedoch die Versuche in stark von Gebirgszügen umgebenen Gebieten oder in Ländern mit einem hohen Anteil an langen Tunneln (z. B. Schweiz, Österreich) durchgeführt, so sind aufgrund des schlechteren GNSS-Signalempfangs infolge von Abschattungen und Multipatheffekten abweichende Ergebnisse zu erwarten.

## 7.2 Empfehlungen und Ausblick

Auf Basis der Untersuchungen dieser Arbeit lassen sich Empfehlungen zu der Stützung von Fahrdynamiksensoren durch GNSS-Daten ableiten. Zum einen hat sich aufgrund der Verfügbarkeitsuntersuchung gezeigt, dass bei einer Fusionierung der Fahrdynamiksensordaten mit den GNSS-Daten für eine signalunabhängige Überprüfung der GNSS-Daten nicht nur der *HDOP*-Faktor, sondern auch die Anzahl der Satelliten zu verwenden sind,

---

<sup>2</sup>Siehe Tabelle 2.2 in Kapitel 2.1.3

da auf Basis der realen Versuchsdaten nicht immer der *HDOP* das bessere Kriterium zur Signalüberprüfung darstellt, wie es zu erwarten ist. Zum anderen zeigt sich, dass v. a. auf Autobahnen und Überlandfahrten die Verfügbarkeit der GNSS-Daten für eine Stützung der GNSS-Daten ausreichend ist. Die Verfügbarkeit im Stadtbereich sinkt jedoch zum Teil unter 10 % (bezogen auf die gefahrene Strecke) und erschwert somit die Stützung.

Der in dieser Arbeit unter Berücksichtigung von kritischen Fahrmanövern und kritischen GNSS-Empfangsbedingungen abgeleitete Versuchskatalog zur Fusion von GNSS- und Fahrdynamiksensordaten deckt einen großen Bereich ab, d. h. die worst-case-Bereiche werden ebensogut repräsentiert wie die "Normalfahrbereiche". Daher wird vorgeschlagen für weitere Untersuchungen diesen Szenarienkatalog als Basis zu verwenden.

Auf Grundlage dieser Versuche wurde im Rahmen der Fehleranalyse der GNSS-Daten die sog. *Schlupfmethode* für die Verzugszeitbestimmung der GNSS-Positionsdaten erarbeitet, die sich als vorteilhafter gegenüber der sog. *Minimummethode* erwiesen hat, da sie die vorhandene Verzugszeitsensitivität besser abbildet. Somit wird für weitere Untersuchungen die Verwendung dieser neuen Methode zur Verzugszeitermittlung von GNSS-Positionsdaten empfohlen.

Anhand der durchgeführten Fehleranalyse war es möglich, jeweils einen für alle GNSS-Empfänger einheitlichen Fusionsansatz für die beiden untersuchten Betrachtungsgrößen für einen Automotiveinsatz abzuleiten. Dieser kann für weitere Betrachtungen herangezogen und erweitert werden, wobei für das "high-end"-Empfangsgerät sich möglicherweise ein optimiertes Filter besser eignet.

Die durch diesen Ansatz und auf Grundlage von realen Daten erreichte positive Stützung der Betrachtungsgrößen Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit durch GNSS-Kurswinkel bzw. durch GNSS-Positionsdaten (Längen- und Breitengrad) ermöglicht eine Verbesserung der Schätzung der Gierrate bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit. Somit ist die Verwendung von entsprechenden GNSS-Daten für die Datenqualitätsverbesserung der Gierrate bzw. für die Schätzung des dynamischen Reifenhalbmessers und somit indirekt für die Fahrzeuggeschwindigkeit vorzuschlagen. D. h. es ist eine Empfehlung zur Nutzung des GNSS-Kurswinkels bzw. der GNSS-Position für eine Stützung der Fahrdynamiksensoren für den Automotiveinsatz auszusprechen.

Ferner zeigen die Untersuchungen, dass sich bereits mit "low-end"-Empfängern signifikante Verbesserungen erzielen lassen. Somit erscheint für eine Stützung im Automotivebereich die auch aus Kostenaspekten attraktive Verwendung von "low-end"-Geräten vielversprechend.

Wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt, bilden die Betrachtungsgrößen Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit die Grundlage für weitere Größen. Somit können auf Basis dieser Arbeit in einem weiteren Schritt die beiden Fusionsansätze hinsichtlich Bestimmung der Fahrzeugposition zusammengeführt und erweitert werden. Wird davon ausgegangen, dass zur Positionsbestimmung bereits die korrigierten Signale ( $\dot{\psi}_{\text{Fzg, kor}}$ ,  $v_{\text{Fzg, kor}}$ ) Verwendung finden, resultiert fahrzeugseitig eine korrigierte Position, die dennoch mit fortschreitender Zeit aufgrund der erforderlichen Integration infolge Koppelortung (siehe

Kapitel 2.2.2.2.5) in ihrem Fehler größer wird. Somit ist auch eine Stützung der Position als durchaus sinnvoll zu erachten. Ein beispielhafter Ansatz findet sich im Anhang A.6.

Als weiteren Ansatzpunkt ist der Übergang auf die Rohdatenebene vorstellbar, da durch die geräteinterne Filterung der GNSS-Daten bereits zahlreiche Informationen verloren / verfälscht bzw. erst gar nicht ausgegeben werden. Somit würden die Pseudodistanzen die Ausgangsbasis für eine Fehlermodellentwicklung hinsichtlich einer Stützung von Fahrdynamikensordaten für Automotiveanwendungen darstellen.

Vor allem unter dem Aspekt der kommenden Genauigkeitssteigerung und Integrität von GNSS durch das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO besteht somit die Möglichkeit einer geringeren Ausfallrate der GNSS-Daten, was einen noch effizienteren Einsatz von GNSS-Daten für Fahrerassistenzsysteme ermöglicht.

Ob und wie groß der Fusionsnutzen mit Daten von weiterentwickelnden Sensoren (sowohl GNSS- als auch fahrzeugseitig) ist, ist ebenfalls für zukünftige Untersuchungen von Interesse.

---

## 8 Zusammenfassung

Durch die Kostenreduktion und die technische Entwicklung von Globalen Satellitennavigationssystem(GNSS)-Empfängern hinsichtlich Effizienz, Größe und Gewicht ist die Zahl verkaufter Empfänger in den letzten Jahren deutlich gestiegen und GNSS-Empfänger sind aus vielen Anwendungsbereichen, auch in der Automobilindustrie, nicht mehr wegzudenken. Eine ähnlich starke technologische Progression und Wachstumsgeschwindigkeit von Systemen ist auch im Bereich der Fahrerassistenzsysteme (FAS) zu beobachten. Insgesamt führen diese Entwicklungen dazu, dass immer mehr solcher Systeme im Fahrzeug zur Verfügung stehen.

Die komplementären Eigenschaften der GNSS-Daten bezüglich Verfügbarkeit und Langzeitstabilität im Vergleich zu einigen Fahrdynamiksensordaten führen auf die Motivation, diese Charakteristiken zu nutzen und GNSS nicht nur zur Routenführung im Automobilbereich einzusetzen. Dieser Gesichtspunkt wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen, indem untersucht wird, ob durch Stützung von Fahrdynamiksensordaten durch GNSS-Informationen eine Verbesserung der Datenqualität und hierdurch eine Performanceverbesserung von Fahrerassistenzsystemen erreichbar ist, auch ohne Verwendung Digitaler Karten.

In einem ersten Schritt werden die zahlreichen FAS unter dem Gesichtspunkt der Stützung durch GNSS-Daten gruppiert, wobei sich zwei Gruppen ergeben, Sensorabgleich, d. h. Offsetfehlerreduzierung sowie exakte Positionierung, d.h. hier geht es um die Ermittlung der genauen Position, die im Fahrzeug meist über Integration der Fahrzeuggeschwindigkeit erfolgt. Bei Betrachtung der Einflussgrößen auf die verschiedenen FAS in der jeweiligen Gruppe, haben sich das Gierraten- und das Fahrzeuggeschwindigkeitssignal als wichtige Größen herauskristallisiert. Diese beiden Signale stellen die Basisgrößen für weitere Betrachtungsgrößen und somit für zahlreiche Fahrerassistenzsysteme dar. Daher ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, auf Basis von realen Messungen eine Fehleranalyse der GNSS- und Fahrdynamikmessdaten durchzuführen und auf den Erkenntnissen einen Fusionsansatz unter Verwendung von GNSS- und Fahrdynamiksensordaten abzuleiten, mit dem eine Verbesserung der Datenqualität ermöglicht wird.

Zum Erreichen dieser Zielsetzung werden in der vorliegenden Arbeit die beiden Betrachtungsgrößen Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit herausgegriffen, da sie die Basisgrößen für weitere Betrachtungsgrößen darstellen. Für die Untersuchung werden drei GNSS-Empfänger betrachtet, die sich hinsichtlich Empfängertechnologie und Algorithmen unterscheiden.

Da in der Literatur keine veröffentlichten Kenntnisse bzgl. Fehlerverhalten und Qualität der GNSS-Daten im dynamischen Fahrgrenzbereich für diesen und für GNSS-kritische Bereiche zu finden sind, diese jedoch für eine Datenfusion essentiell sind, wird zunächst eine Versuchsmethodik definiert, die die dynamisch kritischen GNSS-Bereiche und die



---

dynamischen Fahrgrenzbereiche geeignet abbildet. Aus diesen Versuchen folgen GNSS-spezifische worst-case-Szenarien. Über eine Analyse von Stillstandsversuchen werden Umfeldeinflüsse wie Witterungs- und Tageszeiteinflüsse analysiert. Es hat sich zum einen gezeigt, dass bzgl. des Witterungseinflusses zwar eine leichte Tendenz hin zur Verschlechterung der Positionsgenauigkeit mit zunehmend schlechtem Wetter (sonnig, bewölkt, regnerisch) zu beobachten ist, jedoch liegen die Positionsstreuungen alle innerhalb der in den jeweiligen Empfängerspezifikationen angegebenen Genauigkeit. Zum anderen konnte auch ein Tageszeiteinfluss auf die Positionsgenauigkeit nicht bestätigt werden. Somit sind keine deutlichen Unterschiede auf die Datenqualität der Quellsignale infolge Witterungs- und Tageszeiteinfluss zu erkennen.

Ein weiterer untersuchter Aspekt ist das Vorhandensein von Verzugszeiten der GNSS-Daten bzgl. den verwendeten Fahrdynamiksensordaten. Für die Bestimmung der Verzugszeiten wurde eine neue Methode, die sog. *Schlupfmethode* entwickelt, die bisher nicht existierte. Diese besitzt gegenüber der sog. *Minimummethode* die Eigenschaft der höheren Sensitivität, sodass die Verzugszeiten für die Position besser abbildbar sind. Mit Hilfe dieser Methoden werden für die jeweilige Betrachtungsgröße die Verzugszeiten aus dynamischen Versuchen bestimmt.

Unter Berücksichtigung dieser Verzögerung und der Integration geeigneter Plausibilitätsabfragen für die GNSS-Datenverfügbarkeit wird eine für alle verwendeten GNSS-Empfänger einheitliche Fusionsstrategie abgeleitet, die für jede Betrachtungsgröße zwei Filter (Tiefpassfilter) enthält. Während das erste Filter die Berücksichtigung der Verzugszeiten des entsprechenden GNSS-Signals zur Aufgabe hat, stellt das zweite Filter das eigentliche Fusionsfilter dar. In diesem Filter werden bei der Betrachtungsgröße Gierrate die Korrekturwerte bzw. bei der Betrachtungsgröße Geschwindigkeit der Korrekturfaktor generiert, in dem die entsprechenden in das Filter hineingehenden Signale tiefpassgefiltert und ggf. mit weiteren Parametern kombiniert werden. Die für die Filter erforderlichen Filterparameter werden auf Basis von realen Versuchsdaten experimentell für die verschiedenen GNSS-Empfänger ermittelt. Das aus dem Fusionsfilter generierte Korrektursignal wird schließlich dem entsprechenden Fahrdynamikmesssignal überlagert.

Anhand ausgewählter Bewertungskriterien zeigt sich zum einen eine Verbesserung der beiden Betrachtungsgrößen durch GNSS-Daten-Stützung. Zum anderen ist eine Rangfolge unter den GNSS-Geräten bzgl. Fehlerreduzierung (erzieltem Verbesserungsfaktor) feststellbar, die vom “low-end“-Empfänger angeführt wird.

Auf Basis der Fehleranalyse und unter Einsatz des abgeleiteten einheitlichen Fusionsansatzes mit den ermittelten Filterparametern ist das Grundgerüst für die Synthese von Fusionsalgorithmen zur Performanceverbesserung von FAS gelegt. In dieser Arbeit erfolgte erstmals die Ableitung eines geeigneten Versuchskatalogs zur Untersuchung der GNSS-Daten für Automotiveanwendungen. Damit ist auf Basis von realen Versuchsdaten, auch für Grenzbereiche, der Nachweis erbracht, dass durch die Einbeziehung von GNSS-Daten eine positive Stützung der Betrachtungsgrößen Fahrzeuggeschwindigkeit und Gierrate für einen großen Szenarienbereich im Automotivebereich möglich ist. Darüberhinaus findet sich in der Literatur keine vergleichbare Studie für eine Fehleranalyse und Datenfusionierung mit realen GNSS-Daten im Hinblick auf deren Einsatz für Fahrerassistenzsysteme

im Automotivbereich, womit der Stand der Technik in dieser Hinsicht durch diese Arbeit erweitert wird. Somit stellt die vorliegende Arbeit aus den genannten Gründen einen Erkenntnisgewinn dar.

Die durch die Fusion erzielte Genauigkeitserhöhung könnte Systeme wie ESP, ACC oder den Kreuzungsassistenten positiv beeinflussen. Grund hierfür ist, dass die für die Systeme entscheidenden Regelgrößen durch die Fusion mit GNSS-Daten eine Reduzierung ihrer Fehleranteile erfahren. Hierdurch sind eine Steigerung der Zuverlässigkeit und eine verbesserte Feinabstimmung der Systeme möglich.

Zusätzlich ist eine Zunahme der bisher erzielbaren Genauigkeit und Verfügbarkeit mit dem Betrieb des europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO vorstellbar, wodurch das Potenzial von GNSS für über die Navigation hinausgehende Anwendungen im Fahrzeug weiter steigen wird. In diesem Zusammenhang ergibt sich zur Quantifizierung des zusätzlichen Potenzials neuer Forschungsbedarf.

# A Anhang

## A.1 Darstellung der Patentrecherche

In Kapitel 2.3 wird der Stand der Technik auf Basis einer Patentrecherche dokumentiert. Die für die Patentrecherche verwendeten Suchbegriffe waren u. a. GNSS, GPS, Fahr(er)assistenzsystem(e), Inertialsensorik, Spurführung, (Sensor)fusion in deutscher und englischer Sprache.

Die Ergebnisse der Recherche sind in Abbildung A.1 nach Ergebnissen gruppiert und nach ihrer zeitlichen Entwicklung geordnet.

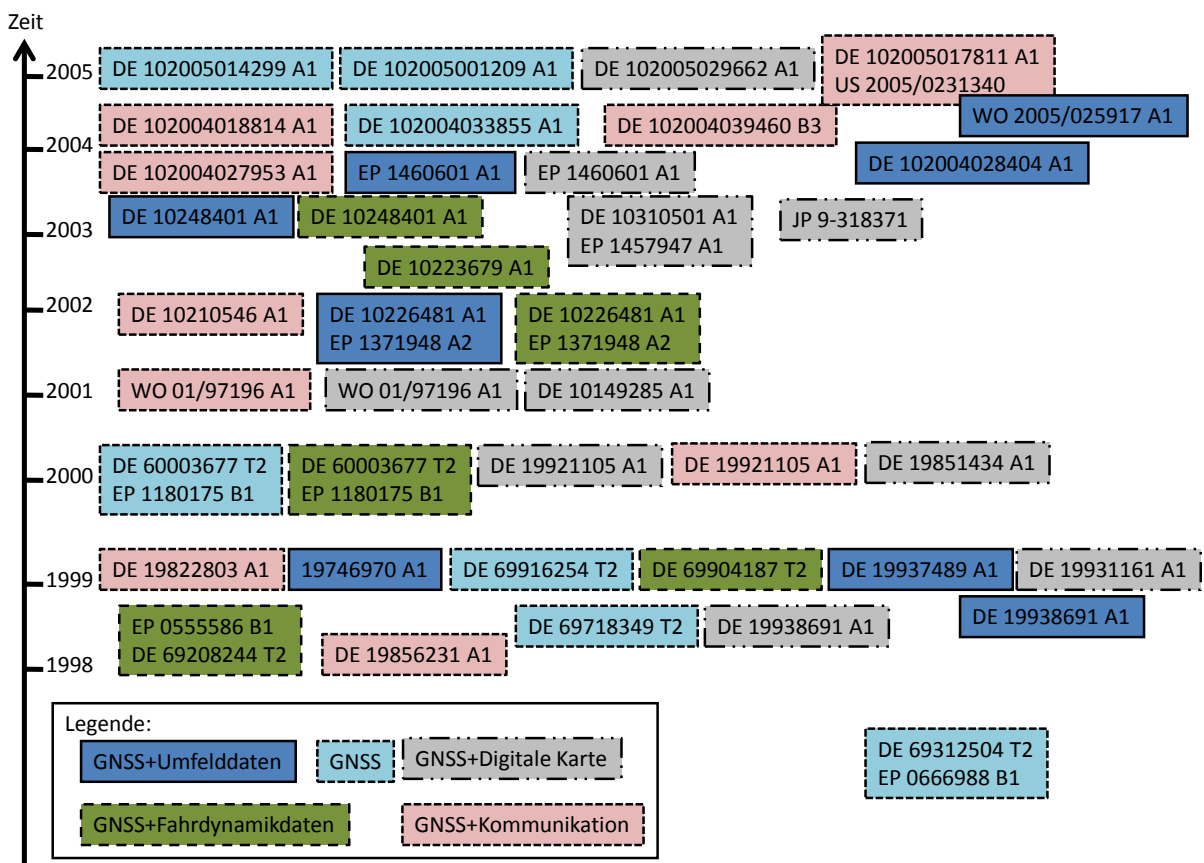


Abbildung A.1: Patente im Bereich Sensorfusion mit GPS.

