

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Standardisierte fehlertolerante Signaldatenaufbereitung für vernetzte Fahrwerkregelsysteme

Wolf Herwig Ahrholdt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 02.08.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.02.2011 angenommen.

Catastrophe equals opportunity.

From the motion picture "King of California"

Kurzfassung

Signaldataaufbereitungen sind elementarer Bestandteil sicherheitsrelevanter Fahrwerkregelsysteme. Sie stellen die Einhaltung der Signalanforderungen an die Fahrdynamiksensorik über die Erhöhung der Signalgenauigkeit sowie die fortwährende Überwachung auf Sensorfehler sicher. Ihre Notwendigkeit ist vor allem durch den direkten Eingriff der Regelsysteme in das Fahrverhalten und die durch den engen Straßenverkehrsraum limitierte Reaktionszeit bei unzulässigen Signalabweichungen gegeben.

Die steigende Anzahl von Fahrwerkregelsystemen sowie die Vernetzung der Systeme untereinander bieten die Möglichkeit, die Entwicklungsumfänge unterschiedlicher Fahrwerkregelsysteme zu bündeln. Eine zentrale Signaldataaufbereitung (ZSDA) kann sowohl als Quelle zugeschnittener Signaldataaufbereitungen für einzelne Fahrwerkregelsysteme als auch als zentrale Komponente zur Versorgung mehrerer Regelsysteme in einem Fahrzeug dienen. Da bestehende Konzepte notwendige nicht-funktionale Anforderungen wie Wiederverwendbarkeit einzelner Implementierungsteile und Skalierbarkeit nicht abdecken, wird in dieser Arbeit die Realisierbarkeit einer ZSDA umfassend untersucht. Ausgangspunkt ist die Erhebung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen an das Zielsystem, die aus dem präsentierten Stand der Technik bezüglich Softwarearchitekturen, Signaldataaufbereitungen und Fahrwerkregelsystemen abgeleitet werden. Entscheidenden Einfluss auf den Entwurf hat die zugrunde liegende Softwarearchitektur, die die Berücksichtigung insbesondere der nicht-funktionalen Anforderungen gewährleistet. Das auf diese Weise entwickelte Konzept mündet in einem Prototyp, mit dessen Hilfe die Realisierbarkeit und die Leistungsfähigkeit des Konzepts demonstriert werden. Abschließend erfolgen eine umfassende Bewertung der Systemeigenschaften basierend auf den erhobenen Anforderungen und eine Abgrenzung der ZSDA von konventionellen Signaldataaufbereitungen.

Abstract

Signal processing units are a fundamental part of safety relevant chassis control systems. Their main task is to ensure the fulfillments of signal specifications regarding the sensors of driving dynamics and the continuous monitoring of sensor failures. The necessity of signal processing units is given due to the direct intervention of the chassis control systems with the vehicle's driving behaviour and, furthermore, due to the limited response time in case of prohibited signal deviations based on the bounded space for vehicle motion.

The increasing number of chassis control systems as well as their integration to interacting overall systems provides the possibility to summarize development activities of different control systems. A centralized signal processing unit is capable of acting either as a source of tailored signal processing units for single control systems or as a central entity that provides common and consistent signals for all involved control systems. Since existing approaches do not cover non-functional requirements like reusability of parts of the implementation and scalability, the practicability of a centralized component is intensively analysed in this thesis. For this reason, functional and non-functional requirements defining the central signal processing unit are developed based on the presented state of the art regarding the fields of software architecture, signal processing units and chassis control systems. Crucial impact on the design is carried out by the software architecture, which assures the consideration of non-functional requirements. The final concept is accomplished by a prototype implementation, which is used to demonstrate the realization and the performance of the system. Finally, an evaluation of the system characteristics is carried out based on the raised requirements and by presenting the achievements compared to a conventional signal processing unit.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als Doktorand bei der AUDI AG im Bereich der Fahrwerkregelsysteme. Dieser Zeitraum prägte mich persönlich wie fachlich nachhaltig und lies mich die unterschiedlichen Perspektiven von Wissenschaft und Praxis erfahren.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing (i. R.) vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München für die Betreuung der Arbeit von Hochschulseite. Die mir überlassenen Freiräume haben ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet. Für die freundliche Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann vom Lehrstuhl für Regelungstechnik ebenfalls an der Technischen Universität München.

Für die Anregung zum Thema und die Betreuung der Dissertation von Unternehmensseite spreche ich Dr.-Ing. R. Schwarz meinen Dank aus. Für ihre inhaltlichen Anregungen danke ich darüber hinaus auch meinen geschätzten Kollegen Dr.-Ing. Johann Fuchs und Dr. techn. Michael Wegscheider.

Mein Dank gilt auch den Studenten, die mich während meiner Zeit als Doktorand unterstützt haben.

Allen meinen Wegbegleitern gilt mein besonderer Dank. Sie schufen durch ihr freundliches Wesen eine konstruktive Arbeitsatmosphäre und sorgten für die notwendigen gedanklichen Freiräume. Aus den unzähligen Gesprächen und Diskussionen gingen viele fachliche Impulse, aber auch kritische Anmerkungen hervor, die mich inspiriert und damit diese Arbeit bereichert haben. Für den gegenseitigen Antrieb und seine Ratschläge gilt mein Dank insbesondere Dipl.-Math. oec. Thomas Reiß. Für die bereichsübergreifende Unterstützung danke ich außerdem Dipl.-Ing. Daniel Köhler.

Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich ganz herzlich. Für Alles.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Symbole und Abkürzungen	viii
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Fahrwerkselektronik im Automobilbereich	1
1.2 Situationsanalyse und Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	5
2 Regelungstechnik im Fahrwerksbereich	7
2.1 Regelkreis	7
2.2 Modellbildung der Regelstrecke	7
2.2.1 Beschreibung der Fahrzeugbewegung	8
2.2.2 Einspurfahrzeugmodell	9
2.2.3 Zweispurfahrzeugmodell	11
2.2.4 Eigenlenkverhalten	13
2.3 Fahrwerkregelsysteme	13
2.4 Vernetzte Fahrwerkregelsysteme: Stand der Technik	15
2.4.1 Funktionsintegration	15
2.4.2 Hardwarearchitektur	15
2.4.3 Softwarearchitektur	16
2.4.4 Prozessintegration	17
2.5 Zusammenfassung	17
3 Signaldatenaufbereitungen für Fahrwerkregelsysteme	19
3.1 Notwendigkeit	19
3.2 Aufgaben	20
3.2.1 Sensorabgleich	21
3.2.2 Sensorüberwachung	22
3.2.3 Schätzgrößen	24
3.3 Realisierung von Signaldatenaufbereitungen: Stand der Technik	24
3.3.1 Methoden des Sensorabgleichs	24
3.3.2 Methoden der Fehlererkennung	29
3.3.3 Methoden der Fehlerdiagnose	39
3.4 Zusammenfassung	39
4 Softwarearchitekturentwurf für Signaldatenaufbereitungen	41
4.1 Beschreibung von Softwarearchitekturen	41
4.2 Qualitätsattribute und Entwurfsprinzipien	42
4.3 Architekturstile	43
4.4 Architekturentwurf für fehlertolerante Systeme: Stand der Technik	44
4.4.1 Bestehende Ansätze zur Sensorüberwachung im Fahrzeug	44

4.4.2	Ganzheitliche Entwurfsstrategien	47
4.5	Bewertung von Softwarearchitekturen	52
4.6	Zusammenfassung	53
5	Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung	54
5.1	Anforderungen von Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsystemen	54
5.1.1	Antriebsmomentenverteilung	55
5.1.2	Lenkung	56
5.1.3	Vertikaldynamik	58
5.1.4	Bremse und Stabilität	59
5.1.5	Assistenzsysteme	61
5.1.6	Übersicht über die Ergebnisse	61
5.2	Anforderungen aufgrund der Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen	63
5.3	Allgemeine Anforderungen	64
5.4	Zusammenfassung	66
6	Konzept einer zentralen Signaldatenaufbereitung	68
6.1	Entwurf der Softwarearchitektur	68
6.1.1	Interaktion mit der Umgebung	68
6.1.2	Anpassung an die Umgebung	72
6.1.3	Struktur des Gesamtsystems	75
6.2	Entwurf des Funktionsumfangs	79
6.2.1	Erhöhung der Signalgenauigkeit	79
6.2.2	Absicherung der Signalqualität	80
6.2.3	Kommunikation der Signalqualität	83
6.2.4	Applikation des Gesamtsystems	86
6.3	Zusammenfassung	86
7	Implementierung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung	88
7.1	Softwarearchitektur	88
7.1.1	Hierarchische Dekomposition	88
7.1.2	Vernetzungsdatenbank	91
7.1.3	Konfiguration des Gesamtsystems	93
7.1.4	Fehlerbehandlung	93
7.1.5	Abtastzeitunabhängige Parametrierung	97
7.1.6	Zeitverhalten	99
7.2	Funktionsumfang	100
7.2.1	Vorbereitung	100
7.2.2	Gierwinkelgeschwindigkeit	102
7.2.3	Querbeschleunigung	105
7.2.4	Fahrzustand	105
7.2.5	Modellgrößen	106
7.2.6	Rückführung	109
7.3	Zusammenfassung	109
8	Bewertung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung	111
8.1	Versuchsaufbau	112
8.1.1	Fehlerarten	112
8.1.2	Versuchsfahrzeuge	112

8.1.3	Versuchsumgebung	112
8.1.4	Fahrmanöver	113
8.2	Bewertung der Nullpunktfehlerbestimmung	114
8.3	Bewertung der Fehlererkennungsmethoden	117
8.3.1	Signalbasierte Methoden	117
8.3.2	Modellbasierte Methoden	119
8.3.3	Redundanzbasierte Methoden	123
8.3.4	Vergleich der Fehlererkennungsmethoden	127
8.4	Bewertung des Einflusses von Sensorabgleichen auf die Fehlererkennung	131
8.5	Bewertung der reduzierten Taktung einzelner Funktionen	132
8.6	Bewertung der Fehlerbehandlung	133
8.6.1	Externe Fehler	134
8.6.2	Interne Fehler	137
8.7	Bewertung nicht-funktionaler Anforderungen	138
8.8	Unbewertete Anforderungen	140
8.9	Bewertung gegenüber konventioneller Signaldatenaufbereitung	140
8.10	Zusammenfassung	142
9	Zusammenfassung	144
	Literaturverzeichnis	147
A	Technische Daten	156
A.1	Entwicklungsumgebung	156
A.2	Sensorspezifikationen	156
A.3	Fahrzeugdaten	157
B	Mathematische Herleitungen	159
B.1	Gleitender Mittelwert	159
B.2	Abtastzeitunabhängige Filterzeitkonstante für ein diskretes Verzögerungsglied erster Ordnung	159
B.2.1	Variante 1	159
B.2.2	Variante 2	160
B.3	Rekursive Parameterschätzung	161
C	Messungen	163

Symbole und Abkürzungen

Mathematische Definitionen

\bar{a}	Mittelwert
\hat{a}	Schätz- oder Modellgröße
$\dot{a} = \frac{da}{dt}$	Erste zeitliche Ableitung der Größe a
$\ddot{a} = \frac{d^2a}{dt^2}$	Zweite zeitliche Ableitung der Größe a
$\overset{\cdot}{\ddot{a}} = \frac{d^3a}{dt^3}$	Dritte zeitliche Ableitung der Größe a
$\mathbf{a} = [a_1 a_2 \dots a_i]^T$	Vektor ($i \in \mathbb{N}$)
$\mathbf{a}^T = [a_1 a_2 \dots a_i]$	Transponierter Vektor ($i \in \mathbb{N}$)
$\mathbf{A} = [a_{ij}]$	Matrix ($i, j \in \mathbb{N}$)
$\mathbf{A}^T = [a_{ji}]$	Transponierte Matrix ($i, j \in \mathbb{N}$)

Griechische Symbole

$\alpha_{\langle h,v \rangle}$	Schräglaufwinkel Hinter-/Vorderrades (Einspurmodell) [rad]
$\alpha_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$	Schräglaufwinkel des linken/rechten Hinter-/Vorderrades (Zweispurmodell) [rad]
β	Schwimmwinkel [rad]
β_{Ref}	Schwimmwinkelreferenz [rad]
Γ	Signalvektor
γ	Korrekturfaktor
Δy	Abweichung der Größe y
Δy_{max}	Maximale Abweichung der Größe y
δ	Lenkradwinkel [rad]
$\delta_{\langle h,v \rangle}$	Radlenkwinkel (gemittelt) Hinter-/Vorderachse [rad]
ϵ	Prozessrauschen
$\zeta_{\langle h,v \rangle}$	Differenz der Schwenkradien der Hinter-/Vorderräder [rad]
Θ	Parametervektor
θ	Nickwinkel [rad]
ν	Messrauschen
$\rho_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$	Schwenkradius des linken/rechten Hinter-/Vorderrades (Zweispurmodell) [m]
φ	Wankwinkel [rad]
ψ	Gierwinkel [rad]
$\dot{\psi}_{\text{Grd,max}}$	Maximaler Gradient der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Mess}}$	Gemessene Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Np}}$	Nullpunktfehler der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Np,max}}$	Maximaler Nullpunktfehler der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Np,Tol}}$	Nullpunktfehlertoleranz der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Rau,max}}$	Maximale Signaländerung (Rauschen) der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{Ref}}$	Gierwinkelgeschwindigkeitsreferenz $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
$\dot{\psi}_{\text{SALM}}$	Mit dem SALM-Ansatz ermittelte Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$

$\omega_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$	Raddrehzahl des linken/rechten Hinter-/Vorderrades $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
ω_{Rad}	Raddrehzahl (allgemein) $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$
σ	Standardabweichung zur Auswertung der Qualität der Modellgrößen
σ_{stat}	Mathematisch definierte Standardabweichung
σ_{verf}	Standardabweichung, gemittelt über den verfügbaren Zeitraum t_{verf} einer Modellgröße
σ_{zul}	Standardabweichung, gemittelt über den zulässigen Zeitraum t_{zul} einer Modellgröße
$\sigma_{\langle \dot{\psi}, \ddot{y}_{\text{Fzg}} \rangle}$	Standardabweichung des additiven Signalrauschens der Gierwinkelgeschwindigkeit $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$ bzw. der Querbeschleunigung $[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$

Lateinische Symbole

0	Nullmatrix
A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Ausgangsmatrix
$c_{\alpha, \langle h,v \rangle}$	Schräglaufsteifigkeit (gemittelt) Hinter-/Vorderachse $[\frac{\text{N}}{\text{rad}}]$
$c_{n \cdot t_Z}$	Filterkoeffizient bei einer Abtastzeit von $n \cdot t_Z$ [-]
E	Erwartungswert
e	Fehler
F_{Em}	Maximaler Empfindlichkeitsfehler einer Messgröße
F_{Np}	Maximaler Nullpunktfehler einer Messgröße
$F_{y, \langle h,v \rangle}$	Seiten-/Querkräft (gemittelt) Hinter-/Vorderachse [N]
f_{Em}	Empfindlichkeitsfehler einer Messgröße
f_{Np}	Nullpunktfehler einer Messgröße
f_{Rau}	Rauschfehler einer Messgröße
g	Erdbeschleunigung $[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$
$g(x)$	Aktivierungsfunktion
H	Lösung der Ricatti-Gleichung
I	Einheitsmatrix
i	Natürliche Zahl
J_z	Massenträgheitsmoment um die z -Achse $[\text{kg m}^2]$
j	Natürliche Zahl
K	Konstante [-]
K_{Em}	Koeffizient bzgl. der maximalen Empfindlichkeitsfehler [-]
K_{Np}	Koeffizient bzgl. der maximalen Nullpunktfehler [-]
k_M	Filterkoeffizient bei der gleitenden Mittelwertbildung [-]
$k_{n \cdot t_Z}$	Filterkoeffizient eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung mit der Abtastzeit $n \cdot t_Z$ [-]
k_{Reg}	Geradensteigung bei Regressionsanalyse [-]
k_s	Statische Verstärkung [-]
k_{Wank}	Wankkompensationsfaktor [-]
l	Radstand [m]
$l_{\langle h,v \rangle}$	Abstand des Schwerpunktes von der Hinter-/Vorderachse [m]
$l_{S, \langle h,v \rangle}$	Spurweite an der Hinter-/Vorderachse [m]
$l_{\text{SP}, x}$	Abstand zwischen Schwerpunkt und Einbaulage eines Sensors in Längsrichtung [m]

$l_{SP,y}$	Abstand zwischen Schwerpunkt und Einbaulage eines Sensors in Quer- richtung [m]
L	Beobachtermatrix
M	Moment [Nm]
MP	Momentanpol
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse [kg]
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen (ohne null)
n	Natürliche Zahl
P	Kovarianzmatrix (Parameterschätzung)
Q	Kovarianzmatrix (Zustandsbeobachter)
R	Kovarianzmatrix (Zustandsbeobachter)
r	Radradius (allgemein) [m]
$r_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$	Dynamischer Radradius des linken/rechten Hinter-/Vorderrades [m]
r_{Em}	Empfindlichkeitsfaktor [-]
$r_{Em,max}$	Maximaler Empfindlichkeitsfaktor [-]
$r_{Em,min}$	Minimaler Empfindlichkeitsfaktor [-]
SP	Schwerpunkt
T	Filterzeitkonstante [s]
T_{Fa}	Filterzeitkonstante des Fahrtabgleichs [s]
$T_{n \cdot t_Z}$	Filterzeitkonstante bei einer Abtastzeit von $n \cdot t_Z$ [s]
T_{Hi}	Filterzeitkonstante des Histogrammabgleichs [s]
T_{St}	Filterzeitkonstante des Stillstandsabgleichs [s]
t	Zeit [s]
t_M	Modulzykluszeit [s]
t_{verf}	Verfügbarkeitszeitraum einer Modellgröße
t_Z	Systemzykluszeit [s] (in dieser Arbeit 0,01 s)
t_{zul}	Gemäß der Zulassungsbedingungen gültige Zeitraum einer Modellgröße
u	Eingangsgröße
v	Geschwindigkeit (allgemein) [$\frac{m}{s}$]
v_{ch}	Charakteristische Geschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
v_{Fzg}	Geschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt (absolut) [$\frac{m}{s}$]
$v_{\langle h,v \rangle}$	Geschwindigkeit (gemittelt) Hinter-/Vorderachse [$\frac{m}{s}$]
$v_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$	Geschwindigkeit des linken/rechten Hinter-/Vorderrades [$\frac{m}{s}$]
v_{Rad}	Radgeschwindigkeit (allgemein) [$\frac{m}{s}$]
v_x	Geschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung [$\frac{m}{s}$]
v_y	Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung [$\frac{m}{s}$]
w	Wichtungsfaktor
x	Zustandsgröße
x_0	Anfangszustand einer Zustandsgröße
$\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$	Ortsfestes Koordinatensystem
$\vec{x}_h, \vec{y}_h, \vec{z}_h$	Horizontiertes, fahrzeugfestes Koordinatensystem
$\vec{x}_{Fzg}, \vec{y}_{Fzg}, \vec{z}_{Fzg}$	Fahrzeugfestes Koordinatensystem
$Y_{Abw,Mod}$	Integral der Modellabweichung
$Y_{Abw,Red}$	Integral der Redundanzabweichung
y	Ausgangsgröße bzw. physikalische Größe
$y_{Abw,Mod}$	Modellabweichung
$y_{Abw,Red}$	Redundanzabweichung
y_{Em}	Empfindlichkeitsfehler

$\ddot{y}_{Fzg,Grd,max}$	Maximaler Gradient der Querbeschleunigung [$\frac{m}{s^3}$]
$\ddot{y}_{Fzg,Np}$	Nullpunktfehler der Querbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
$\ddot{y}_{Fzg,Np,max}$	Maximaler Nullpunktfehler der Querbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
$\ddot{y}_{Fzg,Np,Tol}$	Nullpunktfehlertoleranz der Querbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
$\ddot{y}_{Fzg,Rau,max}$	Maximale Signaländerung (Rauschen) der Querbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
$y_{Grd,Red}$	Abweichungsgradient redundanter Sensorsignale
y_{Gue}	Nutzsignalgüte
y_{komp}	Kompensiertes Signal einer Sensorgröße
y_{max}	Obergrenze, Maximalwert
y_{Mess}	Gemessene Größe
y_{min}	Untergrenze, Minimalwert
$y_{Mod,max}$	Obergrenze des Modellbandes
$y_{Mod,min}$	Untergrenze des Modellbandes
$y_{Mod,oben}$	Obergrenze des Vertrauensintervalls
$y_{Mod,unten}$	Untergrenze des Vertrauensintervalls
y_{Np}	Nullpunktfehler
y_{Nutz}	Nutzsignal
y_{Rau}	Rauschamplitude
y_{Ref}	Referenzgröße
z	Zähler
z_{Rad}	Federweg eines Rades in z -Richtung [m]

Weitere Symbole

■	Auswahl bzw. Anforderung berücksichtigt
□	Auswahl bzw. Anforderung unberücksichtigt
⊗	Auswahl bzw. Anforderung teilweise berücksichtigt
×	Auswahl bzw. Anforderung nicht bewertet
⟨ ⟩	Kennzeichnung variabler Indizes
< >	Kennzeichnung der Schicht bei künstlichen neuronalen Netzen
*	Universeller Platzhalter

Allgemeine Abkürzungen

ABC	Aktive Aufbauregelung (engl. active body control)
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Abstandsregeltempomat (engl. adaptive cruise control)
AFS	Überlagerungslenkung an der Vorderachse (engl. active front steering)
ASR	Antriebsschlupfregelung
ATAM	Analysemethode für Zielkonflikte innerhalb der Architektur (engl. architecture trade-off analysis method)
AUTOSAR	Standardisierte Systemarchitektur im Automobilbereich (engl. automotive open system architecture)
CBAM	Kosten-Nutzen-Analysemethode (engl. cost benefit analysis method)
D	Dekomposition, siehe Abschnitt 6.1.1 (Seite 75)
E	Ersatzwert
EPB	Elektromechanische Parkbremse
EPS	Elektromechanische Lenkunterstützung (engl. electric power steering)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
F	Fehlerwert

FDI	Fehlererkennung und Diagnose (engl. fault detection and identification)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (engl. failure mode and effect analysis)
G	Nutzsignalgüte
GPS	Satellitenortungssystem (engl. global positioning system)
K	Konfiguration, siehe Tabelle 6.4 (Seite 81)
KF	Kennfeld (dreidimensional)
KL	Kennlinie (zweidimensional)
KNN	Künstliches neuronales Netz
Lidar	Übertragung des Radarprinzips auf den Frequenzbereich des Lichts (engl. light detection and ranging)
MLP	Mehrschichten-Perzeptron (engl. multi-layer perceptron)
N	Nutzsignal
Radar	Funkortung und -entfernungsmessung (engl. radio detection and ranging)
rms	Quadratischer Mittelwert (engl. root mean square)
S	Nutzsignalstatus bzw. Schnittstellenkonzept, siehe Abschnitt 6.1.1 (Seite 70)
SAAM	Analysemethode für Softwarearchitekturen (engl. software architecture analysis method)
SALM	Statische, abschnittsweise lineare Modellierung (engl. static piecewise linear model)
SIL	Sicherheitseinstufung (engl. safety integrity level)
SISO	Systeme mit genau einer Ein- und einer Ausgangsgröße (engl. single input, single output)
Var.	Variante(n)
ZSDA	Zentrale Signaldatenaufbereitung

1 Einleitung

1.1 Bedeutung der Fahrwerkselektronik im Automobilbereich

Das Profil einer Automobilmарke ist für Fahrzeughersteller ein elementares Mittel, um gezielt Käuferschichten anzusprechen. Es wird vor allem durch die *Gestaltung des Fahrzeugs* (engl. *design*), die Vermarktung sowie fortschrittliche Technologien beeinflusst. Die das Markenprofil prägenden Eigenschaften bzw. Komponenten des Fahrzeugs stellen darüber hinaus ein Mittel dar, sich von Wettbewerbern zu differenzieren. Das trifft vor allem auf Kernwettbewerber desselben Marktsegments zu. Eine Einteilung ausgewählter Marken bezüglich der differenzierenden Eigenschaften Volumen/Premium, Preis/Qualität und Komfort/Sport ist in **Bild 1.1a** dargestellt.

Durch immer kürzer werdende Marktdurchdringungszeiten neuer Technologien über alle Fahrzeugklassen hinweg reduziert sich der Zeitraum der Exklusivität, und die Fahrzeughersteller laufen Gefahr, ihre Profile aufzuweichen [MF02]. Für den Hersteller werden insbesondere neue Entwicklungen und Funktionen relevant, die vom Kunden wahrgenommen werden und seine Bedürfnisse und Erwartungen an die Marke widerspiegeln. Markenprägende Eigenschaften müssen vom Automobilhersteller identifiziert und in eigener Wertschöpfung vorangetrieben werden. Andere Module, die keine markenspezifische Ausprägung erlauben, werden zunehmend an Systemlieferanten übergeben. Eine Prognose für die Entwicklung der Eigenleistung, aufgeschlüsselt nach Marken bis zum Jahr 2015, zeigt **Bild 1.2**. Während die Eigenleistung im Volumensegment nahezu ausnahmslos zurückgehen wird, bauen die Premiummarken die eigene Wertschöpfung deutlich aus, um dem Kundenanspruch über innovative, wettbewerbswirksame Produkte nachzukommen.

Jede Marke muss im Zuge dieser Herausforderungen eine individuelle Wertschöpfungsstrategie entwickeln. Die Entwicklung für markenprägende Innovationen erfolgt zur Steigerung der

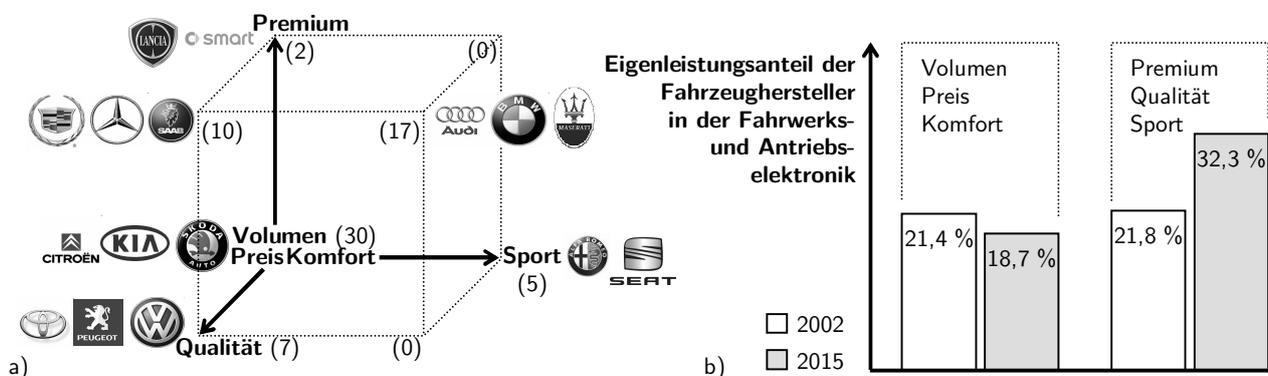


Bild 1.1: a) Einteilung ausgewählter Automobilhersteller in Marktsegmente mit der Anzahl der Marken pro Segment sowie b) Eigenleistungsanteil in der Fahrwerks- und Antriebselektronik gegensätzlicher Marktsegmente [MF02]

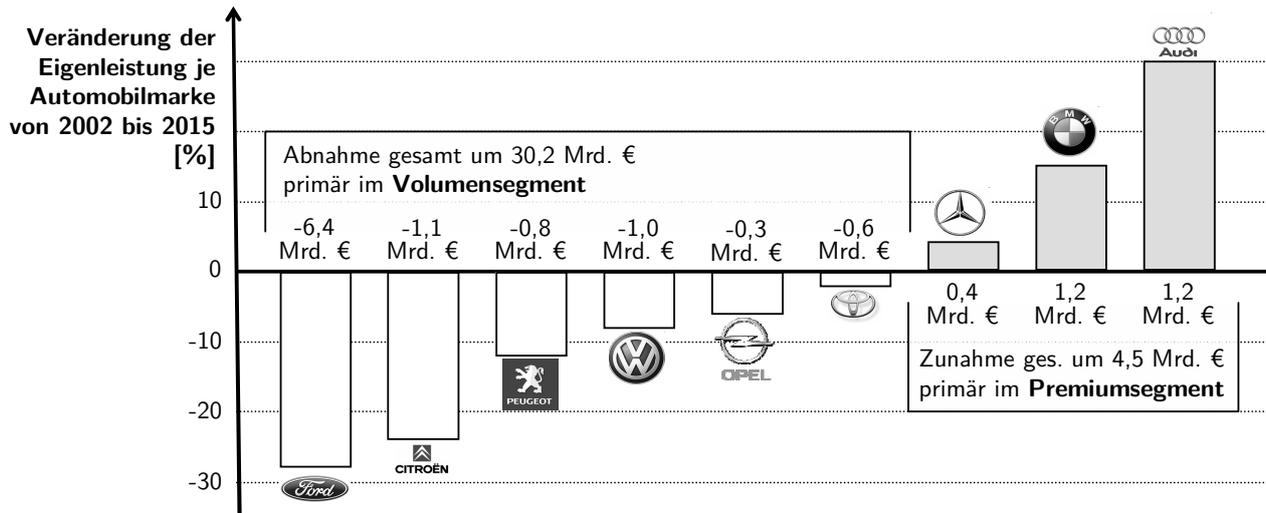


Bild 1.2: Entwicklung der Eigenleistung ausgewählter Automarkennamen zwischen 2002 und 2015 [MF02]

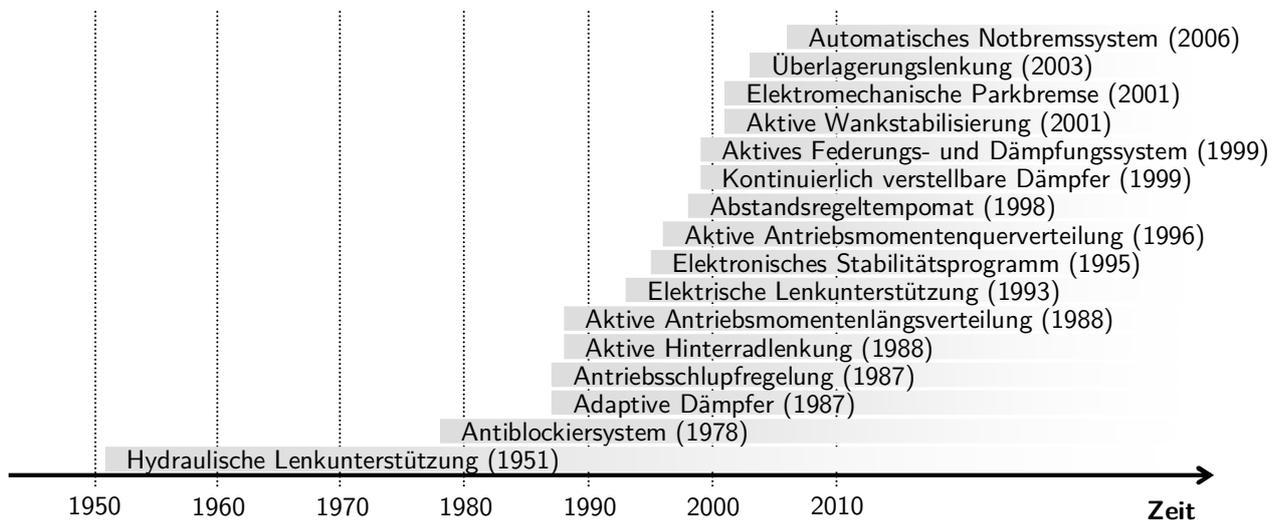


Bild 1.3: Markteinführung von Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsystemen [BS07, HE07, RB06]

Exklusivität vor allem *intern* (engl. *in-house*). Zu den Kernumfängen der Wertschöpfung im Premiumsegment wird insbesondere der Fahrwerks- und Antriebselektronikbereich zählen, wie die Prognose für die markenreichsten Segmente nach [MF02] in **Bild 1.1b** veranschaulicht. In [DB07] wird der Trend bestätigt und die Bereiche Elektrik und Elektronik als wichtigste Treiber für Innovationen im Automobilssektor ausgewiesen. Des Weiteren werden die Verschiebung von Einzel- hin zu Systeminnovationen sowie Effizienz als zentrale Innovationsthemen an Bedeutung gewinnen. Die daraus erwachsenden Herausforderungen werden in der Mehrfachnutzung einzelner Systeme und ihrer Integration ins Fahrzeug liegen. Einen entscheidenden Beitrag an dieser Entwicklung wird die Vernetzung der Fahrwerkregelssysteme haben aufgrund ihres Potenzials zur Markendifferenzierung.

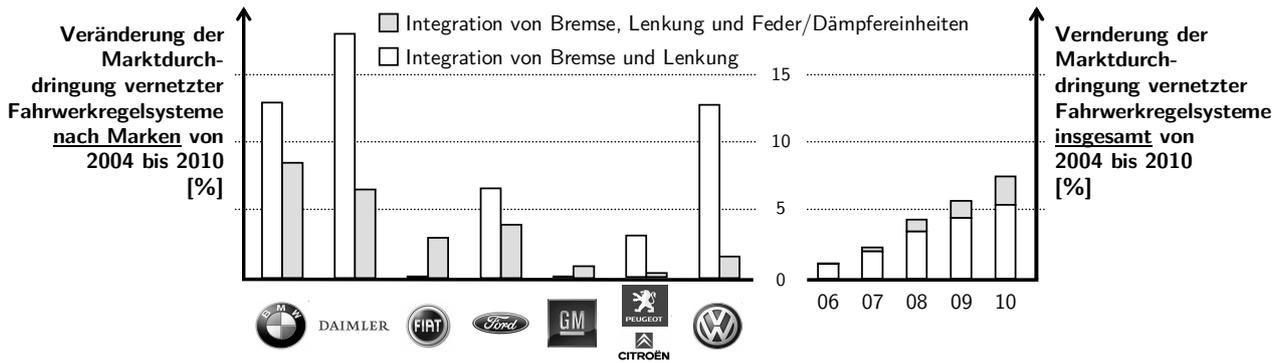


Bild 1.4: Veränderung der Marktdurchdringung vernetzter Fahrwerkregelsysteme [Fro04]

1.2 Situationsanalyse und Zielsetzung der Arbeit

In den vergangenen Jahren ist eine starke Zunahme von mechatronischen Systemen im Fahrzeug zu beobachten [SR02]. Dieser Trend ist insbesondere für den Fahrwerksbereich kennzeichnend, wie **Bild 1.3** zu entnehmen ist. Beispielhaft seien elektromechanische Servo- und Überlagerungslenkungen, variable Antriebsmomentenverteilungen und geregelte Feder- und Dämpfereinheiten genannt. Durch die direkte Beeinflussung der Fahrzeugdynamik sind diese Systeme in den meisten Fällen sicherheitsrelevant, da es im Fehlerfall zu kritischen Fahrzuständen kommen kann. Eine maßgebliche Fehlerquelle stellen die über Sensoren ermittelten Eingangsgrößen der mechatronischen Systeme dar, die sich über funktionale Logik auf die Aktorik auswirken. Einen elementaren Beitrag für ein sicheres Gesamtsystem stellt folglich die Überwachung der genutzten Sensorsignale dar.

Die für die Absicherung der Sensorsignale verantwortliche Komponente wird als Signaldatenaufbereitung oder Signalplausibilisierung bezeichnet. Ihre Kernaufgaben sind:

- ▷ die Erhöhung der Signalgenauigkeit durch die Ermittlung von Sensorungenauigkeiten wie Nullpunktfehlern (engl. offset),
- ▷ die Überwachung der genutzten Sensorsignale auf Fehler und
- ▷ die Bereitstellung von Schätzgrößen wie der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit.

Eine Signaldatenaufbereitung ist für jedes Fahrwerkregelsystem notwendig. Der umgesetzte Funktionsumfang variiert vor allem mit der zur Verfügung stehenden Sensorik sowie der Sicherheitsrelevanz des die Sensorsignale nutzenden Regelsystems. Sie macht für sicherheitsrelevante Fahrwerkregelsysteme mit einem Anteil von ca. 76 % am Gesamtsystem ein Vielfaches im Vergleich zum Regler (ca. 8 %) aus [Sch04].

Die steigende Zahl der Fahrwerkregelsysteme bietet die Möglichkeit, Entwicklungsumfänge unterschiedlicher Projekte in Bezug auf eine Signaldatenaufbereitung zu bündeln. Anstatt für jedes Regelsystem eigenständig eine Signaldatenaufbereitung zu entwickeln, ist eine universelle Komponente denkbar, die wiederverwendbar ist und deren Anpassung an unterschiedliche Zielsysteme vorgehalten wird. Neben der mittelfristigen Kosteneinsparung hätte die Konzentration der Entwicklungsanstrengungen einen positiven Effekt auf die Produktqualität.

Der neben der Zentralisierung vorherrschende Trend zur Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen wird durch die Prognose in **Bild 1.4** für unterschiedliche Integrationsstufen verdeutlicht. Mit der Vernetzung wird der Ansatz verfolgt, das Zusammenwirken der verteilten Regelsysteme auf Basis systemübergreifender Informationen bezüglich Funktionalität, Sicherheit und

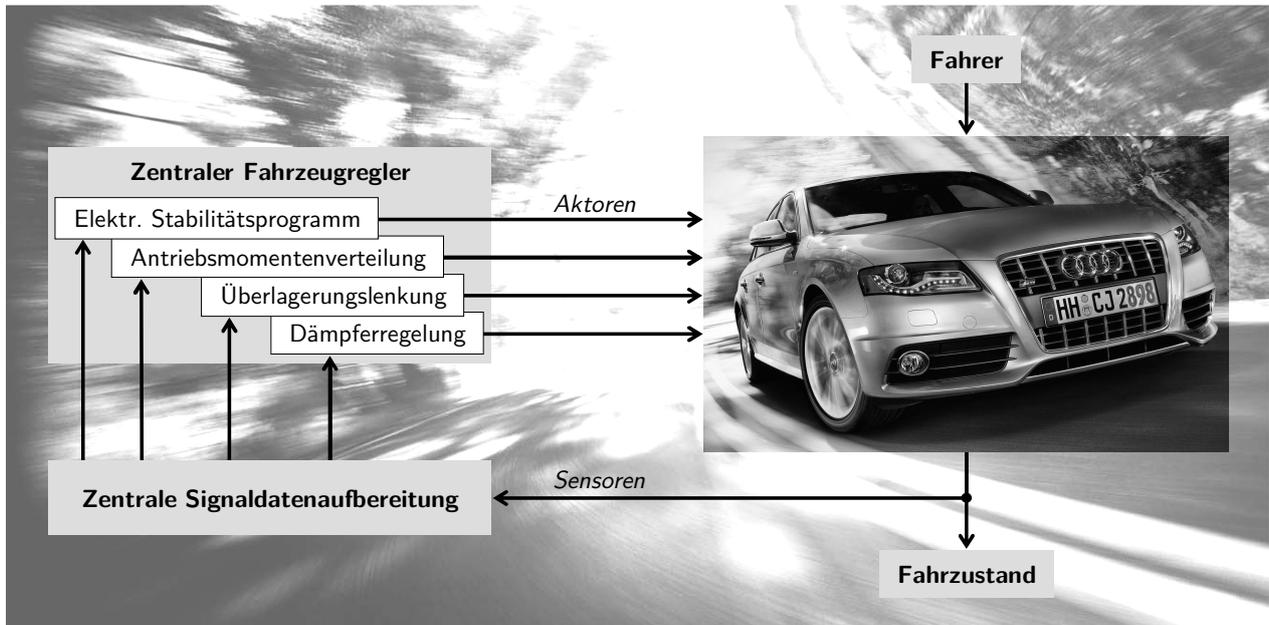


Bild 1.5: Vereinfachte Darstellung eines Fahrwerkregelkreises mit zentraler Signaldatenaufbereitung, angelehnt an [AS09]

Verfügbarkeit zu optimieren und herstellereinspezifisch zu nutzen. Kern des Konzepts ist die Zentralisierung der Wirkungskette der Sensoren über eine zentrale Signaldatenaufbereitung (ZSDA) und Fahrzustandserkennung bis hin zu einem übergeordneten Fahrzeugregler, siehe **Bild 1.5**. Auf diese Weise sollen mittelfristig Kosten in der Entwicklung und für redundante Bauteile eingespart werden [Fro04]. Eine ZSDA ist aufgrund ihrer Stellung am Anfang der Wirkungskette die Voraussetzung für alle darauf aufbauenden, zentralisierten Komponenten.