Aus Abbildung A.1 wird ersichtlich, dass in den letzten Jahren der Fokus auf der Kombination von GNSS und Kommunikation lag und somit auch in diesem Bereich die meisten

Forschungstätigkeiten angesiedelt sind. Dies wird durch die Realisierung eines Testfeldes namens SIM-TD<sup>1</sup>, das als Vorbereitung einer Kommunikationsplattform für das Automobil dient, untermauert.

## A.2 Koordinatensysteme und Koordinatentransformation

### A.2.1 Grundlagen

Für die Nutzung der GNSS-Daten für die Fusion von Fahrdynamiksensordaten müssen die Daten in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegen. Da dies für die GNSS- und Fahrdynamiksensordaten nicht gegeben ist, müssen diese über eine Koordinatentransformation ineinander überführt werden.

Die bei den verschiedenen Daten auftretenden Koordinatensysteme (KS) sind in Abbildung A.2 dargestellt. Bei allen Systemen stehen die Koordinatenachsen orthogonal zueinander und schneiden sich im Ursprung des Koordinatensystems.

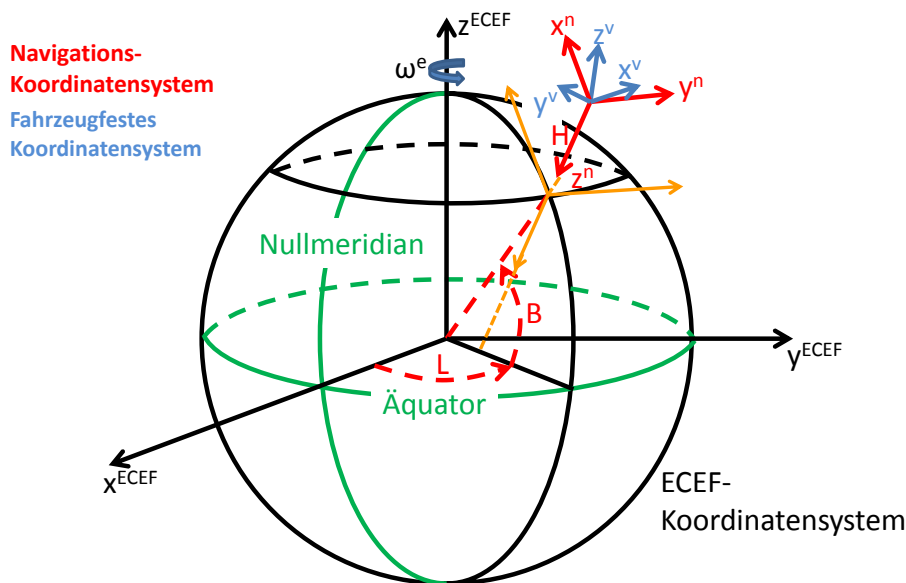


Abbildung A.2: Relevante Koordinatensysteme.

Das fahrzeugfeste (körperfeste) Koordinatensystem (body, Index  $v$ ) ist das Referenzsystem für die Messungen der Inertialsensoren des Fahrzeugs. Seine Achsen sind fest in Bezug zum Fahrzeug und sind gemäß DIN 70000<sup>2</sup> wie folgt definiert: Die  $x^v$ -Achse fällt mit der Längsachse des Fahrzeuges zusammen. In Fahrtrichtung betrachtet weist die  $y^v$ -Achse nach links und die  $z^v$ -Achse weist nach oben. Als Ursprung des Koordinatensystems wird der Schwerpunkt des Fahrzeuges gewählt.

<sup>1</sup>SIM-TD steht für Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland.

<sup>2</sup>DIN 70000: Straßenfahrzeuge, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe.

Das Navigationskoordinatensystem (Index  $n$ ) wird benötigt, um die Position der Navigationsplattform relativ zur Erde zu definieren. Der Ursprung des Navigationskoordinatensystems fällt mit dem Ursprung des fahrzeugfesten Koordinatensystems zusammen. Hier zeigt die  $x^n$ - und  $y^n$ -Achse in Nord- bzw. Ostrichtung und die  $z^n$ -Achse weist entlang des lokalen Gravitationsvektors nach unten. Durch die Parallelität der  $z^n$ -Achse und der Ellipsoidnormale ist die von der  $x^n$ - und  $y^n$ -Achse aufgespannte Ebene immer tangential zu dem Erdellipsoid ausgerichtet.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Koordinatensystemen besitzt das erdfeste Koordinatensystem (Index  $e$ ), auch ECEF<sup>3</sup>-Koordinatensystem genannt, seinen Ursprung im Massezentrum der Erde. Dieses Koordinatensystem wird meist zur Beschreibung der Position und der Lage des Fahrzeugs eingesetzt. Die Koordinatenachsen sind fest in Bezug zur Erde, wobei das System die Erdrotation um die  $z^e$ -Achse erfährt.<sup>4</sup>

Während die Inertialsensordaten des Fahrzeugs sich meist auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem (Body-KS) beziehen, befindet sich das Bezugssystem der Fahrdynamik (v.a. Position) auf der Erdoberfläche. Im Gegensatz hierzu haben die GPS-Daten das sog. WGS84<sup>5</sup>-Koordinatensystem als Grundlage, das ein geozentrisches, kartesisches Koordinatensystem ist. Für die Umrechnung wird ein Referenzellipsoid<sup>6</sup>, hier das WGS84-Ellipsoid, herangezogen. Die Umrechnung von Breiten- und Längengrad sowie Höhe in ECEF-Koordinaten erfolgt gemäß Gleichung A.1 bis Gleichung A.3.<sup>7</sup>

$$x^e = (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L \quad (\text{A.1})$$

$$y^e = (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L \quad (\text{A.2})$$

$$z^e = (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin B \quad (\text{A.3})$$

wobei  $N$  der Querkrümmungsradius ist und aus dem WGS84 zugrunde liegenden Parametern nach

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}} \quad (\text{A.4})$$

bestimmt wird. Dabei kennzeichnet  $e$  die erste Exzentrizität gemäß

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (\text{A.5})$$

und  $a$  sowie  $b$  kennzeichnen die Halbachsen des WGS84-Ellipsoids mit folgenden Zahlenwerten:

$$a = 6,378137 \cdot 10^6 \text{ m} \quad b = 6,3567523142 \cdot 10^6 \text{ m} \quad (\text{A.6})$$

Unter den Annahmen, dass die Fahrzeugbewegung nur im zweidimensionalen betrachtet wird und der Voraussetzung, dass zwischen zwei Positionspunkten (Punkt 0 und Punkt 1)

---

<sup>3</sup>ECEF steht für Earth Centered Earth Fixed.

<sup>4</sup>Wendel (2007): Integrierte Navigationssysteme S. 28ff..

<sup>5</sup>WGS: World Geodetic System.

<sup>6</sup>Mit Hilfe eines Referenzellipsoids, das ein abgeflachtes Rotationsellipsoid darstellt, wird versucht, sich der idealen Erdfigur anzunähern.

<sup>7</sup>Bauer/Wanninger (2003): Vermessung und Ortung mit Satelliten - GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme S. 92 ff.

nur eine geringe Entfernung (2 km) besteht, kann nach SCHRAUT (2000) die Erde vereinfacht als Kugel angesehen werden und eine sphärische Approximation ist durchführbar. Der durch diese Vereinfachung entstehende Fehler beträgt bei einem Punktabstand von 500 m weniger als 0,05 m.<sup>8</sup> Somit erfolgt die Berechnung der Entfernungselemente (auf einer Kugel<sup>9</sup>) gemäß Gleichung A.7 und Gleichung A.8, wobei  $r_E = 6368 \cdot 10^3$  m der mittlere Erdradius ist.

$$dx = r_E \cdot \cos B_1 \cdot (L_1 - L_0) \quad (\text{A.7})$$

$$dy = r_E \cdot (B_1 - B_0) \quad (\text{A.8})$$

Durch geeignete Transformationen sind die beschriebenen Koordinatensysteme ineinander überführbar. Die Überführung des Navigationskoordinatensystems<sup>10</sup> in das fahrzeugfeste Koordinatensystem erfolgt durch drei aufeinander folgende Drehungen, deren Reihenfolge nicht vertauscht werden darf. Zunächst erfolgt eine Drehung um den Eulerwinkel  $\psi$  um die  $z^b$ -Achse (Gieren), dann um den Eulerwinkel  $\Theta$  um die  $y^b$ -Achse (Nicken) und zuletzt eine Drehung um den Eulerwinkel  $\Phi$  um die  $x^b$ -Achse (Wanken). Die Drehungen erfolgen stets im mathematisch positiven Sinn um die jeweilige Drehachse. Die Transformation vom fahrzeugfesten in das Navigationskoordinatensystem erfolgt analog in umgekehrter Reihenfolge.

Die für die Transformation des Navigationskoordinatensystems in das fahrzeugfeste Koordinatensystem erforderlichen drei Transformationsmatrizen lauten:<sup>11</sup>

$$T_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$T_\Theta = \begin{pmatrix} \cos \Theta & 0 & -\sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$T_\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Drehungen ergibt sich damit die Transformation

$$\begin{pmatrix} x^v \\ y^v \\ z^v \end{pmatrix} = T_\Phi T_\Theta T_\psi \begin{pmatrix} x^n \\ y^n \\ z^n \end{pmatrix} = T^{n \rightarrow v} \begin{pmatrix} x^n \\ y^n \\ z^n \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

---

<sup>8</sup>Schraut (2000): Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen S. 18f.

<sup>9</sup>Rummel/Peters (2007): Vorläufiges Vorlesungsmanuskript: Bezugssysteme S. 17f.

<sup>10</sup>Das Navigationskoordinatensystem ist ein lokales nord- und lotrichtungsorientiertes dreidimensionales Koordinatensystem.

<sup>11</sup>Bronstein et al. (1997): Taschenbuch der Mathematik S. 196.

mit

$$T^{n \rightarrow v} = \begin{pmatrix} \cos \Theta \cos \psi & \cos \Theta \sin \psi & -\sin \Theta \\ \sin \Phi \sin \Theta \cos \psi - \cos \Phi \sin \psi & \sin \Phi \sin \Theta \sin \psi + \cos \Phi \cos \psi & \sin \Phi \cos \Theta \\ \cos \Phi \sin \Theta \cos \psi + \sin \Phi \sin \psi & \cos \Phi \sin \Theta \sin \psi - \sin \Phi \cos \psi & \cos \Phi \cos \Theta \end{pmatrix}. \quad (\text{A.13})$$

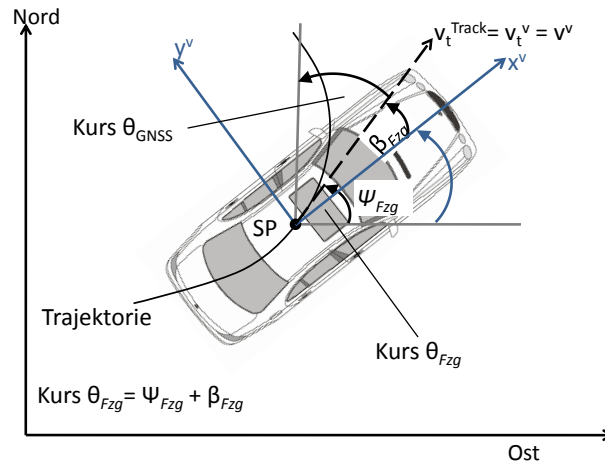
Durch die inverse Transformationsmatrix

$$(T^{n \rightarrow v})^{-1} = (T^{n \rightarrow v})^T \quad (\text{A.14})$$

erfolgt die Transformation vom fahrzeugfesten Koordinatensystem in das Navigationskoordinatensystem.

### A.2.2 Transformation der erforderlichen Gleichungen

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen dem Navigations- und fahrzeugfesten Koordinatensystem sowie zwischen den aus den Fahrzeugsensordaten bzw. aus den GNSS-Daten ermittelten Betrachtungsgrößen hergeleitet. In Abbildung A.3 sind die entsprechenden Parameter dargestellt.



**Abbildung A.3:** Zweidimensionales Koppelmodell für Landfahrzeuge.

Für die vorliegende Untersuchung werden für die Transformation die Eulerwinkel Nick- und Wankwinkel zu Null gesetzt ( $\Theta = \Phi = 0^\circ$ ). Somit ergeben sich aus Gleichung A.13 die in Gleichung A.15 und Gleichung A.16 dargestellten Transformationsmatrizen, wobei nur Bewegungsgrößen in der Ebene betrachtet werden.

$$T^{n \rightarrow v} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$T^{v \rightarrow n} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

### A.2.2.1 Geschwindigkeitstransformation

Werden nun die Gleichungen fahrzeugseitig (im Fahrzeugschwerpunkt SP, siehe Abbildung A.3) betrachtet, so ergeben sich für die Geschwindigkeitskomponenten folgende Zusammenhänge:

$$\begin{pmatrix} v_{x,Fzg,SP}^v \\ v_{y,Fzg,SP}^v \end{pmatrix} = v_t^{Track} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Für  $v_t^{Track}$  kann auch  $v_t^v$  geschrieben werden, da diese aufgrund der Beziehung in Gleichung A.18 ineinander überführbar sind.

$$v_t^v = v_{Fzg}^v = \sqrt{(v_x^v)^2 + (v_y^v)^2} = \sqrt{[(\sin \beta)^2 + (\cos \beta)^2] \cdot (v_t^{Track})^2} = v_t^{Track} \quad (\text{A.18})$$

Die Transformation der Geschwindigkeiten aus dem fahrzeugfesten Koordinatensystem in das Navigationskoordinatensystem unter Anwendung des Additionstheorems lautet:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} v_{x,Fzg,SP}^n \\ v_{y,Fzg,SP}^n \end{pmatrix} &= v_{Fzg,SP}^v \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi_{Fzg} + \beta_{Fzg}) \\ \sin(\psi_{Fzg} + \beta_{Fzg}) \end{pmatrix} \\ &= v_{Fzg,SP}^v \cdot \begin{pmatrix} \cos(\Theta_{Fzg}) \\ \sin(\Theta_{Fzg}) \end{pmatrix} \stackrel{90^\circ - \Theta_{GNSS}}{=} v_{Fzg,SP}^v \cdot \begin{pmatrix} \sin(\Theta_{GNSS}) \\ \cos(\Theta_{GNSS}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Für die Geschwindigkeitskomponenten im Navigationskoordinatensystem gilt für die GPS-Daten allgemein (Voraussetzung: Antenne befindet sich direkt über dem Schwerpunkt<sup>12</sup>):

$$\begin{pmatrix} v_{x,GNSS,SP}^n \\ v_{y,GNSS,SP}^n \end{pmatrix} = v_{GNSS,SP}^n \cdot \begin{pmatrix} \sin \Theta_{GNSS} \\ \cos \Theta_{GNSS} \end{pmatrix} = v_{GNSS,SP}^n \cdot \begin{pmatrix} \cos \Theta_{Fzg} \\ \sin \Theta_{Fzg} \end{pmatrix} \quad (\text{A.20})$$

Bei Betrachtung von Gleichung A.19 und Gleichung A.20 ergibt sich für die aus den Fahrzeugdaten und für die aus den GNSS-Daten ermittelte Geschwindigkeit folgender Zusammenhang:

$$v_{GNSS,SP}^n = v_{Fzg,SP}^v \quad (\text{A.21})$$

### A.2.2.2 Positionstransformation

Die Positionsbestimmung ist mit Hilfe der Koppelnavigation möglich und diese wird immer auf das inertielle Koordinatensystem bezogen. Daher errechnet sich die Position in den jeweiligen Komponenten wie folgt:

$$\begin{aligned} x_{Fzg,SP}^n &= \int v_{x,Fzg,SP}^n(t) dt \\ &= \int (v_{x,Fzg,SP}^v(t) \cdot \cos \psi_{Fzg}(t) - v_{y,Fzg,SP}^v(t) \cdot \sin \psi_{Fzg}(t)) dt \\ &= \int (v_{Fzg,SP}^v(t) \cdot \cos(\psi_{Fzg}(t) + \beta_{Fzg}(t))) dt = \int (v_{Fzg,SP}^v(t) \cdot \cos(\Theta_{Fzg}(t))) dt \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

<sup>12</sup>Die Vernachlässigung ist bei Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit von GPS-Antenne und Schwerpunkt erlaubt, da die Drehbewegungen des Fahrzeuges, je nach Anwendungen, Werte von mehreren hundert Grad pro Sekunde annehmen können, während die Erddrehrate nur etwas mehr als fünfzehn Grad pro Stunde beträgt.



$$\begin{aligned}
 y_{Fzg,SP}^n &= \int v_{y,Fzg,SP}^n(t) dt \\
 &= \int (v_{x,Fzg,SP}^v(t) \cdot \sin \psi_{Fzg}(t) + v_{y,Fzg,SP}^v(t) \cdot \cos \psi_{Fzg}(t)) dt \quad (A.23) \\
 &= \int (v_{Fzg,SP}^v(t) \cdot \sin(\psi_{Fzg}(t) + \beta_{Fzg}(t))) dt = \int (v_{Fzg,SP}^v(t) \cdot \sin(\Theta_{Fzg}(t))) dt
 \end{aligned}$$

Die von dem GNSS-Empfänger zur Verfügung gestellten Längen- und Breitengrade sind auf Basis eines WGS84-Referenzellipsoids gemäß Anhang A.2.1 in das ECEF-Koordinatensystem zu transformieren. Unter Berücksichtigung der genannten Vereinfachungen<sup>13</sup> und des Aspekts des Bezugs auf ein inertiales, erdfestes Koordinatensystem bei Positionsbestimmung ist Gleichung A.22 und Gleichung A.23 noch der Erdradius zu addieren, um die absoluten Positionswerte aus Fahrzeugsensordaten und GNSS-Positionsdaten in einem gemeinsamen Koordinatensystem miteinander vergleichen zu können.

### A.3 Fahrzeugtechnische Modellvorstellung - Einachsmodell

Für die Berechnung der Fahrzeuggeschwindigkeit wird das in Abbildung A.4 dargestellte vereinfachte Einachsmodell herangezogen.

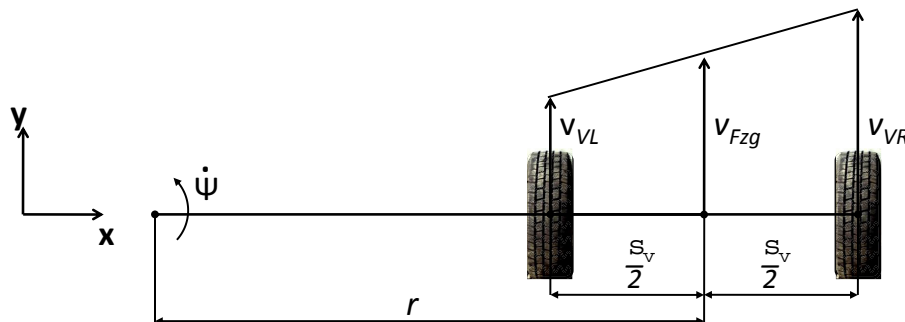


Abbildung A.4: Vereinfachtes Einachsmodell.

Für die Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit finden die Vorderradgeschwindigkeiten Verwendung, da es sich bei dem Versuchsträger um einen Hecktriebler handelt. Somit ist an der Vorderachse kein Antriebsschlupf vorhanden und unter Anwendung des Strahlensatzes ergeben sich für das vereinfachte Einachsmodell (siehe Abbildung A.4) folgende Zusammenhänge:

<sup>13</sup>Die Erde kann in erster Näherung als Kugel angesehen werden und Fahrzeug bewegt sich auf Oberfläche der Erde.

$$\frac{v_{Fzg}}{v_{VL}} = \frac{r}{r - \frac{s_v}{2}} \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{v_{Fzg}}{v_{VL}} = \frac{1}{1 - \frac{s_v}{2r}} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{v_{VR}}{v_{Fzg}} = \frac{r + \frac{s_v}{2}}{r} \quad (\text{A.26})$$

Durch Auflösen von Gleichung A.26 nach  $1/r$  und einsetzen in Gleichung A.24 ergibt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  zu:

$$v_{Fzg} = \frac{v_{VL} + v_{VR}}{2} \quad (\text{A.27})$$

Die Tangentialgeschwindigkeit ergibt sich also im Einachsmodell aus dem Mittelwert der beiden Radgeschwindigkeiten. Unter Verwendung des Gütekriteriums  $fit$  (siehe Gleichung A.28), das die Überdeckung des zu untersuchenden Signals  $Signal_{zu\ untersuchen}$  und des Referenzsignals  $Signal_{Ref}$  (Correxit-Sensor) beschreibt, ergibt sich für die Validierung der verschiedenen Manöverversuche durchschnittlich eine Überdeckung von 95,1% (max. Überdeckung beträgt hier 99,2%) und für Streckenfahrten 92,2% (maximale Überdeckung: 99,1%).<sup>14</sup>

$$fit = 1 - \sqrt{\frac{\sum_i (Signal_{Ref,i} - Signal_{zu\ untersuchen,i})^2}{\sum_i (Signal_{Ref,i} - \overline{Signal_{Ref}})^2}}, \quad (\text{A.28})$$

Hierbei kennzeichnet  $\overline{Signal_{Ref}}$  den Mittelwert über alle Messpunkte des Referenzsignals im betrachteten Bereich und  $i = 1, \dots, n$  alle betrachteten Messpunkte.

Hieraus ist ersichtlich, dass das Einachsmodell die Fahrzeuggeschwindigkeit sehr gut abbildet und in dieser Arbeit eingesetzt werden kann.

## A.4 Versuchsstrecke und Technische Spezifikationen

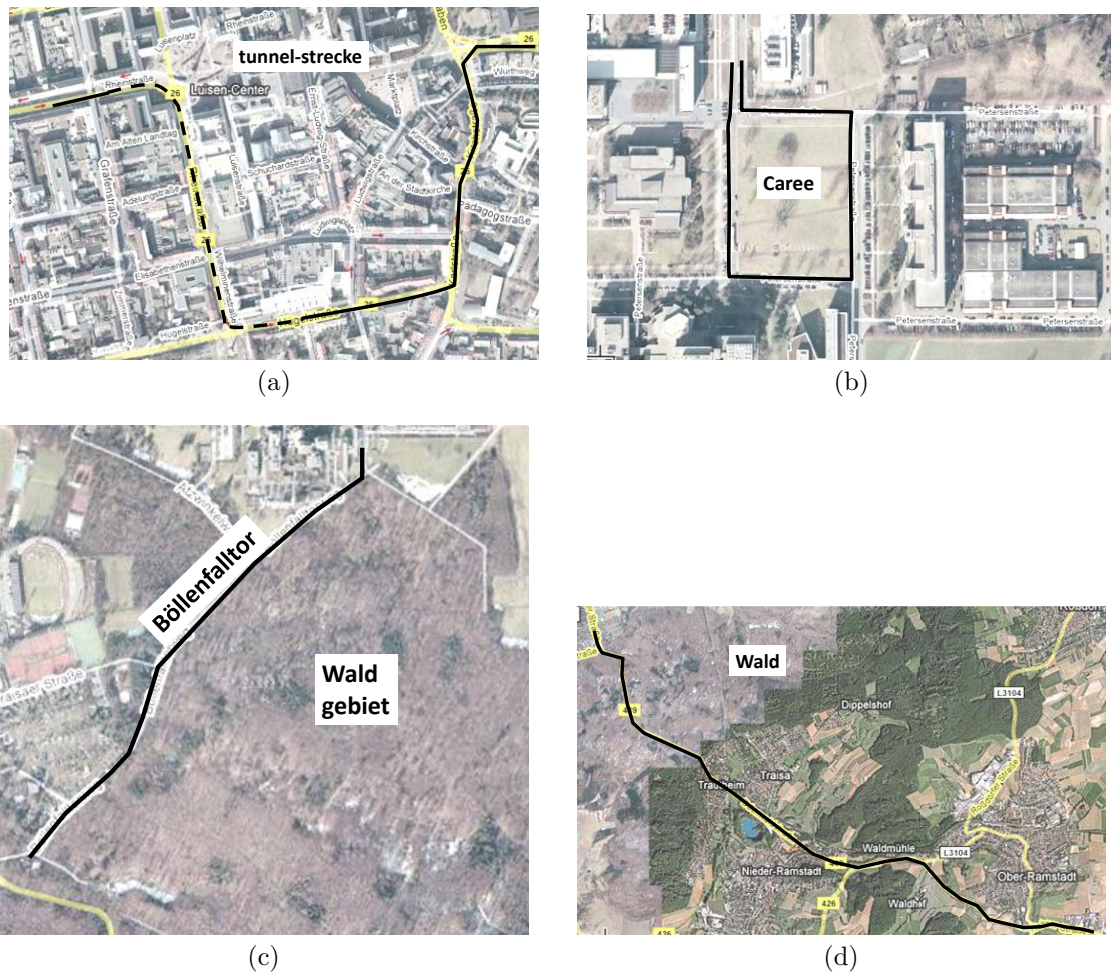
### A.4.1 Versuchsstrecken im öffentlichen Straßenverkehr

Die für die Versuchsstrecke ausgewählten öffentlichen Straßenabschnitte sind für die Strecken "tunnel-strecke", "caree", "böllenfalltor" sowie "wald" jeweils in Form eines Satellitenbildes in Abbildung A.5 dargestellt. Die gefahrene Route ist jeweils durch eine schwarze dicke Linie gekennzeichnet. Ausnahme bildet die Tunneldurchfahrt, die durch eine gestrichelte Linie markiert ist (siehe Abbildung A.5a).

Die Rahmenbedingungen, d. h. Randbebauungen bei den Fahrten im Innenstadtdgebiet zeigen die Videobilder in Abbildung A.6.

---

<sup>14</sup>Fohr (2008): Entwicklung und Implementierung eines Fehlermodells für GNSS-Signale S. 21.



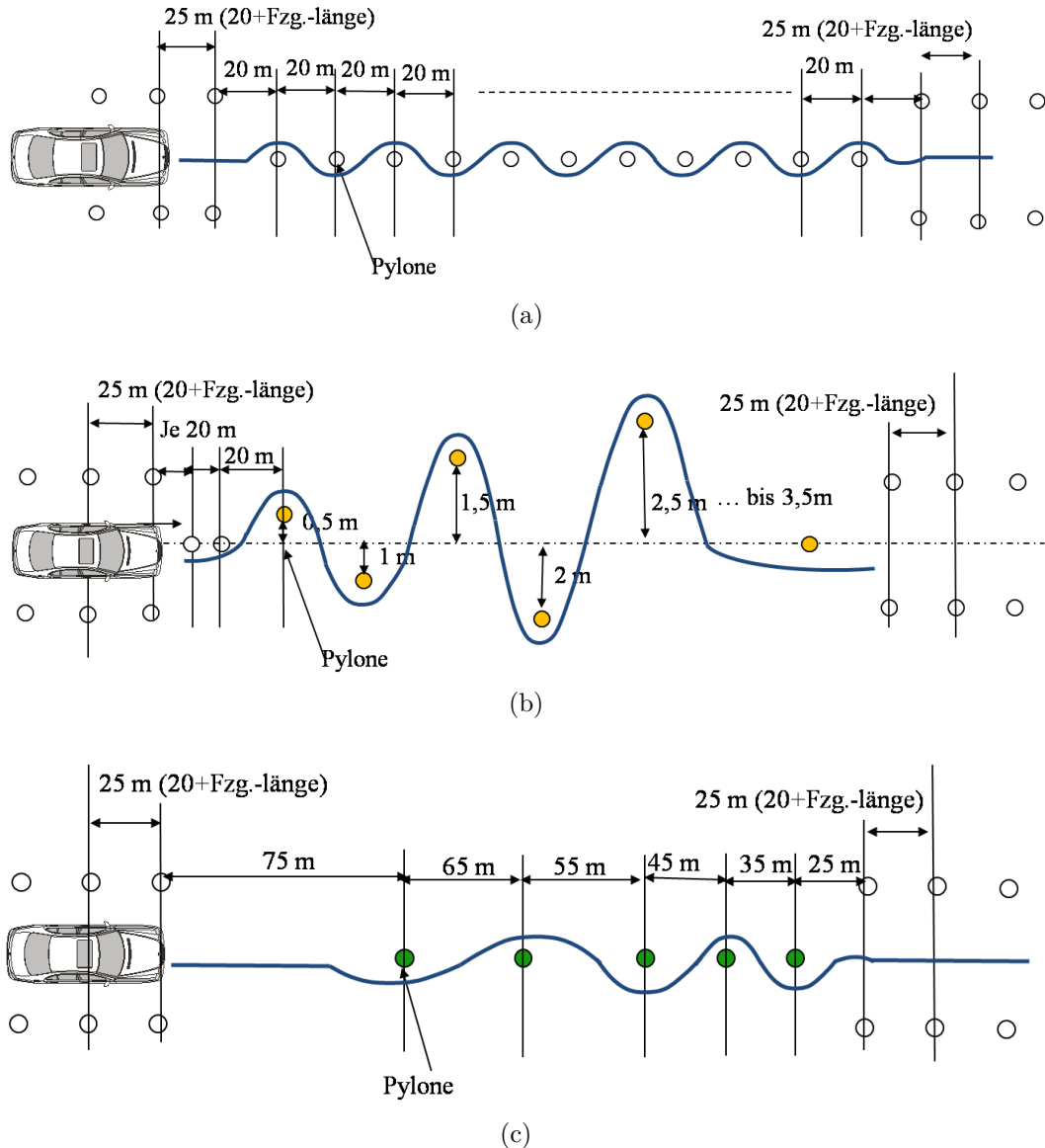
**Abbildung A.5:** Abschnitte der Versuchsstrecke auf öffentlichen Straßen, (a) Innenstadtbereich mit Tunnel, (b) Fahrt am Innenstadtrandgebiet, teilweise von Universitätsgebäuden umgeben, (c) vom Wald berandete Nebenstraße im Innenstadtrandgebiet, (d) durch ein Waldgebiet führende Landstraße. Bildquelle: GOOGLEMAPS.



**Abbildung A.6:** Abschnitte der Innenstadtfahrten, (a) Fahrt von Griesheim nach DA, (b) Innenstadtfahrt mit Baumalleen, (c) Innenstadtwohngbiet, (d) vom Wald berandete Nebenstraße im Innenstadtrandgebiet sowie (e) Innenstadtbereich mit Tunnel.

### A.4.2 Testmanöver Slalom und seine Varianten

In Abbildung A.7 ist das Testmanöver Slalom und seine Varianten dargestellt.



**Abbildung A.7:** Varianten der Slalomfahrt: (a) Slalom, (b) Amplitudenmodulierter Slalom, (c) Frequenzmodulierter Slalom.

Während beim Slalom (Abkürzung *slalom*, Abbildung A.7a) der longitudinale Abstand zwischen den Pylonen konstant ist (20 m) und der laterale Abstand den Wert 0 m annimmt, ist der Abstand zwischen den Pylonen in lateraler Richtung, d. h. Abstand zu der Grundlinie, bei dem amplitudenmodulierten Slalom (Abkürzung: *slaloma*, siehe Abbildung A.7b) immer um einen halben Meter erhöht, so dass sich eine aufschwingende amplitudenmodelierte Slalomfahrt ergibt. Im Gegensatz hierzu wird beim frequenzmodulierten Slalom (Abkürzung: *slalomf*, siehe Abbildung A.7c) der Abstand der Pylonen, die sich alle auf einer Grundlinie befinden, variiert. In dieser Arbeit wurde der Abstand zwischen den Pylonen jeweils um 10 m verkleinert.

### A.4.3 Daten des Versuchsträgers

Der Versuchsträger wurde unter Mithilfe des Geodätischen Instituts der TU Darmstadt tachymetrisch vermessen. Tabelle A.1 enthält die für diese Arbeit erforderlichen Größen<sup>15</sup> und Abbildung A.8 zeigt die Einbauorte der verwendeten Sensoren in der Draufsicht.

**Tabelle A.1:** Notwendige Fahrzeugparameter.

Parameter	Wert
Fahrzeugmasse (incl. Fahrer u. Messtechnik) $m$	2062 kg
Fahrzeugmasse (Leergewicht) $m_{Leer}$	1875 kg
Messtechnikmasse $m_{Messtechnik}$	108 kg
Gierträgheitsmoment um die Hochachse $J_z$	4293,278 kg · m <sup>2</sup>
Gesamtlänge $l_{ges}$	5,158 m
Radstand $l$	3,085 m
Spurweite (unbelastet) $s_v = s_h$	1,574 m
Abstand Vorderachse - Schwerpunkt $l_v$	1,611 m
Abstand Hinterachse - Schwerpunkt $l_h$	1,474 m
Abstand Messtechnik-SP zur HA $l_{Mess-HA}$	0,320 m
Lenkübersetzung $i_{LG}$	14,5
Reifengröße	225/60 R16 98H
Statischer Reifenhalbmesser $r_{stat}$	0,31 m

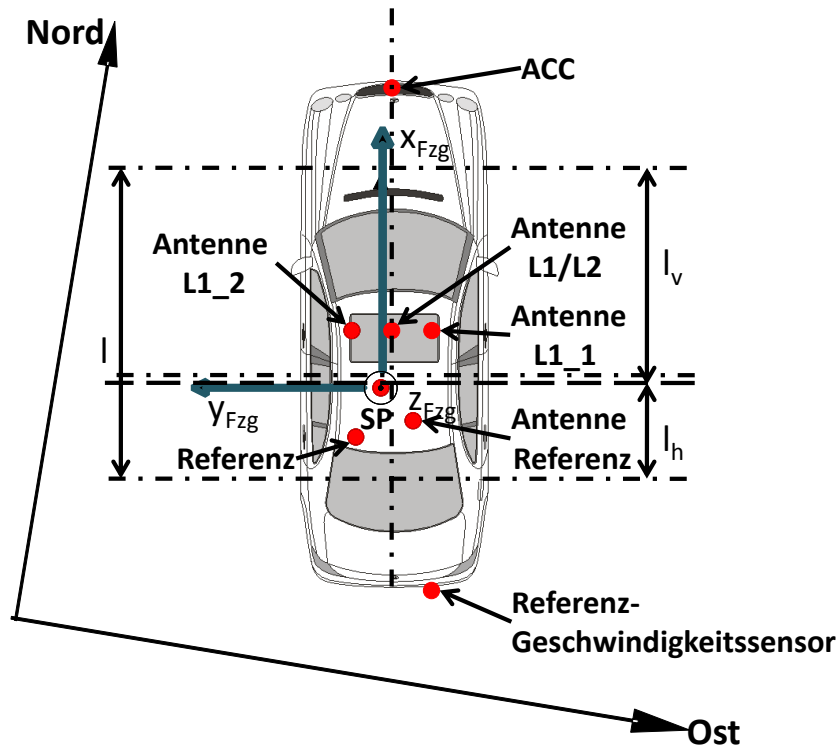
Für die Schwerpunktsermittlung wurden die Radlasten bestimmt. Die Fahrzeugmasse umfasst die eingebaute Messtechnik, den halb gefüllten Kraftstofftank sowie einen 79 kg schweren Fahrer. Die ermittelten Radlasten sind in Tabelle A.2 angegeben.

**Tabelle A.2:** Radlasten des Versuchsträgers mit und ohne Fahrer.

	ohne Fahrer	mit Fahrer
$m_{VR}$ [kg]	468	478
$m_{VL}$ [kg]	475	507
$m_{HR}$ [kg]	536	545
$m_{HL}$ [kg]	504	532
$m_{Fzg}$ [kg]	1983	2062

Die Ermittlung der unbekanntenen Schwerpunktsabstände erfolgt durch Bildung des Momentengleichgewichts um die Vorderachse und um die rechte Fahrzeugseite. Bezugspunkt dieser Koordinaten ist die Mitte der Aufstandsfläche des rechten Vorderrades. Es ergeben sich die in Tabelle A.3 dargestellten Werte für die Schwerpunktslage. Somit liegt der Schwerpunkt (mit Fahrer und eingebauter Messtechnik) 6 mm in Fahrtrichtung links der Fahrzeugmitte und 69 mm hinter der Mitte zwischen den beiden Achsen (siehe Abbildung A.9).