Neue Herausforderungen für eine ZSDA sind darüber hinaus die Erweiterbarkeit des Systems um zusätzliche Sensoren, darauf aufbauende neue Funktionen sowie die Berücksichtigung zusätzlicher Regler. Um jedes Regelsystem bestmöglich mit plausibilisierten Signalen zu versorgen, gleichzeitig aber in Abhängigkeit eingeschränkter Signalgüten bzw. gefundener Fehler die Verfügbarkeit zu maximieren, dürfen nur Regler aktiviert bleiben, denen der aktuelle Systemzustand als Regelgrundlage ausreicht. Grundlage ist die Bereitstellung von definierten Schnittstellen- und Bewertungsgrößen zwischen ZSDA und Reglern.

Die Vernetzung der Fahrwerkregelsysteme führt des Weiteren zu veränderten Anforderungen an die Architektur, begründet vor allem durch die variable Struktur des Gesamtsystems, die sich mit der Konfiguration jedes einzelnen Fahrzeugs ändern kann. Für eine Komponente werden nicht wie gewöhnlich nur Varianten bezüglich der Parametrierung existieren, sondern auch Varianten bezüglich des Funktionsumfangs. Die resultierenden, unterschiedlichen Softwareumfänge verlangen nach Steuergeräten mit skalierbarer Leistung bzw. nach einer Aufteilung einzelner Softwareteile auf unterschiedliche Steuergeräte [HSF⁺04]. Es muss sichergestellt werden, dass die in einem Fahrzeug eingesetzten Softwareteile miteinander harmonieren und jegliches Gefährdungspotenzial für die Fahrzeuginsassen und die Umgebung ausgeschlossen ist.

Mit dem Entwurf einer ZSDA soll in dieser Arbeit der grundlegende Schritt in Richtung eines vernetzten Gesamtsystems unternommen werden. Als primäre Ziele ergeben sich:

- ▷ Erhebung funktionaler sowie nicht-funktionaler Anforderungen an eine ZSDA basierend auf der Analyse bestehender Ansätze im Bereich der Signaldatenaufbereitung unter

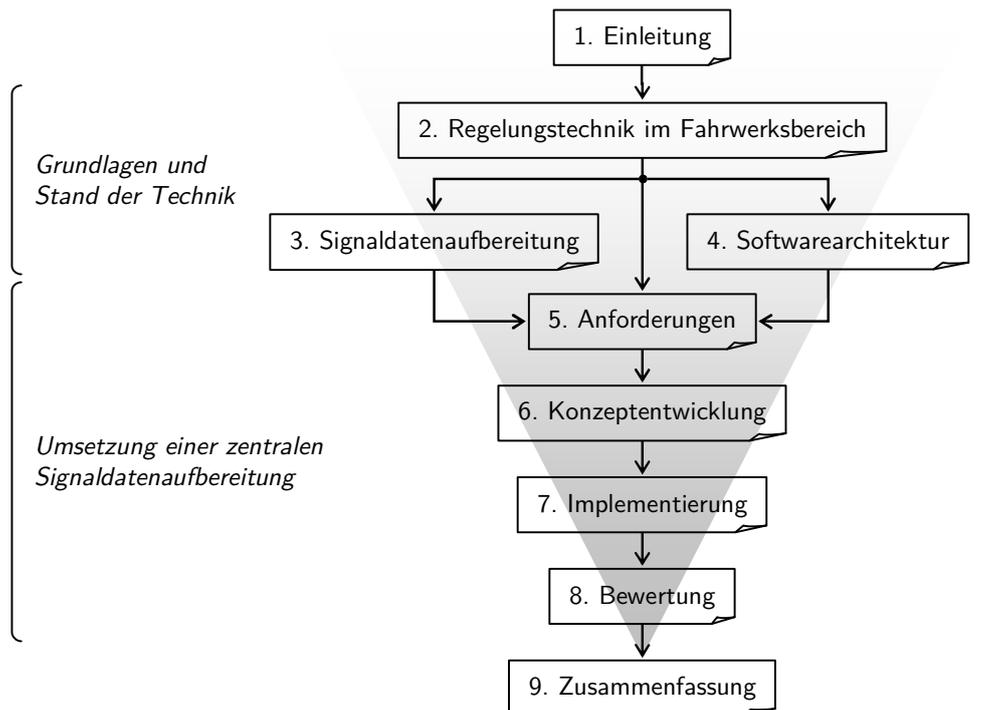


Bild 1.6: Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

besonderer Berücksichtigung der Softwarearchitektur.

- ▷ Systementwurf einer ZSDA durch die Realisierung einer geeigneten Softwarearchitektur, die das Gerüst der funktionalen Implementierung bildet. Ein Schwerpunkt des Entwurfs liegt auf dem skalierbaren und wiederverwendbaren Funktionsumfang.
- ▷ Definition einer universellen Schnittstelle zwischen einer ZSDA und den Fahrwerkregelsystemen, die standardisiert und unabhängig vom signalnutzenden Regler und in Abhängigkeit von reglerindividuellen Anforderungen an die Signale die plausibilisierten Größen bereitstellt.
- ▷ Analyse der Übertragbarkeit von Ansätzen aus dem Bereich der künstlichen neuronalen Netze (KNN) auf sicherheitsrelevante Systeme.

1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Die Vorgehensweise und die daran angelehnte Gliederung orientieren sich an den gesteckten Zielen dieser Arbeit. Dieser *Einleitung* folgen drei Kapitel, die sich mit den Grundlagen der behandelten Thematik und dem aktuellen Stand der Technik auseinandersetzen, siehe **Bild 1.6**. Das zweite Kapitel *Regelungstechnik im Fahrwerksbereich* grenzt das Fahrwerk als Anwendungsgebiet der zu entwerfenden Signaldatenaufbereitung ab. Der Einflussbereich von Fahrwerkregelsystemen wird aufgezeigt und die grundlegenden Möglichkeiten der Beschreibung der Fahrzeugbewegung dargestellt. Abschließend werden das Potenzial und die Herausforderungen der vernetzten Fahrwerkregelsysteme und insbesondere einer zentralen Signaldatenaufbereitung zur Bereitstellung einer einheitlichen Signalbasis herausgestellt. Das Kapitel, wie auch alle folgenden, endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

Das dritte Kapitel *Signaldatenaufbereitungen für Fahrwerkregelsysteme* widmet sich der funk-

tionalen Seite einer Signaldatenaufbereitung und somit einem zentralen Element dieser Arbeit. Zunächst erfolgt eine Begründung der Notwendigkeit und Verbreitung von Signaldatenaufbereitungen im Automobilbereich, um im Anschluss mit dem Sensorabgleich und der Fehlererkennung und -behandlung die Kernaufgaben herauszuarbeiten. Der Stand der Technik fasst die etablierten und bisher unbeachteten Möglichkeiten zur Realisierung von Sensorabgleichen sowie zur Fehlererkennung mit signal-, modell- und redundanzbasierten Methoden zusammen.

Anschließend werden im vierten Kapitel *Softwarearchitekturentwurf für Signaldatenaufbereitungen* die Grundlagen der Softwarearchitektur und mit ihr die Möglichkeit zur Berücksichtigung nicht-funktionaler Anforderungen erläutert. Im Stand der Technik werden zum einen bestehende Konzepte für Sensorüberwachungen im Fahrzeug, zum anderen allgemeine Entwurfsansätze für Softwarearchitekturen sicherheitsrelevanter Systeme analysiert und bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf eine ZSDA untersucht.

Die Erkenntnisse aus dem Bereich der vernetzten Fahrwerkregelsysteme, der funktionsseitigen Umsetzung einer Signaldatenaufbereitung und der Softwarearchitektur werden im fünften Kapitel *Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung* um die Analyse diverser Fahrwerkregelsysteme sowie Aspekte im Zuge ihrer Vernetzung ergänzt. Die Essenz dieser Rahmenbedingungen mündet in die Erhebung von Anforderungen und bildet die Grundlage für den im sechsten Kapitel *Konzept einer zentralen Signaldatenaufbereitung* umgesetzten Konzeptentwurf. Der an einen Architekturentwurf angelehnte, iterative Prozess beginnt allgemein mit den zu realisierenden Eigenschaften des Gesamtsystems, um mit jedem Iterationsschritt spezifische Lösungsansätze für einzelne Teilaspekte zu entwickeln.

Während der Entwurfsansatz das Zusammenspiel einzelner Teile, aber auch die Funktion als Ganzes sicherstellt sowie Lösungsszenarien skizziert, erfolgt im siebten Kapitel *Implementierung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung* die notwendige Detaillierung im Zuge der Realisierung einer ZSDA. Neben der Erläuterung der Struktur des Gesamtsystems erfolgt die Dokumentation der Umsetzung der einzelnen Bestandteile. Anhand der erhobenen Anforderung werden schließlich im achten Kapitel *Bewertung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung* sowohl die Architektur als auch die Funktion ganzheitlich demonstriert und abschließend beurteilt. Diesbezüglich wird auch ein Vergleich mit einer konventionellen Signaldatenaufbereitung angestellt, um die Vorzüge des zentralen Ansatzes herauszuarbeiten. Im neunten und letzten Kapitel *Zusammenfassung* werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit dargestellt.

2 Regelungstechnik im Fahrwerksbereich

Häufigster Einsatzbereich von Signaldatenaufbereitungen sind Regelsysteme. Da die Regelungstechnik eine bereichsübergreifende Disziplin ist, wird im Folgenden speziell auf den Anwendungsbereich der Fahrwerktechnik im Automobilbereich eingegangen sowie die dort erwachsenden Herausforderungen dargestellt. Teil der Betrachtungen ist die Beschreibung der Fahrzeugbewegung als Grundlage der Modellbildung der Regelstrecke.

2.1 Regelkreis

Die Zielsetzung der Regelungstechnik ist die Beeinflussung eines sich zeitlich verändernden Prozesses von außen, so dass dieser in einer vorgegebenen Weise abläuft [Lun01]. Der Prozess wird als Strecke bezeichnet und das Regelziel über *Führungsgrößen* $w(t)$ vorgegeben, siehe **Bild 2.1**. Um das primäre Regelziel $y(t) = w(t)$ zu erreichen, steht der Regelung mindestens eine gemessene Prozesskenngröße oder Regelgröße $y(t)$ zur Verfügung, die fortlaufend mit der Führungsgröße verglichen wird. Die Hauptaufgabe der Regelungstechnik besteht folglich im Entwurf von Reglern, die das Regelziel nach den Anforderungen des Prozesses bestmöglich umsetzen [Mül96]. Die Prozessbeeinflussung erfolgt dabei über *Stellgrößen* $u(t)$. Des Weiteren soll die Wirkung von *Störgrößen* $d(t)$ unterdrückt werden.

Die Anwendung im Bereich des automobilen Fahrwerks bringt die Besonderheit mit sich, dass der Fahrer als zusätzlicher Regler das Geschehen dominiert (vgl. **Bild 1.5**). Vom Fahrer gehen die Führung des Fahrzeugs und somit auch die Vorgaben der Fahrwerkregelsysteme in Form von Führungsgrößen wie beispielsweise Lenkradwinkel, Gaspedalstellung und Bremswunsch aus. Man kann sich ein Fahrwerkregelsystem daher als den inneren, den Fahrer als den äußeren Regelkreis einer Kaskadenregelung vorstellen.

2.2 Modellbildung der Regelstrecke

Der Entwurf eines Reglers setzt das Verständnis des zu beeinflussenden Prozesses voraus, um diesen gezielt über Stellgrößen zu beeinflussen. Dem Reglerentwurf geht daher die Modellbildung der Regelstrecke voraus. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Strecke das fahrdynamische Verhalten eines Kraftfahrzeugs zugrunde gelegt.

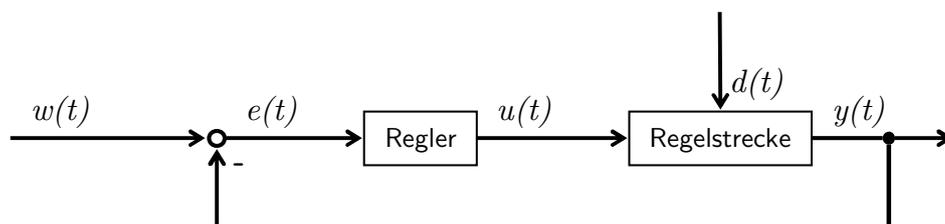


Bild 2.1: Struktur eines Regelkreises [Lun01]

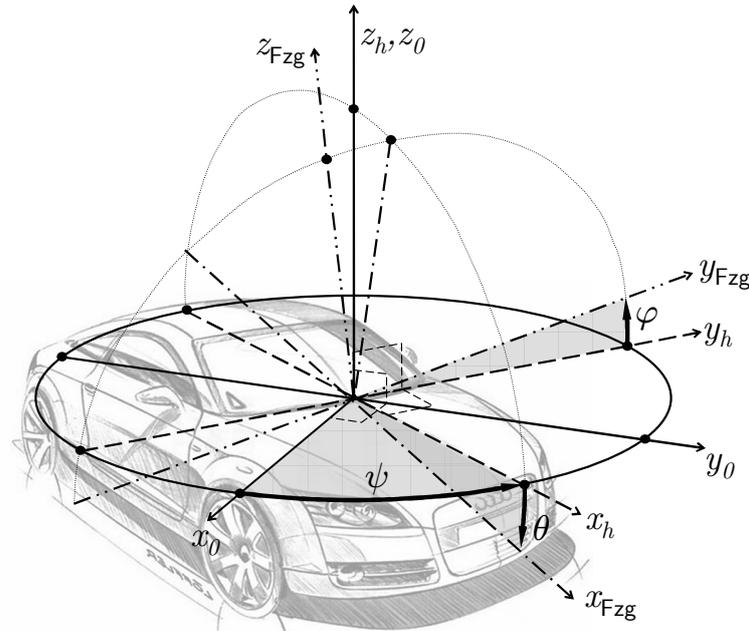


Bild 2.2: Beschreibung der Bewegung eines Fahrzeugs im Raum [Zom87]

Typische fahrdynamische Kenngrößen zur Erfassung des Fahrzustands eines Kraftfahrzeugs werden im Fahrbetrieb gemessen, um gemäß **Bild 2.1** die Führungsgröße(n) mit der aktuellen Fahrsituation vergleichen zu können. Auf Grundlage der Regelabweichung werden von Fahrwerkregelsystemen Regeleingriffe generiert, die korrigierend auf das Fahrverhalten einwirken. Im Folgenden werden wichtige Kenngrößen der Fahrzeugdynamik vorgestellt und ihr Zusammenhang anhand von Fahrzeugmodellen erläutert.

2.2.1 Beschreibung der Fahrzeugbewegung

Zur Beschreibung der Bewegung eines Kraftfahrzeugs im Raum wird von einem ortsfesten Koordinatensystem $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ ausgegangen, dessen \vec{x}_0 - und \vec{y}_0 -Achsen in der Fahrbahnebene liegen. Relativ zu diesem im Abstand $[x_{0,h}, y_{0,h}, 0]$ bewegt sich das horizontierte Koordinatensystem $(\vec{x}_h, \vec{y}_h, \vec{z}_h)$, dessen Ursprung in der \vec{x}_0 - \vec{y}_0 -Ebene angesiedelt ist und dessen Hochachse \vec{z}_h den Fahrzeugschwerpunkt durchsticht. Die Achsen \vec{z}_0 und \vec{z}_h sind parallel zueinander angeordnet, die zugehörigen Koordinatensysteme können jedoch eine Verdrehung um diese Hochachse um den *Gierwinkel* ψ (engl. *yaw angle*) aufweisen [MW04, Wal05]. In **Bild 2.2** sind die Koordinatensysteme vereinfacht mit demselben Koordinatenursprung dargestellt. Die Transformation vom ortsfesten in das horizontierte System erfolgt nach:

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{0,h} \\ y_{0,h} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Aus dem horizontalen kann das fahrzeugfeste Koordinatensystem bestimmt werden, indem der horizontierte Koordinatenursprung entlang der \vec{z}_h -Achse um den Abstand $[0, 0, z_{h,Fzg}]$ in den Fahrzeugschwerpunkt überführt wird. Zusätzlich kann sich der Fahrzeugaufbau aufgrund seiner Trägheit um den *Nickwinkel* θ (engl. *pitch angle*) um die \vec{y}_{Fzg} -Achse sowie um den *Wankwinkel* φ (engl. *roll angle*) um die \vec{x}_{Fzg} -Achse verdrehen. Nicken tritt beim Vorhandensein von Längsbeschleunigung \ddot{x}_{Fzg} beim Bremsen und Beschleunigen des Fahrzeugs auf, Wanken dagegen beim Auftreten von Querschleunigung \ddot{y}_{Fzg} wie bei Kurvenfahrten. Die

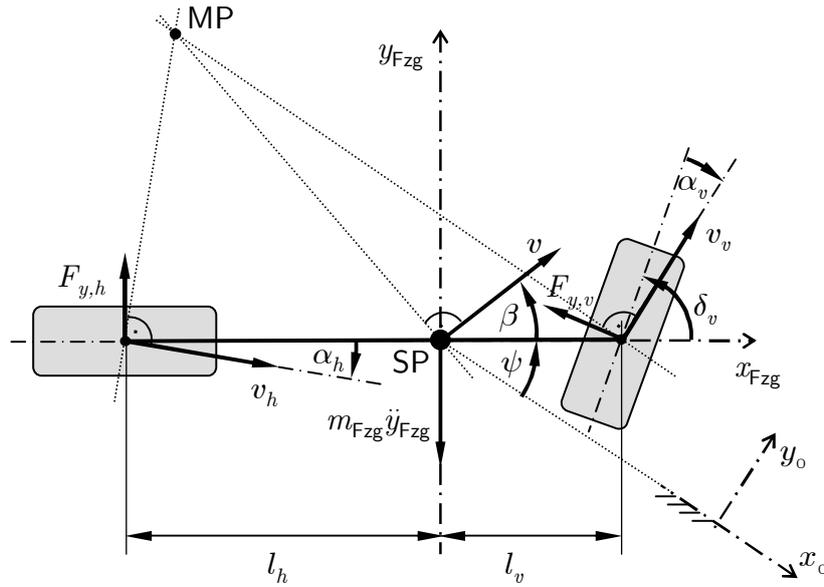


Bild 2.3: Kenngrößen des Einspurmodells, angelehnt an [MW04]

Transformation des horizontalen in das fahrzeugfeste System ergibt sich zu:

$$\begin{bmatrix} x_{Fzg} \\ y_{Fzg} \\ z_{Fzg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \varphi \\ \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta & -\sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{h,Fzg} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.2.2 Einspurfahrzeugmodell

Zum Verständnis der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen werden Kenntnisse der Mechanik der Fahrzeugbewegung benötigt. Eine vereinfachte Darstellung reicht im Allgemeinen aus und hilft, sich auf die wesentlichen Freiheitsgrade zu beschränken. Das Einspurfahrzeugmodell stellt eine verbreitete Modellbildung eines Fahrzeugs dar. Zur Herleitung einer gebräuchlichen Variante werden folgende Annahmen vorausgesetzt [Wal05]:

1. Die Schwerpunkthöhe liegt in der Fahrbahnebene, d. h., weder Nicken noch Wanken des Fahrzeugaufbaus sind möglich. Es treten folglich auch keine Radlaständerungen auf.
2. Die Radaufstandspunkte der Räder werden achsweise zusammengefasst (daher die Bezeichnung „Einspurfahrzeugmodell“).
3. Längskräfte in den Radaufstandspunkten werden nicht berücksichtigt.
4. Das Hinterrad ist nicht lenkbar ($\delta_h = 0$).
5. Ein lineares Reifenverhalten wird vorausgesetzt.
6. Die Bewegungsgleichungen werden für kleine Winkel linearisiert.

Nach **Bild 2.3** können für das Fahrzeugmodell das Kräftegleichgewicht in Querrichtung \vec{y}_{Fzg} und die Momentenbilanz um die Fahrzeughochachse \vec{z}_{Fzg} im Schwerpunkt SP aufgestellt werden. Der Radlenkwinkel des Vorderrades ist mit δ_v , die Fahrzeugmasse mit m_{Fzg} , der Abstand der Radaufstandspunkte vom Schwerpunkt über $l_{\langle h,v \rangle}$ und die Fahrzeugträgheit um die Hoch-

achse \vec{z}_{Fzg} mit J_z gegeben [MW04]:

$$\sum_i F_{y,i} = F_{y,v} \cos \delta_v + F_{y,h} - m_{\text{Fzg}} \ddot{y}_{\text{Fzg}} = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum_i M_{z,\text{SP},i} = F_{y,v} \cos \delta_v \cdot l_v - F_{y,h} l_h + J_z \ddot{\psi} = 0 \quad (2.4)$$

Gemäß der getroffenen Annahmen gilt für die Seitenkräfte $F_{y,\langle h,v \rangle}$ ein linearer Zusammenhang, der über die Schräglaufsteifigkeiten $c_{\alpha,\langle h,v \rangle}$ und die *Schräglaufwinkel* $\alpha_{\langle h,v \rangle}$ (*engl. slip angle*) formuliert wird:

$$F_{y,v} = c_{\alpha,v} \alpha_v \quad (2.5a)$$

$$F_{y,h} = c_{\alpha,h} \alpha_h \quad (2.5b)$$

Da die Räder über einen Starrkörper verbunden sind, bleibt die Geschwindigkeit in Längsrichtung konstant. Es gilt in \vec{x}_{Fzg} -Richtung $v_v \cos(\delta_v - \alpha_v) = v \cos \beta$ und $v_h \cos \alpha_h = v \cos \beta$ mit den Achsgeschwindigkeiten $v_{\langle h,v \rangle}$ und dem *Schwimmwinkel* β (*engl. side slip angle*). In \vec{y}_{Fzg} -Richtung unterscheiden sich die Geschwindigkeiten nur durch den Einfluss der Gierwinkelgeschwindigkeit: $v_v \sin(\delta_v - \alpha_v) = l_v \dot{\psi} + v \sin \beta$ bzw. $v_h \sin \alpha_h = l_h \dot{\psi} - v \sin \beta$. Durch Bildung der Quotienten $\tan(\delta_v - \alpha_v)$ und $\tan \alpha_h$ sowie die Linearisierung für kleine Winkel ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\alpha_v = \delta_v - \beta - l_v \frac{\dot{\psi}}{v} \quad (2.6a)$$

$$\alpha_h = -\beta + l_h \frac{\dot{\psi}}{v} \quad (2.6b)$$

Allgemein gilt für die Beschleunigung eines sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω bewegendes Punktes auf einer Kurvenbahn $\ddot{y} = \dot{v} + \omega \times v$, für die Komponente in \vec{y}_{Fzg} -Richtung somit $\ddot{y}_{\text{Fzg}} = \dot{v}_y + \dot{\psi} v_x$ mit $\omega = \dot{\psi}$. Die zeitliche Ableitung der Quergeschwindigkeit kann aus $v_y = v \sin \beta$ zu $\dot{v}_y = \dot{v} \sin \beta + v \cos \beta \cdot \dot{\beta}$ berechnet werden. Aufgrund der Annahme kleiner Winkel ergibt sich $\dot{v}_y = \dot{v} \beta + v \dot{\beta}$ und somit für die Querbeschleunigung:

$$\ddot{y}_{\text{Fzg}} = \dot{v} \beta + v \dot{\beta} + \dot{\psi} v_x \quad (2.7)$$

Setzt man die Gleichungen (2.5), (2.6) sowie (2.7) in die Bilanzen (2.3) und (2.4) ein, erhält man die Bewegungsgleichungen des Einspurfahrzeugmodells [MW04]:

$$m_{\text{Fzg}} \left(v \dot{\beta} + v \dot{\psi} + \dot{v} \beta \right) = c_{\alpha,v} \left(\delta_v - \beta - l_v \frac{\dot{\psi}}{v} \right) + c_{\alpha,h} \left(-\beta + l_h \frac{\dot{\psi}}{v} \right) \quad (2.8)$$

$$J_z \ddot{\psi} = c_{\alpha,v} l_v \left(-\beta + \delta_v - l_v \frac{\dot{\psi}}{v} \right) + c_{\alpha,h} l_h \left(-\beta + l_h \frac{\dot{\psi}}{v} \right) \quad (2.9)$$

Die Bewegungsgleichungen geben Auskunft über das fahrdynamische Verhalten des Fahrzeugmodells. Für eine stationäre Kreisfahrt ($\dot{v} = \dot{\psi} = \dot{\beta} = 0$) lässt sich zusätzlich der Zusammenhang zwischen Radlenkwinkel und Gierwinkelgeschwindigkeit herleiten [Wal05]. Ausgangspunkt ist die Momentenbilanz um die Radaufstandspunkte:

$$\sum_i M_{z,v,i} = F_{y,h} l - m_{\text{Fzg}} \ddot{y}_{\text{Fzg}} l_v = 0 \quad (2.10)$$

$$\sum_i M_{z,h,i} = F_{y,v} \cos \delta_v l - m_{\text{Fzg}} \ddot{y}_{\text{Fzg}} l_h = 0 \quad (2.11)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.5) und (2.6), den Beziehungen für eine gleichförmige Kreisbewegung auf einer Bahn mit dem Radius ρ

$$v = \omega \rho = \dot{\psi} \rho \quad (2.12)$$

$$\ddot{y} = \frac{v^2}{\rho} = v \dot{\psi} \quad (2.13)$$

sowie unter der Annahme eines kleinen Radlenkwinkels ($\cos \delta_v \approx 1$), erhält man durch Eliminieren des Schwimmwinkels β die gesuchte Übertragungsfunktion:

$$\dot{\psi} = \frac{\delta_v v}{l + \frac{m_{\text{Fzgg}}}{l} \left(\frac{l_h}{c_{\alpha,v}} - \frac{l_v}{c_{\alpha,v}} \right) v^2} = \frac{\delta_v v}{l \left(1 + \frac{v^2}{v_{\text{ch}}^2} \right)} \quad (2.14)$$

Diese stationäre Gierwinkelgeschwindigkeit wird oft auch als „Gierrate nach Ackermann“ bezeichnet. v_{ch} ist die charakteristische Geschwindigkeit, bei der für ein untersteuerndes Fahrzeug eine Lenkwinkeländerung die höchste Gierwinkelgeschwindigkeitsänderung hervorruft. Sie liegt bei modernen Fahrzeugen zwischen zwischen 65 und 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ [Wal05]. Die Lenkempfindlichkeit ist bei v_{ch} folglich maximal. Die charakteristische Geschwindigkeit ist definiert als

$$v_{\text{ch}}^2 = \frac{c_{\alpha,h} c_{\alpha,v} l^2}{m_{\text{Fzgg}} (c_{\alpha,h} l_h - c_{\alpha,v} l_v)} \quad (2.15)$$

und besitzt ausschließlich Abhängigkeiten zu fahrzeugspezifischen Größen [MW04].

2.2.3 Zweispurfahrzeugmodell

Zur Herleitung von Modellgleichungen auf Basis der Radgeschwindigkeiten, die im Verlauf dieser Arbeit zur modellbasierten Überwachung eingesetzt werden, erfolgen im Folgenden Betrachtungen anhand des ebenen Zweispurmodells. Bei diesem werden im Gegensatz zum Einspurmodell alle vier Räder eines Fahrzeugs separat betrachtet. Jedes besitzt einen individuellen Geschwindigkeitsvektor und Schräglaufwinkel. Ansonsten gelten die gleichen Voraussetzungen wie für das Einspurmodell nach Abschnitt 2.2.2.

Bei einer stationären Kreisfahrt drehen die vier Räder des Fahrzeugs um einen Momentanpol MP. Nach **Bild 2.4** liegt für jedes Rad ein eigener Schwenkradius $\rho_{\langle h,v \rangle, \langle l,r \rangle}$ vor, über den nach Gleichung (2.12) eine Radgeschwindigkeit $v_{\langle h,v \rangle, \langle l,r \rangle}$ berechnet werden kann:

$$v_{\langle h,v \rangle, \langle l,r \rangle} = \dot{\psi} \rho_{\langle h,v \rangle, \langle l,r \rangle} \quad (2.16)$$

Da die Schwenkradien unbekannt sind, werden sie aus den Beziehungen eliminiert. Dazu werden die Differenzschwenkradien an Vorder- und Hinterachse sowohl mit Gleichung (2.16)

$$\Delta \rho_v = \rho_{vr} - \rho_{vl} = \frac{v_{vr} - v_{vl}}{\dot{\psi}} \quad (2.17a)$$

$$\Delta \rho_h = \rho_{hr} - \rho_{hl} = \frac{v_{hr} - v_{hl}}{\dot{\psi}} \quad (2.17b)$$

als auch aus geometrischen Überlegungen heraus gebildet:

$$\Delta \rho_v = l_{S,v} \cos(\delta_v + \alpha_{vr}) - \rho_{vl} (1 - \cos \zeta_v) \quad (2.18a)$$

$$\Delta \rho_h = l_{S,h} \cos(\alpha_{hr}) - \rho_{hl} (1 - \cos \zeta_h) \quad (2.18b)$$

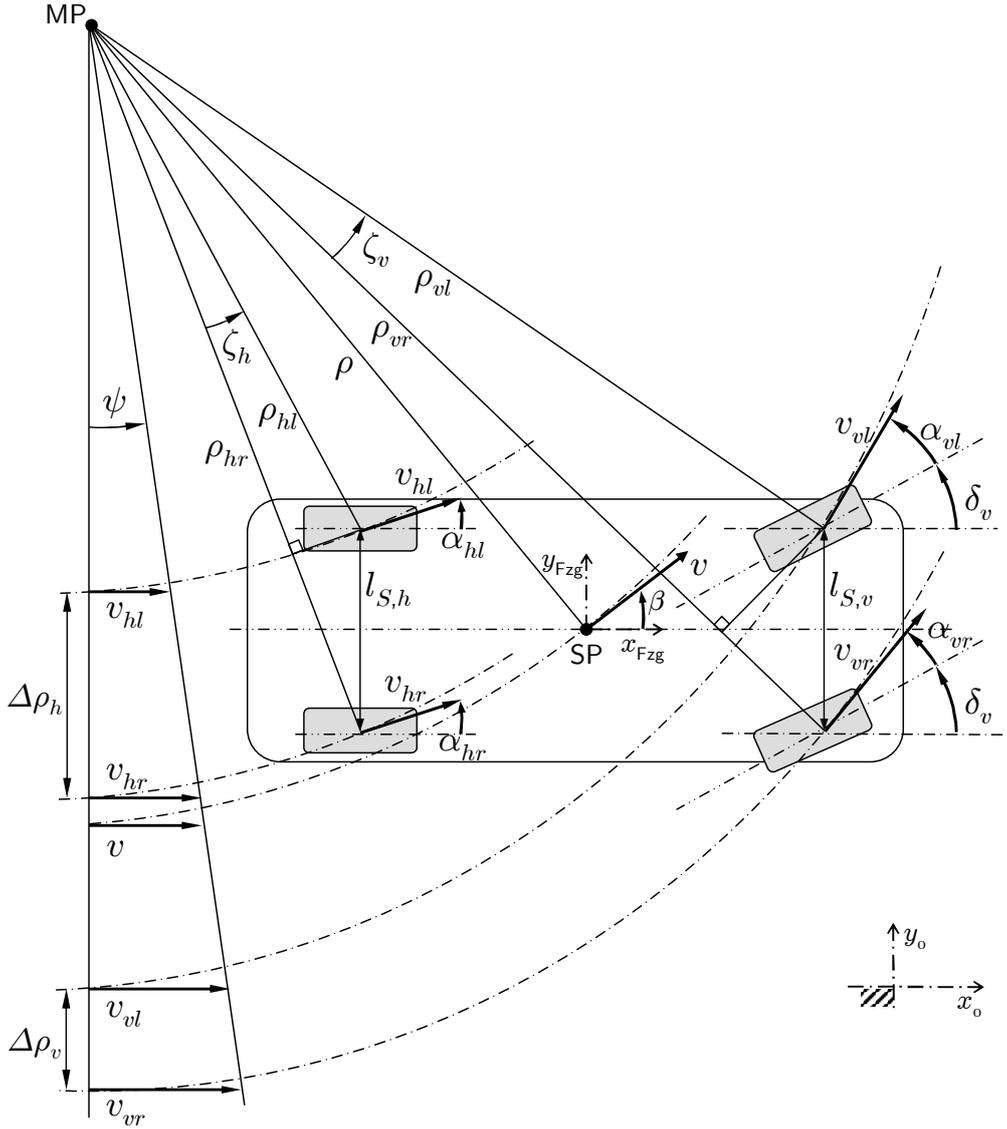


Bild 2.4: Kenngrößen des ebenen Zweispurmodells [Bör03]

Werden die Gleichungspaare unter der Annahme kleiner Radlenk- δ_v und Schräglaufwinkel $\alpha_{\langle h,v \rangle, \langle l,r \rangle}$ sowie vernachlässigbarer Schwenkradiendifferenzwinkel $\zeta_{\langle h,v \rangle}$ gleichgesetzt, ergeben sich zwei einfache Beziehungen für die Gierwinkelgeschwindigkeiten aus den Raddrehzahlen:

$$\dot{\psi}_v = \frac{v_{vr} - v_{vl}}{l_{S,v}} \quad (2.19a)$$

$$\dot{\psi}_h = \frac{v_{hr} - v_{hl}}{l_{S,h}} \quad (2.19b)$$

Durch Transformation über Gleichung (2.13) können sie auch zur Bestimmung der Fahrzeugquerbeschleunigung eingesetzt werden. Nach [Din99] stellen diese Gleichungen eine Möglichkeit zur Überwachung der Fahrdynamiksensorik bei geringem Echtzeitberechnungsaufwand dar.

2.2.4 Eigenlenkverhalten

Das Fahrverhalten eines Fahrzeugs bei Kurvenfahrt ist von Eigenschaften wie beispielsweise der Lage des Schwerpunktes, der Radaufhängung und dem Seitenführungsverhalten der Reifen abhängig [Mey08]. Grundsätzlich werden neutrale, unter- und übersteuernde Fahrzeugtypen unterschieden. Die Einteilung kann nach unterschiedlichen Kenngrößen erfolgen. Nach [HE07, MW04] ist ein Fahrzeug untersteuernd, wenn während einer Kreisfahrt und langsamer Erhöhung der Geschwindigkeit der Lenkradwinkel vergrößert werden muss, um den vorgesehenen Kreisradius zu halten. Die Ableitung des Lenkradwinkels nach der Zentripetalbeschleunigung nach Gleichung (2.13) ist damit positiv:

$$\frac{d\delta}{d\left(\frac{v^2}{\rho}\right)} \begin{cases} > 0 : \text{ untersteuernd} \\ = 0 : \text{ neutral steuernd} \\ < 0 : \text{ übersteuernd} \end{cases} \quad (2.20)$$

Zum Vergleich ist nachfolgend eine weitere Einteilung nach [HE07, Mey08] gegeben, nach der ein untersteuerndes Fahrverhalten vorliegt, wenn der Schräglaufwinkel der Vorder- größer als der der Hinterräder ist. Die Einteilung für neutrale und übersteuernde Fahrzeuge erfolgt äquivalent:

$$\begin{aligned} \alpha_v > \alpha_h &: \text{ untersteuernd} \\ \alpha_v = \alpha_h &: \text{ neutral steuernd} \\ \alpha_v < \alpha_h &: \text{ übersteuernd} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3 Fahrwerkregelsysteme

Die hergeleiteten Modelle kommen im Bereich der Fahrwerkregelsysteme zum Einsatz. Als *Fahrwerk* (engl. *chassis*) bezeichnet man die Gesamtheit aller beweglichen Teile eines Fahrzeugs, die der Verbindung zur Fahrbahn dienen. Dazu gehören Räder, Radaufhängung, Federung, Stoßdämpfer, Lenkung sowie die Bremse. Die Karosserie über dem Fahrwerk wird *Fahrzeugaufbau* (engl. *bodywork*) genannt. Fahrwerkregelsysteme sind eine Untergruppe der Fahrerassistenzsysteme.

Definition 2.1 (Fahrerassistenzsystem): Assistenzsysteme umfassen Informationen über eine Handlung, die Handlungsanweisung sowie den Eingriff in eine ausgeführte Handlung. Der Begriff *Fahrerassistenzsystem* (engl. *driver assistance system*) wird verwendet, wenn es sich um eine fahrrelevante Unterstützung oder Information handelt [FGdF06].

Üblich ist eine Unterteilung der Fahrerassistenzsysteme in Komfortsysteme und Sicherheitssysteme. Komfortsysteme unterstützen den Fahrer in bestimmten Fahrsituationen oder übernehmen definierte Fahraufgaben. Sicherheitssysteme greifen ein, wenn der Fahrer in sicherheitskritischen Situationen falsch, zu spät oder gar nicht reagiert. Diese Aufteilung ist auch bei Fahrwerkregelsystemen zu finden. Oftmals werden zusätzlich Fahrdynamiksystemen unterschieden.

Definition 2.2 (Fahrwerkregelsystem): Ein *Fahrwerkregelsystem* (engl. *chassis control system*) stellt ein Regelsystem dar, das im Bereich des automobilen Fahrwerks zum Einsatz kommt. Durch Fahrwerkregelsysteme wird der Fahrer unterstützt und entlastet [MW04].

Beispiele für Fahrwerkregelsysteme aus dem Sicherheitsbereich sind das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), die die Fahrzeugbewegung gezielt

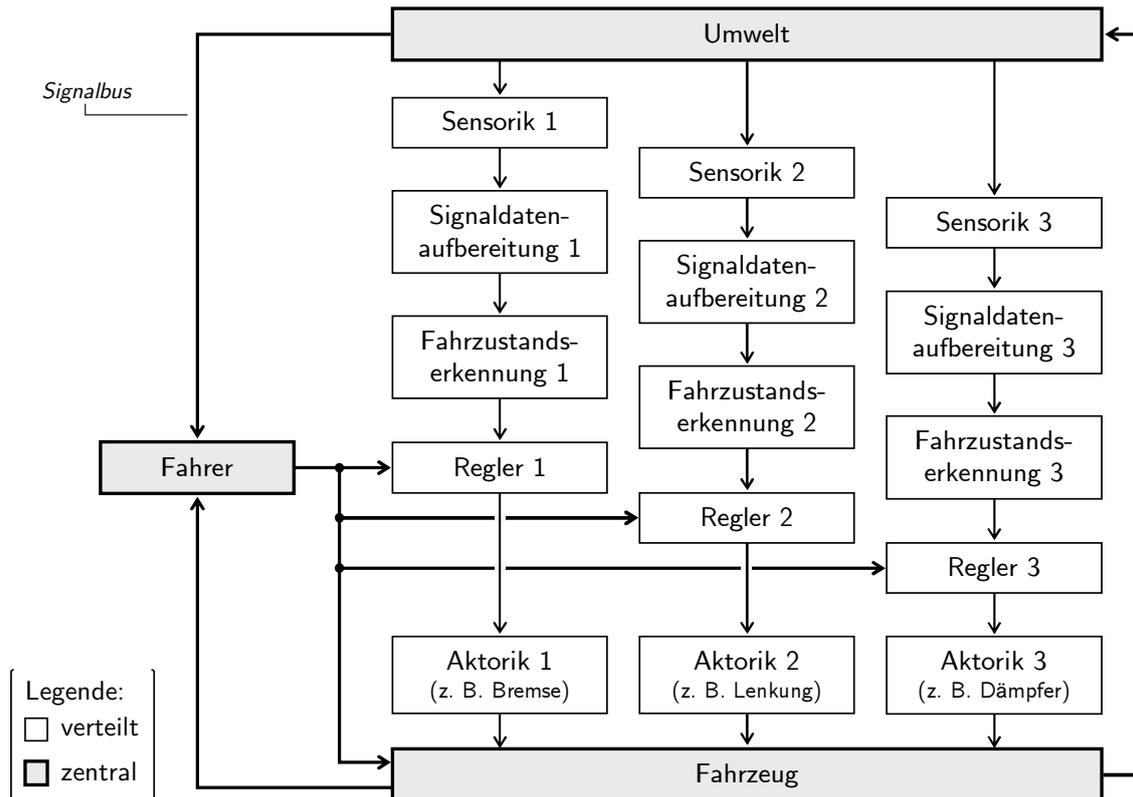


Bild 2.5: Der Koexistenzansatz beschreibt die Fahrwerkregelsysteme als parallele Architektur [KESS06, SR02]

über die Bremse und das Motormoment beeinflussen. Geregelte Allradssysteme und Feder-Dämpfer-Einheiten seien exemplarisch aus dem Bereich der Fahrdynamik- bzw. Komfortsysteme genannt. Je nach umgesetztem Funktionsumfang sind die Einteilungen jedoch als fließend zu betrachten.

Oft sind mehrere Fahrwerkregelsysteme in einem Fahrzeug verbaut. Man spricht vom *Koexistenzansatz*, wenn die Regelsysteme unabhängig voneinander entwickelt werden und als parallele Wirkungsketten im Fahrzeug angeordnet sind, siehe **Bild 2.5**. Das klassische Regelsystem aus Regler und Regelstrecke wird im Fahrwerksbereich um zwei Komponenten erweitert. Eine Signaldataufbereitung übernimmt die Kompensation von Signalungenauigkeiten (z. B. von Nullpunktfehlern) sowie die Überwachung der Sensorsignale hinsichtlich unzulässiger Abweichungen. Die Fahrzustandserkennung ermittelt wichtige Kenngrößen für die Regelung bezüglich des Fahrverhaltens (z. B. übersteuernd/untersteuernd, stationär/instationär).