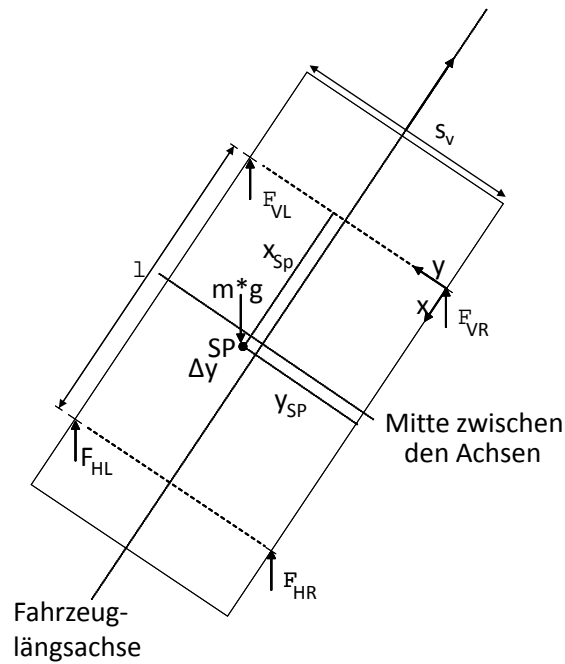
<sup>15</sup>Händler (2006): Untersuchung der Verfügbarkeit von verschiedenen Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) im Fahrbetrieb und Bewertung der Genauigkeit der Daten zur Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) : für nähere Details.



**Abbildung A.8:** Navigations- und fahrzeugfestes Koordinatensystem sowie Einbauposition der verwendeten Sensoren.

**Tabelle A.3:** Schwerpunktlage des Versuchsträgers mit und ohne Fahrer, von der Vorderachse aus gerechnet.

	ohne Fahrer	mit Fahrer
$x_{SP}$ [mm]	1617,95	1611,32
$y_{SP}$ [mm]	777,08	793,11



**Abbildung A.9:** Schwerpunktslage des Versuchsträgers.

Als Fahrdynamiksensoren kommen neben den Raddrehzahlsensoren der serienmäßig verbaute und ein zusätzlich eingebauter Gierratensensor (mit "Fzg-ext" bezeichnet) zum Einsatz, dessen technische Spezifikationen Tabelle A.4 zu entnehmen sind. Weitere Daten können der technischen Kundendokumentation entnommen werden<sup>16</sup>.

**Tabelle A.4:** Technische Daten des mit Fzg-ext. gekennzeichneten Gierratensensors.

Messbereich Drehrate (z-Achse)	-100 ... 99,6 °/s
Auflösung Drehrate (z-Achse)	0,3 °/s

Tabelle A.5 sowie Tabelle A.6 enthalten die wichtigsten technischen Daten der beiden Referenzsysteme<sup>17</sup>.

**Tabelle A.5:** Leistungsspezifikation der Geschwindigkeitsreferenz. Quelle: CORRSYS (2002).

Geschwindigkeitsbereich	0,5 ... 400 km/h
Wegauflösung	1,9 mm
Messunsicherheit	≤ ±0,1 %
Winkelbereich	±40 °
Winkelauflösung	≤ ±0,1 °

<sup>16</sup>Robert Bosch GmbH: DRSSMM - Technische Dokumentation.

<sup>17</sup> Für weiterführende Informationen wird auf die Datenblätter der jeweiligen Hersteller verwiesen.

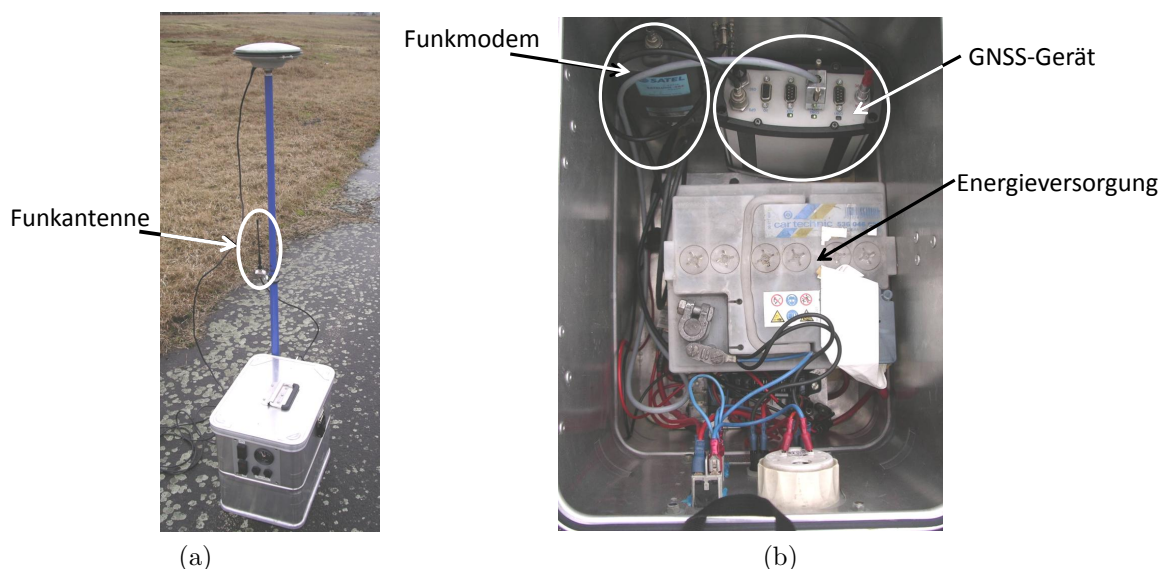


**Tabelle A.6:** Leistungsspezifikation der Referenz - Kreiselplattform. Quelle: GENESYS (2006).

Messbereich Drehrate (z-Achse)	$\pm 320^\circ/\text{s}$
Auflösung Drehrate (z-Achse)	$0,01^\circ/\text{s}$
Messbereich Beschleunigung	$\pm 2,5g$
Auflösung Beschleunigung	$0,0001g$
Messbereich ext. Geschwindigkeit	$\pm 100 \text{ m/s}$
Auflösung ext. Geschwindigkeit	$0,005 \text{ m/s}$
Messbereich Position - Breite	$\pm 90^\circ$
Auflösung Position - Breite	$10^{-7}^\circ$ bzw. $0,01 \text{ m}$
Messbereich Position - Länge	$\pm 180^\circ$
Auflösung Position - Länge	$10^{-7}^\circ$ bzw. $0,01 \text{ m}$
Messbereich Gier- u. Kurswinkel	$0 \dots 359,99^\circ$
Auflösung Gier- u. Kurswinkel	$0,01^\circ$
gewählte Abtastfrequenz	$100 \text{ Hz}$

#### A.4.4 Fachgebietseigene Referenzstation

In Abbildung A.10 ist die fachgebietseigene, portable Referenzstation dargestellt. Diese Referenzstation besteht aus einer wetterresistenten Aluminiumbox, in der neben einer Fahrzeugbatterie, die als Energiequelle dient, ein GNSS-Empfänger sowie ein Funkmodem eingebaut sind (siehe Abbildung A.10b). Außen ist auf einem Teleskopstab die GNSS-Antenne befestigt. Mit Hilfe des Teleskopstabes ist die Höhe der GNSS-Antenne individuell einstellbar.



**Abbildung A.10:** Fachgebietseigene, wetterresistente Referenzstation (a) Außenansicht, (b) Innenansicht.

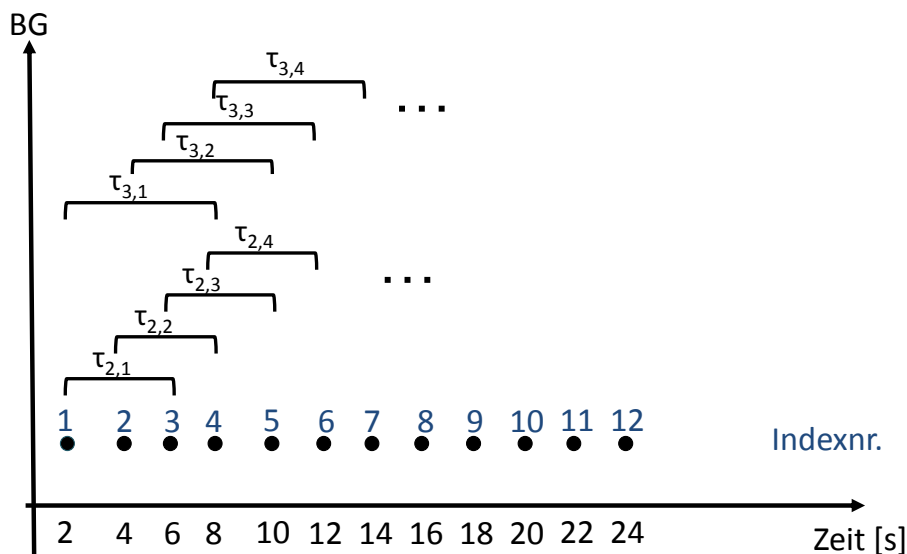
## A.5 Anmerkungen und Ergänzungen zur Signalanalyse

### A.5.1 Anmerkungen - Variationsparameter $\tau$

Für die Bestimmung des Variationsparameters  $\tau$  wurden folgende Bedingungen gestellt. Der maximale Wert für  $\tau$  ( $\tau_{max}$ ) ergibt sich als die Hälfte der Messzeit  $T_{Mess}$  pro Messdatei. In welchen Schritten  $\tau_i$  zu wählen ist, wird durch die Abtastung  $T_{Abtast}$  des jeweiligen Sensors vorgegeben.  $i$  kennzeichnet hierbei das Zeitintervall, von welchen die Messwerte zu verwenden sind. Das kleinste  $\tau$  ( $\tau_{min}$ ) entspricht der Abtastzeit des jeweiligen Gerätes und die maximale  $\tau_i$ -Anzahl ( $n_\tau$ ) wird durch folgende Gleichung vorgegeben:

$$n_\tau = \frac{\tau_{max}}{T_{Abtast}} = \frac{T_{Mess}}{2 \cdot T_{Abtast}} \quad (\text{A.29})$$

Anhand eines einfachen, schematischen Beispiels (siehe Abbildung A.11) wird das Vorgehen zur Ermittlung der Betrachtungsgrößen in Abhängigkeit von  $\tau_i$  vorgestellt.



**Abbildung A.11:** Vorgehen bei der Berechnung der Fehler in Abhängigkeit von  $\tau_i$ .

Die Punkte in Abbildung A.11 kennzeichnen diskrete Messwerte. Die Abtastung  $T_{Abtast}$  beträgt in diesem Beispiel 2s. Zur leichteren Schreibweise werden im Folgenden die Indexnummern verwendet, die ebenfalls in Abbildung A.11 angegeben sind. Ferner wird ein Referenzwert von 0 vorausgesetzt. Ist nun der Mittelwert für den Fehler der Betrachtungsgröße  $BG$  für  $\tau = 2\text{s} = \tau_2$  zu berechnen, so ergibt sich dieser wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \mu_{Datei}(e_{\Delta BG}(\tau_2)) &= \frac{1}{10} \cdot \sum_{k=1}^{10} e_{\Delta BG,k}(\tau_2) = \\
 &= \frac{1}{10} \cdot [ \underbrace{(BG(3) - BG(1))}_{\Delta BG_{\tau_2,1}} + \underbrace{(BG(4) - BG(2))}_{\Delta BG_{\tau_2,2}} + \\
 &+ \underbrace{(BG(5) - BG(3))}_{\Delta BG_{\tau_2,3}} + \underbrace{(BG(7) - BG(5))}_{\Delta BG_{\tau_2,4}} + \dots + \\
 &+ \underbrace{(BG(12) - BG(10))}_{\Delta BG_{\tau_2,10}} ] \tag{A.30}
 \end{aligned}$$

Analoges gilt für die Standardabweichung, die sich wie folgt errechnet:<sup>18,19</sup>

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Datei}(e_{\Delta BG}(\tau_2)) &= \sqrt{\frac{1}{10-1} \cdot \sum_{k=1}^{10} (e_{\Delta BG,k}(\tau_2) - \mu_{Datei}(e_{\Delta BG}(\tau_2)))^2} \\
 &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (e_{\Delta BG,j}(\tau_2))^2 - 10 \cdot (\mu_{Datei}(e_{\Delta BG}(\tau_2)))^2}{(10-1)}} \tag{A.31}
 \end{aligned}$$

### A.5.2 Anmerkung - Normalverteilungsprüfung

Der Einsatz von Bewertungskriterien wie beispielsweise CEP setzt eine Normalverteilung voraus. Zwar wird in der Literatur ausgesagt, dass dies in erster Näherung für die GNSS-Daten anzunehmen ist, jedoch fehlt meist ein Nachweis. Daher wurde am Beispiel der Positionsfehler der Stillstandsmessungen die Normalverteilung anhand eines Normalverteilungsplots untersucht. Exemplarisch ist dieser für die GNSS-Geräte *L1\_2* und *L1/L2* in Abbildung A.12 dargestellt, in der die realen Daten durch das Symbol “+“ gekennzeichnet sind.

Die Linie in Abbildung A.12 repräsentiert das erste und dritte Quartil der realen Daten. Zum Ende der Linien hin wird eine Extrapolation vorgenommen, um eine Unterstützung bei der Auswertung der Linearität zu bieten. Liegt nun eine Normalverteilung der Daten vor, so ist dies an der Linearität in dem Plot zu erkennen, die in Abbildung A.12a und in Abbildung A.12b vorliegt. Somit ist die Annahme der Normalverteilung der Positionsfehler für alle Empfänger in erster Näherung als erfüllt anzusehen.

### A.5.3 Geschwindigkeit, Gierrate und Kurswinkel

In Abbildung A.13a ist exemplarisch für einen Referenzpunkt das Verhalten des Geschwindigkeitssignals und in Abbildung A.13b das Verhalten des Kurswinkelsignals für eine Stillstandsmessung dargestellt.

<sup>18</sup>Bronstein et al. (1997): Taschenbuch der Mathematik S. 727.

<sup>19</sup>Bleymueller/Gehlert/Gülicher (2004): Statistik für Wirtschaftswissenschaftler S. 19.

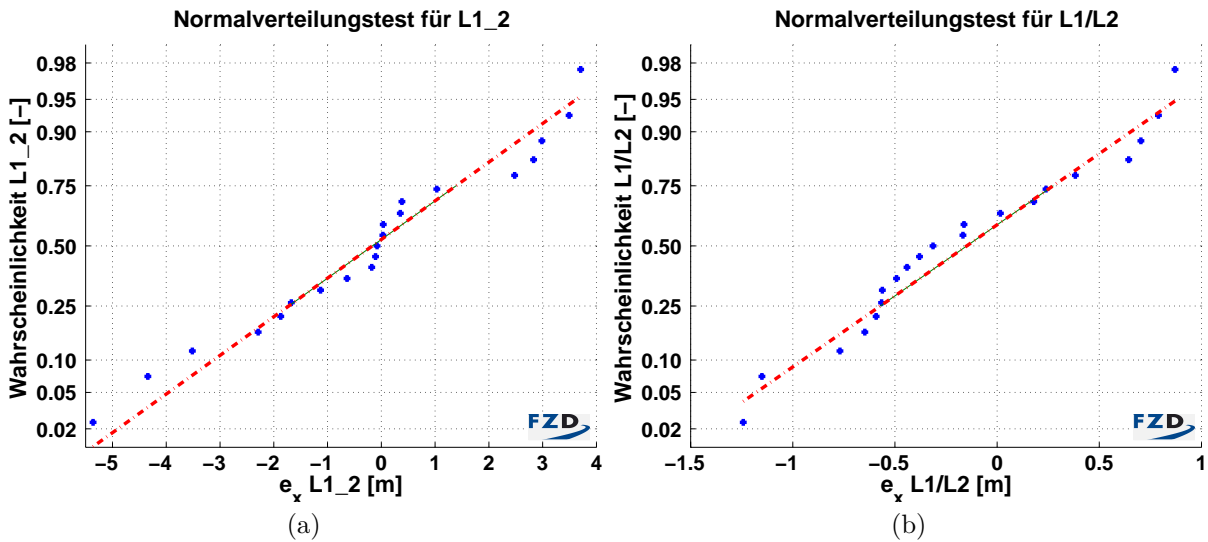


Abbildung A.12: Normalverteilungstest exemplarisch für (a) GNSS-Gerät  $L1\_2$  und (b) GNSS-Gerät  $L1/L2$  für alle Stillstandsmessungen.

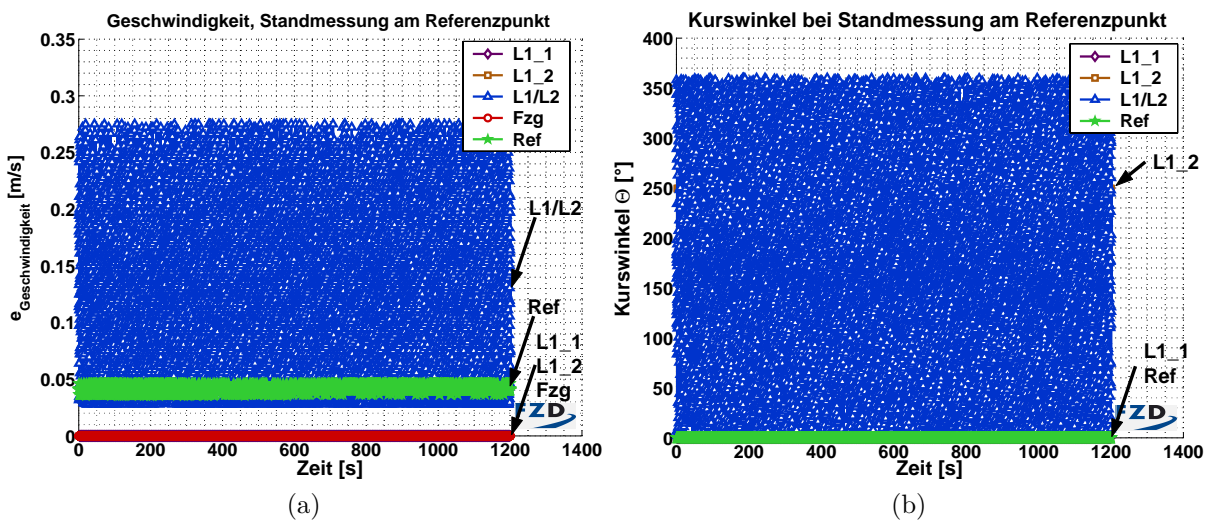


Abbildung A.13: (a) Geschwindigkeitsfehler, (b) Kurswinkelverlauf, jeweils bei Stillstandsmessung. Exemplarisch für Referenzpunkt mit einer Messdauer von 20 min.

Aus Abbildung A.13a ist eine hohe Sensibilität des L1/L2-Empfängers im Stillstand zu beobachten. Dieses gilt auch für die Betrachtungsgröße Kurswinkel (siehe Abbildung A.13b) bei dem L1/L2-Gerät während die beiden anderen Geräte stets einen konstanten Wert ausgeben.

### A.5.4 Verzugszeit

In Tabelle A.7 sind die für die einzelnen Manöver ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen der Zeitverzüge für die Betrachtungsgröße Kursrate dargestellt. Hierbei kennzeichnen die Buchstaben “l” (links) bzw. “r” (rechts) die Richtungen des Beginns des Lenkungseinschlags.

**Tabelle A.7:** Ermittelter Zeitverzug sowie Standardabweichung für Betrachtungsgröße Kursrate für unterschiedliche GNSS-Empfänger für ausgewählte Manöver.

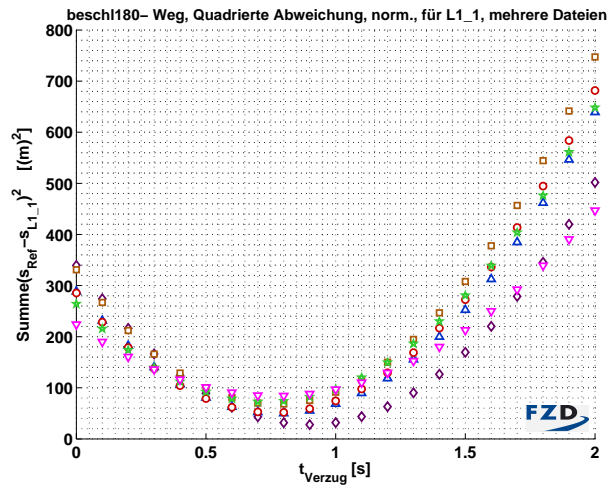
Gerät	L1_1		L1_2		L1/L2	
	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$
Slalom l	1,71	0,04	2,97	0,08	0,04	0,01
Slalom r	1,73	0,04	3,0	0,00	0,04	0,01
Slalom 40 l	1,74	0,04	3,00	0,00	0,05	0,00
Slalom 40 r	1,73	0,05	3,00	0,00	0,04	0,00
Slalom 50 l	1,80	0,05	3,43	1,13	0,08	0,00
Slalom 50 r	1,80	0,00	2,57	1,13	0,08	0,00
Slaloma l	1,73	0,11	2,91	0,16	0,02	0,00
Slaloma r	1,73	0,05	2,94	0,10	0,02	0,01
Slalomf l	1,81	0,18	2,91	0,20	0,09	0,04
Slalomf r	1,76	0,20	2,91	0,11	0,07	0,04

Abbildung A.14 zeigt für die drei GNSS-Geräte jeweils die Summe der quadrierten Abweichungen für mehrere Dateien exemplarisch für das Manöver “Beschleunigung 180“. Hier ist der nahezu horizontale Kurvenverlauf in das Minimum erkennbar.

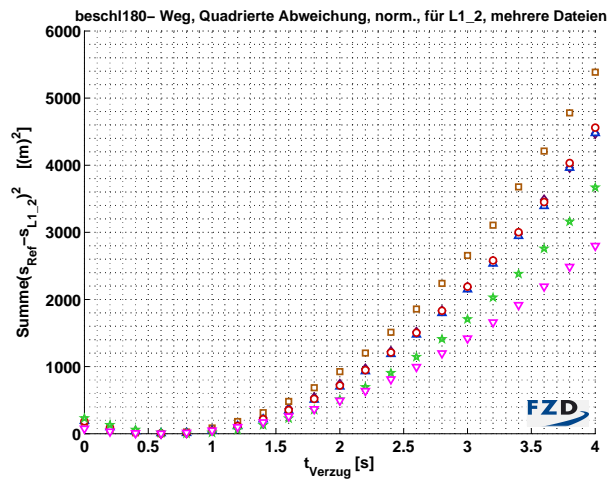
Ebenso wie für die Kursratenwerte sind in Tabelle A.8 die Mittelwerte sowie die Standardabweichung der Zeitverzüge für die jeweiligen Manöver für die Messgröße Position angegeben.

**Tabelle A.8:** Ermittelter Zeitverzug sowie Standardabweichung für die Messgröße Position für die unterschiedlichen GNSS-Empfänger für ausgewählte Manöver.

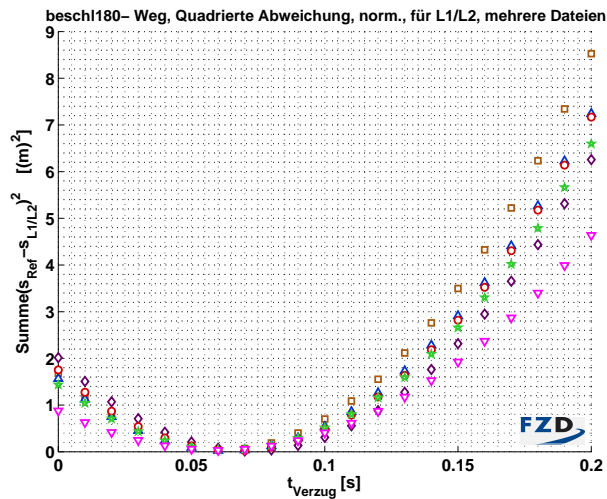
Gerät	L1_1		L1_2		L1/L2	
	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$	$\mu[s]$	$\sigma[s]$
Bonanza	0,56	0,11	0,56	0,09	0,06	0,01
Beschl 80	0,90	0,00	0,60	0,00	0,06	0,01
Beschl 100	0,90	0,00	0,60	0,00	0,06	0,02
Beschl 180	0,80	0,06	0,63	0,08	0,06	0,01



(a)



(b)

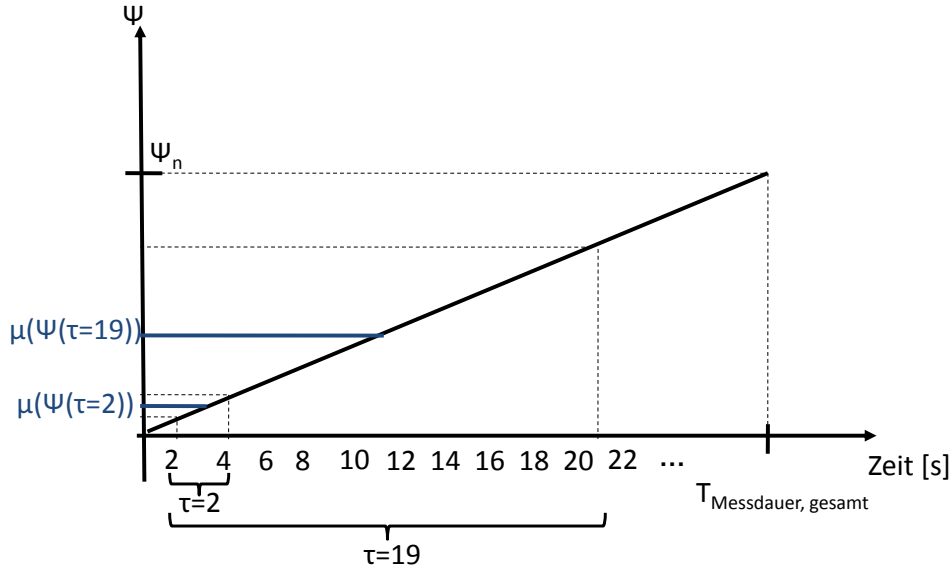


(c)

**Abbildung A.14:** Wert der Summe der quadrierten Abweichungen für das Messsignal Position für mehrere Dateien des Manövers “Beschleunigung” mit Zielgeschwindigkeit 180 km/h für die Geräte: (a) L1.1, (b) L1.2 und (c) L1/L2.

### A.5.5 Anmerkung - Qualitätsuntersuchung Kurswinkel

Bei der Ermittlung der Kurswinkeldifferenzen aus den Gierratensensordaten ist aufgrund der  $\tau$ -Betrachtung eine Korrektur der Gierratenwerte vorzunehmen, da sich sonst wegen der unterschiedlich langen Zeitintervalle und des Driftverhaltens nicht miteinander vergleichbare Mittelwerte ergeben würden. Die Folge wäre eine Verfälschung der Mittelwerte. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung A.15 dargestellt.



**Abbildung A.15:** Mittelwerteeinfluss bei Betrachtung der Kurswinkeldifferenz bei den Fahr-dynamiksensordaten.

In Abbildung A.15 kennzeichnet  $\psi_n$  den sich aus der Integration der Gierrate ergebenden Gierwinkel am Ende der Messdauer  $T_{Messdauer,gesamt}$ .

Die Korrektur, die bei der Kurswinkeldifferenzermittlung erforderlich ist, wird mit  $\dot{\psi}_{mittel,offset}$  bezeichnet und stellt den Quotienten aus  $\psi_n$  und  $T_{Messdauer,gesamt}$  dar (siehe Gleichung A.35). Die Berücksichtigung der verschieden langen Zeitintervalle wird über den Parameter  $m$  berücksichtigt, der sich gemäß Gleichung A.34 bestimmt. Die Gierrate  $\dot{\psi}_{Fzg}$  stellt die gemessene Fahrzeuggierrate dar.

Durch Einsetzen von Gleichung A.34 und Gleichung A.33 in Gleichung A.32 ergibt sich der in Gleichung A.36 dargestellte Zusammenhang.

$$\Delta_k \psi_{Fzg, \tau_i} = \dot{\psi}_{k, gemittelt} \cdot \tau_i \quad (A.32)$$

$$\dot{\psi}_{k, gemittelt} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{l=t_k}^{t_k + \tau_i} \left( \dot{\psi}_{Fzg}(l) - \dot{\psi}_{mittel, offset} \right) \quad (A.33)$$

$$m = \tau_i / T_{Abtast, Gerat} \quad (A.34)$$

$$\dot{\psi}_{mittel, offset} = \frac{\psi_n(T_{Messdauer,gesamt})}{T_{Messdauer,gesamt}} \quad (A.35)$$

$$\rightarrow \Delta_k \psi_{Fzg, \tau_i} = T_{Abtast, Gerat} \cdot \sum_{l=t_k}^{t_k + \tau_i} \left( \dot{\psi}_{Fzg}(l) - \dot{\psi}_{mittel, offset} \right) \quad (A.36)$$

Durch Anwendung dieser Gleichungen ist nun ein Vergleich der entsprechenden Kenngrößen möglich.

Aufgrund des Verdachts einer Geschwindigkeitsabhängigkeit (siehe Kapitel 4.3.3) sind in Abbildung A.16 die Standardabweichungen der Kurswinkeldifferenzen sowie die Mittelwerte der quadrierten Kurswinkeldifferenzen über den zurückgelegten Wegstreckenstücke  $s(\tau_i)$  für Geradeausfahrten mit verschiedenen, konstanten Geschwindigkeiten dargestellt. Aus den Diagrammen geht ein Grenzwert von 300 m hervor, ab dem eine Stützung der Fahrzeuggierrate durch GNSS-Kurs sinnvoll ist.

## A.5.6 Radgeschwindigkeitsfaktor

### A.5.6.1 Radgeschwindigkeitsfaktor bei geradliniger Bewegung

Aus Abbildung A.17 wird der Beschleunigungsverlauf während der Beschleunigungsfahrt auf Zielgeschwindigkeit 100 km/h für den betrachtenden Verlauf ersichtlich. Die Beschleunigungsphase beginnt erst nach ca. 20 s, da jede Versuchsfahrt mit einer Stillstandsphase begonnen wurde.

Abbildung A.18 zeigt den Verlauf des Radgeschwindigkeitsfaktors  $k_v$  für die Beschleunigungs-/Verzögerungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 100 km/h. In den Grafiken sind die bereits ermittelten Verzugszeiten berücksichtigt, die mit den in Kapitel 4.3.4 ermittelten Werten übereinstimmen.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit 180 km/h steht aufgrund der niedrigeren Zielgeschwindigkeit und somit aufgrund des kürzeren Beschleunigungs- und Verzögerungszeitraums nur eine geringe Anzahl an Messpunkten für die  $\tau_i$ -Betrachtung zur Verfügung.

### A.5.6.2 Radgeschwindigkeitsfaktor bei kurvenförmiger Bewegung

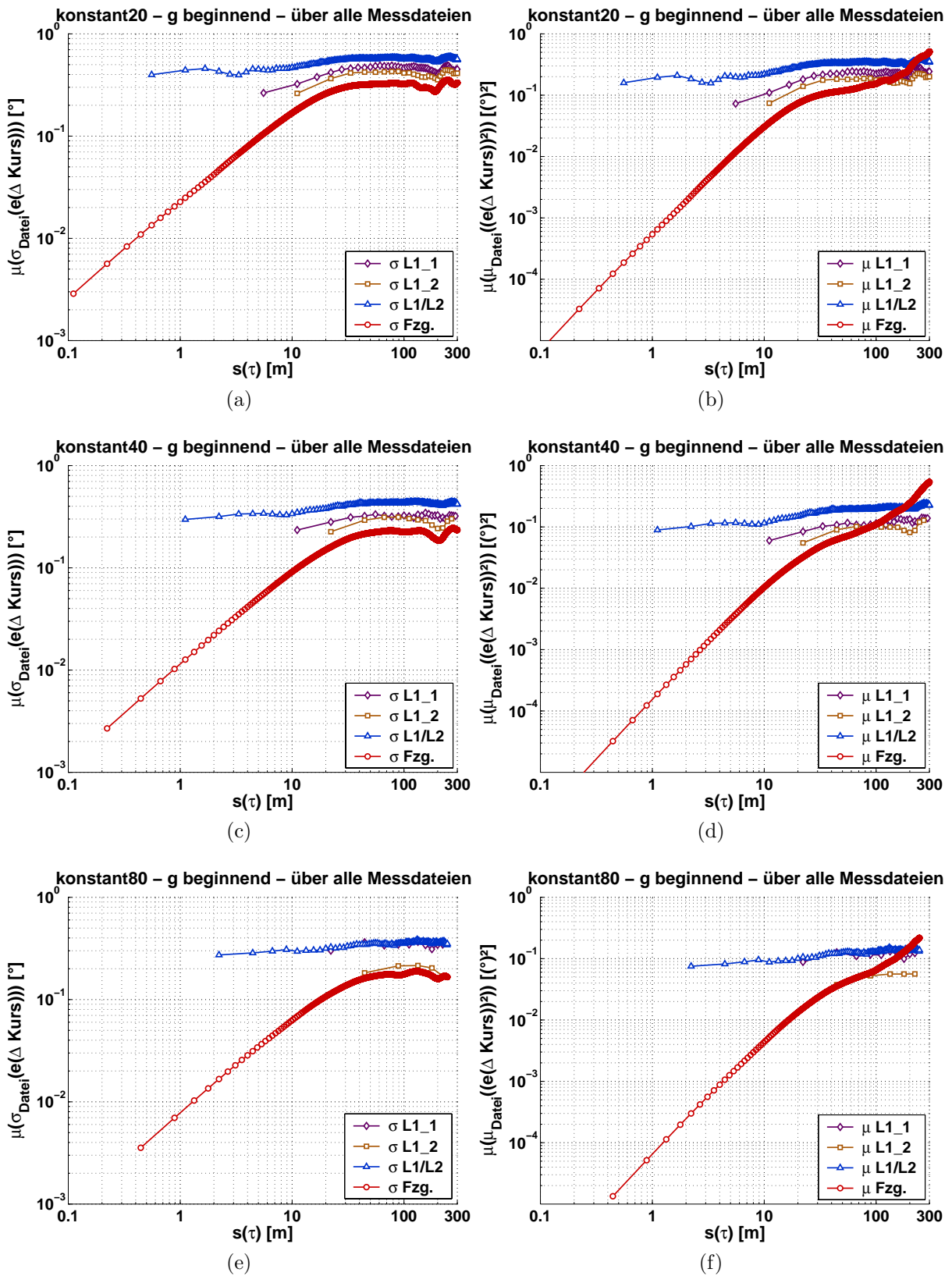
In Abbildung A.19 sind die exakten und die durch die Approximation entstehenden Streckenfehler für zwei Querbeschleunigungswerte ( $a_y = 3,0 \text{ m/s}^2$ ,  $a_y = 10,0 \text{ m/s}^2$ ) dargestellt.

Mit Ausnahme von L1\_2 bei  $a_y = 10 \text{ m/s}^2$  ist der hierdurch entstehende Streckenfehler zwischen exaktem (siehe Abbildung A.19a) und angenähertem Verlauf (Taylorreihenentwicklung inklusive Reihenabbruch nach erstem Glied, siehe Abbildung A.19b) für beide Querbeschleunigungswerte minimal verschieden. Folglich beträgt der maximale, approximierte relative Streckenfehler bei einer Geschwindigkeit von 10,8 m/s und einem Querbeschleunigungswert von  $3,0 \text{ m/s}^2$  bei dem "low-cost"-Gerät mit kleinster Abtastfrequenz (L1\_2) 16,7%.<sup>20</sup> Die übrigen maximalen, approximierten relativen Streckenfehlerwerte für die beiden anderen GNSS-Empfänger liegen für  $a_y = 3,0 \text{ m/s}^2$  deutlich unter 10%.