Da die einzelnen Regler unterschiedliche Regelstrategien verfolgen (z. B. Komfort, Fahrdynamik, Sicherheit), müssen sie bezüglich ihres Wirkungsbereiches so abgestimmt werden, dass sie sich gegenseitig nicht negativ beeinflussen [SR02]. In den meisten Fällen wird das in der Applikationsphase der Regelsysteme und damit in der letzten Phase des Entwicklungsprozesses sichergestellt [KESS06]. Dies führt zu einer Entkopplung der Regler, was mit einer Einschränkung des Funktionspotenzials der Einzelsysteme verbunden ist [SR02].

2.4 Vernetzte Fahrwerkregelsysteme: Stand der Technik

Um das Potenzial der Gesamtheit der Einzelsysteme effizienter auszuschöpfen, werden Strategien unter der Bezeichnung der *vernetzten Fahrwerkregelsysteme* (engl. u. a. *global chassis control*) entwickelt.

Definition 2.3 (Vernetzte Fahrwerkregelsysteme): Die Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen kann als das Bestreben aufgefasst werden, alle in einem Fahrzeug koexistierenden Fahrwerkskomponenten und Regelsysteme zu kombinieren, um bezüglich Sicherheit, Komfort und Wirtschaftlichkeit besser zu agieren als bei einer reinen Addition der Einzelsysteme. Das beinhaltet im Allgemeinen Synergieeffekte im Bereich der Sensoren, der Aktoren und der Reglerarchitektur [LF00].

Der Fahrzeugregler des ESP stellt den ersten Vorstoß in diese Richtung dar, dessen Ziel die Stabilisierung des Fahrzeugs ist. Durch gezielte Ansteuerung der Einzelkomponenten Antiblockiersystem, Antriebsschlupfregelung und Motorschleppmomentenregelung ist es möglich, den für die jeweilige Fahrsituation geeigneten Stabilisierungseingriff auszuführen. Dieser wird als radindividueller Bremseneingriff, durch Beeinflussung des Motormoments oder als Kombination aus beiden Möglichkeiten realisiert. Eine Erweiterung des Ansatzes stellt die Kombination von Überlagerungslenkung und ESP dar [SDM⁺08].

Die Möglichkeiten vernetzter Fahrwerkregelsysteme sind aber weitaus vielfältiger und werden im Folgenden in Kürze dargestellt. Die genannten Teilaspekte sind als sich überschneidende Sichtweisen auf ein komplexes Gesamtsystem zu verstehen.

2.4.1 Funktionsintegration

Der Funktionsaspekt ist der offensichtlichste Treiber für die Vernetzung, um das Funktionspotenzial der steigenden Anzahl von Regelsystemen zum Nutzen des Kunden auszuschöpfen. Daneben kommt einem reduzierten Applikationsaufwand für die Einzelsysteme bei kombinierten Eingriffen eine steigende Bedeutung zu. Die Sicherstellung einer nicht negativen Beeinflussung der Einzelsysteme geht in die gezielte Ausnutzung der Kopplungen für neue, wertsteigernde Funktionen über [KESS06, SR02]. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, eine gemeinsame Informationsbasis zu schaffen. Die Überwachung auf Signalfehler [Hof03, Mun06] und das Erkennen der Fahrsituation [MKA⁺07] erfolgen folglich einheitlich und zentral, um unterschiedliche Interpretationen und folglich Reaktionen zu unterbinden, siehe **Bild 2.6**. Die zentralen Komponenten versorgen nicht nur den Fahrzeugregler mit Signalen, sondern auch die unterlagerten lokalen Regler. Die Priorisierung der Einzelsysteme bei kombinierten Stelleneingriffen übernimmt ebenfalls der Fahrzeugregler [KESS06, KRSV06]. Aufgrund der Zentralisierung des ersten Teils der Wirkkette spricht man vom *Integrationsansatz*. Unterlagert angeordnet sind die lokalen Regler samt zugehöriger Aktorik. Sie besitzen bereits eine Grundfunktionalität, ordnen sich aber stets den verpflichtenden Sollvorgaben des Fahrzeugreglers unter [SR02].

2.4.2 Hardwarearchitektur

Heutige Fahrwerkregelsysteme werden in den meisten Fällen von Zulieferern entwickelt und inklusive Sensorik, Steuergerät und Aktorik an den Fahrzeughersteller geliefert. Mehrfachnutzung von Teilen eines Fahrwerkregelsystems ist dadurch erschwert. Die Situation wird verschärft durch nicht in der Basisausstattung eines Fahrzeugs verbaute, sondern optional in-

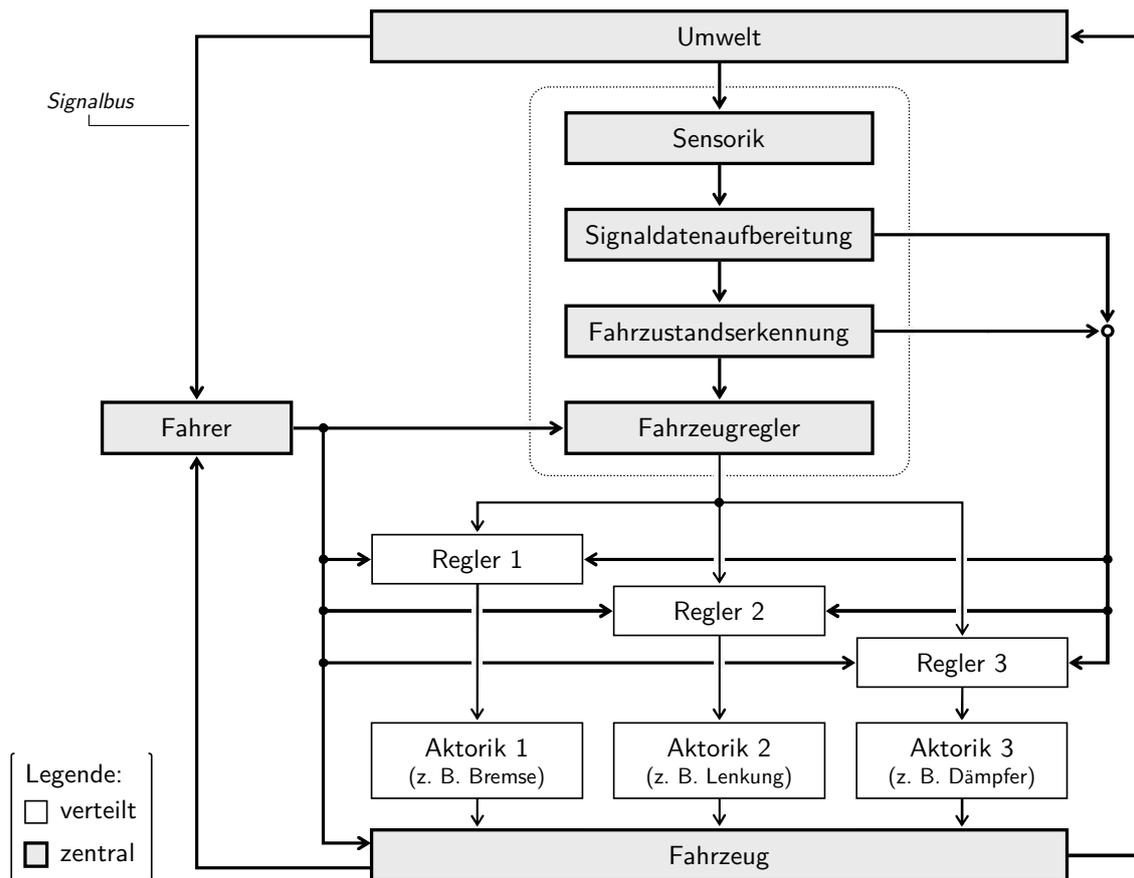


Bild 2.6: Der Integrationsansatz fasst die der Regelung vorgelagerten Komponenten zu zentralen Instanzen zusammen [KESS06, KRSV06, SR02]

tegrierte Komponenten, wie z. B. Sensoren [KESS06]. Der Integrationsansatz kann die Redundanzen auf Seiten der Bauteile beseitigen, indem der erste Teil der Wirkkette der Regelsysteme zentralisiert, die lokalen Regeleinheiten dagegen funktional reduziert werden, siehe **Bild 2.6**. Letztere beinhalten ausschließlich die Grundfunktionalität sowie die Aktoransteuerung und -diagnose [KRSV06, SR02]. Voraussetzung für diesen Ansatz ist, dass die Kosten eines Fahrzeugs in der Basisausstattung nicht oder nicht nennenswert angehoben werden [KRSV06]. Mit zunehmendem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge ergibt sich aufgrund der erweiterten Basisfunktionalität und der damit verbundenen schlankeren Erweiterung des Gesamtsystems ein steigendes Einsparpotenzial [KESS06].

Anzumerken ist, dass der Ansatz unabhängig von der Steuergeräteplattform ist. Möglich ist beispielsweise die Integration der zentralen Softwarekomponenten auf einem eigenständigen Steuergerät sowie die Migration auf das Steuergerät der Bremsenregelsysteme [KRSV06, Sch04]. Die Steuergeräteleistung sollte skalierbar und damit an den Ausstattungsgrad eines Fahrzeugs anpassbar sein.

2.4.3 Softwarearchitektur

Um neben den Steuergeräten auch die von ihnen beherbergte Software auf das Zielfahrzeug zuschneiden zu können, ist eine strikte Trennung zwischen Hard- und Software Voraussetzung. Letztere muss modul- bzw. objektbasiert aufgebaut sein und eine Kapselung definierter Funktionen bewirken, um höchsten Ansprüchen bezüglich Sicherheit, Wiederverwendbarkeit, Aus-

tauschbarkeit, Skalierbarkeit und Testbarkeit zu genügen [SR02]. Regelsysteme werden nicht nur über eigene Steuergeräte verwirklicht, sondern die Leistungsreserven der Steuergeräte unter den Funktionen aufgeteilt, indem virtuelle Logiksteuergeräte definiert werden [KRSV06]. Ansätze dieser Art werden innerhalb der Kooperationen CARTRONIC [KH02, KFCK03] und AUTOSAR (*engl. automotive open system architecture*) [HBS⁺06, HSF⁺04, Mor06] vorangetrieben.

2.4.4 Prozessintegration

Der Entwicklungsprozess wird durch den von vernetzten Fahrwerkregelsystemen eingeleiteten Umbruch und die erhöhten Sicherheitsanforderungen der Regelsysteme maßgeblich beeinflusst. Während Zulieferer oftmals komplette Regelsysteme an den Fahrzeughersteller liefern, wird sich im Zuge der Vernetzung die Komplexität auf lokale Regler inklusive Aktorik reduzieren, was den Lieferantenwechsel vereinfachen soll [KRSV06, LF00, SR02]. Die Entwicklung des ersten Teils der Wirkungskette wird aufgrund seiner Markenrelevanz beim Fahrzeughersteller angesiedelt sein.

Durch die zentralen Softwarekomponenten wird zum einen die bisherige parallele Entwicklungsweise der Einzelsysteme in eine ganzheitliche überführt, die den vorhandenen Wechselwirkungen im Gesamtsystem Rechnung trägt [PK04]. Zum anderen führt die Zunahme sicherheitsrelevanter Regelsysteme zu einem auf funktionale Sicherheit ausgelegten Prozess, der die hohen Anforderungen an die Systemzuverlässigkeit gewährleistet [Int98, KESS06, SLS⁺06]. Das Regelsystem mit den höchsten Anforderungen an die Sicherheit gibt die Anforderungen an die gemeinsam genutzten Komponenten im Gesamtsystem vor. Der Sicherheitsaspekt ist maßgeblicher Einflussfaktor und muss in Form eines durchgängigen Sicherheitskonzepts im gesamten Entwicklungsprozess verankert werden [SLM07].

Der Ansatz der vernetzten Fahrwerkregelsysteme bietet diesbezüglich den Vorteil, dass aufgrund der zentralen Architektur die Kopplungen der Teilsysteme von vornherein in die Entwicklung integriert und den Entwicklern bewusster vor Augen geführt werden. Des Weiteren ist das Potenzial bezüglich Rekonfiguration des Systems im Fehlerfall aufgrund der breiteren Signal- und Informationsbasis vielfältiger [KESS06, LF00]. Allerdings birgt die Zentralisierung im Gegensatz zu unabhängigen Einzelsystemen auch die Gefahr, dass von einem zentralen Ausfall viele Systeme zugleich betroffen wären, was durch robuste, bei Bedarf redundant auszuführende und durchgängig getestete Komponenten ausgeschlossen werden muss.

2.5 Zusammenfassung

Mit dem automobilen Fahrwerk wird der Anwendungsbereich von Signaldatenaufbereitungen definiert. Sie kommen hier in Kombination mit Fahrwerkregelsystemen zum Einsatz. Gemeinsame Grundlage beider Komponenten bilden physikalische Modelle zur Beschreibung der Bewegung eines Fahrzeugs, die in Form von Einspur- und Zweispurmodell ausgeführt werden und im Verlauf dieser Arbeit als Referenz für Sensorabgleiche und Fehlererkennungsmethoden herangezogen werden.

Die Vernetzung der Fahrwerkregelsysteme soll neben der herstellereigenen Ausschöpfung des Funktionspotenzials zusätzlich eine Steigerung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit realisieren. Neben den Möglichkeiten für die Fahrdynamikregelung durch kombinierte Stelleingriffe sich gegenseitig ergänzender Regelsysteme ergeben sich durch die Zentralisierung neue Her-

ausforderungen für Signaldatenaufbereitung und Fahrzustandserkennung. Vor allem aufgrund der parallelen Versorgung von mehr als einem Regelsystem mit Signalen. Die Zunahme von Regelsystemen im Fahrwerksbereich macht darüber hinaus die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Entwicklungsansatzes deutlich, der die Bereiche der Software- und Hardwarearchitektur sowie einen durchgängigen Entwicklungsprozess einschließt.

Die vielfältigen Einflussmöglichkeiten müssen ihre Berücksichtigung im Entwurf der ZSDA finden und wirken sich direkt auf die Anforderungserhebung in Kapitel 5 aus.

3 Signaldatenaufbereitungen für Fahrwerkregelsysteme

Signaldatenaufbereitungen werden in Kombination mit Fahrwerkregelsystemen eingesetzt. Da sie im Normalbetrieb keinen spürbaren Einfluss auf das Ergebnis der Regelung ausüben, wird im Folgenden die Notwendigkeit von Signaldatenaufbereitungen für unterschiedliche Industriezweige geklärt. Anschließend erfolgt eine Erläuterung der Hauptaufgaben der Signalaufbereitung. Der umgesetzte Funktionsumfang variiert vor allem mit der im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Fahrdynamiksensorik und der Sicherheitsrelevanz der Regelsysteme, die die bereitgestellten überwachten Signale nutzen. Die verfügbaren Methoden zur Realisierung der Funktionalität führen abschließend zur Definition des Standes der Technik.

3.1 Notwendigkeit

Die Frage nach der Notwendigkeit einer Signaldatenaufbereitung ist mit Blick auf die Sicherheitsrelevanz der mit Signalen versorgten Regelsysteme zu beantworten. Je kritischer sich ein Regeleingriff auf Grundlage fehlerhafter Messgrößen auf das Gesamtsystem auswirken kann, desto höher sind die Anforderungen an die Signalqualität der verwendeten Signale. Ein wichtiger Faktor zur Beurteilung der Sicherheitsrelevanz ist der durch einen Regeleingriff potentiell einbezogene Arbeits- oder Manövrierraum eines Regelsystems [KG02b]:

- ▷ In der *Automatisierungstechnik* im Sinne von Robotik und automatisierten Anlagen sind geregelte Systeme im Allgemeinen stationär installiert. Ihr Arbeitsbereich ist für das Bedienpersonal im Betrieb nicht zugänglich. Das primäre Ziel der Automation ist in Richtung einer hohen Verfügbarkeit verschoben, um beispielsweise Produktionsausfälle zu minimieren. Anforderungen an die Sicherheit können hoch sein, erfordern in der Regel aber keine abrupten Reaktionen bei auftretenden Fehlern. Auswirkungen beschränken sich auf Beschädigung von Maschine und Material [Bre05, KG02b].
- ▷ Der Manövrierraum von *Schienenfahrzeugen* ist auf den Gleisweg beschränkt, das Risiko für die Umwelt somit begrenzt. Um für jedes Fahrzeug stets einen ausreichenden Bremsweg bereitzuhalten (dieser kann bis zu 1000 m betragen), wird der Verkehrsweg in Streckenblöcke eingeteilt, die nur von einem Zug befahren werden dürfen und fortlaufend überwacht werden [Sch02a, Sch02b]. Regelsysteme werden sowohl im Sicherheits- als auch im Komfortbereich eingesetzt. Beispiele sind Gleitschutzsysteme für einen minimalen Bremsweg und Materialverschleiß sowie Züge mit Neigetechnik und aktiven Fahrwerken [Hes06, HS06, SVE⁺06]. Diese Systeme können durch Fehleingriffe oder Ausfälle nicht zu sicherheitskritischen Situationen führen bzw. es steht aufgrund des Sicherheitsabstandes der einzelnen Züge ausreichend Zeit zur Verfügung, um das Schienenfahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen.
- ▷ Analog zur Automatisierungstechnik haben *Flugzeuge* hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit, zusätzlich aber an die Sicherheit. Eine in der Luftfahrt etablierte Technik zur Auflösung des Zielkonflikts ist die Nutzung von Mehrfachredundanz, d. h. die Um-

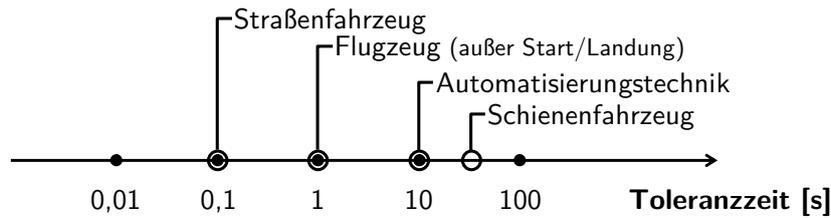


Bild 3.1: Toleranzzeit unterschiedlicher Verkehrsmittel zur Erkennung von Fehlern [KG02a]

setzung einer Funktionalität mit mindestens zwei unterschiedlichen Ansätzen, was allerdings mit höheren Kosten verbunden ist [WIHS04]. Beispielfähig seien Regelsysteme genannt, die eine *Steuerung des Flugzeugs ohne mechanische Kopplung* zulassen (engl. *fly-by-wire*) [Yeh98]. Jedoch werden die hohen Anforderungen durch den relativ großen Manövrierraum von Flugzeugen entschärft [KG02b]. Der überwachte Luftverkehr lässt Toleranzzeiten von 1 s zu [KG02a]. Ausnahmen stellen die Start- und Landephase eines Flugzeugs dar, die niedrigere Toleranzzeiten aufweisen.

- ▷ Anforderungen an die Verfügbarkeit sind bei *Straßenfahrzeugen* ähnlich hoch wie in der Luftfahrtindustrie [KG02a]. Da sich Kraftfahrzeuge im Gegensatz zu den anderen Verkehrsmitteln aber in einem stark befahrenen Verkehrsraum bewegen, gelten höhere Anforderungen bezüglich der Reaktionszeit [KG02b]. Reagiert werden muss innerhalb weniger Rechenzyklen in der Größenordnung von 100-200 ms, was sich in Form hoher Anforderungen an die Systemsicherheit auswirkt [KG02a]. Die höchsten Anforderungen gelten für sicherheitsrelevante Systeme wie Überlagerungslenksysteme oder *vom Fahrer mechanisch entkoppelte Bremssysteme* (engl. *brake-by-wire*), die das Fahrverhalten unabhängig vom Fahrzeugführer beeinflussen können.

Eine Übersicht über die dargestellten Industriezweige bezüglich ihrer Anforderungen an die Toleranzzeit ist in **Bild 3.1** wiedergegeben. Die Toleranzzeit ist direkt proportional zum Manövrierraum eines Fahrzeugs. Nimmt man die Start- und Landephase von Flugzeugen aus, gelten für Straßenfahrzeuge die höchsten Anforderungen bezüglich der Reaktions- und Fehlererkennungszeiten. Aufgrund der deutlich höher zu veranschlagenden Kosten für eine Absicherung über Mehrfachredundanz, z. B. bei Sensorik, Aktorik und Ansteuerung, liegt der Fokus im Automobilssektor stärker auf der Umsetzung von Maßnahmen über Algorithmen. Diese Tatsache begründet die Verbreitung von aufwändigen Signaldatenaufbereitungen in der Automobilindustrie.

3.2 Aufgaben

Eine Signaldatenaufbereitung wird als Komponente von Regelsystemen eingesetzt, um von einem Regler benötigte Größen in einer geforderten Qualität bereitzustellen bzw. diese Qualität fortwährend zu überwachen. Sie ist zwischen den Sensoren und dem Regler angeordnet, siehe **Bild 2.5**. Ihre Aufgabe umfasst den Abgleich von sensor- oder umweltbedingten Signalungenauigkeiten, die Signalüberwachung zur Erkennung von Fehlern und die Bereitstellung von Schätzgrößen [Hof03]. Die drei Teilaspekte werden im Folgenden vorgestellt.

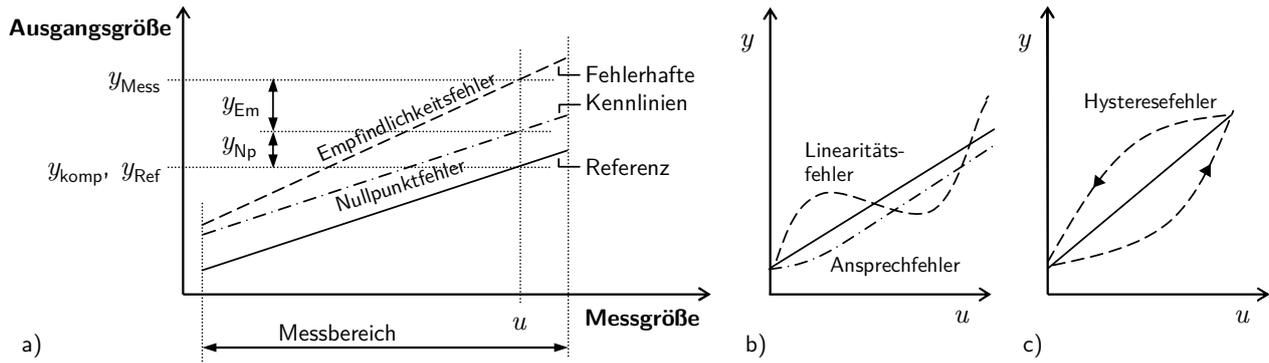


Bild 3.2: Statische Kennlinien eines Sensorsignals: a) Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler mit Kenngrößen, b) Linearitäts- und Ansprechfehler sowie c) Hysteresefehler [Hof06, Kel08]

3.2.1 Sensorabgleich

Sensorabgleiche beziehen sich auf den Zusammenhang zwischen Mess- und Ausgangsgröße eines Sensors. Während die Messgröße je nach Messprinzip einen Zustand in Form einer Spannung, einer Ausdehnung etc. registriert, wird mit der Ausgangsgröße die gesuchte physikalische Größe bereitgestellt, die mit dem Sensor ermittelt werden soll (z. B. eine Beschleunigung). Den Zusammenhang repräsentiert eine *statische Kennlinie*. Diese kann eine Reihe von Abweichungen aufweisen [WW00], die je nach Messprinzip abhängig von der Umwelt (z. B. der Temperatur) sein, aber auch über die Lebenszeit eines Bauteils variieren können, siehe **Bild 3.2:**

- ▷ Ohne Einwirkung auf die Messeinrichtung stellt sich ein *Nullpunktfehler* (engl. *offset*) als konstante Abweichung der Ausgangsgröße von der Nulllage ein.
- ▷ Ein *Steigungs-, Verstärkungs- oder Empfindlichkeitsfehler* liegt vor, wenn die Steigung der Ist- von der der Soll-Kennlinie abweicht.
- ▷ Ein *Ansprech- oder Anlauffehler* tritt auf, wenn eine Änderung der Ausgangs- erst bei Mindestbeträgen der Messgröße und damit verzögert auftritt.
- ▷ Ein *Linearitätsfehler* ist vorhanden, wenn statt des linearen Soll- ein nichtlinearer Ist-Zusammenhang zwischen Mess- und Ausgangsgröße existiert.
- ▷ Ein *Hysteresefehler* besteht, wenn die Kennlinie für eine Erhöhung der Messgröße einen anderen Verlauf aufweist als für eine Verringerung.

Im vom Sensorhersteller anzugebenden Messbereich (vgl. **Bild 3.2a**) werden spezifizierte Fehlerschwellen nicht überschritten, um eine definierte Signalqualität zu erreichen. Die Qualität lässt sich weiter erhöhen, wenn vorhandene Abweichungen kompensiert werden [Hof06]. Ausgehend von den erwähnten Fehlerarten wird versucht, diese zu ermitteln. Dabei beschränkt man sich in der Regel auf Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler. Die Bestimmung von Linearitäts- und Hystereseabweichungen ist mit erheblichem Aufwand verbunden und ausschließlich dynamisch möglich, da der Korrekturwert vom Betrag bzw. vom Gradienten der Messgröße abhängt.

Während in der Sensortechnik gewöhnlich der funktionale Zusammenhang zwischen Mess- und Ausgangsgröße interessiert [TO98], werden einer Signaldatenaufbereitung ausschließlich die Ausgangsgrößen der Sensoren übermittelt. Die Kompensation erfolgt nach **Bild 3.2a** wie

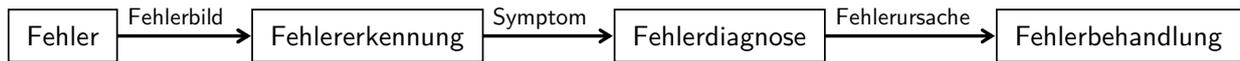


Bild 3.3: Kette der Schritte vom Auftreten des Fehlers über Fehlererkennung und -diagnose bis zur Fehlerbehandlung, angelehnt an [Ise05]

folgt:

$$y_{\text{komp}} = r_{\text{Em}} \cdot y_{\text{Mess}} - y_{\text{Np}} \quad (3.1)$$

Die gemessene Ausgangsgröße y_{Mess} wird über den multiplikativen Faktor

$$r_{\text{Em}} = \frac{y_{\text{Ref}}}{y_{\text{Mess}}} \quad \text{für} \quad y_{\text{Em}} \gg y_{\text{Np}} \quad (3.2)$$

vom Empfindlichkeitsfehler y_{Em} sowie über den additiven Faktor

$$y_{\text{Np}} = y_{\text{Mess}} - y_{\text{Ref}} \quad \text{für} \quad y_{\text{Np}} \gg y_{\text{Em}} \quad (3.3)$$

vom Nullpunktfehler y_{Np} befreit. Die kompensierte Ausgangsgröße ist y_{komp} , die verwendete Referenz y_{Ref} . Der Betrag des Empfindlichkeitsfehlers ergibt sich aus der Abweichung des Empfindlichkeitsfaktors r_{Em} vom fehlerfreien Wert eins: $y_{\text{Em}} = |(r_{\text{Em}} - 1) \cdot y_{\text{Mess}}|$. Es ist ersichtlich, dass sich beide Fehlerarten überlagern. Daher muss eine Vorgehensweise gewählt werden, die dieser Kopplung Rechnung trägt. In der Regel wird zunächst der Nullpunktfehler für kleine Beträge und folglich kleine Empfindlichkeitsfehler bestimmt. Der Empfindlichkeitsabgleich erfolgt dagegen bei größeren Beträgen des Nutzsignals, da der Einfluss des Empfindlichkeitsfehlers proportional zum Betrag zunimmt. Soll keine Korrektur vorgenommen werden, sind $r_{\text{Em}} = 1$ bzw. $y_{\text{Np}} = 0$ anzunehmen.

3.2.2 Sensorüberwachung

Signaldatenaufbereitungen sind fehlertolerante Systeme. Fehlertoleranz ist die funktionale Eigenschaft eines Systems, die Robustheit gegenüber möglichen Fehlern gewährleistet.

Definition 3.1 (Fehlertoleranz): Unter *Fehlertoleranz* (*engl. fault tolerance*) versteht man die Fähigkeit eines Systems, trotz fehlerhafter Komponenten seine Funktionalität vollständig oder in einem festgelegten reduzierten Umfang aufrecht zu erhalten [AHKS02, KG02a].

Zur Realisierung von Fehlertoleranz müssen die Schritte Fehlererkennung, -diagnose und -behandlung durchgeführt werden, um in Abhängigkeit der Fehlerursache Maßnahmen ergreifen zu können, die die Verfügbarkeit des Systems aufrechterhalten, siehe **Bild 3.3**. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von *Fehlererkennung und -diagnose* (*engl. fault detection and identification, FDI*). Die Fehlerdiagnose wird bisweilen auch als Teil der Fehlerbehandlung angesehen [ALR01], sie soll hier jedoch neben Erkennung und Behandlung als Kernaufgabe erläutert werden. Die drei Komponenten beeinflussen den Signalverarbeitungsprozess ausschließlich im Fehlerfall.

Fehlererkennung

Ein auftretender Fehler macht sich über ein Fehlerbild im Prozess bemerkbar. Je nachdem, ob das Fehlerbild auf quantifizierbaren oder auf qualitativen Informationen aufbaut, spricht man

von analytischer oder heuristischer Symptomerzeugung [BBF⁺06, Ise05]. Ziel der Fehlererkennung ist die Ermittlung von Merkmalen oder Symptomen, die als Grundlage der Fehleridentifikation dienen. Die *analytische Symptomerzeugung* untergliedert sich nach [BBF⁺06, Höf96] in folgende Untergruppen:

- ▷ *Grenzwertüberwachungen* (engl. *range check*) überprüfen messbare Signale auf plausible Grenzwerte, welche statisch definiert oder adaptiv sein können.
- ▷ Eine *Signalanalyse* (engl. *signal model-based methods*) kann für einzelne Signale nach Bildung von Signalmodellen angewendet werden. Als Kennwerte können Varianzen, Amplituden, Frequenzen etc. dienen.
- ▷ Mittels der *Prozessanalyse* (engl. *process model-based methods*) können Relationen zwischen unterschiedlichen Signalen über analytische Redundanz (engl. virtual redundancy), d. h. über mathematische Prozessmodelle hergestellt werden. Gängige Methoden sind Paritätsgleichungen, Parameterschätzverfahren oder auch Zustandsschätzmethoden. Symptome sind demzufolge Residuen, Parameter oder Zustandsgrößen.

Grenzwertüberwachung und Signalanalyse werden auch als signalbasierte Methoden bezeichnet, da für eine Aussage ausschließlich das zu bewertende Signal benötigt wird. Dagegen ist die Prozessanalyse den modellbasierten Ansätzen zuzuordnen, die weitere Größen und korrespondierende Modellbeziehungen in die Bewertung eines Signals einbeziehen.

Die *heuristische Symptomerzeugung* nutzt die Erfahrungen, die während des Betriebs, der Wartung, durch Belastungstests etc. eines Prozesses gesammelt wurden. Dieses Wissen kann auch statistische Daten umfassen. Heuristische Angaben können beispielsweise Geräusche, Schwingungen und Verschleißerscheinungen sein. Heuristische Symptome stellen folglich unscharfe Zahlenwerte oder linguistische Variablen wie „klein“, „wenig“, „langsam“ dar [BBF⁺06]. Analytische und heuristische Symptomerzeugung können sich gegenseitig wirksam ergänzen.

Fehlerdiagnose

Die Fehlerdiagnose beinhaltet die Bestimmung von Fehlercharakteristika wie Typ, Größe, Ort und Erkennungszeitpunkt auf Basis der zuvor generierten Symptome. Die Folgerung aus diesen Informationen auf eine Fehlerursache kann über unterschiedliche Vorgehensweisen erfolgen [ALR01, BBF⁺06, Hof03]:

- ▷ *Klassifikationsmethoden* müssen erlernt werden, indem der Prozess mit möglichen Fehlern beaufschlagt und die zugehörigen Eingangsmuster für eine Klassenbildung zusammengetragen werden.
- ▷ *Fehler-Symptom-Kausalitäten* machen der Diagnose Wissen über einen kausalen Zusammenhang zwischen Symptom und Fehlerursache in Form von Regeln zugänglich.

Fehlerbehandlung

Wenn die Ursache eines Fehlers gefunden ist, wird die Fehlerbehandlung eingeleitet [Hof03]. Diese lässt sich nach [ALR01] wie folgt gruppieren:

- ▷ Über *Fehlerisolierung* (engl. *fault isolation*) werden fehlerhafte Komponenten dem Prozess entzogen. Dies kann sich sowohl auf Computerkomponenten (engl. hardware) als auch auf Teile der Implementierung (engl. software) beziehen.

- ▷ *Rekonfiguration* (engl. *reconfiguration*) führt dazu, dass vorgehaltene Ersatzkomponenten die Aufgaben der fehlerhaften übernehmen bzw. dass die bisher von der fehlerhaften Komponente übernommenen Aufgaben auf andere verteilt werden.
- ▷ Eine *Systemwiederherstellung* (engl. *system recovery*) überführt einen fehlerhaften in einen – in der Regel in der Vergangenheit liegenden – fehlerfreien Zustand.
- ▷ *Reinitialisierung* (engl. *reinitialization*) beendet den laufenden Prozess und startet ihn neu, um den fehlerhaften Zustand zu beseitigen.

Im Automobilbereich kommen vor allem Fehlerisolierung und Rekonfiguration zum Einsatz. Eine Reinitialisierung ist in der Regel mit jedem Betätigen der Zündung eines Fahrzeugs gegeben, kann aber auch im laufenden Betrieb erfolgen. Systemwiederherstellungen sind für Echtzeitsysteme nicht zulässig, da sie zum einen die aktuellen Prozesseingangsgrößen kurzzeitig zugunsten eines definierten fehlerfreien Zustand ignorieren, zum anderen das Wiederauftreten eines Fehlers nicht verhindern.

3.2.3 Schätzgrößen

Für Signalabgleiche und -überwachungen werden neben den Sensorgrößen weitere Signale benötigt. Beispiele aus dem Automobilbereich sind eine aus den Raddrehzahlen geschätzte Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und -beschleunigung. Da diese Größen ebenfalls für nachfolgende Komponenten wie Fahrzustandserkennung und Regelung von Interesse sind, werden sie innerhalb der Signaldatenaufbereitung als erstem Nutzer einmalig geschätzt und nachfolgenden Komponenten zur Verfügung gestellt [Hof03, Mun02]. Die Bereitstellung von Schätzgrößen kann beispielsweise für Größen wie den Fahrbahnreibwert auch von der Fahrzustandserkennung übernommen werden [MKA⁺07].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Aspekt der Schätzgrößenbereitstellung nicht weiter betrachtet.

3.3 Realisierung von Signaldatenaufbereitungen: Stand der Technik

Nach der Definition der Aufgaben einer Signaldatenaufbereitung wird der Stand der Technik bezüglich der Umsetzung von Signalabgleich, Fehlererkennung und Fehlerdiagnose zusammengefasst. Auf den Bereich der Fehlerbehandlung wird nicht näher eingegangen, da die Realisierung stark vom Anwendungssystem geprägt ist.

3.3.1 Methoden des Sensorabgleichs

Von den in Abschnitt 3.2.1 aufgeführten Abweichungsarten der statischen Kennlinie wird im Automobilbereich vor allem der Nullpunktfehler ermittelt und kompensiert, zum Teil auch der Empfindlichkeitsfehler. Die gegenseitige Wechselwirkung beider Fehlerarten wird durch unterschiedliche Fahrsituationen, in denen die Abgleiche aktiv sind, entschärft [KMPF06]. Die angewandten Methoden unterscheiden sich bezüglich der Referenzbildung, die auf Basis der abzugleichenden Größe selbst (*Eigenreferenz*, siehe **Bild 3.4**) oder auf Basis weiterer Messgrößen (*Fremdreferenz*) bestimmt werden kann. Da die Bestimmung der Referenz in der

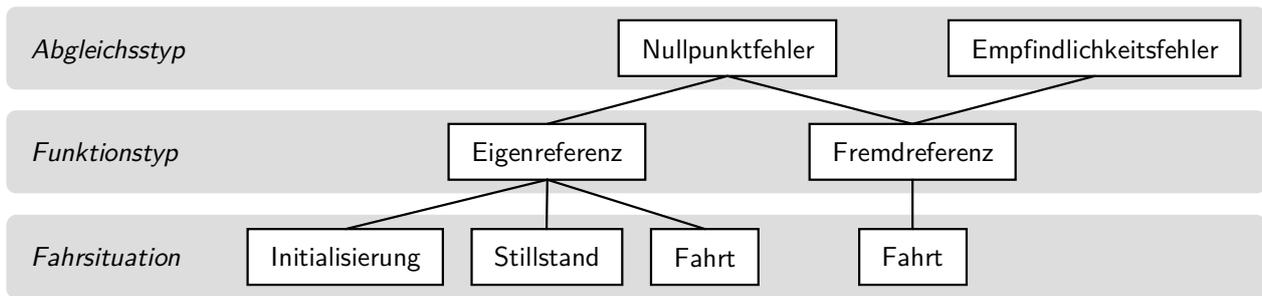


Bild 3.4: Kategorisierung der Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehlerabgleiche

Regel nur in bestimmten Fahrsituationen möglich ist bzw. die zugrunde liegenden Modelle nur begrenzt verfügbar sind, müssen außerdem Zulassungsbedingungen definiert werden. Zusätzliche Abhängigkeiten zwischen den Abgleichen unterschiedlicher Sensoren ergeben sich bei der Fremdreferenzbildung durch die Anwendung analytischer Redundanzen und die damit verbundene Verquickung der Abgleiche mehrerer Messgrößen.

Alle Methoden haben gemeinsam, dass die Fehler aus der Differenz von Mess- y_{Mess} und Referenzgröße y_{Ref} ermittelt werden, siehe Gleichungen (3.2) und (3.3). Der Stand der Technik der Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehlerbestimmung wird nachfolgend zusammengefasst. Die Kompensation der Messgröße erfolgt nach Glg. (3.1). Einige Ansätze ermöglichen darüber hinaus die Bereitstellung einer Toleranz, die eine Aussage über die Güte der ermittelten Abgleichswerte oder den Fortschritt der Bestimmung liefert [KMPF06, WULK04a, WULK04b].

Nullpunktfehlerabgleich mittels Eigenreferenz

Initialisierung Unter der Initialisierung versteht man das Aufstarten eines Systems, bei dem beispielsweise die Verfügbarkeit aller benötigten Eingangsgrößen geprüft wird, um eine definierte Ausgangsbasis der sich anschließenden Funktionsphase zu schaffen. In der Regel erfolgt die Initialisierung beim Betätigen der Zündung des Fahrzeugs. Zwischen dem letzten Betrieb und der aktuellen Initialisierung liegt eine beliebige Zeitspanne, die unter anderem eine Änderung der Umgebungsbedingungen zur Folge haben kann. Dieser Umstand wird für einen ersten Sensorabgleich ausgenutzt, indem der letzte, vor dem Herunterfahren des Systems in einem nicht-flüchtigen Speicher abgelegte Messwert mit dem aktuellen Sensorwert verglichen wird [SB06]. Eine vorhandene Differenz wird als Nullpunktfehler gewertet (z. B. als Folge von Temperaturschwankungen) und kompensiert.

Stillstand Die existierenden Ansätze unterscheiden sich bezüglich der Definition des Stillstandes und der Ermittlung des Nullpunktfehlers. Ein stehendes Fahrzeug wird in den meisten Fällen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit definiert und über weitere Größen wie beispielsweise Querbeschleunigung, Lenkradwinkel und Bremsdruck abgesichert [MA01, Wil93]. Besonderes Augenmerk muss auf Sondersituationen wie der Drehung eines stehenden Fahrzeugs auf einer Platte, einer Fähre etc. gelegt werden. Daher wird zum Teil zusätzlich die Gierwinkelgeschwindigkeit und -beschleunigung abgefragt [WULK04a]. Darüber hinaus müssen die Stillstandsbedingungen für eine definierte Zeitspanne erfüllt sein, bevor mit dem Abgleich begonnen werden kann.

Zur Nullpunktfehlerbestimmung wird für die Gierwinkelgeschwindigkeit die Tatsache ausgenutzt, dass bei Fahrzeugstillstand Null als Referenz vorausgesetzt werden kann. Tritt dennoch

eine Abweichung auf, wird der im Stillstand ermittelte Wert der Gierwinkelgeschwindigkeit als Nullpunktabweichung gewertet [Wil93, WULK04a]. In [MA01] wird dagegen für einen Gierwinkelgeschwindigkeitssensor im Stillstand definiert, dass ein Abgleich nicht notwendig ist, solange die Messwerte innerhalb eines Intervalls mit definierten Grenzen liegen. Liegt die gemessene Gierwinkelgeschwindigkeit außerhalb des Intervalls, wird die überschrittene Grenze durch den aktuellen Messwert ersetzt und die zweite Grenze auf Basis der vorgegebenen maximalen Intervallbreite angepasst. Der Nullpunktfehler ergibt sich als Mittelwert der aktuellen Intervallgrenzen.

Neben der Nullpunktfehlerbestimmung ermöglicht dieser Funktionstyp die Ermittlung einer Toleranz, die nach [WULK04a] während einer Stillstandsphase laufend in Richtung null minimiert wird. Sobald sich eine Fahrphase anschließt, wächst die Toleranz wieder langsam an, da in diese Fahrsituation keine Nullpunktfehlerbestimmung mehr möglich ist.

Auf Querbeschleunigungssensoren ist diese Vorgehensweise nicht übertragbar, da im Stillstand nicht zwischen einem Nullpunktfehler und dem Einfluss einer Seitenneigung der Fahrbahn unterschieden werden kann. Auch der Lenkradwinkel kann im Stillstand beliebige Beträge annehmen, so dass diese Methodik auch hier nicht zur Anwendung kommt.

Fahrt Die Fahrtabgleiche mit Eigenreferenz lassen sich wie die Methoden im Stillstand bezüglich der Zulassungsbedingungen und der Nullpunktfehlerermittlung differenzieren. Die meisten Ansätze setzen eine angenäherte Geradeausfahrt voraus, die nach Überschreitung einer Geschwindigkeitsschwelle kleine Lenkradwinkel(gradienten) und Querbeschleunigungen voraussetzt [PCC03]. In [BPH01] wird der Ansatz erweitert, indem die Zulassungsbedingungen in Abhängigkeit der Abgleichsnotwendigkeit – ermittelt aus der Differenz von Referenz- und Messgröße – bestimmt werden. Als weitere Einflussgröße wird das Auftreten einer Querbeschleunigung während der angenäherten Geradeausfahrt berücksichtigt. Voraussetzung eines Nullpunktabgleichs nach [OT94] ist dagegen ein stationärer Fahrzustand, der über eine beschränkte, für eine definierte Zeitdauer anhaltende Änderungsrate von Fahrzeug- und Gierwinkelgeschwindigkeit definiert wird. Auf diese Weise kann der Nullpunktgleich sowohl im Stillstand als auch während der Fahrt durchgeführt werden.

Die Methoden zur Bestimmung des Nullpunktfehlers basieren auf dem Postulat, dass der Nullpunktfehler eines Sensors gemessen werden kann, wenn im Durchschnitt geradeaus gefahren wird. Für den Lenkradwinkel wird in [PCC03] ein Ansatz gezeigt, der eine Referenz über eine starke Filterung der abzugleichenden Größe selbst bereitstellt, solange die Zulassungsbedingungen erfüllt sind. Ein äquivalentes Vorgehen wird in [OT94] für die Gierwinkelgeschwindigkeit beschrieben.

Eine Variation stellt der Histogrammansatz nach [WULK04b] dar. Der Messbereich eines Sensors wird in diskrete Abschnitte unterteilt, die mit den aktuellen Messwerten befüllt werden, siehe **Bild 3.5a**. Der Nullpunktfehler ergibt sich aus der Verteilung der Häufigkeiten z_k der Sensordaten, im einfachsten Fall aus dem Intervall mit der maximalen Messpunkteanzahl. Des Weiteren sind gewichtete Ansätze über einige oder alle Intervalle denkbar. Auch hier ist die Ermittlung einer Toleranz auf Basis des Häufigkeitsprofils möglich. Je deutlicher die Verteilung der Häufigkeiten z_k ist, desto geringer kann die Toleranz ausfallen.

Der Ansatz nach [CZ02] dagegen erfolgt in stationären Fahrsituationen iterativ. Je höher die Abweichung der Gierwinkelgeschwindigkeit vom bekannten Nullpunkt ist, desto schneller erfolgt eine schrittweise Anpassung. Die Schrittweite wird in zwei Stufen variiert. Die Anpassung wird nicht in jedem Rechenzyklus durchgeführt, sondern in festgelegten Zeitabständen. Optio-

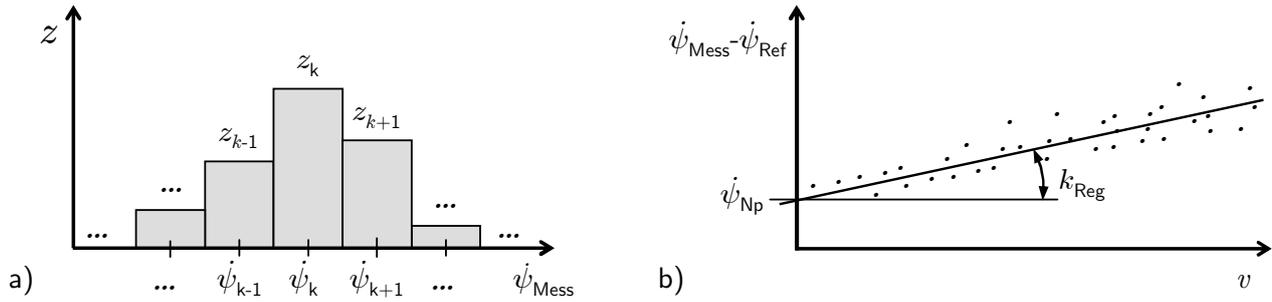


Bild 3.5: Nullpunktfehlerbestimmung mittels a) Histogrammmethode und b) Regressionsanalyse nach [WULK04a, WULK04b]

nal kann dieser Zeitabstand in Abhängigkeit der Temperaturänderung angepasst werden. In [SB06] wird das Vorgehen nicht nur auf Gierwinkel-, sondern auch auf Rollgeschwindigkeits-, Quer- und Längsbeschleunigungssensoren angewendet.

Nullpunktfehlerabgleich mittels Fremdreferenz

Fahrt Voraussetzung für den Nullpunktgleich durch Fremdreferenz ist die Bereitstellung einer Referenzgröße über analytische Redundanz, die auf Basis eines Fahrzeugmodells (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3) unterschiedliche Messgrößen ineinander überführt. Die Zulassungsbedingungen orientieren sich an der Gültigkeit der Modellbeziehungen.

Der Ansatz nach [KI87] ermittelt zwei Modellgrößen für den Lenkradwinkel aus der gemessenen Gierwinkelgeschwindigkeit sowie der Querbeschleunigung. Aus den beiden gewichteten Anteilen wird eine Referenz für den Nullpunktgleich gebildet. Umgekehrt wird in [SK94, WULK04a] der Lenkradwinkel zur Referenzbildung für die Gierwinkelgeschwindigkeit verwendet, in [AR98, LMP98] zusätzlich die Radgeschwindigkeiten und die Querbeschleunigung.

Mit Hilfe des Satellitenortungssystems *GPS* (engl. für *global positioning system*) wird in [Arn04] ein Verfahren vorgestellt, das auf Basis der im Fahrzeug gemessenen Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{\text{Mess}}$ und der über GPS zur Verfügung stehenden Drehung des Geschwindigkeitsvektors als Superposition von Gierwinkel- und Schwimmwinkelgeschwindigkeit ($\dot{\psi}_{\text{Ref}} + \dot{\beta}_{\text{Ref}}$) den Nullpunktfehler bestimmt:

$$\dot{\beta}_{\text{Ref}} = (\dot{\psi}_{\text{Mess}} - \dot{\psi}_{\text{Np}}) - \dot{\psi}_{\text{Ref}} \quad (3.4)$$

Die Regressionsmethode nach [WULK04a, WULK04b] ermittelt Referenzpunkte aus den Radgeschwindigkeiten $v_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$ einer Achse, die bei Kurvenfahrten unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen. Dabei stehen r für den nominellen, $r + \Delta r_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}$ für den tatsächlichen Radradius und $l_{S,\langle h,v \rangle}$ für die Spurweite. Die Indizes r und l kennzeichnen die rechte sowie linke Fahrzeugseite, v und h die Vorder- bzw. Hinterachse:

$$\dot{\psi}_{\text{Ref}} = \frac{v_{\langle h,v \rangle r} \left(\frac{r}{r + \Delta r_{\langle h,v \rangle r}} \right) - v_{\langle h,v \rangle l} \left(\frac{r}{r + \Delta r_{\langle h,v \rangle l}} \right)}{l_{S,\langle h,v \rangle}} \quad (3.5)$$

Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten durch Antriebsschlupf wird diese Berechnungsvorschrift nach Möglichkeit auf die Räder der nicht angetriebenen Achse angewendet. Für jeden Referenzpunkt $\dot{\psi}_{\text{Ref}}$ wird gemäß Glg. (3.3) die aktuelle Differenz zur Messgröße $\dot{\psi}_{\text{Mess}}$ gebildet

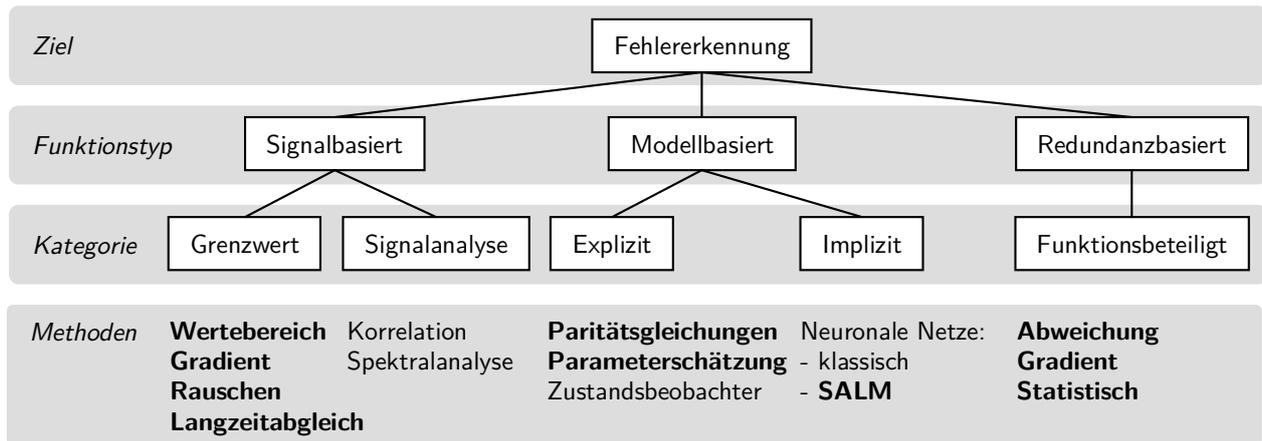


Bild 3.6: Gliederung der signal-, modell- und redundanzbasierten Fehlererkennungsmethoden, angelehnt an [Ise06]

und wie in **Bild 3.5b** geschwindigkeitsabhängig aufgetragen. Aufgrund der Superposition von Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler wird zur Ermittlung der Nullpunktabweichung eine Geradengleichung verwendet, deren Schnittpunkt mit der Ordinate den Nullpunktfehler ergibt. Der Nullpunktfehler wird in diesem Ansatz mittels einer Regressionsanalyse aus den aktuellen Referenzpunkten ermittelt.

$$\dot{\psi}_{\text{Mess}} - \dot{\psi}_{\text{Ref}} = \dot{\psi}_{\text{Np}} + k_{\text{Reg}} v_{\text{Fzg}} \quad (3.6)$$

Auf Basis der Verteilung der einzelnen Messpunkte bezüglich der Referenzgeraden bzw. des abgedeckten Messbereichs kann eine Toleranz bestimmt werden, die eine Aussage über den aktuellen Vertrauensgrad des vorliegenden Nullpunktfehlers liefert.

Empfindlichkeitsabgleich

In [MUV96] wird allgemein die Ermittlung eines Sensorkorrekturfaktors bezüglich der Empfindlichkeit mit Hilfe einer Parameterschätzung oder alternativ über eine iterative Anpassung auf Basis des Vergleichs von Mess- und Referenzgröße beschrieben. In [vZ04] wird eine solche schrittweise Anpassung der Empfindlichkeit der Gierwinkelgeschwindigkeit realisiert, bei der die Abgleichsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eindeutigkeit der Änderungsrichtung der Empfindlichkeit (z. B. ohne Richtungswechsel stetig wachsend) variiert wird. Eine ähnliche Umsetzung ist in [Goe07] zu finden, bei der in bestimmten Fahrsituationen die Messgröße schrittweise in Richtung der Referenz korrigiert wird. Die Referenz ergibt sich aus drei Modellgierwinkelgeschwindigkeiten aus den Vorder- und Hinterrädern sowie dem Lenkradwinkel. Die Fahrsituation ist unter anderem durch eine maximale Querbeschleunigung, eine minimale Modellgierwinkelgeschwindigkeit aus dem Lenkradwinkel und eine maximale Abweichung zwischen den die Referenz bildenden Modellgrößen definiert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Modelle gültig sind, gleichzeitig aber relativ hohe Beträge der Gierwinkelgeschwindigkeit vorliegen. Die resultierenden hohen Ausprägungen des Empfindlichkeitsfehlers erhöhen die Aussagekraft des Abgleichs.

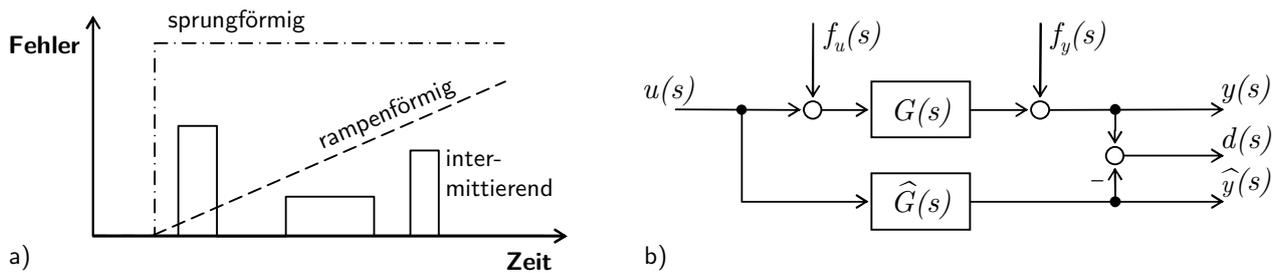


Bild 3.7: a) Modellierung von Fehlern [Ise96] und b) Bildung einer Paritätsgleichung [BBF+06]

3.3.2 Methoden der Fehlererkennung

Die Ansätze zur Realisierung von Fehlererkennungen werden im Folgenden zusammengefasst. Die Methoden werden nach Abschnitt 3.2.2 bezüglich ihres Funktionstyps in signal- und modellbasierte Ansätze unterteilt. Als zusätzlicher Typ wird das redundanzbasierte Vorgehen aufgenommen. Eine Übersicht der vorgestellten Methoden ist in **Bild 3.6** zu finden. Vorangestellt wird eine grundlegende Betrachtung zur Fehlermodellierung.

Fehlermodellierung

Ein Fehler ist eine unzulässige Abweichung eines Merkmals von einer vorgegebenen Forderung [Deu95]. Er führt den Prozess G in einen Zustand, der eine Störung oder einen Ausfall zur Folge haben kann. Grundsätzlich werden sprunghörmige, rampenförmige und intermittierende Fehler unterschieden, siehe **Bild 3.7a**. Zur Modellierung von Fehlern werden diese weiter in additive Fehler f_a , von denen eine GröÙe y additiv verfälscht wird $y_a = y + f_a$, und multiplikative Fehler f_m unterteilt. Letztere wirken sich über ein Produkt $y_m = (G(s) + f_m) u$ auf das Ergebnis aus. Additiven Fehlern liegen in der Regel defekte Sensorik oder Aktorik zugrunde, während multiplikative Fehler auf korrupte Prozessparameter hindeuten [BBF+06].

Signalbasierte Methoden

Signalbasierte Methoden treffen eine Aussage über die Integrität einer GröÙe ausschließlich auf Basis der Informationen, die das Signal selbst trägt. Folglich entstehen keine Kopplungen zu anderen Mess- oder ModellgröÙen.

Wertebereich Die Wertebereichsüberprüfung stellt für ein Signal y_{Mess} die Überschreitung eines festgelegten Wertebereichs $y_{\text{min}} \leq y_{\text{Mess}} \leq y_{\text{max}}$ fest. Ein Fehler wird sofort gesetzt, allerdings ist innerhalb des gültigen Bereichs $[y_{\text{min}}, y_{\text{max}}]$ keine Aussage möglich [Hof03, KMPF06].

Gradient Ähnlich arbeitet die Gradientenüberwachung, die im Gegensatz zur Wertebereichsüberprüfung die zeitliche Ableitung eines Signals auf maximale Beträge $|\dot{y}_{\text{Mess}}| \leq \dot{y}_{\text{max}}$ untersucht, um abrupte Signalausfälle aufzuspüren. Unterhalb der Schwelle \dot{y}_{max} ist keine Aussage möglich [Hof03, KMPF06]. Bei der Festlegung der Schwellen nutzt man aus, dass die Änderungsrate der physikalischen GröÙen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung fahrdynamisch [Hal08] bzw. durch das Messprinzip des Sensors beschränkt ist (vgl. Sensorspezifikationen in Anhang A.2).

Langzeitabgleich Im Fall eines durchgeführten Sensorabgleichs kann der ermittelte Nullpunkt- oder Empfindlichkeitsfehlerwert mit dem vom Hersteller spezifizierten Maximalwert verglichen werden $|y_{Np}| \leq y_{Np,max}$ bzw. $r_{Em,min} \leq r_{Em} \leq r_{Em,max}$. Eine Überschreitung weist einen defekten Sensor aus [Meh07].

Signalanalyse Die Signalanalyse versucht durch Analyse eines einzelnen Signals Kennwerte abzuleiten und auf dieser Basis Fehler des Prozesses zu erkennen. Kennwerte können statistischer Natur sein (z. B. Standardabweichungen, Varianzen, Korrelationen) oder sich auf die inneren Zusammenhänge eines Signals beziehen (z. B. Frequenzen, Amplituden, Leistungsdichte) [Rei92]. Übermäßiges Signalrauschen beispielsweise kann als Hochfrequenzbestandteil eines Signals ein Indiz für elektromagnetische Störungen oder mechanische Sensorfehler sein. Das Rauschen kann über einen Hochpassfilter oder über die Gradientenänderung eines Signals bestimmt werden. Überschreitet das Signalrauschen eine definierte Schwelle, wird ein Fehler erkannt [KMPF06]. Ein weiteres Beispiel ist die Konstanz einer Größe wie dem Lenkradwinkel über einen längeren Zeitraum trotz erwiesener Fahrzeugbewegung. Typische additive oder multiplikative Signalfehler lassen sich mit diesen Methoden jedoch erst bei großen Fehleramplituden erkennen [Hal08].

Korrelation Zwischen den diversen Messgrößen der Fahrdynamiksensorik im Kraftfahrzeug besteht ein physikalischer Zusammenhang, der unter anderem für die Bereitstellung von Modellgrößen ausgenutzt wird. Eine Änderung des Lenkradwinkels, der Gierwinkelgeschwindigkeit oder der Querbeschleunigung – unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung der Signale untereinander – ruft aufgrund der Kopplung der Größen stets eine Änderung in den jeweils anderen Signalen hervor, sofern der Zusammenhang nicht über die Fahrsituation ausgeschlossen werden kann (z. B. Rutschen auf Eis). Die Kopplungen sind beispielsweise aus den Beziehungen in den Gleichungen (2.13), (2.14) und (2.19) ersichtlich. Die Änderung der N Signale $y_{Mess,n}$ wird über die diskrete Integration der zeitlichen Ableitung zwischen den Abtastschritten i_{min} und i_{max} ermittelt [Din03]:

$$\Delta y_{Mess,n} = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \left| \frac{y_{Mess,n,i+1} - y_{Mess,n,i}}{\Delta t} \right| \quad \text{für } n = 1, 2 \dots N \quad (3.7)$$

Zur Überwachung auf Fehler werden zwei Schwellen definiert: Die Unterschreitung der Nierschwelle ist als konstantes Signal zu interpretieren, die Überschreitung der Hochschwelle dagegen als sichere Signaländerung. Ein Fehler liegt vor, wenn eine uneinheitliche Aussage für die einzelnen Sensorsignale vorliegt, das heißt, dass mindestens ein Signal ein stationäres, mindestens ein anderes ein dynamisches Verhalten anzeigt.

Modellbasierte Methoden

Modellbasierte Methoden fußen auf der Verwendung von Modellgrößen. Man spricht in diesem Zusammenhang gemäß **Bild 3.8** auch von analytischer, funktionsbeteiligter Redundanz. Im Bereich der Fahrdynamik kommen in der Regel quantitativ aussagekräftige Größen zum Einsatz.

Paritätsgleichungen Eine weit verbreitete Methode der Fehlererkennung sind Paritätsgleichungen. Sie generieren durch den Vergleich zwischen einem Prozess G und einem Prozess-

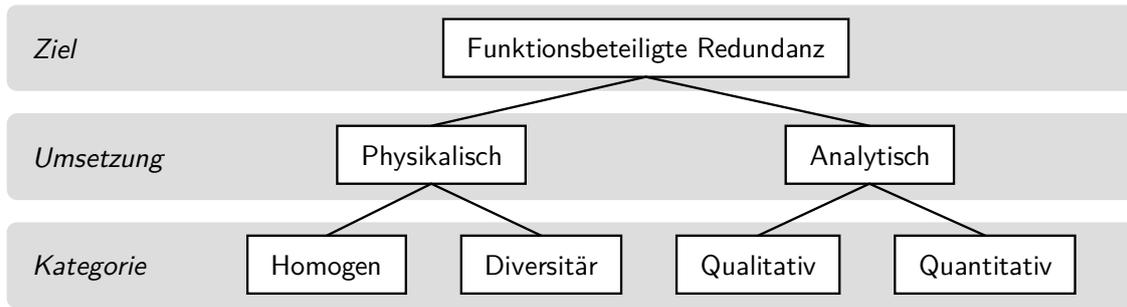


Bild 3.8: Realisierungsmöglichkeiten funktionsbeteiligter Redundanz [Deu90]

modell \hat{G} ein Residuum d , siehe **Bild 3.7b**. Mit der Eingangs- u und der Ausgangsgröße y erhält man im Frequenzbereich die Beziehung:

$$d(s) = y(s) - \hat{y}(s) = \left(G(s) - \hat{G}(s) \right) u(s) \quad (3.8)$$

Im fehlerfreien Fall und unter der Annahme eines hinreichend genauen Modells ist das Residuum null. Beim Auftreten eines Eingangs- f_u oder Ausgangsfehlers f_y kommt es zu Ausschlägen des Residuums der Form:

$$d(s) = G(s)f_u(s) + f_y(s) \quad (3.9)$$

Ein Eingangsfehler wirkt sich je nach Prozess im schlimmsten Fall auf alle Residuen aus, während ein Ausgangsfehler ausschließlich auf ein Residuum Einfluss hat [BBF⁺06, Ise96].

Parameterschätzung Die Parameterschätzung kann sowohl zur Identifikation der Parameter eines Systems eingesetzt werden als auch zur Erkennung von Prozessfehlern. Dazu werden Modelle mit den geschätzten Parametern gespeist und die berechneten Schätzwerte mit gemessenen Prozessgrößen verglichen. Auf Basis von potentiellen Abweichungen können additive und multiplikative Fehler erkannt werden [BBF⁺06]. Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die systembeschreibende, gewöhnliche Differenzialgleichung mit der Eingangs- u und der Ausgangsgröße y sowie den Parametern a_i und b_i :

$$a_0 y(t) + a_1 \dot{y}(t) + \dots + y^{(n)}(t) = b_0 u(t) + b_1 \dot{u}(t) + \dots + b_m u^{(m)}(t) \quad (3.10)$$

Fasst man die Ein- und Ausgangsgrößen $\Gamma^T = [u(t) \dots u^{(m)}(t) \ y(t) \dots y^{(n-1)}]$ sowie die Parameter $\Theta^T = [b_0 \dots b_m \ a_0 \dots a_{n-1}]$ zu Vektoren zusammen, ergibt sich der Fehler e zwischen Schätzung $\hat{y}^{(n)} = \Gamma^T \hat{\Theta}$ und Messung $y^{(n)}$ zu $e = \Gamma^T \hat{\Theta} - y^{(n)}$. Für mehrere Messungen erhält man die Vektor-Darstellung:

$$\mathbf{e} = \mathbf{\Gamma} \hat{\Theta} - \mathbf{y} \quad (3.11)$$

Als Optimierungsbedingung für die Parameterschätzung wird ein quadratisches Gütekriterium V gebildet.

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \left(\mathbf{\Gamma} \hat{\Theta} - \mathbf{y} \right)^T \left(\mathbf{\Gamma} \hat{\Theta} - \mathbf{y} \right) \quad (3.12)$$

Für eine größtmögliche Annäherung der Schätzung an den realen Prozess muss das Gütekriterium minimal und folglich die partielle Ableitung $\frac{\partial V}{\partial \hat{\Theta}}$ null werden. Es ergibt sich die Rechenvorschrift der geschätzten Parameter:

$$\hat{\Theta} = (\mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{y} \quad (3.13)$$

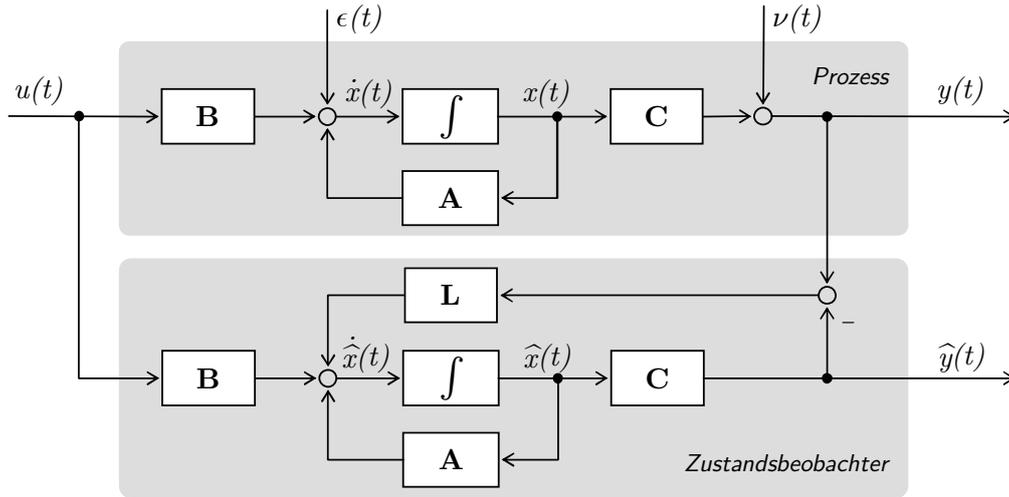


Bild 3.9: Zustandsraumdarstellung von Prozess und Beobachter: Der zugrunde liegende Prozess des Kalman-Filters besitzt im Gegensatz zu dem des Lunenberg-Beobachters Eingänge für Prozess- $\epsilon(t)$ und Messrauschen $\nu(t)$ [Mül96]

Die Mindestanzahl an Messungen beträgt wie die Anzahl der Unbekannten in dieser Gleichung $m + n + 1$. In der Regel wird die Anzahl der zugrunde gelegten Messungen jedoch deutlich höher angesiedelt sein, um akkurate Schätzwerte zu erhalten.

Während die Systemidentifikation mit Parameterschätzung nach Ende der Messung stattfindet, muss die Fehlererkennung im laufenden Betrieb erfolgen. Daher muss die Rechenvorschrift aus Gleichung (3.13) in eine rekursive Form überführt werden. Die Herleitung kann Anhang B.3 entnommen werden. Es ergibt sich die rekursive Darstellung:

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) - \gamma(k) \left[y(k) - \Gamma^T(k) \hat{\Theta}(k-1) \right] \quad (3.14)$$

mit dem Korrekturvektor

$$\gamma(k) = \mathbf{P}(k) \Gamma(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1) \Gamma(k)}{\Gamma^T(k) \mathbf{P}(k-1) \Gamma(k) + 1} \quad (3.15)$$

und der Kovarianzmatrix

$$\mathbf{P}(k) = \left[\Gamma^T(k) \Gamma(k) \right]^{-1} = \left[\mathbf{I} - \gamma(k) \Gamma^T(k) \right] \mathbf{P}(k-1). \quad (3.16)$$

Die Gleichungen werden iterativ durchlaufen und die Parameter in jedem Rechenschritt neu bestimmt [Höf96, Ise96].

Zustandsbeobachter Im Folgenden werden zwei Methoden der Zustandsbeobachtung vorgestellt. Die Begriffe Zustandsbeobachter und Zustandsschätzer sind dabei als Synonyme anzusehen [Mül96]. Voraussetzung ist die Darstellung des Prozesses in der Zustandsraumdarstellung, bei der der Zusammenhang zwischen Eingangs- \mathbf{u} und Ausgangsgrößen \mathbf{y} über Zustandsvariablen \mathbf{x} hergestellt wird. Die Prozessparameter sind in System- \mathbf{A} , Eingangs- \mathbf{B} und Ausgangsmatrix \mathbf{C} enthalten, siehe **Bild 3.9**:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \quad (3.17a)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) \quad (3.17b)$$

Der Prozess muss vollständig beobachtbar sein, das heißt, dass alle Anfangszustände \mathbf{x}_0 aus den Ein- und Ausgangsgrößen bestimmbar sind [Lun02]. Zur Fehlererkennung kann sowohl der Schätzfehler der Zustands- $\mathbf{e}_x(t)$ als auch der der Ausgangsgrößen $\mathbf{e}_y(t)$ verwendet werden:

$$\mathbf{e}_x(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (3.18a)$$

$$\mathbf{e}_y(t) = \mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t) \quad (3.18b)$$

Der Schätzfehler der Zustandsgrößen ist Ausgangspunkt der Bestimmung der Beobachtermatrix \mathbf{L} , die den Einfluss des Ausgangsfehlers in der Schätzgleichung bestimmt:

$$\dot{\mathbf{e}}_x = \frac{d}{dt}(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC}) \mathbf{e}_x(t) \quad (3.19)$$

Die Auslegung des Zustandsbeobachters, der auch als *Lunenberg-Beobachter* bezeichnet wird, erfolgt über das charakteristische Polynom: $\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC}) = 0$. Über Polvorgabe werden die Eigenwerte λ mit einem negativen Realteil gewählt, um den Schätzfehler zu minimieren [Mül96]. Im Gegensatz zum Lunenberg-Beobachter werden bei der optimalen Zustandsschätzung zusätzlich Störgrößen in Form von Prozess- $\epsilon(t)$ und Messrauschen $\nu(t)$ angenommen, siehe **Bild 3.9**. Die Zustandsraumdarstellung aus Gleichung (3.17) erweitert sich somit zu:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \epsilon(t) \quad (3.20a)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \nu(t) \quad (3.20b)$$

Für eine einfache analytische Lösung werden die Störsignale als statistisch unabhängig, mit Mittelwerten von null sowie mit unendlichen Varianzen angenommen [Mül96]. Anstelle von Gleichung (3.19) erhält man für den Schätzfehlergradienten der Zustandsgrößen:

$$\dot{\mathbf{e}}_x = (\mathbf{A} - \mathbf{LC}) \mathbf{e}_x(t) + \epsilon(t) - \mathbf{L}\nu(t) \quad (3.21)$$

Der Schätzfehler wird durch die beiden Störgrößen ständig angeregt [Lun02]. Grundlage des optimalen Zustandsbeobachterentwurfs ist die Minimierung des quadratischen Schätzfehlers $\mathbf{e}_x^T \mathbf{e}_x$. Daraus ergibt sich die Beobachtermatrix zu $\mathbf{L} = \mathbf{H}\mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1}$ mit \mathbf{H} als positiv definierter Lösung der Matrix-Ricatti-Gleichung

$$\mathbf{A}\mathbf{H} + \mathbf{H}\mathbf{A}^T - \mathbf{H}\mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}\mathbf{H} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (3.22)$$

mit den die Intensität des Rauschens beschreibenden Kovarianzmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} . Da der optimale Zustandsbeobachter mit entsprechender Belegung der Kovarianzmatrizen zur Filtrung verrauschter Messdaten eingesetzt werden kann, ist auch die Bezeichnung *Kalman-Filter* üblich [Mül96].

Künstliche neuronale Netze Nach dem Vorbild der Natur sind künstliche neuronale Netze (KNN) in der Lage, einen über eine Datenmenge gegebenen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen zu erlernen. Sie bieten sich daher vor allem dann an, wenn die analytische Modellbildung aufwändig und eine große Datenmenge vorhanden ist [Mie05]. Neben den in den Daten abgelegten Informationen sind KNN auch in der Lage, das erlernte Wissen auf unbekanntes Eingangsdaten zu übertragen.

KNN sind aus miteinander verschalteten Neuronen aufgebaut, die jeweils eine definierte Anzahl von Eingangssignalen einlesen, siehe **Bild 3.10**. Die Eingangsinformationen können globale

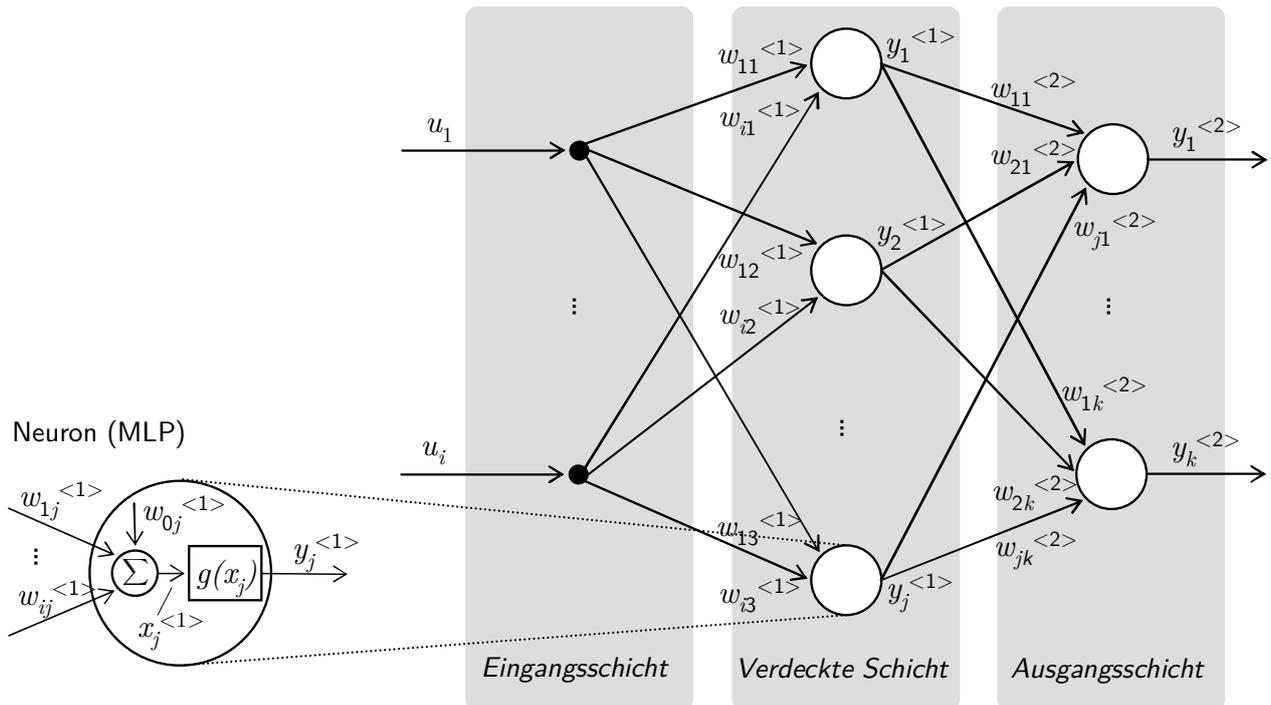


Bild 3.10: Künstliches neuronales Netz am Beispiel eines Mehrschichtenperzeptrons (MLP) mit einer verdeckten Schicht, angelehnt an [Hal08, Köh06]

Eingangsgrößen des Netzes u_i oder im Netz selbst generierte Ausgänge von Neuronen $y_j^{<n>}$ sein, wobei n die Nummer der beherbergenden Schicht beziffert. Jede mit einem Gewicht $w_{ij}^{<n>}$ belegte Eingangsinformation eines Neurons und eine Nullpunktabweichung $w_{0j}^{<n>}$ bilden einen Zustand $x_j^{<n>}$, der für die verdeckten Neuronen entsprechend einer nichtlinearen Aktivierungsfunktion $g(x_j^{<n>})$ auf den Ausgang $y_{j+1}^{<n>}$ abgebildet wird. Im Fall des verbreiteten *Mehrschichtenperzeptrons* (engl. *multi-layer perceptron*, *MLP*) werden die gewichteten Eingänge aufsummiert und in der Regel ein Tangens hyperbolicus als Aktivierungsfunktion verwendet. Die Neuronen der Ausgangsschicht sind mit denen der verdeckten Schicht identisch. Der einzige Unterschied besteht in der linearen Aktivierungsfunktion, die im einfachsten Fall den inneren Zustand direkt auf den Ausgang $y_k^{<n>} = x_k^{<n>}$ abbildet. Für ein MLP mit einer verdeckten Schicht wie in **Bild 3.10** ergeben sich die einzelnen Ausgangsgrößen zu:

$$y_k^{<2>} = w_{0k}^{<2>} + \sum_{j=1}^{j_{\max}} \left(w_{jk}^{<2>} \cdot g \left(w_{0j}^{<1>} + \sum_{i=1}^{i_{\max}} w_{ij}^{<1>} u_i \right) \right) \quad (3.23)$$

Je nach Netztyp unterscheiden sich die Bestimmung des Zustands und die Definition der Aktivierungsfunktion. Des Weiteren können die Anzahl der Schichten, die Zahl der Neuronen pro Schicht und die Verknüpfung der Neuronen untereinander (z. B. vorwärts, rückwärts) variiert werden [Anr04].

Eine Variante der KNN bilden die *statisch, abschnittsweise linear definierten Modelle* (engl. *static piecewise linear model*, *SALM*), eine Eigenentwicklung der AUDI AG aus der Antriebssteuerungsentwicklung [Köh06]. Sie stellen den Zusammenhang zwischen einer Ausgangsgröße und einer beliebigen Anzahl von Eingangsgrößen über Kennlinien und -felder her, siehe **Bild 3.11**. Als Haupteinflüsse werden die einzelnen Eingangssignale u_i bezeichnet, die sich über eine zu entwerfende Kennlinie (KL) anteilig direkt auf den Ausgang \hat{y} auswirken. Wechselwirkungen bezeichnen den kombinierten Einfluss von mindestens zwei Eingangsgrößen über

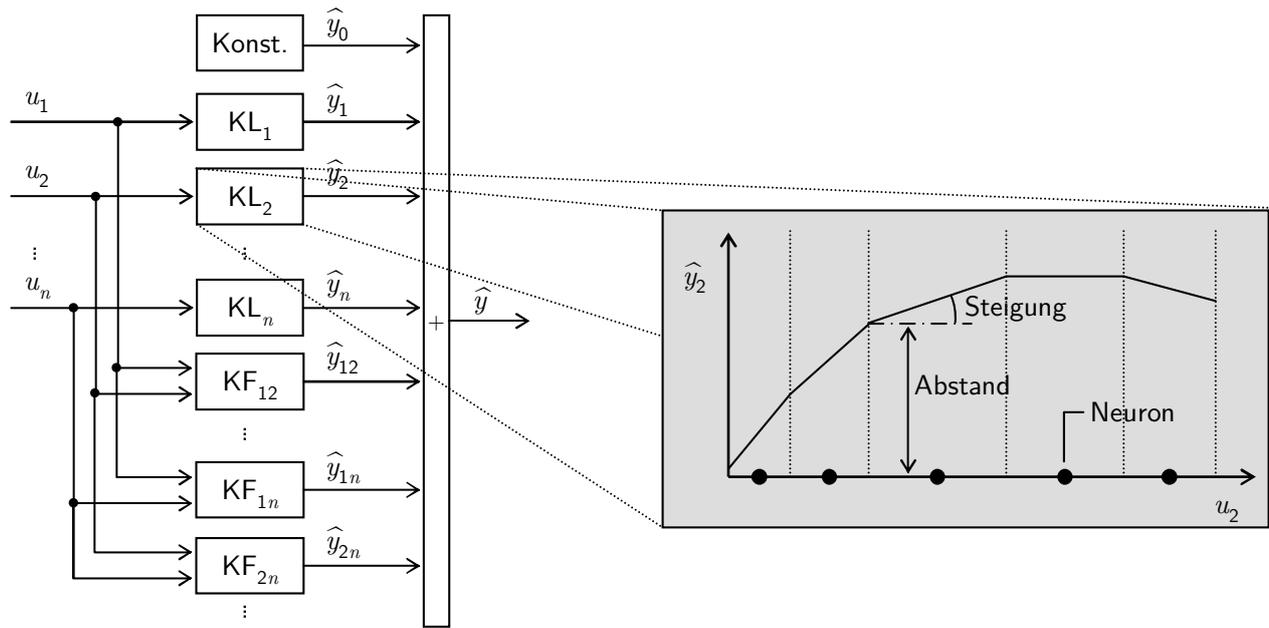


Bild 3.11: Statisch, abschnittsweise linear definiertes Modell auf Basis einer Konstanten sowie Kennlinien (KL) und -feldern (KF) [Köh06]

ein Kennfeld (KF). Zusammenhänge mit mehr als zwei Eingangsgrößen sind möglich, sollten aber vor dem Hintergrund der physikalischen Interpretierbarkeit der Ergebnisse in Form von dreidimensionalen Kennfeldern (mit maximal zwei Eingangsgrößen) vermieden werden.