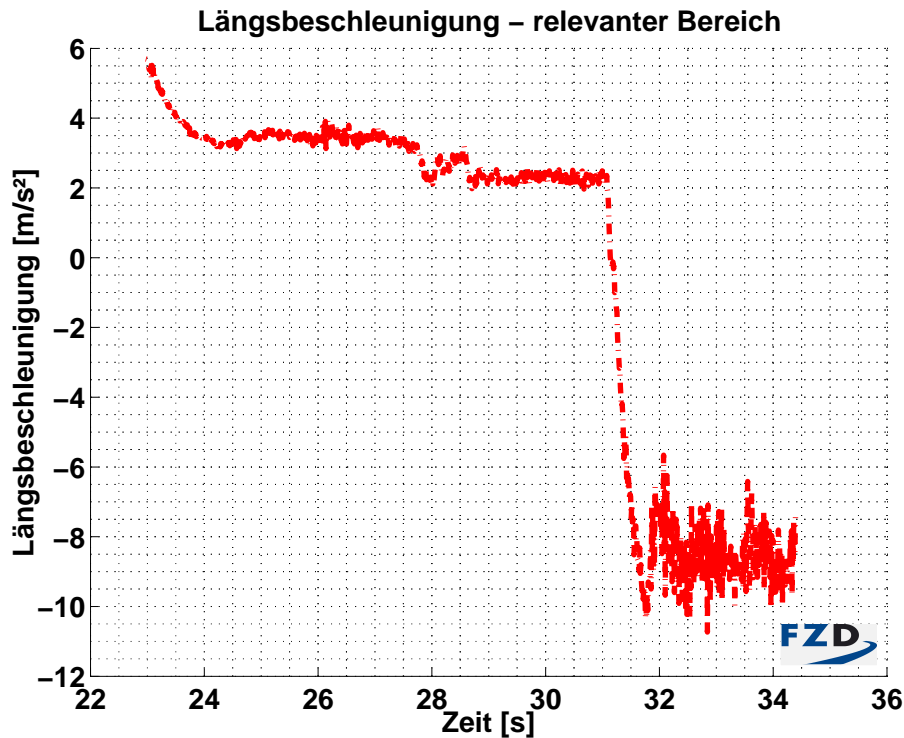
---

<sup>20</sup>Diese Werte für Querbeschleunigung und Geschwindigkeit repräsentieren die Kreisfahrt eines Normalfahrers.





**Abbildung A.16:** Standardabweichung der Kurswinkeldifferenzen ((a), (c), (e)) und Mittelwert der quadrierten Kurswinkeldifferenzen ((b), (d), (f)), jeweils in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstreckenstücke  $s(\tau_i)$  für Geradeausfahrten mit verschiedenen, konstanten Geschwindigkeiten (20 km/h, 40 km/h, 80 km/h).



**Abbildung A.17:** Exemplarischer Beschleunigungs- und Verzögerungsverlauf einer Beschleunigungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 100 km/h.

Bei dem auf Basis von realen Messungen ermittelten Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  ergibt sich für das L1/L2-Gerät eine Abweichung von 2,7 %. Die Ursache hierfür ist in der Vernachlässigung des Schwimmwinkels  $\beta$  zu finden, wie folgende größenordnungsmäßige Abschätzung zeigt. Durch den Schwimmwinkel  $\beta$  kommt es gemäß Gleichung A.37 zu einer Radiusvergrößerung. Wird vom worst-case-Fall ausgegangen, d. h. Kreisfahrt bei sehr niedriger Geschwindigkeit so wird für  $\beta$  der geometrische Schwimmwinkel  $\beta_0$ , gemäß Gleichung A.38 eingesetzt.<sup>21</sup> Dies ist insofern der worst-case-Fall, da mit Zunahme der Fahrgeschwindigkeit bei konstantem Radius die Querbeschleunigung ansteigt. Die hierfür erforderliche Seitenkraft führt zu einem Schräglaufwinkel an der Vorder- und Hinterachse. Hierdurch kommt es zu einer Verringerung des Schwimmwinkels, der bei einer Querbeschleunigung von ca. 4 – 5 m/s<sup>2</sup> sein Vorzeichen wechselt.

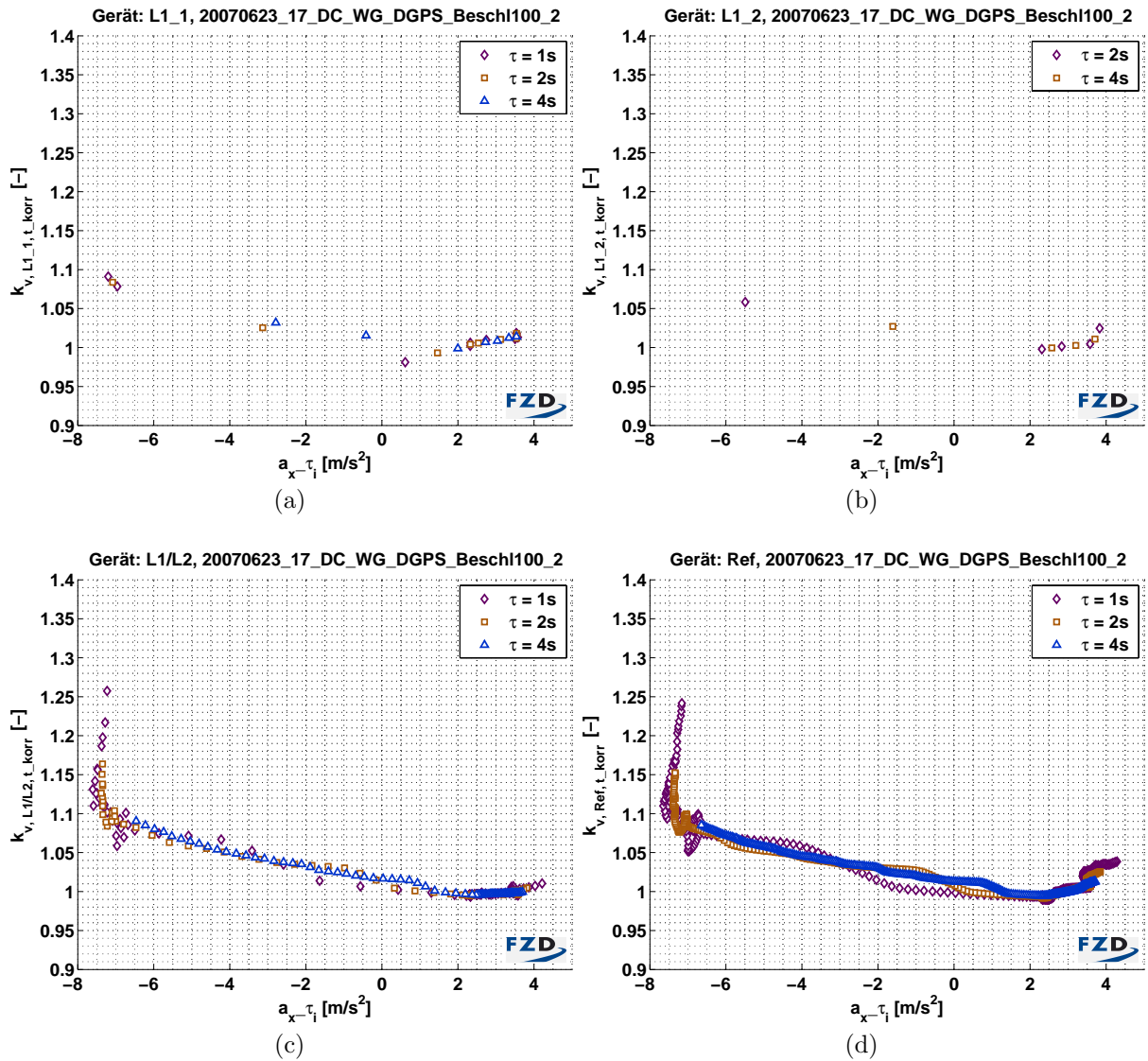
Wird nun Gleichung A.38 in Gleichung A.37 eingesetzt, so ergibt sich die prozentuale Radiusvergrößerung in Bezug zum gefahrenen Kreisradius zu 2,7 % (siehe Gleichung A.39).

$$\text{Radiusvergrößerung} = l_v \cdot \beta \tag{A.37}$$

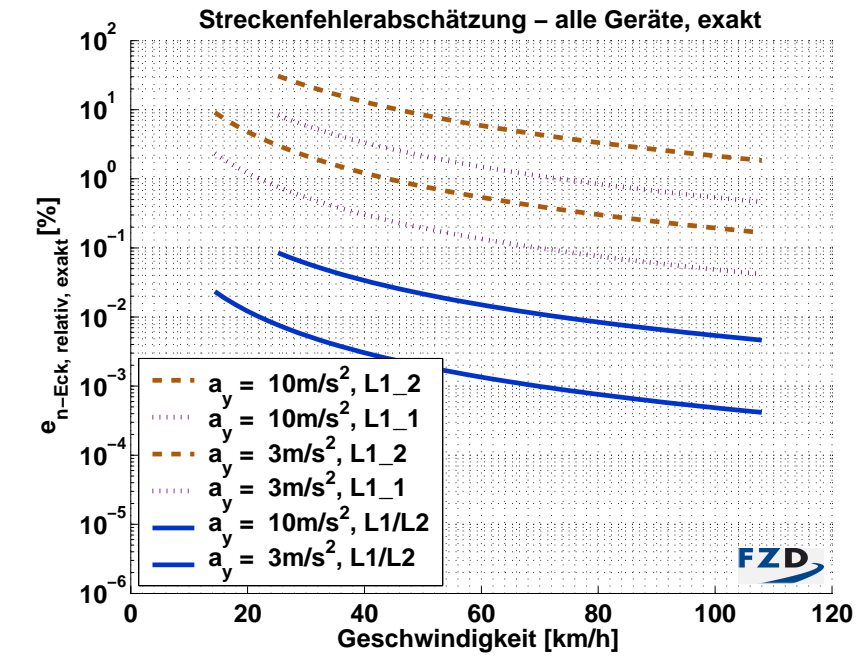
$$\beta_0 = \frac{l_h}{R} \tag{A.38}$$

$$\text{prozentuale Vergrößerung} = \frac{l_v \cdot l_h}{R^2} \cdot 100\% = \frac{l_v \cdot l_h}{R^2} = \frac{1,47 \cdot 1,61}{9,4^2} \cdot 100\% = 2,7\% \tag{A.39}$$

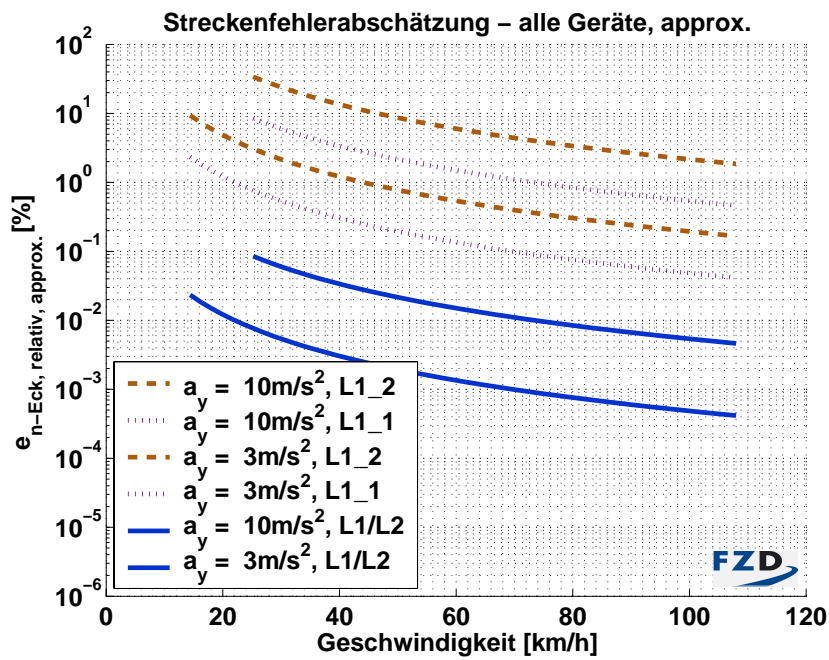
<sup>21</sup>Winner (2006b): Vorlesungsskript: Kraftfahrzeuge I Kapitel Querdynamik, Folie 23.



**Abbildung A.18:** Radgeschwindigkeitsfaktor  $k_v$  über der Längsbeschleunigung für jeweils feste  $\tau_i$ 's aufgetragen, exemplarisch für eine Beschleunigungs- mit anschließender Verzögerungsfahrt mit Zielgeschwindigkeit 100 km/h für die Geräte (a) L1\_1, (b) L1\_2, (c) L1/L2 und (d) Ref. Hierbei sind die entsprechenden Verzugszeiten berücksichtigt.



(a)

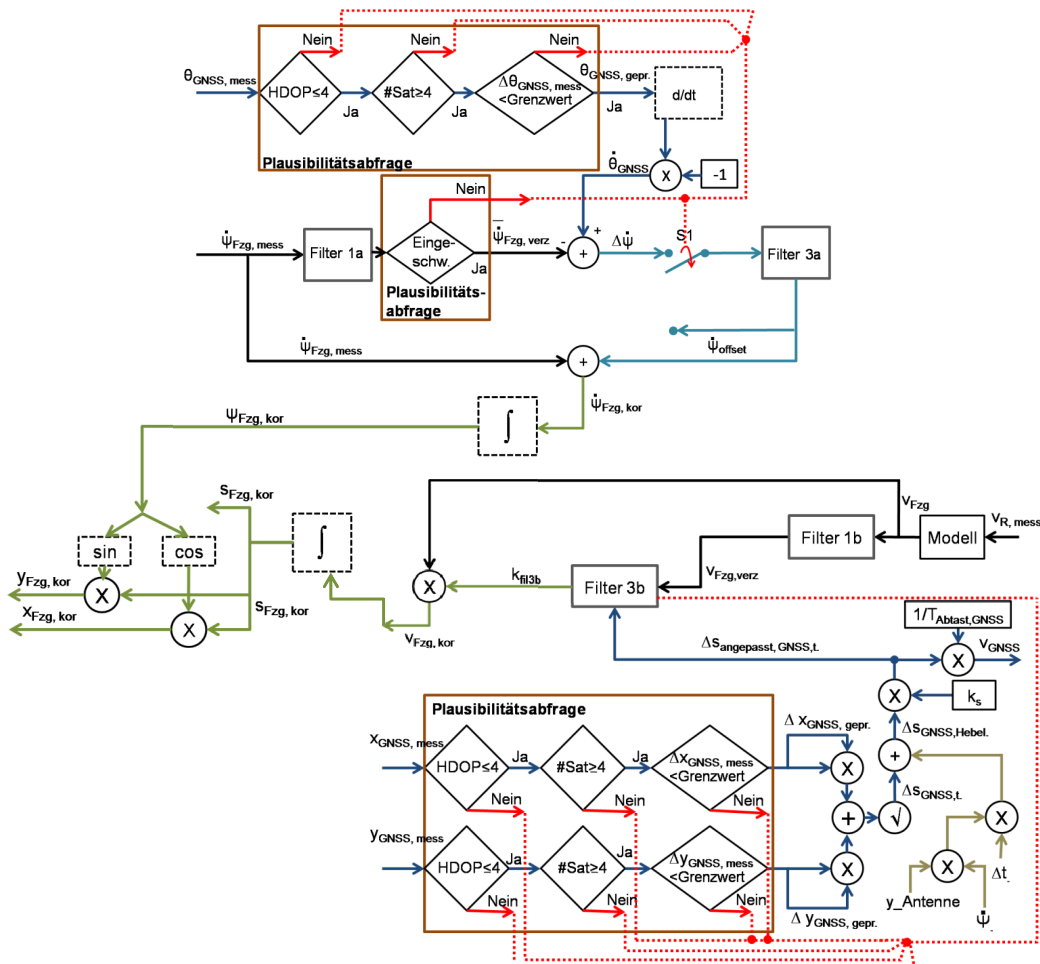


(b)

**Abbildung A.19:** (a) Exakter, (b) Approximierter Streckenfehler für alle eingesetzten GNSS-Empfänger mit Querbeschleunigung von  $3 \text{ m/s}^2$  bzw.  $10 \text{ m/s}^2$ .

## A.6 Ergänzung zum Ausblick

Die in dieser Arbeit realisierten Fusionsansätze können die Basis für die Stützung der Position darstellen. Auf Basis der bereits in Kapitel 5.3 vorgestellten Ansätze könnte ein möglicher Positionsfusionsansatz wie in Abbildung A.20 dargestellt aussehen. Diese Abbildung stellt ein Beispiel dar, da durchaus auch andere Ansätze denkbar sind.