Kennlinien und -felder setzen sich aus einzelnen Neuronen zusammen, die eine Stützstelle bilden. Jede Stützstelle s der Kennlinie der Eingangsgröße u_i besitzt einen definierten Abstand $w_{0,s,i}$ und eine definierte Steigung $w_{1,s,i}$ zur Berechnung der Teilausgangsgröße \hat{y}_i . Die Stützstelle eines Kennfeldes weist ebenfalls einen Abstand $w_{0,s,ij}$ zur Bestimmung der Teilausgangsgröße \hat{y}_{ij} auf, dagegen aber zwei Steigungen $w_{1,s,ij}$ bzw. $w_{2,s,ij}$ für jeweils eine der beiden Eingangsgrößen u_i bzw. u_j :

$$\hat{y}_i(u_i) = w_{0,s,i} + w_{1,s,i}u_i \quad (3.24a)$$

$$\hat{y}_{ij}(u_i, u_j) = w_{0,s,ij} + w_{1,s,ij}u_i + w_{2,s,ij}u_j \quad (3.24b)$$

Die Gesamtausgangsgröße \hat{y} ergibt sich aus der Summe der n Teilausgangsgrößen der Haupteinflüsse, der $\binom{n}{2}$ Beiträge der Wechselwirkungen sowie einer möglichen Konstanten \hat{y}_0 :

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \sum_{i=1}^n (w_{0,s,i} + w_{1,s,i}u_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n (w_{0,s,ij} + w_{1,s,ij}u_i + w_{2,s,ij}u_j) \quad (3.25)$$

Während des Anlernens der Netze müssen die Gewichte des SALM-Ansatzes so belegt werden, dass der Ausgangsfehler $e_y = y - \hat{y}$ minimal wird. Oft wird das Quadrat des Fehlers als Bewertungskriterium herangezogen. Um das Gütemaß auf die inneren Schichten zu übertragen, wird häufig das *Gradientensuchverfahren* (engl. *error backpropagation*) angewendet. Für jeden Ausgang werden die partiellen Ableitungen nach den einzelnen Gewichten $\partial \hat{y}_k / \partial w_{ij}^{<n>}$ gebildet. Eine Anpassung des Gewichtes $w_{ij}^{<n>}$ erfolgt in Richtung des steilsten negativen Gradienten, um den Ausgangsfehler zu minimieren. Die Vorgehensweise wird für alle Gewichte und Ausgangsgrößen sowie alle Messpunkte des Trainingsdatensatzes angewendet. Sobald ein Konvergenzkriterium erfüllt ist, wird der Lernprozess abgebrochen. Konvergenzkriterien können maximale Modellfehler oder eine festgelegte Anzahl von Trainingsschritten sein [Köh06].

Redundanzbasierte Methoden

Im Gegensatz zur Luftfahrt werden für sicherheitsrelevante Systeme im Automobilbereich in der Regel einfach redundante Sensoren (d. h. zwei unabhängige Messungen derselben physikalischen Größe) eingesetzt. Voraussetzung für die Funktion der redundanzbasierten Ansätze ist ein Fehler auf nur einem der beteiligten zwei Signale. Ändern sich beide Messgrößen identisch, aber falsch (z. B. bei Einstreuung elektromagnetischer Strahlung), kann der Fehler mit redundanzbasierten Methoden nicht aufgespürt werden.

Für die Fahrdynamiksensorik muss weiterhin nur der Fall der physikalischen, funktionsbeteiligten (oder „heißen“) Redundanz betrachtet werden, siehe **Bild 3.8**, da das Hauptziel einer schnellen, sicheren und hoch verfügbaren Fehlererkennung ausschließlich durch den direkten Vergleich der redundanten Sensorsignale erfolgen kann. Die physikalische Umsetzung steht für die Erfassung der Messgröße über einen tatsächlich vorhandenen Sensor im Gegensatz zu einer Modellgröße. Sind die redundanten Sensoren identisch, spricht man von homogener Redundanz, andernfalls von diversitärer. Nicht-funktionsbeteiligte (oder „kalte“) Redundanz würde zwar im Fall eines Sensorfehlers einen Verfügbarkeitsgewinn erzielen, jedoch wäre die Fehlererkennung auf signal- und modellbasierte Methoden beschränkt, was zu höheren Fehlererkennungszeiten im Vergleich zu redundanzbasierten Ansätzen, vor allem bei dynamischen Fahrmanövern, führt, aber keinen Sicherheitsgewinn bedeutet [ISS02].

Redundanzabweichung Die einfachste Möglichkeit der Fehlererkennung im Fall redundanter Sensorsignale $y_{\text{Mess},i}$ basiert auf der Überwachung ihrer Differenz $|y_{\text{Mess},1} - y_{\text{Mess},2}| \leq y_{\text{max}}$, der sogenannten Redundanzabweichung. Überschreitet diese Abweichung unter Berücksichtigung der möglichen Ungenauigkeiten wie Nullpunkt- oder Empfindlichkeitsfehlern eine festgelegte Schwelle y_{max} , wird ein Fehler erkannt [HOR06].

Redundanzgradient Zur Erkennung von Fehlern mit steilen Flanken auf einem der redundanten Signale wird der Vergleich der differenzierten redundanten Signale $|\dot{y}_{\text{Mess},1} - \dot{y}_{\text{Mess},2}| \leq \dot{y}_{\text{max}}$ unter Einbeziehung des maximalen Empfindlichkeitsfehlers eingesetzt [DH00, Meh07]. Alternativ kann der Gradient der Redundanzabweichung $\frac{d|y_{\text{Mess},1} - y_{\text{Mess},2}|}{dt} \leq \dot{y}_{\text{max}}$ überwacht werden.

Statistische Auswertung In [DM05] wird eine Methode zur Überwachung redundanter Sensorik beschrieben, die wie die bereits vorgestellten Ansätze ohne Modellgrößen auskommt und auf Sensoren unterschiedlicher Bauart angewendet werden kann. Kern dieses Konzepts ist zum einen die Nutzung der in den Sensorspezifikationen gegebenen Informationen bezüglich maximaler Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler, zum anderen die Anwendung statistischer Methoden für eine gleitende, quadratische Mittelwertbildung sowie die Berücksichtigung von Störsignalen (z. B. Sensorrauschen durch unebene Fahrwege).

Ausgangspunkt der Überlegungen ist die Annahme, dass sich das gemessene Signal $y_{\text{Mess},i}$ eines Sensors i aus der tatsächlichen, physikalischen Größe y , den Ungenauigkeiten durch Nullpunkt- f_{Np} und Empfindlichkeitsfehler f_{Em} sowie einem Rauschanteil f_{Rau} zusammensetzt:

$$y_{\text{Mess},i} = y + f_{\text{Np},i} + f_{\text{Rau},i} + f_{\text{Em},i} y \quad (3.26)$$

Das Rauschen kann über einen Hochpassfilter aus den Messgrößen ermittelt werden. Das Ersetzen der Fehlereinflüsse durch die maximalen Herstellerangaben für Nullpunkt- $f_{\text{Np}} \leq F_{\text{Np}}$

und Empfindlichkeitsfehler $f_{Em} \leq F_{Em}$ führt zu der Ungleichung:

$$|y_{Mess,i}| \leq |y| + F_{Np,i} + |f_{Rau,i}| + F_{Em,i} |y| \quad (3.27)$$

Die maximale Abweichung der beiden Messgrößen $y_{Mess,1}$ und $y_{Mess,2}$ bestimmt sich nach:

$$|y_{Mess,1} - y_{Mess,2}| \leq F_{Np,1} + F_{Np,2} + |f_{Rau,1}| + |f_{Rau,2}| + (F_{Em,1} + F_{Em,2}) |y| \quad (3.28)$$

Das fehlerfreie Signal y wird aus Gleichung (3.27) für beide Sensoren bestimmt. Mit den Konstanten $K_{Np} = F_{Np,1} + F_{Np,2}$ und $K_{Em,\langle 1,2 \rangle} = \frac{F_{Em,1} + F_{Em,2}}{1 - F_{Em,\langle 1,2 \rangle}}$ erhält man zwei Varianten der folgenden Ungleichung:

$$|y_{Mess,1} - y_{Mess,2}| \leq K_{Np} + |f_{Rau,1}| + |f_{Rau,2}| + K_{Em,\langle 1,2 \rangle} (|y_{Mess,\langle 1,2 \rangle}| + F_{Np,\langle 1,2 \rangle} + |f_{Rau,\langle 1,2 \rangle}|) \quad (3.29)$$

Für eine statistische Auswertung der Residuen werden die Ungleichungen quadriert und der Erwartungswert E gebildet:

$$E \{ |y_{Mess,2} - y_{Mess,1}|^2 \} \leq E \left\{ \left[K_{Np} + |f_{Rau,1}| + |f_{Rau,2}| + K_{Em,\langle 1,2 \rangle} (|y_{Mess,\langle 1,2 \rangle}| + F_{Np,\langle 1,2 \rangle} + |f_{Rau,\langle 1,2 \rangle}|) \right]^2 \right\} \quad (3.30)$$

Der Erwartungswert wird als *quadratischer, gleitender Mittelwert* (engl. *moving root mean square*) umgesetzt und setzt die Kenntnis einer definierten Anzahl vergangener Messwerte voraus. Zur Vermeidung von Speicherbedarf und Prozessorlast wird in Anhang B.1 eine rekursive Form der Berechnung hergeleitet, die ausschließlich den Mittelwert aus dem letzten Zyklus und die aktuellen Messgrößen voraussetzt.

Auf Basis dieser Ungleichung kann die Abweichung der Messgrößen mit einer adaptiven Schwelle überwacht werden. Neben den konstanten Einflussgrößen auf diesen Schwellenwert aus den Sensorspezifikationen $F_{Np,i}$ und $F_{Em,i}$ werden der aktuelle Betrag der Messgröße $y_{Mess,i}$ und dynamische Anregungen über $f_{Rau,i}$ berücksichtigt.

Robustheitsmaßnahmen

Robustheitsmaßnahmen stellen sicher, dass ausschließlich tatsächlich vorhandene Fehler im Gegensatz zu Signalausreißern gefunden werden und sorgen somit für eine hohe Verfügbarkeit des Systems, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen. In der Regel führen die Maßnahmen zu adaptiven Schwellen, die sich in Abhängigkeit der berücksichtigten Einflussgröße anpassen.

Sensorspezifikation Jeder Sensor besitzt definierte Eigenschaften, die sich vor allem auf die Genauigkeit der Messgröße sowie mögliche Abweichungen beziehen. Die Spezifikation der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren ist Anhang A.2 zu entnehmen. Wichtige Einflussgrößen sind die maximalen Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler bzw. das Signalrauschen, die das Ergebnis der Messung verfälschen und zu Abweichungen zwischen Mess- und Referenzgröße führen können. Überwachungsalgorithmen müssen diese bekannten Ungenauigkeiten berücksichtigen [DM05, HOR06].

Modellungenauigkeiten Modellbeziehungen werden unter zahlreichen Annahmen hergeleitet und stellen folglich eine vereinfachte Beschreibung des realen Verhaltens dar. Daher muss über Zulassungsbedingungen sichergestellt werden, dass die Modelle ausschließlich in ihrem gültigen Bereich arbeiten [Bau08]. Eine andere Möglichkeit ist die dynamische Bestimmung von Modellunsicherheiten, die zur Aufweitung von Schwellen eingesetzt werden können [DSDR05].

Entprellung Alternativ zu oder in Kombination mit adaptiven Schwellen können zur Entprellung von Signalausreißern Fehlerzähler und Fehlerintegrale Anwendung finden. Sobald eine Auslöseschwelle überschritten wird, werden alle Abweichungen oberhalb der Schwelle aufintegriert. Der Fehlerzähler erhöht dagegen in jedem Rechenzyklus einen Zähler, solange eine Abweichung vorliegt. Erst wenn Integral oder Zähler einen Grenzwert überschreiten, wird ein Fehler endgültig erkannt [DH00, HOR06].

Bewertung

Die vorgestellten Möglichkeiten der Fehlererkennung haben unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Abbildung von Fehlern in den erzeugten Residuen, der vorausgesetzten Kenntnisse über den Prozess, der Anregung der Eingangssignale, der Tiefe der Fehlerdiagnose etc. [BBF⁺06]. Die Eigenschaften der einzelnen Ansätze werden im Folgenden zusammengefasst. Eine Übersicht der wesentlichen Merkmale ist in **Tabelle 3.1** zu finden.

Signalbasierte Methoden sind im Fall von Wertebereichs- und Gradientenüberwachungen sehr einfach umzusetzen, bieten jedoch aufgrund ihrer weit gefassten Grenzwerte nur beschränkte Fehlererkennungsmöglichkeiten. Fehler lassen sich jedoch eindeutig einem Signal zuordnen. Die Signalanalyse bietet sich im Bereich der Fahrdynamik durch die vorherrschende, starke Anregung über den Untergrund nicht an. Der Vorteil des Korrelationsverfahrens liegt vor allem in seiner Unabhängigkeit von Modellgrößen, da bei der Bestimmung der Änderung eines Signals ausschließlich die Messgrößen Einfluss haben. Nachteilig wirken sich Situationen aus, in denen die Beziehungen zwischen den Messgrößen durch den Fahrer entkoppelt werden, z. B. durch das Festhalten des Lenkrads bei einem schleudernden Fahrzeug auf Niedrigreibwert. In diesen Fällen muss die Überwachung passiviert werden.

Paritätsgleichungen eignen sich insbesondere für das Erkennen additiver Fehler (vor allem bei Sensoren, Aktoren), setzen aber voraus, dass ein genaues Modell verfügbar ist. Ihr Vorteil ist der geringe Rechenaufwand und ihre Funktion ohne Anregungssignal am Eingang. Im Gegensatz dazu setzen Parameterschätzmethoden eine solche Anregung voraus. Sie eignen sich vor allem für die Erkennung von multiplikativen Fehlern der Prozessparameter und liefern auch

Tabelle 3.1: Bewertung der Fehlererkennungsmethoden, angelehnt an [Höf96]

Methoden	Entwurfsaufwand	Anregung	Rechenaufwand	Erkennungszeit	Bemerkung
<i>Signalbasiert</i>					
Wertebereich	gering	nein	gering	kurz	unscharfe Überwach.
Gradient	gering	nein	gering	kurz	unscharfe Überwach.
Signalanalyse	hoch	ja	gering	lang	ungeeignet für Kfz.
Korrelation	gering	nein	gering	kurz	Gültigkeit beschränkt
<i>Modellbasiert</i>					
Paritätsgleichungen	gering	nein	gering	kurz	Gültigkeit beschränkt
Parameterschätzung	gering	ja	hoch	lang	Gültigkeit beschränkt
Zustandsbeobachter	hoch	nein	hoch	kurz	Gültigkeit beschränkt
KNN	hoch	nein	gering	kurz	adaptionstfähig
<i>Redundanzbasiert</i>					
Abweichung	gering	nein	gering	sehr kurz	kostenintensiv
Gradient	gering	nein	gering	sehr kurz	kostenintensiv
Statistische Auswertung	gering	nein	gering	sehr kurz	kostenintensiv

bei einfachen *Systemen mit nur einem Ein- und Ausgangssignal* (engl. *single input, single output, SISO*) mehrere, in der Regel physikalisch interpretierbare Residuen. Der Entwurfsaufwand ist wie bei den Paritätsgleichungen gering, jedoch ist der Rechenaufwand relativ hoch [Höf96].

Zustandsbeobachter sind ebenfalls vornehmlich für die Erkennung von additiven Fehlern geeignet. Da optimale Zustandsbeobachter das im Prozess vorhandene Rauschen in den Entwurf integrieren, werden folglich auch unter widrigen Rahmenbedingungen gute Ergebnisse realisiert [BBF⁺06]. Entwurfs- und Rechenaufwand sind allerdings als hoch einzustufen.

Eine Alternative zu den analytischen Ansätzen sind künstliche neuronale Netze. Sie sind in der Lage, unbekannte Zusammenhänge über vorliegende Messdaten zu erlernen und erzielen bei richtiger Auslegung akkurate Ergebnisse. Jedoch kann das Training, die Auswahl der zugrunde gelegten Messdaten sowie der Entwurf der Netzstruktur langwierig sein und stark von der Erfahrung des Anwenders abhängen. Nachteilig wirkt sich weiterhin aus, dass nicht bekannt ist, ob der aktuelle Trainingszustand des Netzes ein lokales oder das globale Optimum widerspiegelt. Der erlernte Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen bleibt dem Anwender folglich verborgen. Der SALM-Ansatz dagegen kombiniert die Vorteile der akkuraten Modellierung mit physikalischer Interpretierbarkeit, indem Einflüsse einzelner Eingangsgrößen über Kennlinien und -felder visualisiert werden [Köh06].

Eine effektive Methode der Fehlererkennung stellen redundanzbasierte Ansätze dar. Ihr einfacher Aufbau geht mit einer sicheren Fehlererkennung bei hoher Verfügbarkeit einher, weshalb sie vor allem in sicherheitsrelevanten Systemen Anwendung finden. Erkannte Fehler können jedoch nicht einem einzelnen Sensor zugeordnet werden. Ein weiterer Nachteil besteht in den höheren Kosten für die redundante Bauteile.

3.3.3 Methoden der Fehlerdiagnose

Da im Automobilbereich der Zusammenhang zwischen Symptomen und Fehlerursache in der Regel bekannt ist, ist es nicht notwendig, diese Relation über Klassifikationsmethoden zu erlernen. Daher kommen Interferenzmethoden in Form von Fehler-Symptom-Kausalitäten zum Einsatz, die über binäres Schließen eine Fehlerursache ermitteln [Pfe98]:

WENN < Bedingung > DANN < Schlussfolgerung >

Bei unscharfen Zugehörigkeitsklassen bietet sich approximatives Schließen mit Hilfe von Fuzzy-Logik an. Jedem Symptom wird eine Zugehörigkeitsfunktion zuordnet und eine Schlussfolgerung auf Basis der wahrscheinlichsten Ursache der Symptome getroffen [BBF⁺06].

3.4 Zusammenfassung

Die Notwendigkeit von Signaldatenaufbereitungen im Fahrwerksbereich ist vor allem durch den direkten Eingriff von Regelsystemen in das Fahrverhalten eines Fahrzeugs und die durch den engen Verkehrsraum limitierte Reaktionszeit beim Auftreten von Fehlern gegeben. Im Automobil- kommen im Gegensatz zum Luftfahrtbereich aus Kostengründen keine rein auf Redundanz beruhende Ansätze zum Einsatz, sondern stärker auf Logik und Algorithmen basierende Umsetzungen, um die geforderten Toleranzzeiten einzuhalten.

Zu den Kernaufgaben einer Signaldatenaufbereitung zählt der Abgleich von bekannten Sensorabweichungen wie Nullpunkt- oder Empfindlichkeitsfehlern. Die aktuell im Einsatz befindlichen Ansätze werden präsentiert und erstmals eine Kategorisierung der verfügbaren Sensorabgleichsmethoden für Fahrdynamiksensorik erarbeitet.

Die Fehlererkennung stellt eine weitere Hauptaufgabe einer Signaldatenaufbereitung dar. Die klassische Einteilung in signal- und modellbasierte Methoden wird um redundanzbasierte Verfahren erweitert. Die Kategorisierung dient zusammen mit der erarbeiteten Bewertung der in Kapitel 6 durchgeführten Auswahl geeigneter Ansätze zur Sensorüberwachung für die zu entwickelnde ZSDA. Darüber hinaus werden diverse Robustheitsmaßnahmen zur Absicherung der Fehlererkennungsmethoden im praktischen Einsatz zusammengefasst.

Im Rahmen der Fehlererkennung wird mit dem auf künstlichen neuronalen Netzen basierenden SALM-Ansatz eine im Fahrwerksbereich bisher unbeachtete Modellierungsmethode vorgestellt, die bei impliziter Modellbildung erstmal eine physikalische Interpretierbarkeit bietet und im Rahmen dieser Arbeit in Bezug auf ihre Anwendung auf sicherheitsrelevante Systeme analysiert wird.

Die präsentierten Methoden bezüglich Sensorabgleich und -überwachung bilden die Grundlage der zu entwerfenden ZSDA, bei der neben neuen Ansätzen und Anforderungen auch bewährte „Bausteine“ zu einem neuen Ganzen kombiniert werden. Der in diesem Kapitel erarbeitete Stand der Technik dient mit seiner Übersicht über mögliche Lösungsansätze und ihrer Bewertung als Ausgangspunkt für den ausstehenden Entwurf der funktionalen Inhalte einer ZSDA. Für ein leistungsfähiges Gesamtsystem bietet sich in der Regel die Kombination unterschiedlicher Herangehensweisen an, die ihre Defizite wechselseitig mit ihren Stärken überdecken und sich auf diese Weise wirksam ergänzen.

4 Softwarearchitekturentwurf für Signaldatenaufbereitungen

Mit zunehmender Größe und Komplexität eines Softwaresystems ist die Entwurfsproblematik nicht länger auf die Funktionen und Algorithmen beschränkt. Der Entwurf des Gesamtsystems und somit die Softwarearchitektur erwachsen zu einem zentralen Aufgabenfeld [GS94].

Definition 4.1 (Softwarearchitektur): Unter Softwarearchitektur versteht man die Struktur eines Programms oder eines ausführbaren Systems, welche die einzelnen Softwareelemente, die äußerlich sichtbaren Eigenschaften dieser Elemente, die Beziehungen der Elemente untereinander sowie notwendige Randbedingungen beinhaltet, um die Anliegen und Interessensschwerpunkte der beteiligten *Interessensvertreter* (engl. *stakeholder*) zu erfüllen [BCK03, GAACB95].

Die Softwarearchitektur stellt einen Themenkomplex dar, der für vielschichtige Softwaresysteme einen wichtigen Beitrag zur Berücksichtigung nicht-funktionaler Eigenschaften darstellt. Die Erfüllung dieser Anforderungen hängt eng mit Systemeigenschaften wie Effizienz, Beherrschbarkeit und Qualität zusammen. Eigenschaften, denen im Laufe der Softwareentwicklung und -anwendung eine entscheidende Rolle zukommt.

Der Einfluss der Softwarearchitektur auf das Konzept der vernetzten Fahrwerkregelsysteme wurde bereits in Abschnitt 2.4.3 dargestellt. Im Folgenden wird der Begriff der Softwarearchitektur detailliert. Bestehende Ansätze für die Überwachung der Fahrdynamiksensorik im Fahrzeug sowie allgemeine Entwurfsstrategien für sicherheitsrelevante Systeme werden vorgestellt und vor dem Hintergrund der Verwendung für eine zentrale Signaldatenaufbereitung (ZSDA) beurteilt.

4.1 Beschreibung von Softwarearchitekturen

Zur Beschreibung von Softwarearchitekturen werden Sichten eingesetzt, die die strukturelle Dekomposition eines komplexen Softwaresystems erlauben [RH06].

Definition 4.2 (Sicht): Eine Sicht beschreibt ein System von einem bestimmten, abstrakten Standpunkt aus und die damit einhergehenden Anliegen bzw. Interessensschwerpunkte der Projektbeteiligten. Sie besteht aus einer Menge von Elementen und deren Beziehung untereinander [BCK03, RH06].

Sichten sollen sicherstellen, dass die Interessensschwerpunkte aller Projektbeteiligten berücksichtigt werden. Projektbeteiligte können Entwickler, Architekten, Anwender, Administratoren, Wartungsingenieure, Kunden etc. sein. Je nach Projekt kann eine repräsentative Auswahl von Sichten getroffen werden, die das System in Abhängigkeit der Anliegen der Beteiligten hinreichend genau beschreiben.

In der Literatur variieren die dargestellten Sichten in Bezeichnung, Definition und Detaillierung, siehe u. a. [BCK03, HNS00, Kru95, RBK06]. Im Folgenden wird die gemeinsame Schnittmenge dargestellt, die als Grundlage für weitere Untergliederungen anzusehen ist [RH06]:

- ▷ *Statische Sichten* beschreiben die Zerlegung eines Systems in Elemente und deren Abhängigkeiten untereinander.

- ▷ *Dynamische Sichten* stellen das Laufzeitverhalten des Systems dar. Dieses kann sich auf das zeitliche Verhalten sowie die Veränderungen von Elementen, Kontrollflüssen, Abhängigkeiten und Interaktionen beziehen. Unterschieden wird zwischen obligatorischem und möglichem Verhalten.
- ▷ *Verteilungssichten* setzen sich mit den Beziehungen eines Systems zu seiner (evtl. noch zu erstellenden) Umgebung auseinander. Das schließt sowohl die Zuordnung bestimmter Elemente auf Infrastruktur- oder Hardwareeinheiten (z. B. Prozessoren, Steuergeräte) als auch die Verteilung auf organisatorische Einheiten (z. B. Entwickler, Hersteller) ein.

4.2 Qualitätsattribute und Entwurfsprinzipien

Funktionalität ist die Fähigkeit eines Systems zur Erfüllung der Aufgabe, die zu seiner Realisierung führte. Wenn man sich jedoch ausschließlich auf funktionale Anforderungen konzentrierte, bestünde jedes Softwaresystem aus nur einem Modul ohne jegliche interne Struktur. *Qualitätsattribute* beschreiben daher die nicht-funktionalen Anforderungen [Gor06]. Sie werden auch als *Randbedingungen* (engl. *constraints*) bezeichnet und stehen grundsätzlich orthogonal zu den funktionalen Anforderungen, d. h., beide Anforderungstypen verfolgen unterschiedliche Entwurfsziele [BCK03]. Beispielsweise ist die Bereitstellung eines funktional notwendigen Signals unabhängig vom Grad der Skalierbarkeit oder Erweiterbarkeit eines Systems. Dennoch kann es im Verlauf des Architekturentwurfs zu Wechselwirkungen zwischen ihnen kommen. Im Folgenden seien Qualitätsattribute exemplarisch aufgeführt:

- ▷ *Qualität*: Korrektheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Fehlertoleranz, Sicherheit, Redundanz;
- ▷ *Beherrschbarkeit*: Einfachheit, Applizierbarkeit, Wartbarkeit, Modifizierbarkeit, Integrierbarkeit, Austauschbarkeit;
- ▷ *Effizienz*: Leistungsfähigkeit, Performanz, Skalierbarkeit, Zeitverhalten, Verbrauchsverhalten;
- ▷ *Implementierung*: Modularität, Wiederverwendbarkeit, Erweiterbarkeit, Änderbarkeit, Stabilität, Spezifizierbarkeit, Testbarkeit;

Neben den für eine Systemarchitektur spezifischen Qualitätsattributen lassen sich allgemeine, nicht-funktionale Anforderungen formulieren, die sich in der Praxis bewährt haben und als *Entwurfsprinzipien* bezeichnet werden. Sie sind je nach Schwerpunktsetzung während des Architekturentwurfs gleichzeitig zu beachten bzw. gegeneinander abzuwägen [RH06]:

- ▷ Durch *Abstraktion* wird der komplexe Entwurfsprozess in jedem Schritt auf das Wesentliche beschränkt. Wichtiges Hilfsmittel sind die architektonischen Sichten.
- ▷ *Modularisierung* strebt die Gliederung des Gesamtsystems in überschaubare Einheiten an. Jede Einheit sollte eine hohe Kohäsion aufweisen, so dass Zusammengehörendes auch zusammengefasst wird, gleichzeitig aber nur eine lose Kopplung zu anderen Einheiten besitzen, um Abhängigkeiten innerhalb des Systems vorzubeugen. Ein Hilfsmittel stellt die hierarchische Dekomposition dar, die eine Aufteilung in Abhängigkeit des Abstraktionsgrades vornimmt.
- ▷ Die richtige Größe der Implementierungseinheiten wird als *Granularität* bezeichnet. Sie hängt stark von den zu erfüllenden Aufgaben ab.

- ▷ Die *Kapselung* (engl. *information hiding*) verfolgt das Ziel, so viele Informationen wie möglich im Innern der Einheiten zu bündeln, um die Abhängigkeiten nach außen zu minimieren und die Variabilität zu steigern. Sie kann sich negativ auf die Testbarkeit auswirken.
- ▷ Das Prinzip der *Trennung von Zuständigkeiten* (engl. *separation of concerns*) soll Änderungen innerhalb des Systems vereinfachen, indem für eine Aufgabe immer nur ein Element zuständig ist.
- ▷ Ein wesentlicher Grundsatz für Architekturen ist die *Einheitlichkeit* innerhalb des Gesamtsystems, d. h., die konsequente Beibehaltung von Konzepten und Entscheidungen. Sie führt zu einem verständlichen System und reduziert die Komplexität.

In der Praxis sind die Entwurfsprinzipien in den meisten Fällen nicht durchgängig realisierbar, da die Wechselwirkungen und Zielkonflikte überwiegen. Daher sind Kompromisse notwendig, die stets gründlich abgewogen und dokumentiert werden sollten.

4.3 Architekturstile

Architekturstile (engl. *architectural styles*) stellen Lösungsstrukturen dar, die bestimmte Eigenschaften verkörpern und durchgängig über alle Ebenen auf ein System angewendet werden können [RH06]. Sie stellen ein Gerüst dar, das sich in der Praxis bewährt hat und folglich das Wissen erfahrener Softwarearchitekten beinhaltet. Ausgewählte Beispiele für Architekturstile nach [GS94] sind:

- ▷ *Leitungen und Filter* (engl. *pipes and filters*) beschreiben ein System als Komposition aus Funktionen beinhaltenden Komponenten, den Filtern, und den für den Datenaustausch verantwortlichen Verbindungen, den Leitungen. Der Datenfluss ist auf diese Weise festgelegt.
- ▷ Das *Schichtenmodell* (engl. *layered systems*) besteht aus mehreren Schichten, von denen jede ausschließlich mit den beiden angrenzenden Schichten in Verbindung treten kann.
- ▷ *Objektorientierte Organisation* (engl. *object-oriented organization*) besitzt keine feste Struktur. Die Objekte bilden die Komponenten, die über Funktionen oder Prozeduren mit anderen Komponenten kommunizieren können.
- ▷ *Ereignisbasierte Aufrufe* (engl. *event-based invocations*) ähneln dem objektorientierten Ansatz, jedoch kommunizieren die Komponenten nicht direkt miteinander. Stattdessen werden Ereignisse gesendet, die von allen anderen Komponenten empfangen werden. Die verantwortlichen Komponenten führen die Anweisung aus. Weder Sender noch Empfänger kennen ihre Kommunikationspartner.

Jeder Architekturstil hat Vor- und Nachteile, die eine Anwendung sinnvoll machen oder aber ausschließen können. Für sicherheitsrelevante Systeme wie eine Signaldatenaufbereitung ist die Wahl eines Stils eingeschränkt, da der Datenfluss nachvollziehbar und testbar sein muss. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Systemverhalten zu jedem Zeitpunkt deterministisch verläuft und vollständig abgeprüft werden kann. Von den aufgezählten Varianten erfüllt lediglich der Ansatz *Leitungen und Filter* diese Anforderungen. Alle im Folgenden vorgestellten Architekturansätze gehören diesem Architekturstil an.

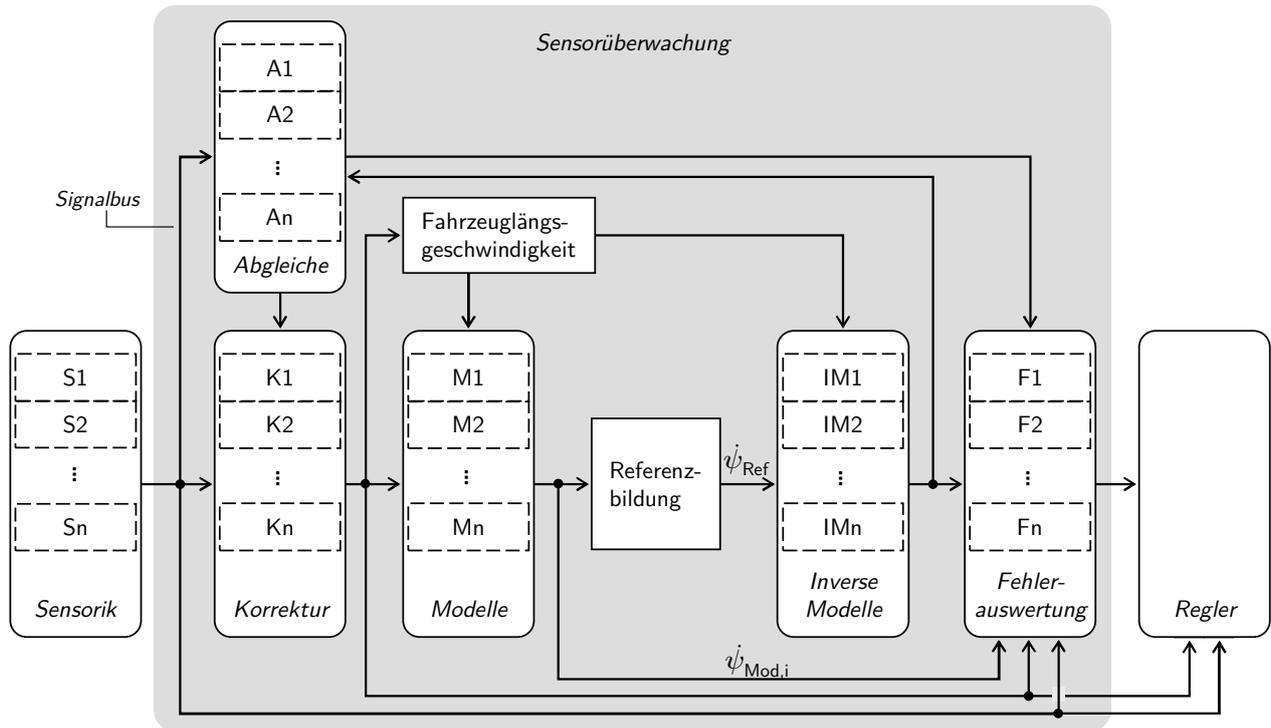


Bild 4.1: Sensorüberwachung durch Referenzbildung auf Basis der Gierwinkelgeschwindigkeit nach [MUV96]

4.4 Architektorentwurf für fehlertolerante Systeme: Stand der Technik

Eine ZSDA stellt ein komplexes Softwaresystem dar, das nicht-funktionale Anforderungen wie Erweiterbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Skalierbarkeit an die Softwarearchitektur stellt. Diese Qualitätsattribute müssen von Beginn an im Entwurf berücksichtigt werden. Im Folgenden werden zunächst bestehende Architekturansätze vorgestellt, deren Schwerpunkt auf den funktionalen Anforderungen liegt. Herangehensweisen zur Entwicklung fehlertoleranter Systeme, die einen ganzheitlichen Systementwurf anstreben, folgen.

4.4.1 Bestehende Ansätze zur Sensorüberwachung im Fahrzeug

Referenzbildung auf Basis der Gierwinkelgeschwindigkeit

Der in [MUV96] vorgestellte Ansatz basiert auf der vom Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) vorausgesetzten Sensorik im Fahrzeug. Dazu zählen vor allem der Lenkradwinkel-, die Gierwinkelgeschwindigkeits-, die Querbeschleunigungs- und Raddrehzahlsensoren. Um die Signalgenauigkeit zu erhöhen, werden in einem ersten Schritt die Nullpunktfehler der Sensoren ermittelt, für den Gierwinkelgeschwindigkeitssensor auch bzw. für die Raddrehzahlen ausschließlich der (relative) Empfindlichkeitsfehler (Block *Abgleiche*, siehe **Bild 4.1**) und die Signale entsprechend korrigiert (*Korrektur*). Anhand von Modellbeziehungen werden aus dem Lenkradwinkel, der Querbeschleunigung und dem Radgeschwindigkeitspaar der nicht-angetriebenen Achse Modellgierwinkelgeschwindigkeiten $\dot{\psi}_{Mod,i}$ errechnet (*Modelle*), aus denen mittels einer gewichteten Mittelwertbildung eine Referenzgierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{Ref}$

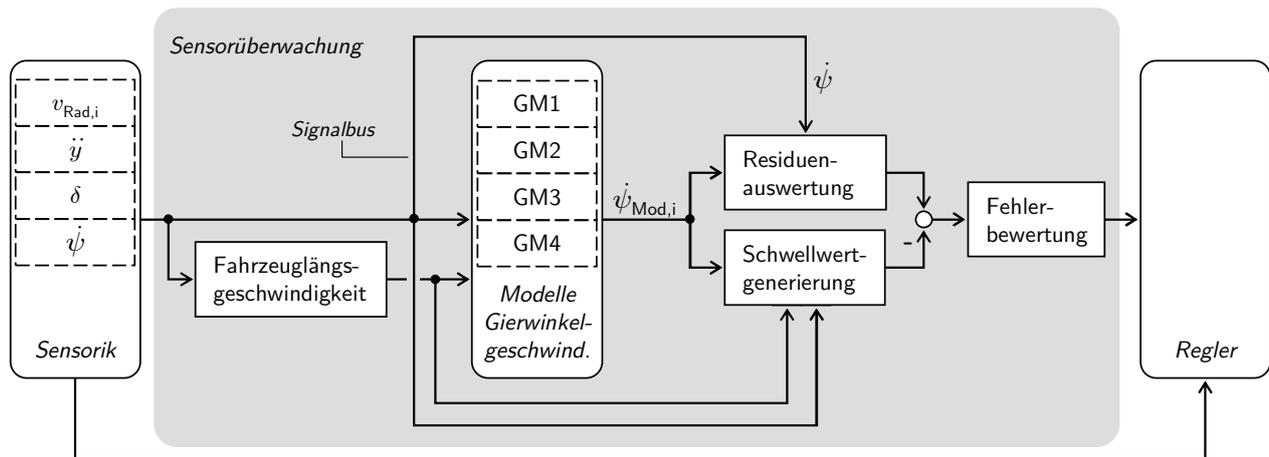


Bild 4.2: Sensorüberwachung mit adaptiven Schwellen am Beispiel der Gierwinkelgeschwindigkeit nach [Din00]

bestimmt wird (*Referenzbildung*). Die Modellgröße mit dem größten Abstand zur Messgröße wird in diesem Schritt vernachlässigt. Unter der Annahme, dass ein fehlerhaftes Signal zu einer wachsenden Abweichung zwischen Modell- und Messgröße führt, wirkt sich ein einzelner Fehler nicht auf die Überwachungsqualität des Systems aus.

Die Referenzgröße wird direkt zur Residuenbildung des Gierwinkelgeschwindigkeitssensors eingesetzt. Zusätzlich wird sie über die bereits erwähnten, aber invertierten Modellbeziehungen in Referenzen für die verbleibenden Sensoren umgerechnet (*Inverse Modelle*) und dient deren Plausibilisierung. Die gebildeten Residuen aus Referenz und Messgröße werden abschließend bewertet (*Fehlerauswertung*) und vorhandene Fehler an den nachfolgenden Regler kommuniziert.

Wechselseitige Sensorüberwachung mit adaptiven Schwellen

Das Konzept nach [Din99, Din00] verzichtet auf die Referenzbildung auf Basis der Gierwinkelgeschwindigkeit und berechnet stattdessen für Gierwinkelgeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Lenkradwinkel jeweils vier Modellgrößen anhand geometrischer Beziehungen (Block *Modelle*, siehe **Bild 4.2**). Da für jedes Modell Gültigkeitsbedingungen definiert sind, variiert ihre Verfügbarkeit mit der Fahrsituation. Auch die Referenzbildung ist abhängig von der Zahl der verfügbaren Modelle und wird entweder als gewichtete Mittelwertbildung ausgeführt (Verfügbarkeit der Modelle hoch) oder die Auswahl erfolgt auf Basis der minimalen Abweichung der Modellgrößen von der Messgröße (Verfügbarkeit der Modelle gering, *Residuenauswertung*). Die Auswahltechnik soll sicherstellen, dass die Residuen zum einen empfindlich gegenüber den zu entdeckenden Fehlern, zum anderen robust gegenüber Modellungenauigkeiten sind. Das zu bildende Residuum aus Referenz und Messgröße wird mit einer adaptiven Schwelle (*Schwellwertbildung*) verglichen, eine Bewertung des Signals vorgenommen (*Fehlerbewertung*) und an den Regler weitergegeben.

Dreikanalige Architektur mit adaptivem Fahrdynamikregler

Im Ansatz nach [MSB04] werden alle fehlertolerant geforderten Zustandsgrößen physikalisch zweikanalig ausgeführt (jeweils zwei Gierwinkelgeschwindigkeits-, Querbeschleunigungs- und

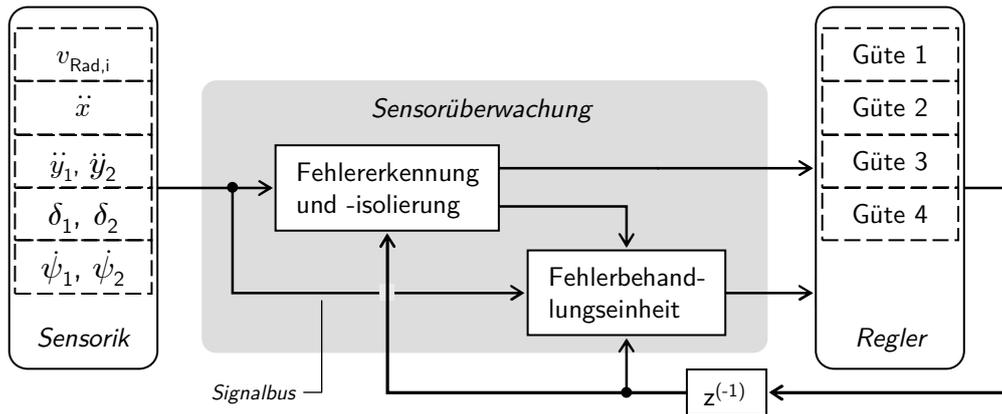


Bild 4.3: Dreikanalige, fehlertolerante Sensorüberwachung nach [BFH⁺02]

Lenkradwinkelsensoren, siehe Block *Sensorik* in **Bild 4.3**). Je nach Anforderung des Reglers können auf diese Weise Einfach- und zum Teil auch Mehrfachfehler erkannt und toleriert werden. Um nach einem Sensorfehler die Verfügbarkeit des Systems zu steigern, muss zur Fehlerisolierung eine analytische Vergleichsgröße herangezogen werden (*Fehlererkennung und -isolierung*), die zu einer dreikanaligen Zustandsgrößenermittlung führt. Unabhängig vom Auftreten eines Fehlers wird jedoch stets eine Größe auf Basis mindestens eines physikalischen Signals an den Regler kommuniziert. Die abgesicherten Sensorsignale sind außerdem Ausgangspunkt für die Ermittlung von Schätzgrößen wie Schwimmwinkel und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit (*Fehlerbehandlungseinheit*).

Je nach verfügbarer Sensorbasis werden die einzelnen Teile des Systems auf die geänderten Rahmenbedingungen im Fall von fehlerhaften Sensoren angepasst, was zur Passivierung einzelner Bestandteile führen kann. Auch der aufsetzende Fahrdynamikregler variiert seine Regelgüte in vier Stufen in Abhängigkeit der Systemverfügbarkeit (*Regler*).

Bewertung

Allen Ansätzen ist ihr funktional getriebener Entwurf anzumerken, der zwar zu einer der jeweiligen Problemstellung angemessenen Lösung führt, aber nicht-funktionale Anforderungen wie die Erweiterung oder Handhabung des Gesamtsystems im Konzept vernachlässigt. Den Ansätzen [MUV96] und [Din00, Din03] gemein ist die Realisierung eines Überwachungskonzepts für die ESP-Sensorik im Fahrzeug. Sie stellen maßgeschneiderte Lösungen für den Betrieb des ESP mit abgesicherten Messgrößen dar, vor allem bezogen auf die Anzahl und Art der Sensoren, auf die zur Verfügung stehende Hardwareplattform und auf das aufsetzende Regelsystem. Zwangsläufig sind die Konzepte durch ihre Spezialisierung auf ein definiertes System statisch und können nur mit erheblichem Aufwand an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden.

Der Ansatz nach [MSB04] hebt sich durch zwei Erweiterungen ab. Zum einen werden die fahrdynamisch relevanten Signale bis auf die Raddrehzahlen mit jeweils zwei Sensoren erfasst und verarbeitet, zum anderen ist die Überwachungsstrategie bezüglich einer erhöhten Verfügbarkeit optimiert, da Einfach- und Mehrfachfehler in unterschiedlichen Sensortypen vom System erkannt werden und zu einer Rekonfiguration der Sensorüberwachung und des Reglers führen. Das Vorgehen führt folglich zu einer engeren Abstimmung zwischen Sensorüberwachung und Regler. Der Ansatz ist jedoch – trotz der funktional möglichen Rekonfiguration

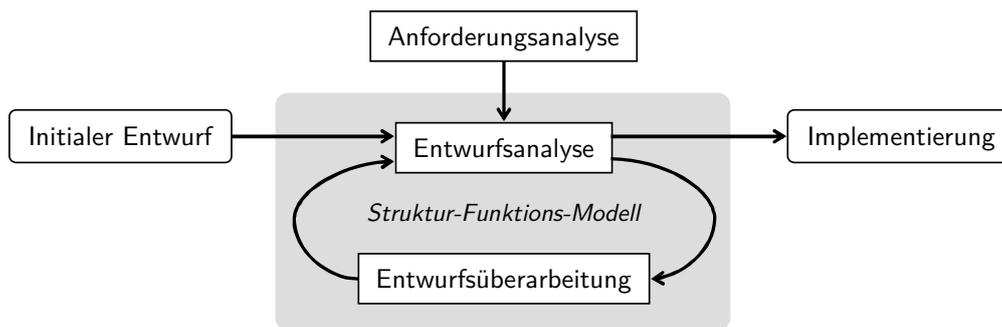


Bild 4.4: Entwicklungsprozess fehlertoleranter softwareintensiver Systeme nach [AHKS02]

in Richtung einer eingeschränkten Sensorbasis – auf Systeme mit der vorausgesetzten maximalen Sensorkonfiguration beschränkt und kann den statischen Charakter nicht vollständig ablegen.

4.4.2 Ganzheitliche Entwurfsstrategien

Der Entwurf einer Softwarearchitektur ist ein vielschichtiger Prozess, der die Umsetzung der Qualitätsattribute und folglich der Anforderungen an die Architektur sicherstellt. Die Komplexität entsteht aufgrund der im Allgemeinen vorhandenen starken Divergenz der Attribute, ihres hohen Abstraktionsgrades und der daraus resultierenden Schwierigkeit der Anforderungsumsetzung. Zahlreiche Aspekte greifen bei der Entscheidungsfindung ineinander, eine Reihe von Prinzipien ist gleichzeitig zu beachten [RH06]. Folglich existieren unterschiedliche Ansätze für den Entwurf von Softwarearchitekturen.

Entwurf mittels Struktur-Funktions-Modell

Der Entwurfsansatz nach [AHKS02] beruht auf bewährten Entwurfsmustern. Auf diese Weise soll heuristisches Wissen gesammelt, dokumentiert und neuen Projekten zugänglich gemacht werden. Der Vorgehensweise liegt ein Struktur-Funktions-Modell zugrunde, welches alle Komponenten und deren Kopplungen untereinander beschreibt. Letztere werden als Funktionsbereitstellungswege bezeichnet. Für Kausalzusammenhänge, die sich nicht über Funktionsbereitstellungswege darstellen lassen, wird der Begriff der Pseudofunktion eingeführt. Eine Pseudofunktion kann beispielsweise die Beschränkung auf einen bestimmten Speicherbereich sein, der für eine Funktion reserviert ist. Fehler können sich im Struktur-Funktions-Modell ausschließlich entlang der (Pseudo-)Funktionsbereitstellungswege ausbreiten.

Um die Auswirkung von Fehlern einzudämmen, kann das Modell um Fehlertoleranzmaßnahmen erweitert werden. Dafür werden eine Erkennungsschnittstelle definiert, benötigte Fehlertoleranzkomponenten nach Bedarf hinzugefügt sowie der Behandlungsbereich der Fehlertoleranzmaßnahme abgegrenzt. Zur Strukturierung der Fehlertoleranzmaßnahmen werden diese nach Fehlerursachen (Bereitstellung eines falschen, verspäteten, keines etc. Wertes) gruppiert, die Ursachen wiederum bestimmten Diensten (Daten-, Speicher-, Aktordienste etc.) zugeordnet. Diese Fehlersemantik wird in einem Katalog gesammelt, der außerdem Entwurfsmuster für die Systemrealisierung enthält.

Die Anwendung des Katalogs erfolgt nach einer *Anforderungsanalyse* (siehe **Bild 4.4**), die die Notwendigkeit von Fehlertoleranzmaßnahmen in Abhängigkeit der geforderten Systemzu-

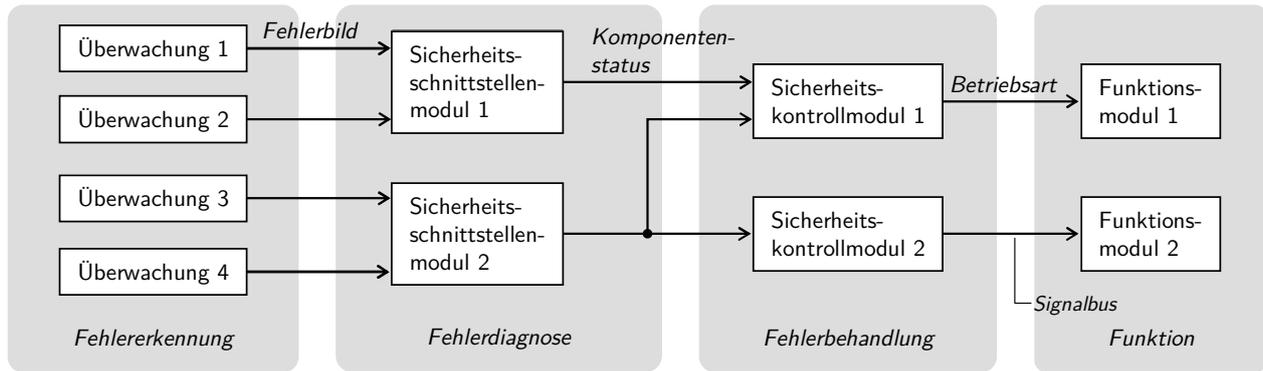


Bild 4.5: Softwaresicherheitsarchitektur nach [Cos03b]

verlässigkeit definiert. Die Analyse schließt die Definition von degradierten Betriebszuständen und die Reaktion auf Fehler ein. Außerdem können auch qualitative Anforderungen an die Architektur einfließen. Die Anforderungen führen zu einem *initialen Systementwurf* und folglich zu einem ersten Struktur-Funktions-Modell, das eine klare Strukturierung des Entwurfsproblems inklusive der Fehlertoleranzanforderungen unterstützt. Die auf dem Modell aufbauende *Entwurfsanalyse* führt zu einer *Entwurfsüberarbeitung*, die zu einer Änderung der Struktur bzw. der Funktionsaufteilung sowie zu einer Erweiterung um Fehlertoleranzmaßnahmen führen kann. Die Überarbeitung mündet wiederum in eine Analyse. Der iterative Prozess endet mit einem anforderungskonformen Systementwurf als Grundlage der *Implementierung*.

Entwurfsmuster für sicherheitsrelevante Systeme

Der Lösungsansatz nach [Cos03b, CH03] verfolgt ein einzelnes Entwurfsmuster für sicherheitsrelevante Systeme im Automobilbereich mit definierten Eigenschaften. Dazu zählen die Forderung nach Fehlertoleranz sowie die Modularität, Spezifizierbarkeit und Testbarkeit der Komponenten. Die korrespondierenden Anforderungen wurden im Zuge des Architekturentwurfs berücksichtigt und umgesetzt. Der Schwerpunkt liegt jedoch nicht auf einem generellen Entwurfsprozess, sondern auf dem optimierten Entwurfsergebnis.

Ein Grundprinzip des Entwurfsmusters ist die strikte Trennung der Sicherheitslogik von der Funktionsdarstellung [CH03]. In **Bild 4.5** ist das Prinzip anhand der Separation der Blöcke zur Fehlererkennung, -diagnose und -behandlung von der funktionalen Implementierung ersichtlich. Die Fehlererkennung ist mit Hilfe von *Überwachungen* für das Auffinden von Fehlern zuständig, die die Systemsicherheit und Verfügbarkeit gefährden. Unterschieden wird zwischen Ansätzen für Hardware- (Überprüfung auf Plausibilität, Grenzwerte, Übertragungsfehler etc.) und Softwarefehler (Zeitüberschreitung bei zeitkritischen Systemen, Vergleich diversitär berechneter Größen etc.). Die Maßnahmen können kontinuierlich, zyklisch/ereignisgesteuert oder im Vor-/Nachlauf des Betriebs stattfinden [Cos03a, Cos03c].

Die *Sicherheitsschnittstellenmodule* werten innerhalb der Fehlerdiagnose individuell für jede sicherheitsrelevante Komponente die von den zugehörigen Überwachungsmodulen übermittelten Fehlerbilder aus. Der ermittelte Komponentenstatus beinhaltet im einfachsten Fall die Zustände „fehlerfrei“ und „fehlerbehaftet“. Anhand der übermittelten Status erfolgt die Bestimmung der passenden Betriebsart durch die *Sicherheitskontrollmodule*. Die Betriebsart kann von der Ausgrenzung defekter Komponenten über die Fehlereingrenzung bis zur Fehlerbehebung unterschiedliche Strategien verfolgen, die im Zuge des Systementwurfs festgelegt

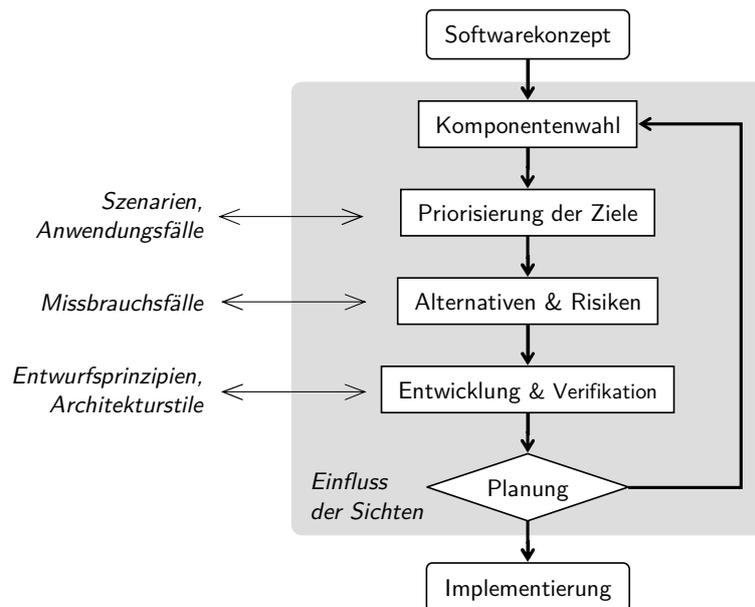


Bild 4.6: Iterative Vorgehensweise zum Entwurf einer Softwarearchitektur nach [BCK03, Gor06, RH06]

werden müssen. Jedem Sicherheitskontrollmodul ist ein *Funktionsmodul* zugeordnet, das seine Funktionsweise in Abhängigkeit der übermittelten Betriebsart variiert.

Allgemeiner Architekturentwurf über Qualitätsattribute

Allgemeine Ansätze für den Entwurf von Softwarearchitekturen sind zahlreich vorhanden. Im Folgenden wird ein iterativer Ansatz als Fusion unterschiedlicher Herangehensweisen [Gor06, RH06] vorgestellt, der maßgeblich durch den *über Qualitätsattribute getriebenen Entwurfsansatz* (engl. *attribute driven design*) nach [BCK03] beeinflusst wurde. Die stetige Weiterentwicklung führte unter anderem zu einer stärkeren Verbindung von Qualitätsattributen und Architekturentscheidungen [BBK00, BBK03, BKB02]. Gemeinsamer Startpunkt der Ansätze ist ein *Softwarekonzept* (siehe **Bild 4.6**), welches die Kernaufgabe des Zielsystems beschreibt:

1. Mittels *Komponentenwahl* wird der Fokus des Architekturentwurfs der aktuellen Iterationsschleife festgelegt. Im ersten Durchlauf ist diese Komponente aller Voraussicht nach das Gesamtsystem.
2. Im Anschluss müssen für die betrachtete Komponente die Treiber der Architektur ermittelt werden, die innerhalb des Gesamtsystems variieren können. Dazu gehört die Analyse der *Ziele, Anforderungen, Mängel* und *Rahmenbedingungen*. Einen wichtigen Beitrag leisten definierte Anwendungsfälle und Szenarien, die Eigenschaften oder Verhaltensweisen des fertig gestellten Systems bzw. von Teilsystemen in abstrakter Form beschreiben.
3. Nicht alle Eigenschaften können in einer Iteration berücksichtigt werden. Daher ist es notwendig, eine Strategie festzulegen, aus der eine *Priorisierung der gesetzten Ziele* hervorgeht.
4. Zur Ableitung von Maßnahmen werden *Alternativen* bewertet und *Risiken* analysiert. Hilfreich ist in diesem Fall die Berücksichtigung von Missbrauchsfällen, die Schwachstellen aufzeigen und zur Bewertung alternativer Vorgehensweisen eingesetzt werden

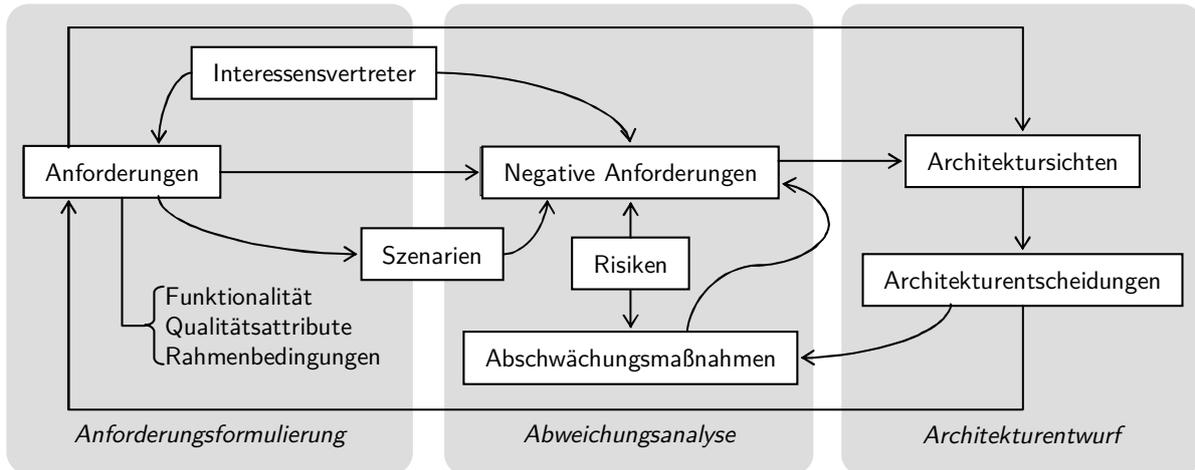


Bild 4.7: Architekturentwurfsprozess sicherheitsrelevanter Systeme nach [WK06a, WK06b]

können.

5. Schließlich erfolgt mit der *Entwicklung und Verifikation* die systematische Umsetzung der festgelegten Ziele. Die Anwendung bestimmter Architekturstile kann den Entwurf unterstützen. Gleichzeitig sollten allgemeine Entwurfsprinzipien berücksichtigt werden, die bewährte Anforderungen an die Architektur zusammenfassen. Bei Bedarf erfolgt in diesem Schritt eine Dekomposition in Module, deren Schnittstellen zu definieren sind. Abschließend muss überprüft werden, ob die gesetzten Ziele ausreichend berücksichtigt wurden, was wegen konträrer Anforderungen oftmals ein Abwägen zwischen gegensätzlichen Stoßrichtungen darstellt. Die Verifikation beinhaltet auch die Überarbeitung von Anforderungen und Anwendungsfällen. In der Praxis erfordert die Bewertung des Grades der Zielerreichung in der Regel die Implementierung eines Architekturprototyps.
6. Die *Planung* der nächsten Iteration hängt eng mit der Komponentenwahl und den Erkenntnissen der vorhergehenden Verifikation zusammen. Auf der Grundlage des vorliegenden Wissens über das (Teil-)System wird entschieden, welche Ziele nachdrücklicher verfolgt bzw. welcher andere Teilbereich der Architektur ausgearbeitet werden soll. Der Entwurfsprozess geht in eine neue Iterationsschleife. Ist bereits eine rudimentäre Architektur vorhanden, kann parallel und schrittweise mit der Implementierung der Funktionalität begonnen werden.

Die Architekturentwicklung stellt die Berücksichtigung der erhobenen Anforderungen sicher. Unterstützend wirken sich die unterschiedlichen Sichten auf das System aus, die fortwährend zu einem umfassenden Überblick über die Komponenten, ihre Umgebung sowie die vorherrschenden Rahmenbedingungen und Verhaltensweisen im Systemverbund führen.

Architekturentwurf für sicherheitsrelevante Systeme

Inspiziert durch die anerkannte Herangehensweise nach [BCK03] und der Forderung nach einer synchronen Entwicklung von Anforderungen und Softwarearchitektur [Nus01] wird in [WK06a, WK06b] der Entwurfsansatz für sicherheitsrelevante Systeme erweitert. Daher weist der bekannte iterative Prozess einige Besonderheiten bezüglich der Formulierung und Berücksichtigung von Sicherheitsanforderungen auf. Die Prozessschritte werden nachfolgend erläutert, eine Übersicht ist in **Bild 4.7** zu finden:

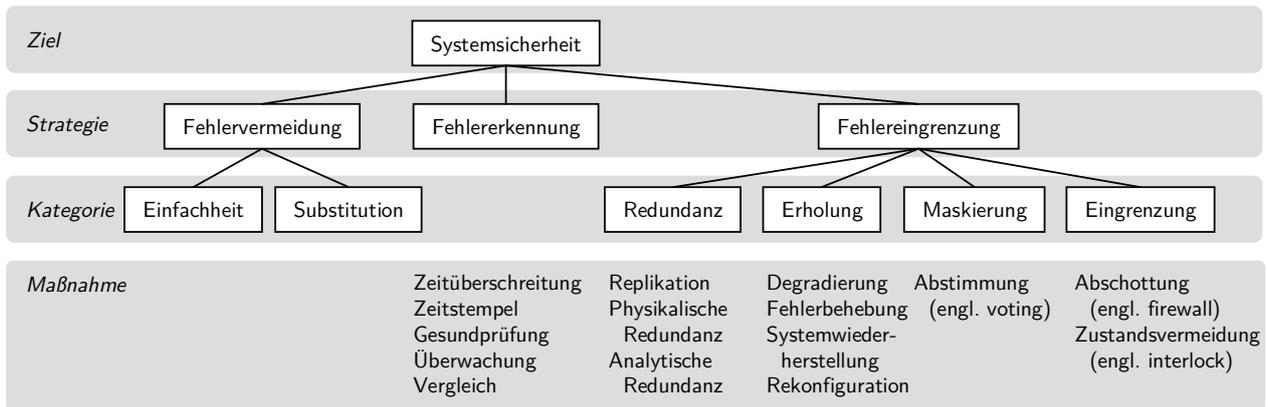


Bild 4.8: Sicherheitsstrategien für sicherheitsrelevante Systeme nach [WK04]

1. Mit der *Anforderungsformulierung* wird das aktuelle Wissen über das System für die kommende Iteration fixiert. Grundlage bilden Anforderungen, die sich sowohl auf die Funktion, aber auch auf Qualitätsattribute und einschränkende Rahmenbedingungen beziehen, die durch die projektbeteiligten Interessensvertreter motiviert sind und weiter verfolgt werden sollen. Des Weiteren werden Anwendungsfälle und *Szenarien* definiert, die das abstrakte Verhalten des Systems festlegen.
2. Ein Schwerpunkt der Vorgehensweise liegt auf der Ableitung von *negativen Anforderungen*, die als Treiber von Absicherungsmaßnahmen anzusehen sind. Sie werden über eine *Abweichungsanalyse* (engl. *deviation analysis*) ermittelt, die mögliche Risiken identifiziert und deren Ursache ergründet.
3. Die *Priorisierung* der Handlungsschwerpunkte legt die Abarbeitungsreihenfolge für die aktuelle Iteration fest. Unterstützt wird die Bewertung durch eine Gefährdungs- und Risikoanalyse, die die Vergleichbarkeit einzelner Ereignisse nach Kriterien wie Auftretenswahrscheinlichkeit, Beherrschbarkeit und Schadensausmaß gewährleistet. Mit fortschreitender Detaillierung der Architektur können weitere Hilfsmittel wie Fehlerbaum- oder Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) zum Einsatz kommen.
4. Anhand der gesammelten Informationen muss der *Architekturfreiraum* (engl. *architectural design space*) aufgezeigt werden, der alle Entwurfsoptionen und ihre Anwendungsmöglichkeiten enthält.
5. Die Wahl einer *Abschwächungsmaßnahme* (engl. *mitigation option*) muss auf Basis von Kosten-Nutzen-Betrachtungen, potentiellen Nebenwirkungen von Entscheidungen etc. sorgfältig abgewogen werden. In diesem Zusammenhang kommt den Auswirkungen von Sicherheitsmaßnahmen auf die Architektur maßgebliche Bedeutung zu. Eine Auswahl an möglichen Strategien zur Fehlervermeidung, Fehlererkennung und Fehlereingrenzung ist in **Bild 4.8** gegeben.
6. Die Entwurfsentscheidung mündet in eine *Überarbeitung der Anforderungen und Architektursichten* und bildet den Ausgangspunkt für eine weitere Iteration.

Die Iterationen werden so lange fortgesetzt, bis alle Anforderungen verwirklicht und alle Risiken beseitigt bzw. auf ein vertretbares Maß reduziert worden sind.

Bewertung

Der Entwurfsansatz nach [AHKS02] stellt über das Struktur-Funktions-Modell geordnet die Kopplungen innerhalb eines Systems dar. Voraussetzung ist die Kenntnis von Ort sowie Art der auftretenden Fehler, um geeignete Maßnahmen abzuleiten. Für komplexe Systeme wird diese Vorgehensweise schnell unübersichtlich, zumal das Modell lediglich eine statische Sicht auf das System darstellt. Getroffene Entscheidungen werden in Form von Entwurfsmustern dokumentiert, die auch Informationen über mögliche Alternativen enthalten. Auf diese Weise wird die heuristische Entwurfserfahrung gesammelt und steht nachfolgenden Projekten zur Verfügung. Die Übertragbarkeit der Methodik ist aber folglich aufgrund des notwendigen Katalogwissens stark eingeschränkt. Die Berücksichtigung von Anforderungen an die Softwarearchitektur ist möglich, der Schwerpunkt des Ansatzes liegt jedoch auf einem funktional getriebenen Entwurf.

Die Vorgehensweise nach [Cos03a, CH03] ist dagegen kein allgemeiner Architekturentwurf, sondern ein mögliches Entwurfsmuster für sicherheitsrelevante Systeme. Der Fokus liegt auf der Sicherheitsarchitektur, nicht auf der Funktionalität der gesteuerten Komponenten. Kopplungen zwischen den Funktionsmodulen bzw. funktionale Rahmenbedingungen bleiben im Entwurfsprozess unberücksichtigt. Vorteilhaft wirken sich dagegen die modulare Struktur mit ihren klar definierten Aufgaben und Schnittstellen aus, die im Verlauf der Entwicklung separat spezifiziert, konzipiert und getestet werden können. Des Weiteren ist aufgrund der Modularität der Architektur die Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten denkbar. Der Ansatz kann als Entwurfsmuster in einen ganzheitlichen Entwurfsprozess integriert werden, stellt jedoch kein vollständiges Konzept dar.

Der allgemeine Ansatz nach [BCK03, Gor06, RH06] berücksichtigt sowohl Anforderungen an die Funktion, an die Architektur als auch ihren wechselseitigen Einfluss aufeinander und ist folglich universell auf jedes Softwaresystem anwendbar. Die daraus hervorgegangene, ebenfalls ganzheitliche Vorgehensweise nach [WK06a, WK06b] erweitert die Herangehensweise für sicherheitsrelevante Systeme. Die zahlreichen positiven und negativen Anforderungen, Szenarien, Anwendungs- und Missbrauchsfälle etc. machen die Durchführung des Entwurfs sehr aufwändig und für vielschichtige Systeme äußerst komplex. Hervorzuheben ist, dass Sicherheitsanforderungen explizit in den Entwurf einfließen. Die Beurteilung der Notwendigkeit einzelner Sicherheitsmaßnahmen wird über eine Gefährdungs- und Risikoanalyse bestimmt. Diese Voraussetzung erschwert die Anwendung auf Systeme ohne Wechselwirkung mit der Umwelt. Eine Signaldatenaufbereitung kann folglich ausschließlich in Kombination mit einem signalnutzenden Regelsystem und der dann vorherrschenden direkten Wechselwirkung mit dem Fahrzeug erfolgen.

4.5 Bewertung von Softwarearchitekturen

Um die Qualität einer Softwarearchitektur zu beurteilen, müssen die zugrunde liegenden, nicht-funktionalen Anforderungen oder Qualitätsattribute auf ihre Berücksichtigung analysiert werden. Auf diese Weise können potentielle Schwachstellen und Risiken aufgedeckt sowie Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet werden. Die allgemeine Vorgehensweise lässt sich in fünf Schritten zusammenfassen [BG04, BKK01]:

1. Planung und Vorbereitung der Bewertung
2. Erläuterung der Softwarearchitektur

3. Erhebung und Priorisierung von Szenarien ausgehend von den zu untersuchenden Qualitätsattributen
4. Analyse der Softwarearchitektur
5. Interpretation und Dokumentation der Ergebnisse

Je nach Zielsetzung der Bewertung haben sich unterschiedliche Ansätze entwickelt, die sich in qualitative (z. B. Fragetechniken) und quantitative Methoden (z. B. Metriken, Simulationen, Prototypen) einteilen lassen. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Allgemeingültigkeit, der Detaillierungsgrad, der Anwendungszeitpunkt und der Schwerpunkt der Analyse. Die bekanntesten Methoden sind [BG04, BKK01, DN02, IHO02]:

- ▷ Die *Analysemethode für Softwarearchitekturen* (engl. *software architecture analysis method, SAAM*) stellt einen auf Szenarien basierenden Ansatz dar. Den Schwerpunkt der Analyse stellt die Modifizierbarkeit eines Systems dar.
- ▷ Aufbauend auf dem erstgenannten Ansatz setzt die *Analysemethode für Zielkonflikte innerhalb der Architektur* (engl. *architecture trade-off analysis method, ATAM*) die Verallgemeinerung des Ansatzes auf beliebige Qualitätsattribute um. Die Betrachtung der Interaktion der nicht-funktionalen Anforderungen bildet eine Besonderheit dieses Verfahrens.
- ▷ Einen weniger auf die Qualitätsattribute einer Architektur, sondern vielmehr auf die Auswirkungen auf tangierte Geschäftsziele wie Kosten, Zeitpläne etc. ausgerichteter Ansatz ist die *Kosten-Nutzen-Analysemethode* (engl. *cost benefit analysis method, CBAM*).

Die Methoden haben gemeinsam, dass sie die Teilnahme der an der Softwarearchitektur beteiligten Interessensvertreter voraussetzen, um eine vollständige Sicht auf die Architektur sicherzustellen. Die Erhebung der Szenarien ist erst dann abgeschlossen, wenn nach ihrer Analyse Auswirkungen auf den Architekturentwurf ausbleiben.

4.6 Zusammenfassung

Zur Berücksichtigung der notwendigen nicht-funktionalen Anforderungen wie Wiederverwendbarkeit und Skalierbarkeit für ein komplexes Softwaresystem wird das Handlungsfeld der Softwarearchitektur erläutert. Die Berücksichtigung von Qualitätsattributen ist der Schlüssel für den Entwurf der Softwarearchitektur für eine ZSDA. Im Stand der Technik präsentierte, bestehende Ansätze der Sensorüberwachung berücksichtigen diese Aspekte unzureichend, indem sie einen einseitigen Schwerpunkt auf die Funktion setzen. Folglich muss ein neues Konzept entwickelt werden, das neben den funktionalen auch die nicht-funktionalen Anforderungen berücksichtigt. Deren Erhebung ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels. Sie dienen als Ausgangspunkt für einen an die beiden ganzheitlichen Herangehensweisen – der über Qualitätsattribute getriebene allgemeine Ansatz nach [BCK03, Gor06, RH06] und dessen Erweiterung auf sicherheitsrelevante Systeme nach [WK06a, WK06b] – angelehnten Architekturentwurf.

5 Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung

Eine Signaldatenaufbereitung ist für jedes Fahrwerkregelsystem notwendig, jedoch variiert der realisierte Funktionsumfang vor allem hinsichtlich der verfügbaren Fahrdynamiksensorik und der Sicherheitsrelevanz der signalnutzenden Regelsysteme. Für den Entwurf einer zentralen Signaldatenaufbereitung (ZSDA) muss daher bekannt sein, welche Anforderungen an sie gestellt werden. Zur Klärung dieser Frage werden nach **Bild 5.1** drei Teilbereiche untersucht. Anforderungen ergeben sich zunächst aus der Analyse bestehender Fahrerassistenzsysteme, bei denen es sich um potentielle Signalabnehmer handelt. Die Informationen werden sowohl durch Literaturrecherche als auch durch die Befragung von Experten der Technischen Entwicklung der AUDI AG zusammengetragen. Der zweite Einflussbereich ist die Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen, aus der neue Rahmenbedingungen erwachsen. Diese werden wiederum mittels Literaturrecherche, aber auch über die Analyse der zentralen Stellung einer Signaldatenaufbereitung im Verbund der vernetzten Regelsysteme ermittelt. Abschließend werden bewährte Entwurfsprinzipien aus dem Bereich der Softwareentwicklung ergänzt.

5.1 Anforderungen von Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsystemen

Zur Anforderungserhebung werden im Folgenden die Ergebnisse der Analyse von Fahrerassistenzsystemen dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Untergruppe der Fahrwerkregelsysteme, die Auflistung erfolgt chronologisch innerhalb einzelner Bereiche des Fahrwerks. Der Kern der Untersuchung ist neben der Funktionsweise vor allem die Fragestellung nach

- ▷ der vorausgesetzten Fahrdynamiksensorik,
- ▷ der Sicherheitseinstufung des Regelsystems,
- ▷ den umgesetzten Umfängen einer Signaldatenaufbereitung,
- ▷ der erforderlichen Signalqualität.

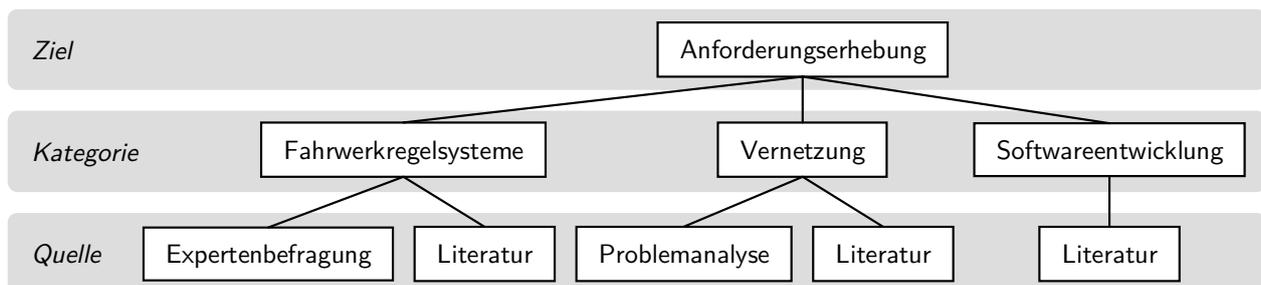


Bild 5.1: Anforderungserhebung für eine zentrale Signaldatenaufbereitung

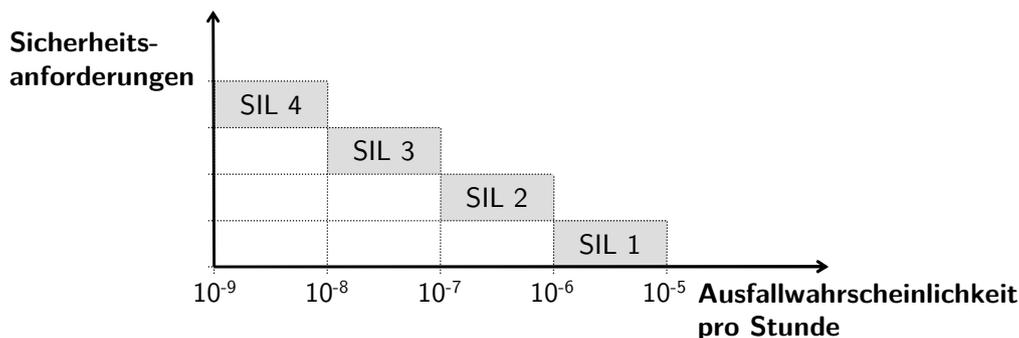


Bild 5.2: Definition der Sicherheitseinstufungen für Betriebsarten mit hoher Anforderungsrate oder kontinuierlicher Anforderung als Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde [Int98]

Die Sicherheitseinstufung erfolgt gemäß der Norm IEC 61508 [Int98], die als Richtlinie für die Entwicklung und Absicherung sicherheitsrelevanter Systeme geschaffen wurde. Die Anforderungen an das System und seinen Entwicklungsprozess steigen mit der Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls. In Abhängigkeit der tolerierten Ausfallwahrscheinlichkeit kann einem System eine *Sicherheitseinstufung* (engl. *safety integrity level, SIL*) vorgeschrieben werden, die wie in **Bild 5.2** dargestellt in die vier Stufen SIL 1 bis SIL 4 unterteilt ist.

5.1.1 Antriebsmomentenverteilung

Audi Sportdifferenzial (2008)

Das Audi Sportdifferenzial ist ein aktiv geregeltes Hinterachsdifferenzial, das fahrsituationsabhängig das Antriebsmoment asymmetrisch zwischen den Rädern der Hinterachse verteilen kann, siehe **Bild 5.3**. Diese Verteilung kann auch im frei rollenden, ausgekuppelten Zustand oder im Schubbetrieb erfolgen [Mei08]. Durch die Momentenverteilung wird das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs beeinflusst und folglich das Ansprechverhalten bei Kurvenfahrt dynamischer gestaltet. Des Weiteren können Stabilisierungsfunktionen mit dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) realisiert werden. Die Regelstrategie und folglich das umzusetzende Fahrverhalten ist vom Fahrer in mehreren Stufen wählbar.

Fahrdynamiksensorik: Lenkradwinkel (erfüllt Anforderungen nach SIL 3), $2\times$ Gierwinkelgeschwindigkeit, $2\times$ Querb beschleunigung, $4\times$ Raddrehzahlen [Mei06], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 2 [MPMS09]

Signalaufbereitung: Abgleich der Sensorik: Gierwinkelgeschwindigkeit (Nullpunkt), Querb beschleunigung (Nullpunkt), Lenkradwinkel (Nullpunkt), Raddrehzahlen (relative Empfindlichkeit); — Überwachung der Sensorik: Wertebereiche und Gradienten aller Sensorsignale, Wertebereiche der ermittelten Abgleichswerte, Abweichung der redundanten Sensoren, Modellüberwachung des Lenkradwinkels; — Bereitstellung von Schätzgrößen: Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und -beschleunigung [Ahr06];

Signalanforderungen: Lenkradwinkel $\delta_{\max} = \pm 0,5 \text{ rad}$, Querb beschleunigung $\ddot{y}_{\text{Fzg,max}} = \pm 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{\max} = \pm 0,25 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, Längsgeschwindigkeit $v_{x,\max} = \pm 4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [Sag06];

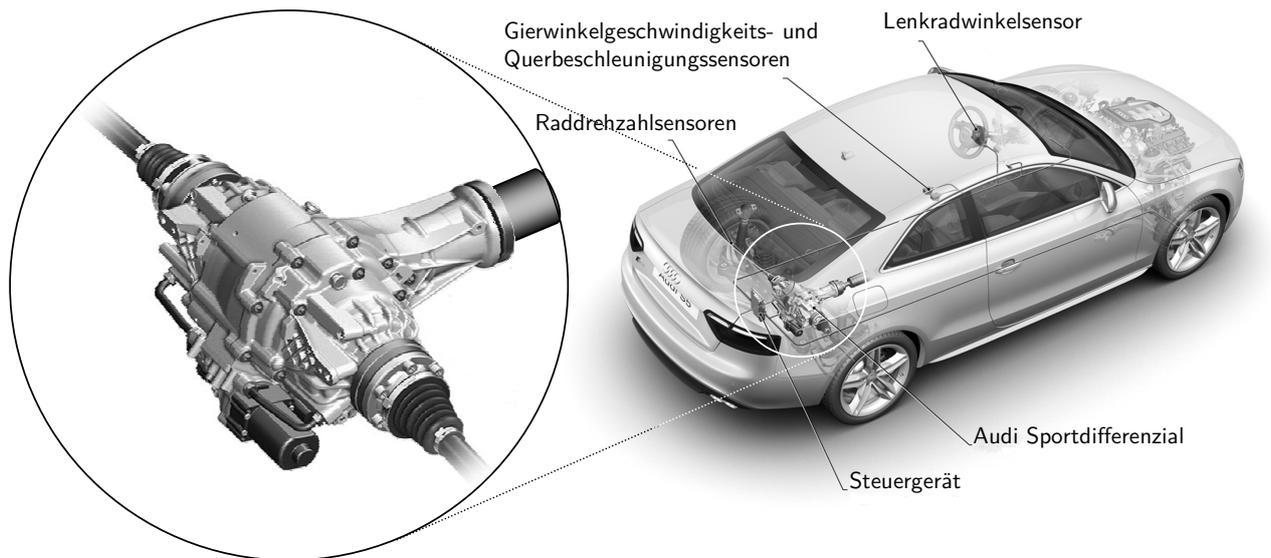


Bild 5.3: Audi Sportdifferenzial integriert ins Fahrzeug, angelehnt an [SDM⁺08]

Dynamic Performance Control (2008)

Das Regelsystem Dynamic Performance Control der BMW AG ist wie das Audi Sportdifferenzial ein aktiv geregeltes Hinterachsdifferenzial, das Differenzmomente von bis zu 1800 Nm realisieren kann [BMW08b]. Der konstruktive Unterschied der Systeme liegt im Konzept der Überlagerungsgetriebe und der Aktoransteuerung. Während bei der AUDI AG die Betätigung hydraulisch über Lamellenkupplungen erfolgt, steuert die BMW AG die Kupplungen mechanisch über Elektromotoren an [BBB⁺08].