**Abbildung A.20:** Blockschaltbild eines möglichen Fusionsansatzes für die Betrachtungsgröße Position.

---

# Literaturverzeichnis

- Ammon, Dieter:** Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik. B. G. Teubner Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-02378-4
- Autohaus (Hrsg.):** DAT-Report 2005. 2005, Sonderheft Autohaus extra 8 / 2005, Auto Business Verlag GmbH & Co.KG, München
- Autohaus (Hrsg.):** DAT-Report 2006. 2006, Sonderheft Autohaus extra 8 / 2006, Springer Transport Media GmbH, München
- Autohaus (Hrsg.):** DAT-Report 2007. 2007, Sonderheft Autohaus extra 8 / 2007, Auto Business Verlag GmbH & Co.KG, München
- Autohaus (Hrsg.):** DAT-Report 2008. 2008, Sonderheft Autohaus extra 7 / 2008, Springer Transport Media GmbH, München
- Back, Michael:** Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Universitätsverlag Karlsruhe, 2005, Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH) Band 02, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Karlsruhe, ISBN 3-86644-031-6
- Backfisch, Klaus Peter:** Das große Reifenbuch - Technik, Sicherheit, Fahrdynamik, Tuning. HEEL Verlag GmbH, Königswinter, 2006, ISBN 978-3-89880-656-1
- Barrenscheen, J./Eichhorn, Ulrich:** Mobilität der Zukunft. In Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel: Möglichkeiten, Grenzen, Risiken. 2001, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 469, S. 3-26, Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig
- Bauer, Horst (Hrsg.):** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch/Bosch. 22. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, ISBN 3-540-62219-5
- Bauer, Inge:** Positionierungssysteme für Baumaschinen über GPS. In Zeitschrift Tiefbau. Band 04/2007, 2007 (URL: [http://www.baumaschine.de/Portal/Tbg/2007/heft4/a230\\_231.pdf](http://www.baumaschine.de/Portal/Tbg/2007/heft4/a230_231.pdf)), S. 230-231, letzter Zugriff: 30.12.2007
- Bauer, Manfred/Wanninger, Lambert:** Vermessung und Ortung mit Satelliten - GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 5. Auflage. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2003, ISBN 3-87907-360-0

- Bauer, Oleg:** Planung von Geschwindigkeitsprofilen für automatisch geführte Fahrzeuge. VDI-Verlag, 2005, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 585, Dissertation an dem Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik an der Universität Siegen, ISBN 3-18-358512-X
- Becker, Matthias:** Globale Satellitennavigationssysteme - Wo stehen wir heute? DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 2007, INTERGEO, Leipzig
- Bevly, David M.:** Global Positioning System GPS: A Low-Cost Velocity Sensor for Correcting Inertial Sensor Errors on Ground Vehicles. In Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Band 126, Number 2, The American Society of Mechanical Engineers, ASME, June 2004, ISSN 0022-0434, S. 255-264
- Beyer, Jürgen/Wigger, Burkard:** Vorlesungsskript: Grundlagen der Navigation und Anwendungen. 2001, Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt
- Bittner, G.:** Autonome Fahrzeuge - Aufbau und erste Erfahrungsberichte. 17.-19. Oktober 2000, DGON - Symposium, Ortung und Navigation, GALILEO, Freising/Weihenstephan, S. 177-189
- Bleymueller, Josef/Gehlert, Günther/Gülicher, Herbert:** Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. 14. Auflage. Vahlen-Verlag, München, 2004, ISBN 3-800-63115-6
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.):** Deutscher Funknavigationsplan (DFNP). Telematica, Bonn/Berlin, 1999, Teil 2
- Bock, Th. et al.:** Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme. VDI Verlag, München, 2005, VDI-Bericht Nr. 1900, S. 1-16
- Bortz, Jürgen:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 2005, ISBN 3-540-21271-X
- Bosch, Robert GmbH (Hrsg.):** Technische Dokumentation DRSMM 2001. 2001
- Bosch, Robert GmbH (Hrsg.):** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch/Bosch. 26. Auflage. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007, ISBN 978-3-8348-0138-8
- Brasseur, Georg:** Fahrerassistenzsysteme. 24. November 2005, Herbsttagung des Forums Technik und Gesellschaft: Sehnsucht nach Sicherheit - Welche Antworten hat die Technik für die Menschen?
- Börner, Marcus:** Adaptive Querdynamikmodelle für Personenkraftfahrzeuge - Fahrzustandserkennung und Sensorfehlertoleranz. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2004, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 563, Dissertation an dem Fachgebiet Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 3-18-356312-6
- Bronstein, Ilja N. et al.:** Taschenbuch der Mathematik. 3. Auflage. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main und Thun, 1997, ISBN 3-8171-2003-6

- Conley, Rob et al.:** Performance of Stand-Alone GPS. In **Kaplan, Elliott D./Hegarty, Christopher J. (Hrsg.):** Understanding GPS: Principles and Applications. 2. Auflage. Artech House, Inc., Norwood, 2006, ISBN 1-58053-894-0. – Kapitel 7, S. 301ff
- Corrsys/Datron (Hrsg.):** Correvit S-400 Berührungsloser Optischer Sensor - Bedienungsanleitung. 2002
- DAT (Hrsg.):** DAT-Report 2003. 3. April 2003, kfz-betrieb dossier, Vogel Auto Medien GmbH Co.KG, Würzburg
- DAT (Hrsg.):** DAT-Report 2004. 15. April 2004, kfz-betrieb dossier, Vogel Auto Medien GmbH Co.KG, Würzburg
- DAT-Veedol (Hrsg.):** DAT-Veedol-Report 2002. 11. April 2002, kfz-betrieb dossier, Vogel Auto Medien GmbH Co.KG, Würzburg
- Dickmanns, E. D. et al.:** The seeing passenger car "VaMoRs-P". Oktober 1994, IEEE Industrial Electronics Society. Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium 1994, Paris, Frankreich, S. 22ff
- DIN1319:** Grundlagen der Messtechnik. 1995 (Teil 1), 2005 (Teil 2), 1996 (Teil 3), 1999 (Teil 4)
- DIN70000:** Straßenfahrzeuge, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe. 1994
- DIN70020-5:** Kraftfahrzeugbau; Reifen und Räder; Begriffe und Meßbedingungen. 1986
- DINISO7401:** Testverfahren für querdynamisches Übertragungsverhalten. 1988
- Discher, Christian:** Ein dynamisches Fehlermodell für die Satellitenortung in einem integrierten INS/GNSS-Navigationssystem. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003, [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968911668&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=968911668.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968911668&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=968911668.pdf), letzter Zugriff: 12.10.2006
- Dörries, Rene:** Die Entwicklung von Verfahrenskriterien für Präzisionsanflüge der Betriebsstufe I unter Verwendung bodengestützt augmentierter Satellitensysteme. Dissertation, Institut für Luft- und Raumfahrt - Fachgebiet Flugführung und Flugverkehr, Technische Universität Berlin, 2004, [http://edocs.tu-berlin.de/diss/2004/doerries\\_rene.pdf](http://edocs.tu-berlin.de/diss/2004/doerries_rene.pdf), letzter Zugriff: 30.12.2007
- Däubler, Lorenz/Bikker, Gert/Schnieder, Eckehard:** SATNAB - Satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment. In Signal+Draht (94). Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2002, Heft 6, S. 12-15
- Dudenhöffer, Ferdinand:** Wertwachstum durch Mikrotechnik: Fahrerassistenzsysteme. In inno - innovation, Dezember 2005, Dortmund. IVAM e.V., Fachverband für Mikrotechnik, 2005, 10. Jahrgang, Nr.32 [http://www.neuematerialien.de/index.php?content=inno\\_archiv](http://www.neuematerialien.de/index.php?content=inno_archiv), S. 4-5, letzter Zugriff: 12.12.2006



- Dudenredaktion, Wissenschaftlicher Rat (Hrsg.):** Duden, Band 5 - Das Fremdwörterbuch. 5. Auflage. Dudenverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1990, ISBN 3-411-20915-1
- Ehmans, Dirk et al.:** Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. 04.-06. Oktober 2000, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000, Aachen
- Engel, Thomas/Rutz, Andreas:** Starfire - Das DGPS-Netzwerk von John Deere und seine Nutzung auf Landmaschinen. Tagungsband VDI/MEG, 2002, Tagung Landtechnik, Zweibrücken, S. 293-298
- Falcone, Marco/Erhard, Phillipe/Hein, Guenter W.:** GALILEO. In **Kaplan, Elliott D./Hegarty, Christopher J. (Hrsg.):** Understanding GPS: Principles and Applications. 2. Auflage. Artech House, Inc., Norwood, 2006, ISBN 1-58053-894-0. - Kapitel 10, S. 559ff
- Farrel, Jay/Barth, Matthew:** The Global Positioning System and Inertial Navigation. McGraw-Hill, 1999, ISBN 0-07-022045-X
- Fairheller, Scott/Clark, Richard:** Other Satellite Navigation Systems. In **Kaplan, Elliott D./Hegarty, Christopher J. (Hrsg.):** Understanding GPS: Principles and Applications. 2. Auflage. Artech House, Inc., Norwood, 2006, ISBN 1-58053-894-0. - Kapitel 11, S. 595ff
- Filip, Ales/Mocek, Hynek/Bazant, Lubor:** Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen. In Signal+Draht (93). Band 5/2001, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2001, S. 16-21
- Filzek, Björn:** Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich. VDI-Verlag, 2003, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 536, Dissertation an dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 3-18-353612-9
- Fohr, Stefan:** Entwicklung und Implementierung eines Fehlermodells für GNSS-Signale. Februar 2008, Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Forschungsgesellschaft, für Straßen-und Verkehrswesen:** RAS-Q - Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte. 1996, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- Frank, D./Reichart, G.:** Grenzen der Verkehrssicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz. VDI Verlag, Düsseldorf, 25.-26. Mai 2000, VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme, VDI-Bericht Nr. 1546, S. 3-21
- Freyman, Raymond:** Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. BMW Group Forschung und Technik 2004

- Friedrich, H. et al.:** Auf dem Weg zum intelligenten Auto - Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen. VDI Verlag, Düsseldorf, 03.–04. Mai 2001, VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Bericht Nr. 1613, S. 277–296
- Geduld, Georg:** Collision Avoidance, Adaptive Cruise Control: Two similar Applications with different Kinds of Philosophy and Safety Impact. 21.–24. October 1997, Proceedings on the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, ICC Berlin; Brüssel: ITS
- Genesys (Hrsg.):** ADMA-G: Automotive Dynamic Motion Analyzer mit DGPS - Technische Dokumentation. 2006
- Gern, Axel et al.:** Robust Lane Recognition Using Vision and DGPS Road Course Information. IEEE 2001, 14.–17. May 2001, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, S. 1–6
- Goldbeck, J./Ernst, S./Kelch, L.:** Lane following combining vision and DGP. In Image and Vision Computing. Band 18, Issue 5, Elsevier Science B.V., December 2005, April 2001, S. 425–433
- Gopi, Satheesh.:** Global Positioning System - Principles and Applications. The McGraw-Hill, Heidelberg, 2005, Civil Engineering Series, ISBN 0–07–058599–7
- Grell, Detlef:** Rad am Draht. In c't magazin für computer technik. Band 14/2003, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, 2003 (URL: <http://www.heise.de/ct/03/14/170/default.shtml>), S. 170–183, letzter Zugriff: 10.10.2006
- Grewal, Mohinder S./Weill, Lawrence Randolph/Andrews, Angus P.:** Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. 2. Auflage. John Wiley - Interscience, 2007, ISBN 978–0–470–04190–1
- Gräfe, Gunnar/Lang, Martin/Banemann, Silvia:** Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme. VDI Verlag, Norderstedt, 2005, VDI-Bericht Nr. 1900, S. 311–326
- Görres, B. et al.:** Absolute calibration of GPS-antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. In GPS Solutions. Band 10, Number 2, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2006, ISSN 1080–5370, S. 136–145, doi: 10.1007/s10291-005-0015-3
- Götting, H.:** Automatische Lenkung von Kranen und Fahrzeugen mit Hilfe von DGPS. (URL: <http://www.goetting.de>), letzter Zugriff: 30.07.2006
- Gu, Xiaogang:** Die Machbarkeit von GNSS/Galileo-basierter Zugortung für sicherheitsrelevante Anwendungen. In Signal+Draht (97). Eurailpress, Hamburg, 2005, Heft 1+2, S. 6–11
- Gudat, Adam J./Colburn, Stephen/Harrold, Gregory R.:** Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Lage von Sämlingen während des Ackerbaus. Patent, 1999, DE 199 21 105 A 1, Veröffentlichung: 05.01.2000

- Hamberger, Werner:** Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädikativen Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung. VDI-Verlag, 1999, VDI Fortschrittsbericht, Reihe 12 Nr. 371, ISBN 3-18-337112-X
- Hannuschka, Andrea:** Vergleich INS mit GPS. (URL: [https://ypbind.de//maus/Vortraege/andrea76/andrea76\\_1.html](https://ypbind.de//maus/Vortraege/andrea76/andrea76_1.html)), letzter Zugriff: 22.12.2007
- Harms, Menno:** Mobile Navigationsgeräte - Marktzahlen und Trends. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., 15. März, Pressekonzferenz, Berlin, 2007
- Heinze, Ottmar:** Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems. Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1996, DGK Reihe C Nr. 459, Dissertation an dem Institut für Physikalische Geodäsie an der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 978-3-7696-9502-1
- Hermannski, U.:** Maschinensteuerung mit vollautomatischer Kontrolle der Höhe. In Zeitschrift Tiefbau. 2001, S. 256-257, Vortrag anlässlich des VDBUM-Seminars vom 20.-24. Februar in Braunlage
- Hipp, E./Schaller, K.-V.:** Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge - Stand und Ausblick. VDI Verlag, Düsseldorf, 03.-04. Mai 2001, VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Bericht Nr. 1613, S. 49-63
- Händler, Erik:** Untersuchung der Verfügbarkeit von verschiedenen Globalen Navigations-satellitensystemen (GNSS) im Fahrbetrieb und Bewertung der Genauigkeit der Daten zur Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). August 2006, Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard/Lichtenegger, Herbert/Collins, James:** Global Positioning System. Theory and Practice. 6. Auflage. Springer-Verlag, Wien, New York, 2007, ISBN 978-3-211-83534-0
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard/Lichtenegger, Herbert/Wasle, Elmar:** GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and More.
- Huster, Jochenn/Hartmann, Rald/Diekhans, Norbert:** Überladeassistenzsystem. Patent, 2004, DE 10 2004 052 298 A 1, Veröffentlichung: 08.06.2006
- ifmo, Institut für Mobilitätsforschung:** Zukunft der Mobilität - Szenarien für das Jahr 2025. Erste Fortschreibung. 1. Auflage. 2005
- Inoue, Keiich et al.:** Guidance System for Farm Work using GPS and Adaptive Control Method for Autonomous Tractor. 17.-19. Oktober 2003, GNSS - The European Navigation Conference, Graz, Austria, S. 239-252
- Isermann, Rolf:** Identifikation dynamischer Systeme. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1988, Band 1, ISBN 3-5405-4924-2

- Jacobson, Len:** GNSS Markets and Applications. In **Kaplan, Elliott D./Hegarty, Christopher J. (Hrsg.):** Understanding GPS: Principles and Applications. 2. Auflage. Artech House, Inc., Norwood, 2006, ISBN 1-58053-894-0. – Kapitel 12, S. 635ff
- Jungmann, Th.:** Paris 2004: Citroën präsentiert den neuen C4. [URL: http://www.all4engineers.com](http://www.all4engineers.com)), letzter Zugriff: 22.12.2007
- Kaempchen, Nico et al.:** Vernetzte Fahrzeug-Umfelderfassung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V. (fmrt), 2005, 3. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting im Altmühltal
- Kanz, C.:** Rechtliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen. Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 22.–24. September 2003, Tagungsband Workshop Fahrerassistenzsysteme, Leinsweiler/Pfalz, ISBN 3-9809121-0-8, S. 24–28
- KayserThrede:** Integrail. [URL: http://integrail.kayser-threde.com/ig-det.html](http://integrail.kayser-threde.com/ig-det.html)), letzter Zugriff: 29.12.2007
- Kayton, Myron/Fried, Walter R.:** Avionics Navigation Systems. John Wiley and Sons, 1997, ISBN 0-471-54795-6
- Kipka, Adrian:** Grossräumige GPS / INS Vermessung mittels virtueller Referenzstationen. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, 2006
- Klanner, Felix/Ehmanns, Dirk/Winner, Hermann:** ConnectedDrive - Vorausschauende Kreuzungsassistenz. ika Aachen 2006, 9.–11. Oktober 2006, Tagungsbeitrag zum 15. Aachener Kolloquium "Fahrzeug- und Motorentchnik"
- Kleine-Besten, Thomas et al.:** Navigation und Telematik. In **Winner, Hermann/Hakuli, Stephan/Wolf, Gabriele (Hrsg.):** Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 1. Auflage. Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0287-3. – Kapitel 39, S. 599ff
- Koch, Rainer:** Überwachungseinrichtung zur Überwachung von Containern. Patent, 2004, DE 10 2004 059 759 A 1, Veröffentlichung: 29.06.2006
- Kutzbach, Heinz Dieter/Stoll, Albert:** Führung von Landmaschinen mit GPS. Tagungsband VDI/MEG, 10.–11. Oktober 2000, Tagung Landtechnik, Münster, S. 331–336
- Kutzbach, Heinz Dieter/Stoll, Albert:** Autonome Fahrzeuge - Mit Satellitennavigation präzise fahren. In Landinfo. Band 3/2004, Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume, 2004, S. 16–24
- Lau, Oliver:** Gut gespurt – GPS-Tracks auswerten und bearbeiten. In c't - Magazin für Computertechnik. Band 19/2008, Heise Verlag, 2008, S. 112–120
- Lübke, Andreas:** Car-to-Car-Communication - Technologische Herausforderung. 2004, Kongressband zum VDE-Kongress 2004-Innovationen für Menschen - network-on-wheels.de

- Leach, Barrie W./Dillon, Jeremy/Rahbari, Roya:** Operational Experience with Optimal Integration of Low-Cost Inertial Sensors and GPS for Flight Test Requirements. In Canadian Aeronautics and Space Journal. Band 49, No. 2, June 2003, ISSN 0008–2821, S. 41–54
- Lenz, Werner:** Reaktivierung von Schienennebenstrecken durch den Einsatz satellitengestützten Zugleitbetriebs. Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 1999, [URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/734/pdf/Diplomarbeit\\_Lenz.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/734/pdf/Diplomarbeit_Lenz.pdf), letzter Zugriff: 29.12.2007
- Liang, D.:** An overview of a generic multi-sensor integrated navigation system design. In Aerospace Navigation System. North Atlantic Treaty Organization, 1995, AGAR-Dograp 331 1995, ISSN 0365–2467
- Luh, Steffen:** Untersuchung des Einflusses des horizontalen Sichtbereichs eines ACC-Sensors auf die Systemperformance. VDI-Verlag, 2007, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 659, Dissertation an dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 978–3–18–365912–8
- Mages, Mark/Hopstock, Matthias/Winner, Hermann:** Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistentz - Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2007, 14.–15. November 2007, Proceedings of Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig
- Mansfeld, Werner:** Satellitenortung und Navigation. Vieweg-Verlag, 2004, ISBN 3–528–16886–2
- Markgraf, Carsten:** Autonomes Fahren mit Hilfe der Magnetonageltechnik. Dissertation, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Universität Hannover, 2002
- Maurer, Markus:** Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. VDI-Verlag, 2000, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 443, Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, ISBN 3–18–344312–0
- Mayser, C. et al.:** Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr. BMW Group Forschung und Technik GmbH, München 2004
- Meffert, Beate/Hochmuth, Olaf:** Werkzeuge der Signalverarbeitung - Grundlagen, Anwendungsbeispiele, Übungsaufgaben. Pearson Studium, München, 2004, ISBN 3–8273–7065–5
- Meitinger, Karl-Heinz/Heißing, Bernd/Ehmanns, Dirk:** Linksabbiegeassistentz - Beispiel für die Top-Down-Entwicklung eines Aktiven Sicherheitssystems. TÜV-Süd und Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (ftm) der TU München, 4.–5. April 2006, 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching bei München
- Mercedes-Benz (Hrsg.):** Tabellenbuch Personenwagen - Typ 163, 168, 170, 203, 208, 210, 215, 220. DaimlerChrysler AG - Teile-Technik und Technische Informationen (GSP / SI), 2001, Mai 2001