Fahrdynamiksensorik: Gierwinkelgeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Lenkradwinkel, 4× Raddrehzahlen [BBB⁺08, BMW08b], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 3 [BBB⁺08]

5.1.2 Lenkung

Electric Power Steering (1993)

Electric Power Steering (EPS) stellt eine elektromechanische Lenkunterstützung dar, die eine freie Regelung des Handmomentes ermöglicht. Das unterstützende Moment wird über einen Elektromotor an Zahnstange oder Lenksäule eingeleitet. Der größte Vorteil des Ansatzes liegt in einer bedarfsgerechten und damit geringeren Leistungsaufnahme im Gegensatz zu konventionellen, hydraulischen Systemen [HE07, Wil05].

Fahrdynamiksensorik: Lenkradwinkel, 4× Raddrehzahlen [Sam08], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 3 [Mül08]

Active Front Steering (2003)

Die Überlagerungslenkung der BMW AG wird als Active Front Steering bezeichnet. Sie beeinflusst über einen am Lenkgetriebe angebrachten Stellmotor inklusive Überlagerungsgetriebe

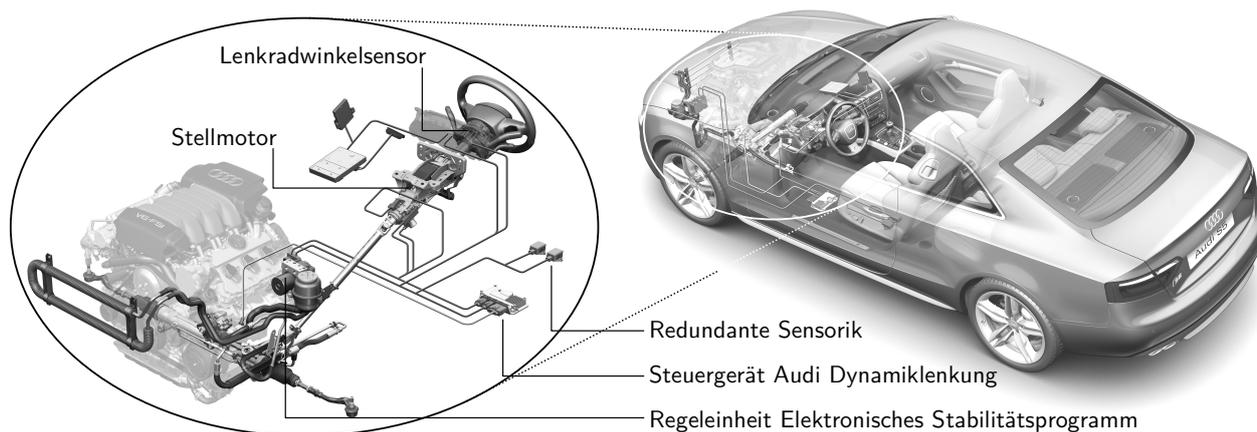


Bild 5.4: Audi Dynamiklenkung integriert ins Fahrzeug, angelehnt an [SDM⁺08]

den Radlenkwinkel. In der Regel wird in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit die Lenkübersetzung angepasst, um dem Fahrer ein komfortables Führen des Fahrzeugs zu ermöglichen. Bei geringen Geschwindigkeiten wird die Lenkung direkter und somit der Lenkaufwand geringer, indem ein großer Lenkwinkel gemäß dem Fahrerwunsch überlagert wird (z. B. zum Rangieren des Fahrzeugs). Bei hohen Geschwindigkeiten wird die Lenkung indirekter, so dass Lenkvorgaben präziser vorgenommen werden können. Stabilisierende Eingriffe können – auch entgegen dem Fahrerwunsch – ausgeführt werden [EPK⁺02].

Fahrdynamiksensorik: Lenkradwinkel, Stellmotorwinkel, 2× Gierwinkelgeschwindigkeit, 2× Querbefleunigung, 4× Raddrehzahlen [EPK⁺02], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 3

Signalaufbereitung: Überwachung: Wertebereiche und Gradienten aller Sensorsignale, Modellüberwachung, Abweichung der redundanten Sensoren voneinander [EPK⁺02];

Audi Dynamiklenkung (2007)

Die Audi Dynamiklenkung ist eine Überlagerungslenkung, die sich konstruktiv durch die Integration in die Lenksäule und das verwendete Überlagerungsgetriebe von Active Front Steering unterscheidet. Komfortfunktionen werden auf Basis von Lenkrad- und Stellmotorwinkel sowie Raddrehzahlen in einem eigenen Steuergerät realisiert, siehe **Bild 5.4**. Für Stabilisierungseingriffe wird ein vom ESP berechneter Sollwinkel an das Steuergerät übermittelt und dem Fahrerwunschlenkwinkel überlagert [Her07]. Wie beim Audi Sportdifferenzial kann die Regelstrategie vom Fahrer beeinflusst werden.

Fahrdynamiksensorik: Lenkradwinkel (erfüllt Anforderungen nach SIL 3), Stellmotorwinkel, 2× Gierwinkelgeschwindigkeit, 2× Querbefleunigung, 4× Raddrehzahlen [Lan07], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 3 [Sch06] (Kritische Softwarepfade werden nach [SLM07] zum Teil diversitär gerechnet, um systematische und sporadische Fehler aufgrund der Programmierung, des Speichers etc. auszuschließen. Ein Ausfall der Sensorik führt zur Sperrung des Stellmotors und zu einer konstanten mechanischen Lenkübersetzung.)

Signalaufbereitung: Abgleich: Lenkradwinkel (Nullpunkt), Radgeschwindigkeiten (relative Empfindlichkeit). — Überwachung: Wertebereichs- und Gradientenüberwachung aller Sensoren, Modellüberwachung des Lenkradwinkels. — Bereitstellung von Schätzgrößen: Fahr-

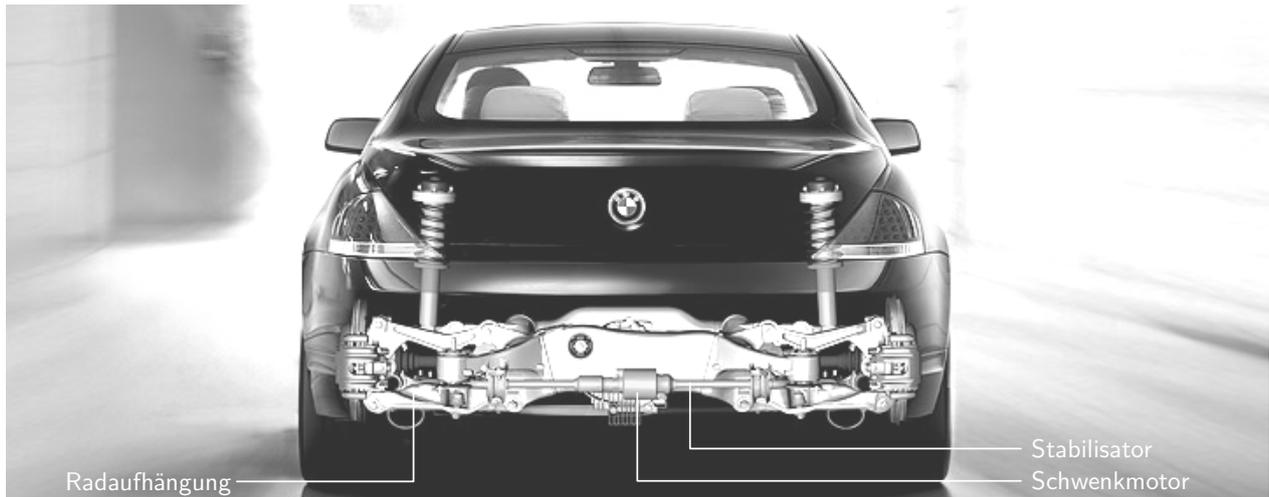


Bild 5.5: Dynamic Drive der BMW AG integriert ins Fahrzeug [BMW08a]

zeuglängsgeschwindigkeit und -beschleunigung. — Gierwinkelgeschwindigkeit und Querbesehleunigung werden vom ESP bereitgestellt, siehe Seite 59 [Lan07];

Signalanforderungen: Lenkradwinkel $\delta_{\max} = \pm 0,262 \text{ rad}$, Querbesehleunigung $\ddot{y}_{\text{Fzg,max}} = \pm 2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{\max} = \pm 0,122 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, Längsgeschwindigkeit $\dot{x}_{\max} = \pm 4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [Her07];

5.1.3 Vertikaldynamik

Active Body Control (1999)

Active Body Control ist ein von der Daimler AG entwickeltes aktives Federungssystem, das die Lage des Fahrzeugaufbaus ausschließlich durch eine hydraulisch realisierte Veränderung des Federfußpunktes beeinflussen kann. Die Räder werden weiterhin durch passive Elemente befedert und bedämpft [WS99]. Der Ansatz ermöglicht den Entfall konventioneller Stabilisatoren, was zu einer Komfortverbesserung beiträgt. Das Potenzial des Systems erstreckt sich von einem aktiven Nick- und Wankausgleich des Fahrzeugs über eine beladungsabhängige Niveauregulierung bis zu einer Absenkung der Karosserie bei hohen Geschwindigkeiten [For07].

Fahrdynamikseniorik: Querbesehleunigung, Längsbesehleunigung, $4 \times$ Federweg, $3 \times$ Aufbau-besehleunigung [WS99], siehe **Tabelle 5.1**;

Dynamic Drive (2001)

Als Dynamic Drive werden von der BMW AG aktiv angesteuerte Stabilisatoren bezeichnet, die eine Umverteilung der Radaufstandskraft an beiden Achsen bewirken. Die zwei Stabilisator-elemente pro Achse sind jeweils mittig drehbar mit der Karosserie, außen mit der Radaufhän-gung und innen über einen hydraulisch betriebenen Schwenkmotor miteinander verbunden, siehe **Bild 5.5**. Durch die Ansteuerung des Motors können die mit der Radaufhängung verbun-denen Enden gegeneinander verdreht werden. Die daraus resultierenden Kräfte, die auf die Radaufhängung wirken, verursachen bei Kurvenfahrten eine bedarfsorientierte Verteilung der Radaufstands- und somit der Seitenführungskräfte zwischen den Rädern einer Achse. Gleich-zeitig kann die Wankbewegung des Fahrzeugaufbaus vollständig ausgeglichen werden. Bei

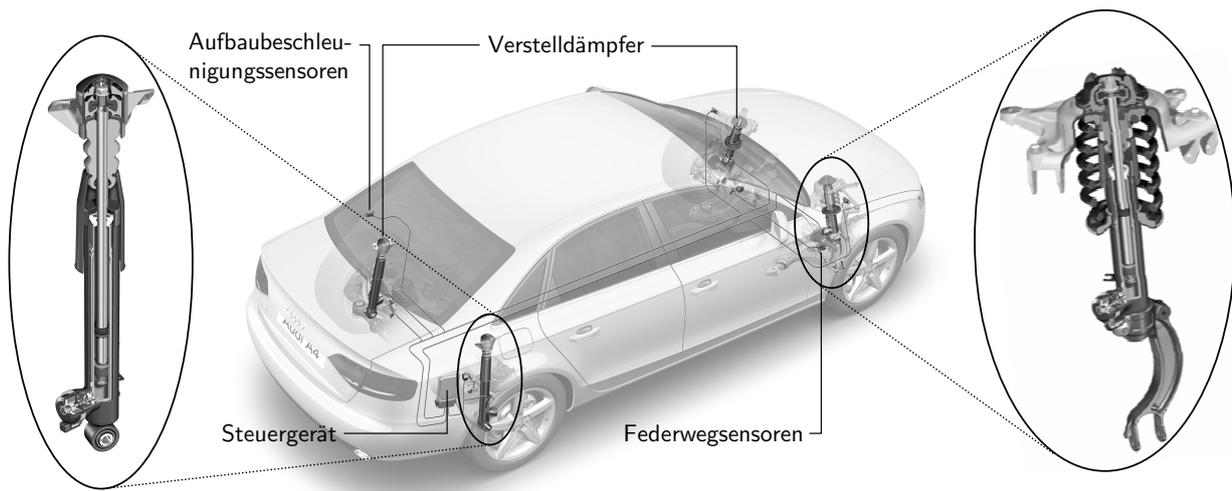


Bild 5.6: Audi Dämpferregelung integriert ins Fahrzeug [Her07, SB07]

Geradeausfahrt werden die Schwenkmotoren passiviert, um den Fahrkomfort (insbesondere die Funktion der Einzelradaufhängung) nicht zu beeinträchtigen [JBB⁺01, JSB03].

Fahrdynamiksensork: Lenkradwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit, Querbeschleunigung, 4× Raddrehzahlen, 4× Federweg [JSB03], siehe **Tabelle 5.1**;

Signalaufbereitung: Abgleich und Überwachung der Querbeschleunigung [JSB03]

Audi Dämpferregelung (2007)

Die Audi Dämpferregelung besteht aus semiaktiv geregelten Stoßdämpfern, die ihre Dämpfungskonstante über variable Durchströmungsöffnungen für die Hydraulikflüssigkeit an die aktuelle Fahrsituation anpassen, siehe **Bild 5.6**. Die Regelstrategie kann vom Fahrer aus mehreren Fahrprogrammen ausgewählt werden [SB07].

Fahrdynamiksensork: Lenkradwinkel, Querbeschleunigung, 4× Raddrehzahlen, 4× Federweg, 3× Aufbaubeschleunigung [Her07], siehe **Tabelle 5.1**;

Signalaufbereitung: Nutzung der vom ESP bereitgestellten Größen [Her07], siehe Seite 59;

Electrical Active Body Control (in der Entwicklung)

Im Vergleich zu dem 1999 eingeführten Active Body Control besitzt das Regelsystem teiltragende, elektrisch betriebene Federbeine. Diese sind einem passiven Federelement sowie einem Dämpfer parallel geschaltet. Die Einflussmöglichkeiten entsprechen denen des Active Body Control. Darüber hinaus sind Komfortfunktionen wie eine Beladungs- und Einstiegshilfe denkbar [Her07].

Fahrdynamiksensork: Querbeschleunigung, Längsbeschleunigung, 4× Raddrehzahlen, 4× Federweg, 3× Aufbaubeschleunigung [Her07], siehe **Tabelle 5.1**;

5.1.4 Bremse und Stabilität

Antiblockiersystem (1978)

Das 1978 von der Robert Bosch GmbH vorgestellte Antiblockiersystem verhindert das Blockieren der Räder beim Verzögern des Fahrzeugs durch die Regelung des radindividuellen Bremsdrucks. Im Allgemeinen führt die Regelung zu einer Verkürzung des Bremswegs, in einigen Ausführungen sogar auf losem Untergrund. Da ein blockiertes Rad zu einem nahezu vollständigen Verlust der Längs- und Seitenführungskräfte am Reifen führt, bleibt durch das Eingreifen des Regelsystems das Fahrzeug lenkbar und vom Fahrer beherrschbar. Beim Bremsen auf unterschiedlichen Reibwerten (in Fahrtrichtung links und rechts) wird außerdem das Eindrehen des Fahrzeugs verzögert, so dass dem Fahrer mehr Zeit zum Gegenlenken zur Verfügung steht [Rei03].

Fahrdynamiksensorik: 4× Raddrehzahlen [Rei03], siehe **Tabelle 5.1**;

Elektronisches Stabilitätsprogramm (1995)

Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) verhindert durch radindividuelle Brems Eingriffe im fahrdynamischen Grenzbereich das Schleudern des Fahrzeugs und unterstützt den Fahrer bei einer kontrollierten Fahrzeugführung. Die Markteinführung des von der Robert Bosch GmbH entwickelten Systems fand 1995 statt. Ausgangspunkt der Regelung ist der Vergleich des Fahrerwunsches mit dem aktuellen Fahrverhalten. Im Fall eines Regeleingriffs führt das gezielte Abbremsen einzelner Räder zum Aufbau eines Giermomentes um die Fahrzeughochachse, welches sowohl im unter- als auch im übersteuernden Fahrbetrieb korrigierend auf die Fahrzeugdynamik einwirkt. Das ESP schließt unterlagerte Regelsysteme wie das Antiblockiersystem mit ein [RDH01, vZ04].

Fahrdynamiksensorik: Lenkradwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit, Querschleunigung, 4× Raddrehzahlen, zum Teil Wankwinkelgeschwindigkeit bei realisiertem Überschlagschutz [vZ04], siehe **Tabelle 5.1**;

Signalaufbereitung: Abgleich der Sensorik: Gierwinkelgeschwindigkeit (Nullpunkt und Empfindlichkeit), Querschleunigung (Nullpunkt), Lenkradwinkel (Nullpunkt und Empfindlichkeit), Raddrehzahlen (Nullpunkt und Empfindlichkeit). — Überwachung der Sensorik: Wertebereiche und Gradienten aller Sensorsignale, Wertebereiche der ermittelten Abgleichswerte, Modellüberwachung, Vorzeichenüberprüfung (Lenkradwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit), Unterspannung (Raddrehzahlen), konstanter Wert (Lenkradwinkel). — Bereitstellung von Schätzgrößen: Fahrzeuglängsgeschwindigkeit [BBF⁺06];

Elektromechanische Parkbremse (2001)

Mit der elektromechanischen Parkbremse ist neben der konventionellen Parkbremsfunktion auch ein Anfahrsistent realisiert. Dieser löst die Bremse beim Anfahren an einer Steigung erst, wenn ausreichend Vortriebskraft bereitgestellt wird. Des Weiteren kann die elektromechanische Parkbremse auch als Notbremssystem betätigt werden [For07].

Fahrdynamiksensorik: Längsbeschleunigungssensor, 4× Raddrehzahlen [Her07], siehe **Tabelle 5.1**;

Sicherheitseinstufung: SIL 3 [Her07] (Um ungewollte Brems Eingriffe auszuschließen, ist die Steuerung der elektromechanischen Parkbremse redundant ausgeführt)

5.1.5 Assistenzsysteme

Adaptive Cruise Control (1998)

Adaptive Cruise Control ist ein 1998 eingeführter Abstandsregeltempomat, der eine Erweiterung konventioneller Geschwindigkeitsregelanlagen darstellt. Das System überwacht mittels Umfelderkennungssensorik fortwährend den Bewegungsraum des Fahrzeugs nach vorn. Sobald ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt wird, wird dessen Position und Geschwindigkeit ermittelt. Auf dieser Grundlage findet über Motor- und Bremsengriffe eine Längsregelung des mit Adaptive Cruise Control ausgestatteten Fahrzeugs statt, so dass es dem Vordermann mit konstantem Abstand folgt. Bremsst das vorausfahrende Fahrzeug bzw. bewegt es sich mit geringerer Geschwindigkeit, verzögert das Regelsystem mit höchstens einem Drittel der maximal möglichen Bremskraft. Verkürzt sich der Abstand zum Vordermann dennoch, kann zusätzlich eine Warnung des Fahrers erfolgen [RDH01].

Fahrdynamiksensorik: *Radar* (engl. für *radio detection and ranging*) bzw. *Lidar* (engl. für *light detection and ranging*) für Umfelderkennung vorn bzw. redundante Ausführung bei automatischer Notbremsfunktionalität, Lenkradwinkel und Gierwinkelgeschwindigkeit zur Ermittlung der prognostizierten Fahrtroute, Querbewegung und 4× Raddrehzahlen aufgrund der Kopplung mit dem ESP, optionale Integration der Längsbeschleunigung für den Betrieb bis in den Fahrzeugstillstand sowie Steigungsberechnung, siehe **Tabelle 5.1** [Her07];

Signalaufbereitung: Nutzung der vom ESP bereitgestellten Größen [Her07], siehe Seite 59;

5.1.6 Übersicht über die Ergebnisse

Die zusammengetragenen Informationen sind bezüglich der verwendeten Sensoren in **Tabelle 5.1** dargestellt. Die Fahrwerkregelsysteme sind zum Großteil als Sonderausstattung eines Fahrzeugs gegen Aufpreis erhältlich. Ausnahmen stellen in vielen Ländern die Bremsenregelsysteme ABS und ESP sowie die elektromechanische Servolenkung EPS dar, die als Sicherheits- sowie Komfortsysteme auch außerhalb des Premiumsegments zur Basisausstat-

Tabelle 5.1: Sicherheitseinstufung (SIL) sowie Sensorbestückung ausgewählter Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsysteme

Fahrwerkregelsystem		SIL	Fahrdynamiksensorik (Anzahl)						
Abk.	Bezeichnung		δ	ψ	\ddot{y}_{Fzg}	\ddot{x}_{Fzg}	ω_{Rad}	z_{Rad}	\ddot{z}_{Fzg}
ABC	Active Body Control	–	–	–	1	1	4×1	4×1	3×1
AFS	Active Front Steering	3	1	2	2	–	4×1	–	–
ACC	Adaptive Cruise Control	–	1	1	1	(1)	4×1	–	–
ABS	Antiblockiersystem	–	–	–	–	–	4×1	–	–
—	Audi Dämpferregelung	–	1	–	1	–	4×1	4×1	3×1
—	Audi Dynamiklenkung	3	1	2	2	–	4×1	–	–
—	Audi Sportdifferenzial	2	1	2	2	–	4×1	–	–
—	Dynamic Drive	–	1	1	1	–	4×1	4×1	–
DPC	Dynamic Performance Control	3	1	1	1	–	4×1	–	–
eABC	Electrical Active Body Control	–	–	–	1	1	4×1	4×1	3×1
EPS	Electric Power Steering	3	1	–	–	–	4×1	–	–
EPB	Elektromechanische Parkbremse	–	–	–	–	1	4×1	–	–
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm	–	1	1	1	–	4×1	–	–

tung zählen. Gleiches gilt für die elektromechanische Parkbremse und zukünftige elektrohydraulische bzw. elektromechanische Bremssysteme, die bei Einsatz aufgrund ihrer im Vordergrund stehenden Grundfunktionalität in der Basisausstattung eines Fahrzeugs angeboten werden.

Anforderung 1 (Sensorbasis): Als Minimalsensorkonfiguration einer ZSDA muss jedes Fahrzeug mit folgenden Sensoren ausgestattet sein:

- ▷ Lenkradwinkel δ
- ▷ Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}$
- ▷ Querschleunigung \ddot{y}_{Fzg}
- ▷ Raddrehzahlen $\omega_{Rad,i}$

Als Sonderausstattung angebotene Regelsysteme führen in den meisten Fällen zu einer Erweiterung der Sensorbasis. Des Weiteren kann der Fall eintreten, dass Fahrdynamiksensoren aufgrund sich ändernder Strategien durch andere substituiert werden. Beispielsweise ist die Aufbaubewegung gleichwertig über die Messung der Aufbaubeschleunigungen (in der Regel an drei Punkten der Karosserie) sowie über die Bestimmung von Nick- und Wankwinkelgeschwindigkeit darstellbar. Die Kosten für eine Erweiterung der Sensorik dürfen ein vertretbares Maß nicht überschreiten, da Bauteilkosten im Gegensatz zu einer Funktionsrealisierung auf Basis von Software für jedes gefertigte Fahrzeug aufgewendet werden müssen.

Anforderung 2 (Erweiterbarkeit): Für optionale Fahrwerkregelsysteme sind Varianten oder Erweiterungen der Sensorbasis sowie neue oder verbesserte Funktionalitäten unabhängig voneinander in das Gesamtsystem zu integrieren. Als potentielle Zusatzsensorik sind folgende Messgrößen vorzuhalten (vgl. Anforderung 11 und 17):

- ▷ Redundante Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_2$
- ▷ Redundante Querschleunigung $\ddot{y}_{Fzg,2}$
- ▷ Längsbeschleunigung \ddot{x}_{Fzg}
- ▷ Nickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$
- ▷ Wankwinkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}$
- ▷ Federwege $z_{Rad,i}$
- ▷ Aufbaubeschleunigungen $\ddot{z}_{Fzg,i}$

Die von der Signaldatenaufbereitung bereitgestellten Signale müssen für alle aufsetzenden Fahrwerkregelsysteme nutzbar sein, was sich insbesondere auf die bereitgestellte Signalgenauigkeit auswirkt.

Anforderung 3 (Signalgenauigkeit): Die von einer ZSDA plausibilisierten Signale müssen die höchsten der von den nutzenden Fahrwerkregelsystemen gestellten Anforderungen erfüllen [Mun02]. Nach Analyse aktueller Fahrwerkregelsysteme in Abschnitt 5.1 ergeben sich als maximal zulässige, nicht erkannte Signalabweichung die Grenzwerte:

- ▷ Lenkradwinkel $\delta_{max} = \pm 0,262 \text{ rad}$
- ▷ Gierwinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}_{max} = \pm 0,122 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- ▷ Querschleunigung $\ddot{y}_{Fzg,max} = \pm 2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- ▷ Längsgeschwindigkeit $\dot{x}_{max} = \pm 4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Das Ziel einer hohen Signalgenauigkeit kann mit unterschiedlichen Strategien verfolgt werden. Ein Ansatzpunkt ist die Nutzung von hochwertigen Sensoren, ein anderer besteht in der

Bestimmung möglicher Sensorungenauigkeiten. Ein Nullpunktfehlerabgleich wird als obligatorisch eingestuft.

Anforderung 4 (Sensorgenauigkeit): Es muss sichergestellt werden, dass die Qualität der von der Sensorik gemessenen fahrdynamischen Größen ausreicht, um die formulierten Anforderungen an die Signalgenauigkeit zu erfüllen. Zu berücksichtigen sind insbesondere die vom Sensorhersteller spezifizierten, maximal zu erwartenden Abweichungen der bereitgestellten Messgrößen.

Anforderung 5 (Nullpunktfehler): Um den Einfluss von Nullpunktfehlern der Fahrdynamiksensorik zu minimieren, muss dieser Fehler für die einzelnen Sensoren im Betrieb bestimmt und das Sensorsignal um diesen Betrag korrigiert werden.

Die beiden oben genannten Möglichkeiten wirken sich direkt auf die Signalgüte aus, jedoch muss zusätzlich ein Maß zur Quantifizierung derselben bereitgestellt werden.

Anforderung 6 (Signalgüte): Für die von der Signaldatenaufbereitung bereitgestellten Sensorsignale muss eine Größe bereitgestellt werden, die die Signalgüte oder -integrität des Sensorsignals kennzeichnet [KRC02, KMPF06, Mun06, VOS⁺08], vgl. Anforderung 9.

Überwachungen der einzelnen Signale stellen weiterhin sicher, dass die Nichteinhaltung der geforderten Genauigkeit registriert wird.

Anforderung 7 (Überwachung der Sensoren): Um zu große Signalungenauigkeiten und auftretende Sensorfehler abzufangen, müssen – in Abhängigkeit der Anforderungen eines Regelsystems – die Fahrdynamiksensoren während des Fahrzeugbetriebs fortwährend überwacht werden. Wird ein Sensor als fehlerhaft detektiert, muss der Ausschluss des Signals für den Regler sichergestellt werden (vgl. Anforderung 10).

5.2 Anforderungen aufgrund der Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen

Der Ansatz der vernetzten Fahrwerkregelsysteme geht idealerweise von einer ZSDA aus, die als Basis des Fahrzeugreglers und der unterlagerten, lokalen Regler dient (vgl. Abschnitt 2.4.1). Doch sowohl in aus Sicht des Fahrzeugherstellers eingekauften Systemen wie dem ESP als auch in den vom Fahrzeughersteller in Eigenregie entwickelten sind bereits Signalplausibilisierungen als elementarer Teil der Systemabsicherung vorhanden. Die Herausforderung besteht in der Umsetzung des Ansatzes der vernetzten Fahrwerkregelsysteme, ohne den in der Regel parallelen Entwicklungsprozess auf Seiten des Fahrzeugherstellers sowie des Zulieferers zu behindern (z. B. durch unterschiedliche Entwicklungsumgebungen, den Schutz des strategischen Fachwissens). Voraussetzung ist eine klare Regelung der Verantwortlichkeiten für die einzelnen Komponenten, einschließlich einer ZSDA [CCA02, Sch04].

Die zentrale Stellung einer Signaldatenaufbereitung lässt aus dem Umstand, dass eine beliebige Anzahl von Reglern mit Signalen versorgt wird, neue Anforderungen erwachsen. Es darf keine Verflechtung zwischen Signalbereitstellung und Reglern im Sinne einer Spezialisierung oder Festlegung auf eine bestimmte Konfiguration des Gesamtsystems geben, um die Austauschbarkeit bzw. Integration neuer Regelsysteme zu gewährleisten. Schnittstellensignale sollten einheitlich und unabhängig von der Implementierung sein, beispielsweise durch die Kommunikation eines aktorunabhängigen Bremsmomentes anstelle eines Bremsdrucks [CCA02, KRC02].

Anforderung 8 (Standardisierte Schnittstellen): Als zentrale Komponente muss eine Signaldatenaufbereitung Informationen für unterschiedliche Fahrwerkregelsysteme bereitstellen, die umgekehrt Größen ausgeben, die von einer Signaldatenaufbereitung verwendet werden. Um die Nutzung von Informationen

konfigurations- und implementierungsunabhängig sicherzustellen, müssen die ausgetauschten Informationen in einer standardisierten Form und einheitlich für alle plausibilisierten Sensoren vorliegen.

Eine Verletzung der in Anforderung 3 geforderten Signalgenauigkeit muss zum Ausschluss des Signals für den oder die betroffenen Regler führen, die diese Genauigkeit voraussetzen. Um die Verfügbarkeit von Reglern mit geringeren Anforderungen nicht zu beeinträchtigen, ist eine durchgängige Strategie zur Bereitstellung der Sensorsignale notwendig. Ziel muss eine Maximierung der Verfügbarkeit der einzelnen Regler bei Einhaltung der Sicherheitsanforderungen sein [Mun06].

Anforderung 9 (Anforderungsbasierte Nutzsignalbereitstellung): Die Bereitstellung der Messgrößen muss unter Berücksichtigung der reglerindividuellen Signalanforderungen erfolgen, um die Nutzung der Signale in Abhängigkeit der Genauigkeit und Verfügbarkeit der Sensorik zu steuern (vgl. Anforderung 6).

Die Steuerung der reglerindividuellen Ausgabe der Messgrößen in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der einzelnen Sensorsignale kann sowohl in einer Signaldatenaufbereitung als auch in den Reglern stattfinden. Voraussetzung ist, dass die Funktion einer Signaldatenaufbereitung auch unter eingeschränkten Betriebsbedingungen gewährleistet ist [CCA02].

Anforderung 10 (Rekonfiguration): Im Fall einer sich ändernden Umgebung (z. B. Sensorausfall, fehlerbehaftete Module) soll sich das Gesamtsystem fehlertolerant verhalten, das heißt, es muss sich an die neue Situation anpassen und seine Funktionalität bestmöglich aufrecht erhalten (vgl. Anforderung 7).

Die Erfüllung dieser Anforderung hängt eng zusammen mit der Verkettung der Module einer zentralen Signaldatenaufbereitung untereinander. Je mehr Wechselwirkungen zwischen diesen herrschen, desto schwieriger wird das Aufrechterhalten der Funktion im Fehlerfall.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass auch unterschiedliche Sensoren derselben fahrdynamischen Größe Verwendung finden. So verwenden Überlagerungslenkungen aufgrund ihrer hohen Sicherheitseinstufung (vgl. Abschnitt 5.1.2) hochwertigere Lenkwinkelsensoren als Fahrzeuge mit Standardlenkung in Kombination mit dem ESP. Des Weiteren kann Sensorredundanz eingesetzt werden, wenn eine fahrdynamische Größe in sicherheitsrelevanten Systemen mehrfach gemessen wird.

Anforderung 11 (Skalierbarkeit): Um das Gesamtsystem an die Anforderungen unterschiedlicher Kombinationen von Signalnutzern und Zielfahrzeugen anzupassen, muss der Funktionsumfang variabel sein, so dass das Gesamtsystem um neue Komponenten erweitert, bestehende Komponenten mehrfach eingesetzt sowie vorhandene Komponenten durch neue oder überarbeitete ersetzt werden können [VOS⁺08] (vgl. Anforderung 2 und 17).

Auf diese Weise kann der Umfang einer ZSDA an ein Fahrzeug individuell angepasst werden. Im Gegensatz dazu wäre auch ein System denkbar, das stets die Maximalfunktionalität enthält und sich in Abhängigkeit der vorhandenen Sensorbasis eigenständig konfiguriert. Dieser Ansatz wird hier jedoch mit Verweis auf [Mot04] ausgeschlossen, worin für sicherheitsrelevante Systeme das Vorhandensein von ungenutzten Teilen der Implementierung nicht empfohlen wird.

5.3 Allgemeine Anforderungen

Ein elementarer Beitrag für ein skalierbares Gesamtsystem ist die Zerlegung desselben in überschaubare Einheiten, die autonom spezifiziert, entwickelt und getestet werden können [VOS⁺08].

Anforderung 12 (Modularität): Zum Zweck der Beherrschbarkeit der Gesamtsoftware muss sichergestellt werden, dass die Implementierung in Module aufgeteilt wird, die einen konsistenten und kohärenten Teilumfang der Gesamtfunktionalität beinhalten. Das heißt, dass Zusammengehörendes mit dem Ziel zusammengefasst wird, eine lose Kopplung der Module untereinander zu realisieren (vgl. Abschnitt 4.2).

Anforderung 13 (Spezifizier- und Testbarkeit): Jeder Bestandteil der Software muss unabhängig vom Gesamtsystem oder Teilen davon vollständig spezifizier- und testbar sein.

Neben den beschriebenen positiven Effekten führt eine Aufteilung der Funktionalität in der Regel zu einem schlechteren Laufzeitverhalten der Gesamtsoftware durch die steigende Anzahl von Funktionsaufrufen und Variablen sowie zu einem wachsenden Speicherbedarf. Entscheidenden Einfluss haben die zur Verfügung stehenden Ressourcen.

Anforderung 14 (Zeitverhalten): Das Gesamtsystem muss bezüglich der benötigten Berechnungszeit skalierbar sein, um in Abhängigkeit der verfügbaren Hardwareplattform das gewünschte Laufzeitverhalten zu realisieren.

In der Fahrzeugindustrie liegen heute Zykluszeiten von maximal 1–20 ms vor. Als Richtwert sollte das Gesamtsystem so konzipiert sein, dass die Abarbeitung der Funktionalität höchstens 50 % der Zeit eines Rechenzyklus beträgt, um Engpässen vorzubeugen. Die Geschwindigkeit der Berechnung ist zum einen abhängig von der Komplexität der Implementierung, zum anderen von den Leistungsreserven des Steuergeräts.

Anforderung 15 (Hardwareplattform): Die Auslegung der Hardwareplattform muss das geforderte Laufzeitverhalten umsetzen. Entscheidende Faktoren sind die Anzahl der Prozessoren, ihre Leistungsfähigkeit, der verfügbare Speicher sowie die geforderten Überwachungsroutrinen.

Vor dem Hintergrund einer sich stetig ändernden Fahrzeuginfrastruktur, vor allem in Bezug auf die Leistungsdaten der Steuergeräte sowie die für die Kommunikation zuständigen Bussysteme, muss die Möglichkeit der Anpassung einer ZSDA an ihre Umgebung gewährleistet sein.

Anforderung 16 (Integrierbarkeit): Eine ZSDA muss in variable Umgebungen integriert werden können. Diese Anpassungen beziehen sich vor allem auf ihre Schnittstellen zur Umgebung.

Eine signifikante Forderung an das Gesamtsystem ist die Einheitlichkeit der Umsetzung, die weitreichende Folgen für Systemeigenschaften wie Wartbarkeit, Erweiterbarkeit, Skalierbarkeit, Applizierbarkeit etc. hat. Unterstützt wird diese Anforderung durch eindeutige Verantwortlichkeiten (vgl. Abschnitt 4.2).

Anforderung 17 (Einheitlichkeit): Prinzipien und Vorgehensweisen beim Entwurf der Architektur und der Funktion sollen so gewählt werden, dass sie einheitlich auf das Gesamtsystem angewendet werden können (vgl. Anforderung 2 und 11).

Anforderung 18 (Trennung der Zuständigkeiten): Für eine Aufgabe soll immer nur ein Element verantwortlich sein, um die Struktur des Gesamtsystems zu vereinfachen.

Anforderung 19 (Applizierbarkeit): Eine ZSDA muss auf unterschiedliche Fahrzeugtypen und -varianten applizierbar sein, was sich ausschließlich auf ihre Parameter, insbesondere die Fahrzeugparameter, bezieht. Die Funktionen müssen von der Applikation unberührt bleiben (vgl. Anforderung 11).

Da eine ZSDA für die Bereitstellung von Signalen für mehrere, im Idealfall für alle sicherheitsrelevanten Fahrwerkregelsysteme eingesetzt wird, muss gewährleistet werden, dass eine hohe Verfügbarkeit der Sensorsignale nicht zu Lasten der Sicherheit des Gesamtsystems geht.

Anforderung 20 (Sicherheit): Vorrangiges Ziel einer ZSDA ist die Maximierung der Signalgenauigkeit und der entdeckten Signalfehler. Gleichzeitig sind die Minimierung der Fehlererkennungszeiten, unbegründeter Einschränkungen der Verfügbarkeit und durch eine ZSDA induzierter Fehler sicherzustellen.

Die Entwicklung gemäß eines Standards (z. B. SIL) ist in Abhängigkeit der Anforderungen der Regelsystem vorzunehmen.

5.4 Zusammenfassung

Zur Erhebung der Anforderungen an die zu entwerfende ZSDA wird eine Analyse bestehender Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsystemen durchgeführt. Im Mittelpunkt stehen Fragestellungen bezüglich der genutzten Fahrdynamiksensorik, der Sicherheitseinstufung gemäß IEC 61508 [Int98], des umgesetzten Funktionsumfangs einer Signaldatenaufbereitung sowie der Anforderungen an die verwendeten fahrdynamischen Signale. Der sich ergebende Anforderungskatalog wird unter Berücksichtigung der im vorausgegangenen Kapitel 2 bezüglich der Vernetzung von Fahrwerkregelsystemen und Kapitel 4 mit dem Fokus auf der Softwarearchitektur gesammelten Erkenntnisse ergänzt.