- Metzler, H.G.:** Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung. In **Willumeit, Hans-Peter/Kolrep, Harald (Hrsg.):** Wohin führen Unterstützungssysteme? Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. Pro Universitate Verlag, 1998, ZMMS-Spektrum Band 5, ISSN 0949-734X, S. 206-225
- Metzler, Patrick/Flohr, Werner/Höh, Michael:** System zur Bestimmung der relativen Position eines zweiten landwirtschaftlichen Fahrzeugs in Bezug auf ein erstes landwirtschaftliches Fahrzeug. Patent, 2004, DE 10 2004 039 460 B 3, Veröffentlichung: 20.04.2006
- Mineta, Kenichi/Unoura, Kiyozumi/Ikeda, Tetsuo:** Development Of A Lane Mark Recognition System For A Lane Keeping Assistant System. 2003, SAE-Paper 2003-01-0281
- Mitschke, Manfred:** Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C: Fahrverhalten. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong, 1990, ISBN 978-3-540-15476-0
- Mitschke, Manfred/Wallentowitz, Henning:** Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004, ISBN 3-540-42011-8
- Müller, Maximilian:** Validierung der Messtechnik zur Genauigkeitsbewertung von Trajektorien - Teil 1. Februar 2007a, Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Müller, Maximilian:** Validierung der Messtechnik zur Genauigkeitsbewertung von Trajektorien - Teil 2. Oktober 2007b, Ergänzung zur Studienarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Mörbe, Matthias:** Fahrdynamik-Sensoren für FAS. In **Winner, Hermann/Hakuli, Stephan/Wolf, Gabriele (Hrsg.):** Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 1. Auflage. Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0287-3. – Kapitel 10, S. 94ff
- Naab, Karl:** Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit. 2004, BMW Group, München
- Nagle, Thomas J. et al.:** Automotive Concepts For Use Of The Modernized Global Positioning System (GPS). 2003, SAE-Paper 2003-01-0538
- Natke, Hans Günther:** Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 1983, ISBN 978-3-5280-8145-7
- Nöcker, Gerhard/Mezger, Klaus/Kerner, Boris:** Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme. Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V. (fmrt), 2005, 3. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting im Altmühltal
- Nelson, William:** Use of Circular Error Probability in Target Detection. ESD-TR-88-109 May 1988, Hascom Air Force Base, Bedford, Massachusetts

- Neunzig, Dirk/Benmimoun, A./Sandkühleret, D.:** Vom Bremsassistent über ACC zur automatischen Notbremsung? 2005, 3. CTI Fachkonferenz Fahrerassistenzsysteme, Stuttgart
- Nielsen, Wolfgang et al.:** Informationsfusion für Fahrerassistenzsysteme. In **Maurer, Markus/Stiller, Christoph (Hrsg.):** Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Springer Verlag, 2005, ISBN 978-3-540-23296-4. – Kapitel 3, S. 43–58
- N.N.:** Automatische Einbuchung.  $\langle$ URL: [http://www.tollcollect.de/mautsystem/tcrdifr002-1\\_autom\\_einbuchung.jsp](http://www.tollcollect.de/mautsystem/tcrdifr002-1_autom_einbuchung.jsp); jsessionid=C100FA925584B6F92B220EA75D09C46F $\rangle$ , letzter Zugriff: 22.12.2007
- N.N.:** Fahrerlose Lkw in Aktion, Automatisierung mit integriertem Antrieb. In Zeitschrift Hebezeuge und Fördermittel. Band 41/2001, 2001, S. 404–405
- Noack, Patrick Ole:** Entwicklung fahrspurbasierter Algorithmen zur Korrektur von Ertragsdaten im Precision Farming. Technische Universität München, 2006, Dissertation an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München
- Pacejka, Hans B.:** Tyre and Vehicle Dynamics. 2. Auflage. Butterworth-Heinemann, 2006, Vogel Fachbuch, ISBN 980-0-7506-6918-7
- Park, Minha:** Error Analysis and Stochastic Modelling of MEMS based Inertial Sensors for Land Vehicle Navigation Applications. Master Thesis, UCGE Report 20194, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary (Calgary), CANADA, 2004,  $\langle$ URL: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/Papers/Thesis/YG/04.20194.MinhaPark.pdf> $\rangle$ , letzter Zugriff: 17.01.2008
- Petovello, Mark:** Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation. PhD Thesis, Department of Surveying Engineering, University of Calgary (Alberta), 2003, UCGE Report 20173
- Pfister, Jörg:** Sicherheitsrelevante Navigation für ein neues Rollführungskonzept am Flughafen Frankfurt/Main. Shaker Verlag GmbH, 2000, Dissertation an dem Fachgebiet für Flugmechanik und Regelungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 978-3-826-57429-0
- Pfister, Jörg et al.:** Design of a High End Navigation Unit applying GNSS, LORAN-C and Dead Reckoning Sensors. 2002, 3rd International Symposium on Integration of LORAN-C/EUROFIX and EGNOS/Galileo in Munich
- Pfister, Jörg et al.:** Galileo Systemsimulation zur Bewertung kombinierter Methoden der Positionsbestimmung. Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), 29.–30. November 2006, Proceedings of DGON - Symposium Positionierung und Navigation, Göttingen
- Reichart, G.:** Einsatz der Telekommunikation für fahrerunterstützende Systeme. In **Siegle, G. (Hrsg.):** Telematik im Verkehr. 1996, S. 193–206

- Reichart, G.:** Sichere Elektronik im Kraftfahrzeug. In at Automatisierungstechnik. Oldenbourg Verlag, München, 1998, Jahrgang 46, Heft 2, S. 78–83
- Reichart, G./Lerner, G.:** Systeme zur Fahrerunterstützung. In **Datow, M. (Hrsg.):** Verkehrstelematik - Projekte und Strategien. Kongressdokumente TTE 1995, Berlin, 1995, S. 193–206
- Reimpell, Jörnßen/Betzler, Jürgen; Reimpell, Jörnßen (Hrsg.):** Fahrwerktechnik: Grundlagen. 4. Auflage. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2000, Vogel Fachbuch, ISBN 3-8023-1727-0
- Reimpell, Jörnßen/Sponagel, Peter:** Fahrwerktechnik: Reifen und Räder. 2. Auflage. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1988, Vogel Fachbuch, ISBN 3-8023-0737-2
- Rothacher, Markus/Zebhauser, Benedikt:** Tutorial Einführung in GPS. 23.–24. Mai 2000, 3. Sapos-Symposium
- Rottmann, Frank:** Wertwachstum durch Mikrotechnik: Fahrerassistenzsysteme. In inno - innovation, Dezember 2005, Dortmund. IVAM e.V., Fachverband für Mikrotechnik, 2005, 10. Jahrgang, Nr.32 (URL: [http://www.neuematerialien.de/index.php?content=inno\\_archiv](http://www.neuematerialien.de/index.php?content=inno_archiv)), S. 6–7, letzter Zugriff: 12.12.2006
- Rummel, Reiner/Peters, Thomas:** Vorläufiges Vorlesungsmanuskript: Bezugssysteme. 2007, letzter Zugriff: 13.01.2008 (URL: [http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~iapg/web/lehre/skripten/Mitschrift\\_BS\\_2007.pdf](http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~iapg/web/lehre/skripten/Mitschrift_BS_2007.pdf))
- Ryu, Jihan:** State and Parameter Estimation for Vehicle Dynamics Control Using GPS. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 2004
- Ryu, Jihan/Gerdes, Christian J.:** Integration Inertial Sensors With Global Positioning System (GPS) for Vehicle Dynamics Control. In Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Band 126, Number 2, The American Society of Mechanical Engineers, ASME, June 2004, ISSN 0022-0434, S. 243–254
- Ryu, Jihan/Rossetter, E. J./Gerdes, Christian J.:** Vehicle Sideslip and Roll Parameter Estimation using GPS. AVEC 2002, 09.–13. September 2002, Proceedings of AVEC 2002, 6th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan, 2002
- Sawabe, Mikio:** Status of QZSS Project. Institute of Geodesy and Navigation University FAF Munich, 21.–23. February 2006, Munich Satellite Navigation Summit
- Schmidt, Doris/Winner, Hermann:** Kombination von Fahrdynamiksenor- und Globalen Navigationssatellitensystemdaten zur Performanceverbesserung von Fahrerassistenzsystemen. Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), 06.–07. November 2007, Proceedings of DGON - Symposium Positionierung und Navigation, Magdeburg
- Schraut, Michael:** Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation,



- Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, 2000, [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=962057894&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=962057894.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=962057894&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=962057894.pdf)}, letzter Zugriff: 13.01.2008
- Schröder, Caterina:** EU-Kommission: ESP und Spritspar-Reifen sollen Leben und Umwelt retten. <http://www.atz-online.de/index.php;do=show/alloc=1/lng=de/id=7909/site=a4e/sid=6736ff1f7aa84c9791661db20f3cd82c>}, letzter Zugriff: 24.05.2008
- Seeber, Günter:** Satellite Geodesy. 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2003, ISBN 3-11-017549-5
- Söhne, Wolfgang:** Ein hybrides System in der Geodäsie. Einsatz des NAVSTAR GPS mit dem Strapdown-Inertial-Navigationssystem LASERNAV II für kinematische Punktbestimmung und Orientierung. Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1996, DGK, Reihe C Nr. 463, Dissertation am Institut für Physikalische Geodäsie, Technischen Universität Darmstadt, ISBN 978-3-769-69504-5
- Simon, Andreas:** Führung eines autonomen Straßenfahrzeugs mit redundanten Sensorsystemen. VDI-Verlag, 2003, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 554, Dissertation an dem Institut für Regelungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig, ISBN 3-18-355412-7
- Solimeno, Adriano:** Low-Cost INS/GPS Data Fusion with Extended Kalman Filter for Airborne Applications. Master Thesis L57574, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007, <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/126262/1/dissertacao.pdf>}, letzter Zugriff: 20.10.2007
- Sorvik, Bengt:** Holzernteverfahren und System für die Forstwirtschaft. Patent, 1997, DE 697 18 349 T 2 bzw. EP 0 957 674 B 1, Veröffentlichung: 06.11.2003
- Stanag4278:** Method of Expressing Navigation Accuracies. Military Agency for Standardization, North Atlantic Treaty Organization Headquarters, Brussels, August 1993, NATO Standardization Agreement, Edition 3
- Stempfhuber, Werner Vitus:** Kalibrierung GPS gestützter Positionsbestimmung in Precision Farming. 2002, S.1-13, <http://www.geo.bv.tum.de/de/mitarb/stempfhuber/9.\%20Kalibrierung\%20GPS\%20gest\%F0tztter\%20Positionsbestimmung\%20in\%20Precision\%20Farming.pdf>}, letzter Zugriff: 30.12.2007
- Stempfhuber, Werner Vitus:** Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Dissertation, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München, 2004
- Stenbid, J. P.:** Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence, Washington, DC, U.S.A., 2001

- Stiller, Christoph:** Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In **Maurer, Markus/Stiller, Christoph (Hrsg.):** Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Springer Verlag, 2005, ISBN 978-3-540-23296-4. – Kapitel 1, S. 1–20
- Stiller, Christoph/Pöchmüller, W./Hürtgen, B.:** Stereo vision in driver assistance systems. 1997, Proceedings of IEEE Int. Conf. Intel. Transportation Systems, Bd. CD-ROM Nr. 3701
- Stoll, Albert:** Autonome Leitlinienplanung für die Schwadführung. In **(KTBL), Darmstadt, Landtechnik-Vereinigung im VDMA (LAV) Frankfurt/Main Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Düsseldorf Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.):** Landtechnik. Band 2/2001, 2001, ISSN 0023-8082, S. 76–77
- Thrun, Sebastian:** Stanley: The Robot that Won The DARPA Grand Challenge. Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford 2005
- Titterton, David H./Weston, John L.:** Strapdown Inertial Navigation Technology. 2. Auflage. IEE, London, 2004, IEE Radar, Sonar and Navigation series 17, ISBN 0-86341-358-7
- Vallant, Johannes:** GLORIA. In The Navigation View. Band III / 2002, 2002, S. 1–9
- Van Zanten, Anton/Kost, Friedrich:** Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In **Winner, Hermann/Hakuli, Stephan/Wolf, Gabriele (Hrsg.):** Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 1. Auflage. Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0287-3. – Kapitel 25, S. 356ff
- Vasek, Thomas:** Rechner auf Rädern. In Technology Review. Band 07/2004, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, 2004, S. 20–41
- Walchko, Kevin:** Low Cost Inertial Navigation: Learning to integrate noise and find your way. Master Thesis, Machine Intelligence Laboratory, University of Florida, 2002, [http://www.mil.ufl.edu/publications/thes\\_diss/Kevin\\_Walchko\\_thesis.pdf](http://www.mil.ufl.edu/publications/thes_diss/Kevin_Walchko_thesis.pdf), letzter Zugriff: 29.12.2007
- WdK, Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie:** PkW-Reifen, Abrollumfang, Geschwindigkeitsabhängigkeit. Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V., Frankfurt, Oktober 1992, Leitlinie 107-1
- Weltzien, Cornelia:** GPS-Empfänger Vergleich - Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung. In geo-konzept. Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V., Prüf stelle für Landmaschinen, Potsdam-Bornim, 2003, DLG-Prüfbericht 5148F
- Wendel, Jan:** Entwurfs- und Analysemethoden Integrierter Navigationssysteme. Universität Karlsruhe, 2003, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe
- Wendel, Jan:** Integrierte Navigationssysteme. Oldenbourg-Verlag, 2007, ISBN 978-3-486-58160-7

- Winner, Hermann:** Adaptive Cruise Control. In **Jurgen, R. (Hrsg.):** Automotive Electronics Handbook. 2. Auflage. McGraw-Hill Handbooks, 2001, ISBN 0-07-034453-1, S. 31.1 ff
- Winner, Hermann; Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Hrsg.):** Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC. Christiani, Konstanz, 2002, Gelbe Reihe, ISBN 978-3-8652-2018-9
- Winner, Hermann:** Vorlesungsskript: Kraftfahrzeuge II. 2004, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Winner, Hermann:** Vorlesungsskript: Fahrerassistenzsysteme. 2006a, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Winner, Hermann:** Vorlesungsskript: Kraftfahrzeuge I. 2006b, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt
- Winner, Hermann:** Mit aktiven Sensoren das Kfz-Umfeld erfassen - Funktion und Leistungsfähigkeit von Radar & Co. In **Stiller, Christoph (Hrsg.):** it Information Technology, 49. Band 1/2007, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2007, ISSN 1611-2776, S. 17-24
- Winner, Hermann/Danner, Bernd/Steinle, Joachim:** Adaptive Cruise Control. In **Winner, Hermann/Hakuli, Stephan/Wolf, Gabriele (Hrsg.):** Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 1. Auflage. Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0287-3. – Kapitel 32, S. 478ff
- Zabler, Erich et al.; Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Hrsg.):** Sensoren im Kraftfahrzeug. Robert Bosch, Stuttgart, 2001, Gelbe Reihe Ausgabe 2001, ISBN 3-7782-2031-4
- Zabler, Erich et al.; Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Hrsg.):** Sensoren im Kraftfahrzeug. Robert Bosch, Stuttgart, 2007, Gelbe Reihe Ausgabe 2007, ISBN 978-3-86522-021-9
- Zogg, Jean-Marie:** Grundlagen der Satellitennavigation – User’s Guide. u-blox, 2006
- Zomotor, A.:** Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. 1. Auflage. Vogel-Fachbuch, Würzburg, 1987, ISBN 3-8023-0774-7
- Zukunft, Detlef:** Anwendungspotential und DLR-Expertise. In Exposé Galileo im Verkehr. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in der Helmholtz-Gemeinschaft, Köln, 2005

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Doris Schmidt  
Geburtsdatum: 30. Oktober 1976  
Geburtsort: Würzburg  
Familienstand: ledig  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Schulzeit

09/1983 – 08/1987 Grundschole, Waldbrunn  
09/1987 – 06/1996 Deutschhaus-Gymnasium, Würzburg  
Leistungskurse: Mathematik, Wirtschafts-und Rechtslehre  
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife am 20. Juni 1996

## Studium

10/1996 – 11/2002 Technische Universität Darmstadt  
Studium des Allgemeinen Maschinenbaus  
Abschluss: Diplom-Ingenieur am 26. November 2002  
04/2003 – 01/2007 FernUniversität Hagen  
Zusatzstudium Wirtschaftswissenschaften  
Abschluss: Diplom-Wirtschaftsingenieurin am 26. Januar 2007

## Berufstätigkeit

03/2003 – 04/2004 Technische Universität Darmstadt  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet  
Numerische Berechnungsverfahren bei  
Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer  
05/2004 – 03/2008 Technische Universität Darmstadt  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet  
Fahrzeugtechnik bei Prof. Dr. rer. nat.  
Hermann Winner  
Seit 07/2008 Daimler AG Sindelfingen  
Entwicklungsingenieurin