Die Übersicht in **Tabelle 5.2** zeigt das Spannungsfeld der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen auf, in dem sich der Entwurf einer ZSDA bewegt. Neben bekannten Forderungen funktionaler Natur nach der Sensorgenauigkeit, der Überwachung der Signale, der Rekonfiguration des Gesamtsystems etc. sind zahlreiche nicht-funktionale Qualitätsattribute zu erfüllen. Anforderungen bezüglich der Erweiterbarkeit, der Skalierbarkeit und der Einheitlichkeit der Systemrealisierung etc. haben auf die zu erfüllenden funktionalen Ziele unterge-

Tabelle 5.2: Gliederung der Anforderungen nach Kategorie und Art (Legende: ■ - Anforderung zugeordnet, □ - nicht zugeordnet)

Anforderung			Anforderungsart	
Seite	Nr.	Titel	funktional	nicht-funkt.
<i>Fahrwerkregelsysteme</i>				
62	1	Sensorbasis	■	□
62	2	Erweiterbarkeit	□	■
62	3	Signalgenauigkeit	■	□
63	4	Sensorgenauigkeit	■	□
63	5	Nullpunktfehler	■	□
63	6	Signalgüte	■	□
63	7	Überwachung der Sensoren	■	□
<i>Vernetzung</i>				
63	8	Standardisierte Schnittstelle	■	□
64	9	Anforderungsbasierte Nutzsignale	□	■
64	10	Rekonfiguration	■	□
64	11	Skalierbarkeit	□	■
<i>Allgemein</i>				
64	12	Modularität	□	■
65	13	Spezifizier- und Testbarkeit	□	■
65	14	Zeitverhalten	■	□
65	15	Hardwareplattform	■	□
65	16	Integrierbarkeit	□	■
65	17	Einheitlichkeit	□	■
65	18	Trennung der Zuständigkeiten	□	■
65	19	Applizierbarkeit	■	□
65	20	Sicherheit	□	■

ordneten Einfluss, tragen aber entscheidend dazu bei, das Konzept einer ZSDA zum Erfolg zu führen. Die Gesamtmenge der Anforderungen spannt den Entwicklungsfreiraum auf, der die möglichen Lösungsansätze für die zu konzipierende ZSDA enthält. Im folgenden Abschnitt wird aufbauend auf dieser Basis ein Konzept für eine ZSDA erarbeitet, das unter Berücksichtigung und Priorisierung der erhobenen Anforderungen entwickelt wird.

6 Konzept einer zentralen Signaldatenaufbereitung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Notwendigkeit einer zentralen Signaldatenaufbereitung (ZSDA) für vernetzte Fahrwerkregelsysteme erläutert, der Stand der Technik bezüglich Funktionsumfang und Softwarearchitektur dargestellt und schließlich die Erhebung der Kernanforderungen durchgeführt. Damit sind die Voraussetzungen für einen Konzeptentwurf einer ZSDA geschaffen. Gemäß den Untersuchungen zur Softwarearchitektur in Kapitel 4 wird dazu als ganzheitliche Herangehensweise eine Kombination des über Qualitätsattribute getriebene allgemeine Ansatzes nach [BCK03, Gor06, RH06] und dessen Erweiterung auf sicherheitsrelevante Systeme nach [WK06a, WK06b] eingeschlagen, die dem Architekten einen für funktionale und nicht-funktionale Anforderungen geeigneten Entwurfsfreiraum bietet. Dieser Freiraum wird zunächst mit dem Entwurf der Softwarearchitektur eingegrenzt. Anschließend werden die zu realisierenden Funktionen in den geschaffenen Rahmen eingebettet.

6.1 Entwurf der Softwarearchitektur

Die Realisierung einer geeigneten Softwarearchitektur für eine ZSDA verläuft in mehreren Iterationen nach **Bild 4.6**. In der Regel bietet sich eine Vorgehensweise an, die eine Konkretisierung des Entwurfs von außen nach innen bzw. vom Allgemeinen zum Speziellen vornimmt. Initial wird daher im Folgenden die Interaktion einer Signaldatenaufbereitung mit ihrer Umgebung betrachtet, um daraus Rahmenbedingungen an die Architektur abzuleiten. Überlegungen zur Anpassung der Implementierung an die Umwelt konkretisieren das Architekturkonzept weiter. Mit Entscheidungen zur Strukturierung und zum Aufbau des Gesamtsystems werden schließlich die Voraussetzungen für die funktionale Implementierung geschaffen.

Das Vorgehen beim Architekturentwurf ist in **Tabelle 6.1** zusammengefasst, indem in einer Matrix die Zuordnung der erhobenen Anforderungen aus Kapitel 5 zu den folgenden Entwurfsschritten vollzogen wird.

6.1.1 Interaktion mit der Umgebung

Definition der Nutzschnittstelle

Die Funktionalität einer Signaldatenaufbereitung muss sich in der Nutzschnittstelle widerspiegeln, die für den Informationsaustausch mit den Reglern verantwortlich ist. Die Kernaufgaben sind die Bereitstellung der Nutzsignale, die Erhöhung und Kommunikation der Signalqualität und das sichere Detektieren von Fehlern.

Anforderungen: 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20 (siehe **Tabelle 6.1**);

Umsetzung: Die Signalqualität kann sich im Betrieb fortwährend ändern und wirkt sich direkt auf die von einer Signaldatenaufbereitung bereitgestellten Signale aus, so dass ihre

Bestimmung und ihre Kommunikation an die Regler kontinuierlich erfolgen muss. Die Nutzsinalinformationen gliedern sich daher in drei unterschiedliche Komponenten [Mun06]:

- ▷ Das *Nutzsignal* (N) trägt die physikalische Information der Messgröße. Im Fall redundanter Sensorik kann ein gemittelter Wert ausgegeben werden, ansonsten das kompensierte Sensorsignal. Bei fehlerhaften Sensoren wird ein *Ersatzwert* (E) bereitgestellt, der sich über analytische Redundanz aus einer Modellgröße bildet. Alternativ erfolgt die Ausgabe einer definierten konstanten Zahl als *Fehlerwert* (F), der sich aus dem letzten gültigen Wert des Nutzsinalns oder des Ersatzwertes bzw. einer festgelegten Konstante ergibt.
- ▷ Die *Nutzsignalgüte* (G) beschreibt zu jedem Zeitpunkt die Qualität der zugehörigen Messgröße. Sie trägt die physikalische Einheit des Nutzsinalns und ist positiv definiert. Je größer ihr Betrag, desto höher können potentielle Abweichungen vom korrekten Messwert sein. Wenn modell- oder redundanzbasierte Überwachungen beispielsweise eine unplausible Abweichung der Messgröße(n) detektieren, wird zunächst kein Fehler gesetzt,

Tabelle 6.1: Zuordnung der Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung zu den einzelnen Entwurfsschritten der Softwarearchitektur (*Legende:* ■ - Anforderung berücksichtigt, □ - unberücksichtigt)

Seite	Anforderung	Zuordnung							
62	Sensorbasis	□	□	□	□	■	□	□	□
62	Erweiterbarkeit	□	□	■	■	■	■	□	□
62	Signalgenauigkeit	■	■	□	□	□	□	□	■
63	Sensorgenauigkeit	□	□	□	□	□	□	□	□
63	Nullpunktfehler	■	■	□	□	□	□	□	□
63	Signalgüte	■	■	□	□	□	□	□	□
63	Überwachung der Sensoren	■	■	□	□	□	□	□	□
63	Standardisierte Schnittstelle	■	■	□	□	□	□	□	□
64	Anforderungsbasierte Nutzsinalns	■	■	□	□	□	□	□	□
64	Rekonfiguration	■	■	□	□	□	□	□	■
64	Skalierbarkeit	□	□	■	■	■	■	□	□
64	Modularität	□	■	■	□	■	■	■	■
65	Spezifizier- und Testbarkeit	□	□	□	□	□	■	■	■
65	Zeitverhalten	□	□	□	■	■	□	□	□
65	Hardwareplattform	□	□	□	■	■	□	□	■
65	Integrierbarkeit	□	□	■	■	■	□	□	□
65	Einheitlichkeit	□	■	□	□	□	■	■	■
65	Trennung der Zuständigkeiten	□	■	■	□	■	■	■	□
65	Applizierbarkeit	□	□	□	■	□	□	■	□
65	Sicherheit	■	■	□	□	□	□	□	■
Seite	Entwurfsschritt	:	:	:	:	:	:	:	:
68	Definition Nutzsinalnschnittstelle	..:	:	:	:	:	:	:	:
70	Kommunikation mit Reglern:	:	:	:	:	:	:	:
72	Integration in variable Umgebungen:	:	:	:	:	:	:	:
73	Skalierung des Zeitverhaltens:	:	:	:	:	:	:	:
73	Gesamtsystemkonfiguration:	:	:	:	:	:	:	:
75	Hierarchische Dekomposition der Funktionalität:	:	:	:	:	:	:	:
77	Struktur mehrfach verwendeter Elemente:	:	:	:	:	:	:	:
78	Eigensichere Module:	:	:	:	:	:	:	:

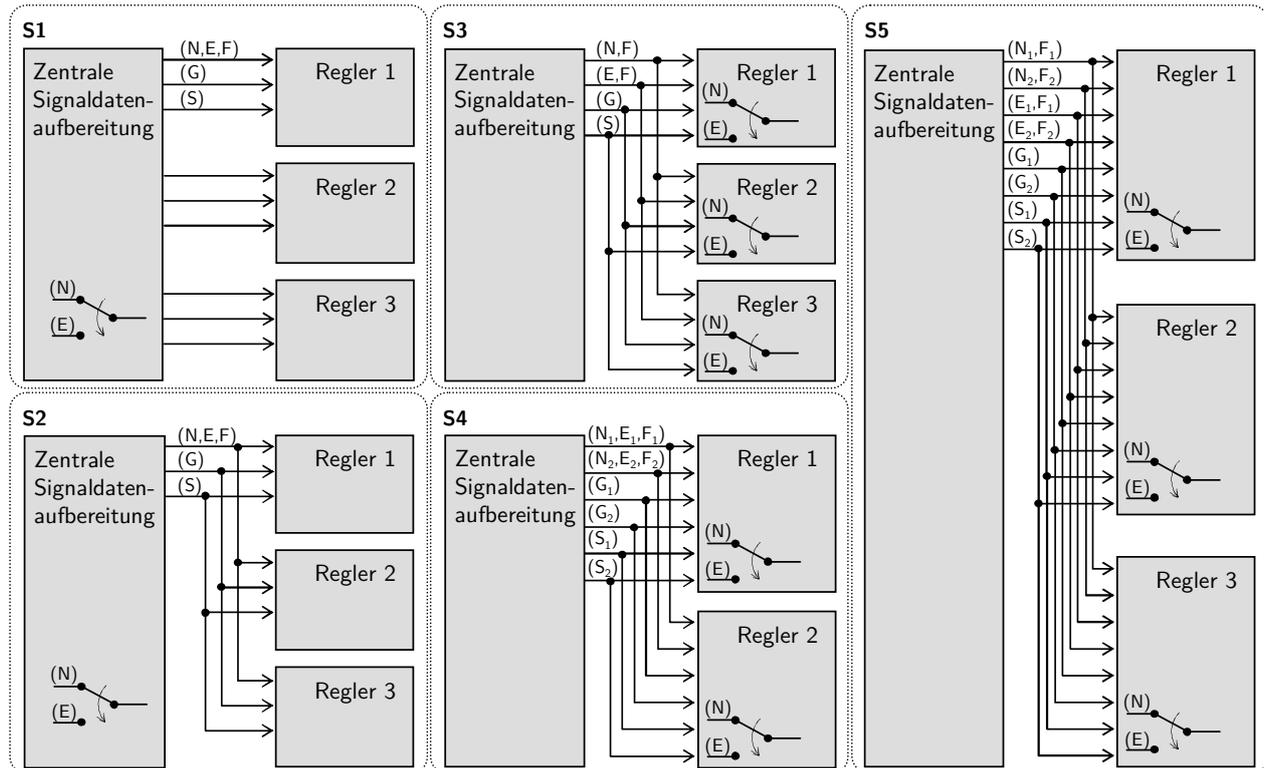


Bild 6.1: Konzepte der Nutzschnittstelle zwischen ZSDA und Reglern für ein zweifach gemessenes, redundantes Sensorsignal [AS08]. Der Schalter kennzeichnet die Komponente, die für die Umschaltung zwischen Nutzsignal und Ersatzwert verantwortlich ist (*Legende: N – Nutzsignal, E – Ersatzwert, F – Fehlerwert, G – Nutzsignalgüte, S – Nutzsignalstatus, Index – Kennzeichnung des Sensors 1/2*)

sondern die Signalgüte eingeschränkt, d. h. ihr Betrag angehoben. Das erhöht die Verfügbarkeit der Regler sowie die Robustheit des Gesamtsystems, da das signalnutzende Regelsystem anhand der Güte entscheidet, ob das Nutzsignal verwendet werden darf.

- ▷ Der *Nutzsignalstatus* (S) gibt Auskunft über den Ursprung des Nutzsignals (Sensor, Modellgröße oder Fehlerwert). Zusätzlich kann im Fehlerfall auch die vorliegende Fehlerart kommuniziert werden.

Die Schnittstelle ist über Konzept S1 in **Bild 6.1** visualisiert. Die funktionale Logik zur Bereitstellung der Nutzsignalgüte sowie die Belegung des Nutzsignalstatus werden im weiteren Verlauf erörtert.

Kommunikation zwischen Signaldatenaufbereitung und Reglern

Zur Realisierung einer ZSDA muss die Kommunikation mit den Reglern vereinheitlicht werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die bereitgestellten Signale alle notwendigen Informationen enthalten, gleichzeitig aber von unterschiedlichen Reglern genutzt werden können. Alle nachfolgend vorgestellten Konzepte sind schematisch in **Bild 6.1** dargestellt.

Anforderungen: 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 20 (siehe **Tabelle 6.1**);

Konzept S1: Ausgehend vom klassischen Ansatz, bei dem eine Signaldatenaufbereitung für ein einzelnes Regelsystem entwickelt wird, werden für jeden Regler ausschließlich die benötigten Signale mit einer individuellen Degradationslogik bereitgestellt. Diese setzt reglerspezifische Signalanforderungen und daraus abgeleitete Fehlerschwellen voraus, die zu reglerabhän-

gigen Varianten einzelner Überwachungen führen. Als Folge wächst der funktionale Aufwand zur Bereitstellung und Umschaltung innerhalb einer Signaldatenaufbereitung sowie die Anzahl der Schnittstellengrößen mit der Zahl der versorgten Regler. Die benötigte Bandbreite auf dem Kommunikationsmedium zwischen beiden Komponenten steigt mit jedem versorgten Regler an, sofern die ZSDA und der bzw. die Regler auf unterschiedlichen Steuergeräten untergebracht sind.

Konzept S2: Für jedes Nutzsinal werden drei Informationskanäle zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten das Nutzsinal inklusive des von der Signaldatenaufbereitung bereitgestellten Ersatz- sowie des Fehlerwertes. Zusätzlich werden Nutzsinalgüte und -status übertragen. Vorteil der Vorgehensweise ist eine schlanke Schnittstelle, da alle Regler dieselben Signale nutzen. Nachteilig wirkt sich dagegen die Degradation der sensorindividuellen Nutzsinalsignale aus, da sie sich trotz der unterschiedlichen Anforderungen an die Signalgüte auf alle nutzenden Regler auswirkt. Beispielsweise ist für einen sicherheitsrelevanten, redundante Sensorik fordernden Regler die Bereitstellung einer Modellgröße überflüssig, in der Regel sogar unerwünscht, da im Fehlerfall die Systemsicherheit gefährdet werden kann. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen durch die Umschaltung des Nutzsinals auf einen Ersatz- bzw. Fehlerwert während einer Degradation, was zu Signalsprüngen führen kann. Ist der Regler empfindlich gegenüber solchen Sprüngen, obwohl eine Modellgröße seinen Anforderungen genügt, muss er zum Zeitpunkt des Wechsels (kommuniziert über den Nutzsinalstatus) einen geeigneten Übergang eigenständig sicherstellen.

Konzept S3: Durch die Unterscheidung von Nutzsinal und Ersatzwert kommt es zu einer Erweiterung der Schnittstelle [KMPF06]. Nutzsinalgüte und -status bleiben davon unberührt. Die Ausgabe eines Fehlerwertes kann auf Nutzsinal und Ersatzwert angewendet werden. Die Entscheidung über die Verwendung von Nutzsinal oder Ersatzwert obliegt den Reglern auf Basis der über Nutzsinalgüte und -status zur Verfügung gestellten Informationen [Mun06]. Auch die Umschaltung von Nutzsinal auf Ersatzwert wird bei Bedarf von jedem Regler selbstständig und reglerspezifisch umgesetzt. Wie in Konzept S2 können ausschließlich die höchsten Anforderungen an die Signale berücksichtigt werden.

Konzept S4: Von einer Signaldatenaufbereitung wird nicht mehr ein Nutzsinal übermittelt, sondern stattdessen werden die an der Bildung beteiligten, kompensierten Einzelsensoren signale individuell mit Güte und Status bereitgestellt. Die Absicherung der Sensorsignale erfolgt auf Basis der höchsten Anforderungen im Systemverbund, jedoch kann jedes Signal individuell bezüglich seiner Verwendung beurteilt werden. Die Generierung des Nutzsinals auf Basis von Signalgüte und -status, z. B. als Mittelwert aus beiden Sensoren oder lediglich aus einem Messwert, muss im Regler erfolgen.

Konzept S5: Konzept S5 stellt die Kombination aus den Ansätzen S3 und S4 dar. Obwohl alle beteiligten Regelsysteme über dieselbe Nutzsinalschnittstelle verfügen, besteht die Freiheit der Auswahl der für ein Regelsystem adäquaten Signale bezüglich der an der Nutzsinalbildung beteiligten Einzelsignale und der Umschaltung auf den Ersatzwert.

Umsetzung: Die Konzepte S2 bis S5 brechen mit dem klassischen Ansatz einer auf ein Regelsystem und seine Signalanforderungen zugeschnittenen Signaldatenaufbereitung und formen eine neutrale Signalbereitstellungsinstanz. Die Gründe hierfür sind eine direkte Folge der vorherrschenden Rahmenbedingungen, da Überwachungstypen nicht mehr individuell für ein Regelsystem genutzt und parametrisiert werden können, sondern die Auslegung anhand der Maximalanforderungen der Regelsysteme im Verbund erfolgen muss. Die Ermittlung der notwendigen Signalanforderungen ist und bleibt ein aufwändiges Unterfangen, das von der Implementierung und folglich der „Verstärkung“ eines Sensorsignals durch die Regleralgorithmen

abhängt. Jede Änderung der Implementierung kann folglich zu veränderten Signalanforderungen führen, was in regelmäßigen Abständen eine Wiederholung der Bestimmungsprozedur und einen Abgleich mit der Leistungsfähigkeit einer ZSDA nach sich ziehen sollte. Denn die Schwellen einzelner Überwachungen können zwar aufgeweitet werden, sofern die Signalanforderungen das zulassen, der limitierende Faktor bleibt jedoch die grundsätzliche Leistungsfähigkeit eines Überwachungstyps und seine robuste Parametrierung. Aufgrund des zentralen Ansatzes müssen alle signalnutzenden Fahrwerkregelsysteme und ihre Signalanforderungen in Betracht gezogen werden, was zu zusätzlichen Abhängigkeiten im Systemverbund führt. Um eine größtmögliche Unabhängigkeit von den Anforderungen der Regelsysteme aufzuweisen, bietet sich für eine ZSDA folgende Vorgehensweise an:

1. Applikation der einzelnen Überwachungstypen unabhängig von den Signalanforderungen der Regelsysteme. Alleiniges Ziel ist eine bestmögliche Fehlererkennung bei gleichzeitig hoher Robustheit, um ausschließlich tatsächlich vorhandene Fehler zu detektieren.
2. Abgleich der Überwachungsschwellen mit den Signalanforderungen der Regelsysteme, um die Bereitstellung der geforderten Signalgenauigkeit sicherzustellen.
3. Sollten in Schritt 2 die geforderte Signalgenauigkeit nicht erreicht werden, müssen Abhilfemaßnahmen diskutiert werden. Diese können sich beispielsweise in einer niedrigeren Robustheit bzw. besserer Fehlererkennung der Überwachungen widerspiegeln oder die Notwendigkeit von redundanter Sensorik zur Absenkung der Fehlererkennungsschwelle zur Folge haben.

Ob eine kompakte Bereitstellung der Nutzsinalinformationen (S2), die separate Bereitstellung eines Ersatzwertes (S3), der Einzelsensorsignale (S4) oder die Kombination aus den beiden letztgenannten Ansätzen (S5) gewählt wird, hängt vor allem von den Anforderungen der Regelsysteme ab und von der Fragestellung, welche Informationen von ihnen abgerufen werden. In allen Fällen wird die reglerspezifische Anpassung einer ZSDA auf unterschiedliche Arten aufgelöst. Die Aufweitung der Schnittstelle rentiert sich jedoch nur dann, wenn die zusätzliche Entscheidungsfreiheit von den Reglerentwicklern genutzt wird.

In dieser Arbeit werden die beiden Konzepte S3 und S4 weiter verfolgt und führen somit zu einer Erweiterung der eingangs definierten Nutzschnittstelle. Die Verantwortung für die Umschaltung zwischen Nutzsinal und Ersatzwert (S3) bzw. die Nutzsinalbildung (S4) wird von den Reglern bzw. den Reglerentwicklern übernommen, die die bestmögliche Lösung in Abhängigkeit ihrer Implementierung und der von Nutzsinalgüte und -status bereitgestellten Informationen umsetzen und an keinen allgemein gültigen Kompromiss gebunden sind. Der Nachteil einer Ausweitung des Schnittstellenumfangs gegenüber Konzept S2 wird durch die Vorteile der individuellen Bereitstellung von Mess- und Modellgrößen ausgeglichen.

6.1.2 Anpassung an die Umgebung

Integration in variable Umgebungen

Eine ZSDA muss an unterschiedliche Umgebungen angepasst werden können. Eine Umgebungsänderung könnte eine veränderte Hardwareplattform oder die Umstellung des Bussystems im Fahrzeug von einem ereignis- (z. B. CAN, engl. für controlled area network) auf einen zeitgesteuerten Ansatz (z. B. FlexRay) sein.

Anforderungen: 2, 11, 12, 16, 18 (siehe **Tabelle 6.1**);

Umsetzung: Der Fokus dieser Architekturentscheidung liegt auf geänderten Schnittstellensignalen einer ZSDA im Gegensatz zu einem gleichbleibenden internen Signalumfang. Um die Schnittstellensignale an das interne Format anzupassen bzw. umgekehrt, werden sowohl am Eingang als auch am Ausgang einer Signaldatenaufbereitung Module vorgesehen, die eine Kapselung der internen Signale und die notwendigen Signalkonvertierungen vornehmen.

Skalierung des Zeitverhaltens

Der Softwareumfang einer für ein Fahrwerkregelsystem eingesetzten Signaldatenaufbereitung macht ein Vielfaches im Vergleich zum Regler aus [Sch04]. Die Komplexität steigt mit der Zahl der abgedeckten Sensoren und der mit Signalen versorgten Regelsysteme weiter an. Folglich variieren auch die benötigte Rechenleistung und der vorzuhaltende Speicher des Steuergeräts. Aber auch die versorgten Regelsysteme können auf unterschiedliche Abtastraten ausgelegt sein.

Anforderungen: 2, 11, 14, 15, 16, 19 (siehe **Tabelle 6.1**);

Umsetzung: Unterschiedliche Herangehensweisen bieten sich zum Umgang mit den variablen Leistungsanforderungen an. Einerseits ist der Einsatz leistungsfähiger Steuergeräte möglich, die die geforderten Leistungsreserven aufweisen und die auch für die Abarbeitung der Maximalkonfiguration einer ZSDA in Echtzeit gerüstet sind, andererseits kündigt sich wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben die Mehrfachnutzung von Steuergeräteressourcen durch gekapselte Softwareteile verschiedener Softwaresysteme an. Die Anpassung kann wiederum über die Steuergeräteleistung, aber auch über die Aufteilung der Softwareteile erfolgen.

Um Engpässen vorzubeugen, sollte eine ZSDA so konzipiert werden, dass der benötigte Rechenaufwand an den verfügbaren Ressourcen des Steuergeräts ausgerichtet werden kann. Diesen zusätzlichen Freiheitsgrad erhält man durch die Skalierung des Zeitverhaltens einzelner Module, so dass diese nicht in jedem Rechenschritt abgearbeitet werden. Die funktionale Bedeutung dieser Skalierung wird in den zugrunde gelegten Fahrzeugen (siehe Abschnitt A.3) durch die unterschiedlichen Abtastraten der Fahrdynamiksensorik deutlich. Während sowohl Gierwinkelgeschwindigkeit, Querbeschleunigung als auch Lenkwinkel in jedem Rechenschritt (d. h. alle 10 ms) aktualisiert eingelesen werden, ist die Abtastfrequenz der Raddrehzahlen halbiert. Ein aktuelles Signal wird nur alle 20 ms bereitgestellt. Alle Module, die auf den Raddrehzahlen aufbauen, können folglich ohne Einschränkung der Genauigkeit alle 20 ms abgearbeitet werden und zu einer Reduzierung der Steuergeräteleast beitragen, sofern dadurch die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems nicht gefährdet wird.

Gesamtsystemkonfiguration

Neben dem Zeitverhalten muss auch der Funktionsumfang einer ZSDA an eine beliebige Fahrzeugkonfiguration angepasst werden. Des Weiteren müssen Ergänzungen und Erweiterungen der Logik schnell und zuverlässig ausgeführt und von der Architektur unterstützt werden. Das Entfernen, Überarbeiten und Ergänzen von Modulen setzt Wissen über die Verkettung der internen Elemente einer Signaldatenaufbereitung voraus, vor allem über ihre Abarbeitungsreihenfolge. Während der Entwicklung muss für jedes Modul bekannt sein, welches andere Modul für die Bereitstellung der Eingangsgrößen verantwortlich ist.

Anforderungen: 1, 2, 11, 12, 14, 15, 16, 18 (siehe **Tabelle 6.1**);

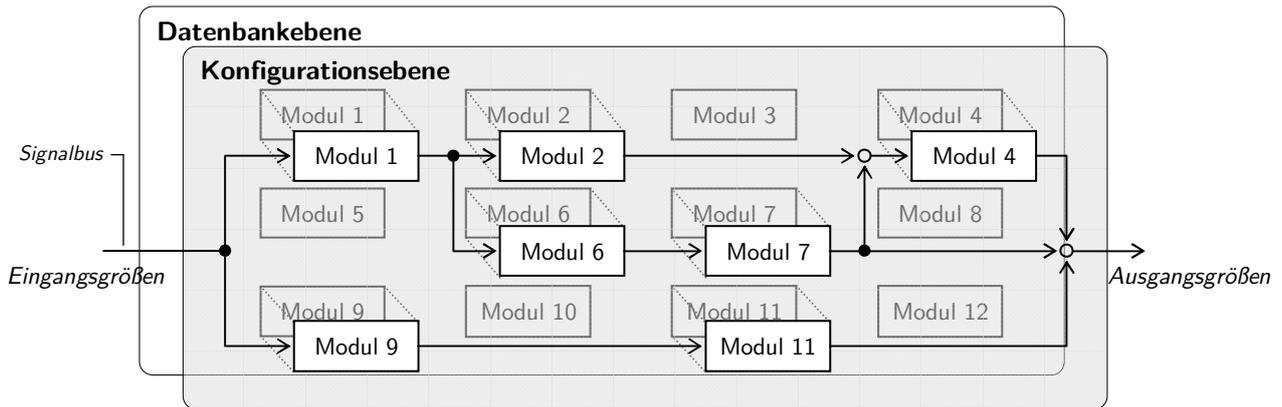


Bild 6.2: Konzeptdarstellung einer Vernetzungsdatenbank

Umsetzung: Treibende Kraft für die Gesamtsystemkonfiguration ist der variable Funktionsumfang in Abhängigkeit der Fahrzeugausstattung. Eine ZSDA stellt daher ein dynamisches System dar, das je nach Anwendungsfall auf das Zielfahrzeug zugeschnitten werden muss. Ein Beispiel ist die Überwachung der Federwegsensoren, die nur dann notwendig ist, wenn ein Regelsystem zur Vertikaldynamikregelung im Fahrzeug verbaut ist.

Einzelne Module haben darüber hinaus zwangsläufig keine eindeutigen Eingangsgrößen, da die Signalquellen mit unterschiedlichen Konfigurationen je Fahrzeugausstattung variieren können, was wiederum zu Varianten einzelner Modulschnittstellen führt. Beispielsweise könnten modellbasierte Überwachungen bei Verfügbarkeit von redundanter Sensorik ausgespart werden, was folglich Einfluss auf alle Module ausübt, die durch die Modellüberwachungen bereitgestellte Größen nutzen. Für die Handhabung der Konfigurationen stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung:

- ▷ Je Konfiguration wird in einem *separaten Modell* gepflegt. Änderungen in einzelnen Modulen müssen in allen Modellen nachgezogen werden, sofern das Modul in diesen Verwendung findet.
- ▷ Es existiert lediglich ein Modell, welches auf der Maximalkonfiguration der ZSDA aufbaut. Das heißt, dass alle verfügbaren Module eingebunden werden müssen. Die Anpassung des Modells erfolgt über die *Parametrierung einzelner Module*, die in einer bestimmten Variante aktiviert werden können. Die Maximalkonfiguration beinhaltet folglich nicht nur alle verfügbaren Module, sondern jeweils auch alle verfügbaren Modulvarianten und folglich auch ungenutzte Funktionsteile.
- ▷ Die Module und ihre Varianten inklusive der Schnittstellen werden in einer *Vernetzungsdatenbank* gespeichert, siehe Datenbankebene in **Bild 6.2**. Die Zielkonfiguration wird aus dieser Bibliothek extrahiert und auf der Konfigurationsebene zu einem lauffähigen Gesamtsystem bzw. Modell zusammengefügt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Konzept der Vernetzungsdatenbank weiter verfolgt. Zum einen, um die Skalierbarkeit des Modells demonstrieren zu können, zum anderen, um die Konfigurationen ressourcenschonend umzusetzen und nicht wie beim Ansatz über die Modulparametrierung ungenutzte Programmteile auf das Steuergerät zu integrieren.

Die Vernetzungsdatenbank kann darüber hinaus als Hilfsmittel genutzt werden. Da jede Konfigurationsänderung die Aktualität und Konsistenz des internen Signalfusses voraussetzt, sollten diese Vernetzungsinformationen regelmäßig Prüfroutinen unterzogen werden, die bei-

spielsweise sicherstellen, dass alle ausgetauschten Größen über Signalquelle und -ziel verfügen. Zum Teil werden diese Aufgaben bereits von der Implementierungsumgebung übernommen. Eine tiefgreifendere Konsistenzprüfung ließe sich realisieren, wenn auch die Vernetzungsinformationen in der Datenbank abgelegt würden.

Daneben ist die Nutzung der Informationen als dynamische Sicht (vgl. Abschnitt 4.1) und somit als Entwurfshilfsmittel bei Architekturänderungen möglich. Auf diese Weise kann in die Systemkonfiguration im Bewusstsein eingegriffen werden, dass stets nicht nur ein einzelnes Element Gegenstand der Betrachtungen ist, sondern seine Stellung und Funktion im Systemverbund.

6.1.3 Struktur des Gesamtsystems

Hierarchische Dekomposition der funktionalen Implementierung

Bei der Aufteilung der Funktionalität auf Module muss darauf geachtet werden, dass Module und Strukturen weitestgehend einheitlich aufgebaut sind. Auf diese Weise können Teile der Implementierung wiederverwendet und Entwicklungs- und Testaufwand minimiert werden. Gleichzeitig gilt es, durch die Dekomposition einer Signaldatenaufbereitung die Übersichtlichkeit und das Verständnis der Architektur zu fördern. Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung sind die elementaren funktionalen Abhängigkeiten innerhalb einer Signaldatenaufbereitung in **Bild 6.3** grob skizziert, ohne einzelne Sensortypen zu differenzieren. Beispielsweise kann aus fahrdynamischen Messgrößen über analytische Redundanz eine Referenz für den Abgleich eines Sensors bereitgestellt werden. Der ermittelte Korrekturwert, z. B. in der Form eines Nullpunktfehlers, beeinflusst die abzugleichende Messgröße wiederum über die Kompensation derselben. Der Abgleich führt aber auch zu einer Erhöhung der Signalqualität, auf die auch die unterschiedlichen Überwachungstypen positiv einwirken. Die Signalqualität ist als Nutzsignalgüte wie das Nutzsignal selbst Bestandteil der Ausgangsschnittstelle. Die fahrsituationsabhängige Bestimmung von Modellgrößen ermöglicht darüber hinaus auch den Einsatz modellbasierter Überwachungen.

Die Festlegung der Struktur der Architektur kann unter vielfältigen Gesichtspunkten erfolgen. Drei unterschiedliche Ansätze werden nachfolgend dargestellt.

Anforderungen: 2, 11, 12, 13, 17, 18 (siehe **Tabelle 6.1**);

Konzept D1: Eine Unterteilung des Gesamtsystems ausschließlich in Module ohne weitere übergeordnete Ebene stellt den einfachsten und flexibelsten Ansatz dar. Jedoch ist die einzige verbleibende Integrationsebene vor dem Hintergrund der abzudeckenden Funktionen unübersichtlich und komplex. Problematisch ist darüber hinaus das Testen, das nach den Modultests sofort auf die Gesamtsystemebene mit seinen vielfältigen Fehlerquellen wie Verkettung der Module, Fehlerfortpflanzung etc. übergehen müsste.

Konzept D2: Die Aufteilung nach einzelnen Funktionalitäten (z. B. Abgleiche, Überwachungen) hat eine klare, aber ausschließlich funktional motivierte Gliederung zur Folge. Für einen Überblick über das Gesamtsystem ist der Ansatz geeignet. Nachteilig wirkt sich aus, dass der Signalaustausch zwischen den Modulen eines Blocks stark eingeschränkt ist, da die einzelnen Module in der Regel für einen anderen Sensor zuständig sind. Modulübergreifende Zusammenhänge werden auf diese Weise nicht gefördert, was vor allem für die durchzuführenden Integrationstests, die die Kopplung der Module im Blockverbund überprüfen, hinderlich ist.

Konzept D3: Die Unterteilung in sensorspezifische Einheiten (z. B. Querbeschleunigungs-

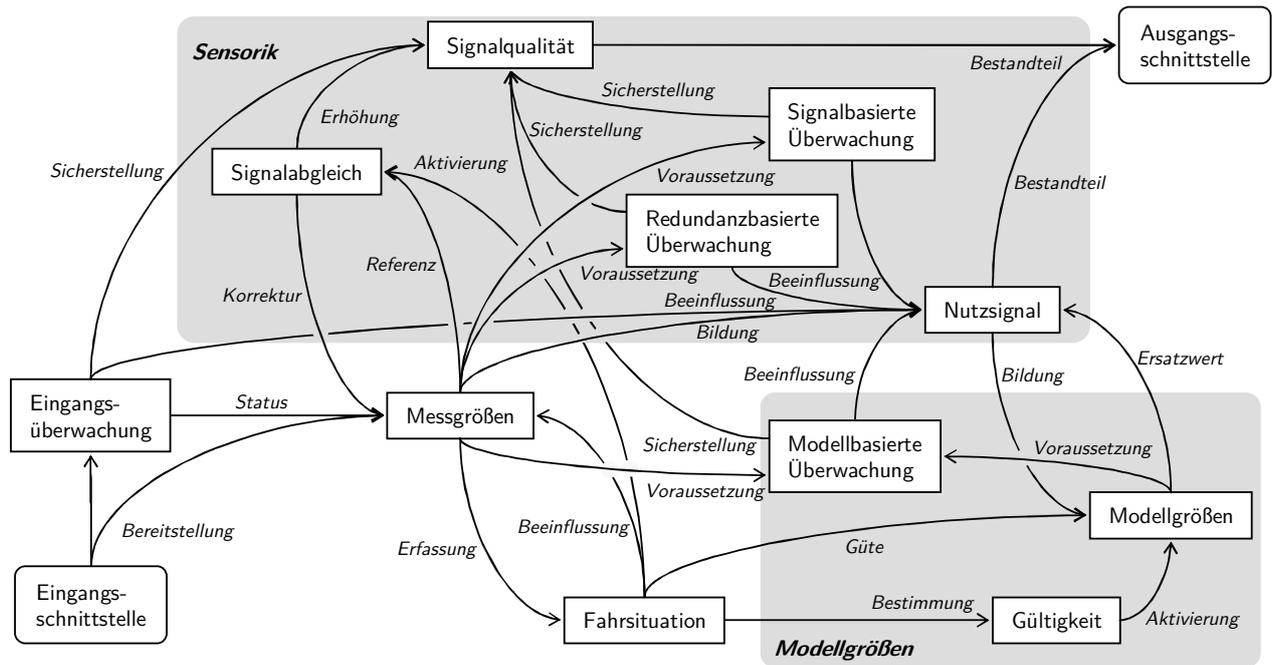


Bild 6.3: Elementare Abhängigkeiten innerhalb einer Signaldatenaufbereitung

block inklusive der Abgleiche und der signal- und redundanzbasierten Überwachungen) führt ebenfalls zu einer übersichtlichen Zerlegung des Gesamtsystems, die sich weniger an der Funktion als vielmehr an der Fahrdynamiksensorik ausrichtet. Die Skalierung des Gesamtsystems in Abhängigkeit von Fahrzeugvarianten wird auf diese Weise unterstützt, da die verfügbare Fahrzeugsensorik maßgeblicher Einflussfaktor ist. Es ergeben sich sensorspezifische Blöcke, deren innere Struktur eine geringe Abhängigkeit von der gewünschten Sensorkonfiguration hat. Diese Blöcke können folglich in unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen in gleicher oder ähnlicher Form eingesetzt werden, was den Testaufwand minimiert. Zusätzlich werden durch das Zusammenspiel der sensorspezifischen Module zahlreiche interne, das Testen unterstützende Kopplungen wirksam (vgl. Gruppierung *Sensorik* in **Bild 6.3**). Ergänzend ist ein Block für die Bereitstellung der *Modellgrößen* und der zugehörigen Gültigkeitsinformationen denkbar. Da die Ausgangsbasis der Modellgrößenbestimmung von den bereits eingangs-, signal- und redundanzüberwachten Nutzsignalen gebildet wird, sind die Modellüberwachungen nicht im sensorspezifischen, sondern ebenfalls im Modellgrößenblock anzusiedeln.

Umsetzung: Trotz vielfältiger Strukturierungsmöglichkeiten erfolgt eine Festlegung auf Konzept D3, da es funktionale sowie nicht-funktionale Anforderungen in die Architektur einfließen lässt. Die Grobstruktur in **Bild 6.4** fasst die Entwurfsentscheidung visuell zusammen und zeigt die Berücksichtigung der hierarchische Dekomposition unterstützenden Blöcke *Sensorik*

Tabelle 6.2: Mögliche Gliederungsebenen der Architektur

Gliederungsebene	Beispiel
System	Summe aller Elemente
└ Block	Sensorspezifische Einheiten, z. B. Gierwinkelgeschwindigkeit
└└ Modul	Nullpunktgleich im Stillstand
└└└ Funktion	Verzögerungsglied erster Ordnung
└└└└

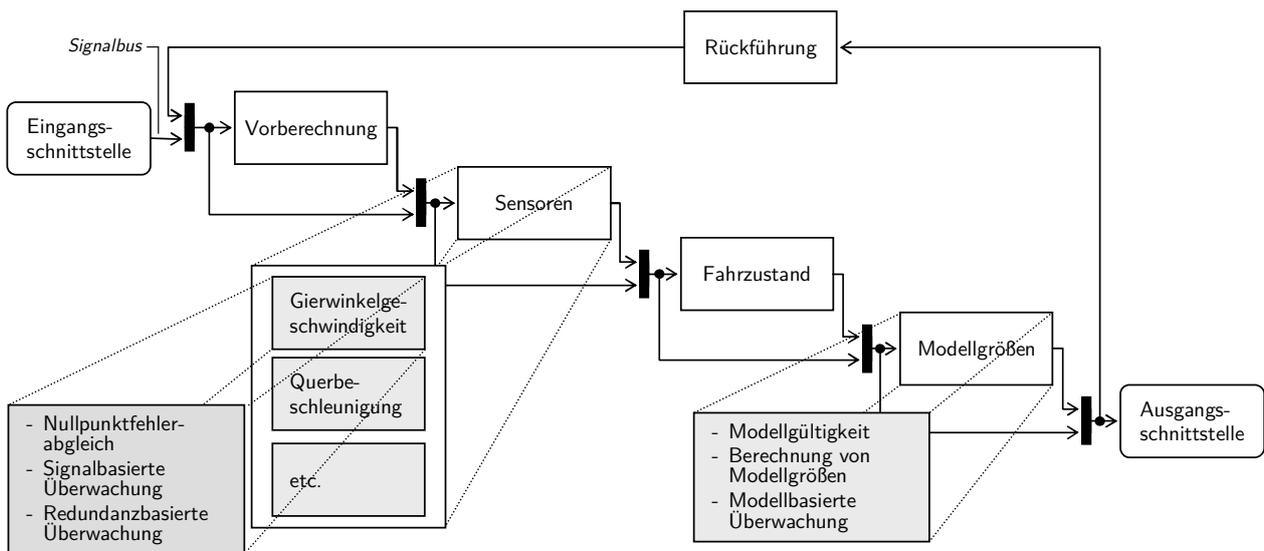


Bild 6.4: Hierarchische Dekomposition einer zentralen Signaldatenaufbereitung

und *Modellgrößen*. Weitere Blöcke zur *Vorbereitung* und zur *Rückführung* von Größen sowie zur Berechnung des *Fahrzustands* werden vorgehalten. Die Auswahl der Dekompositionsvariante muss aufgrund der sich ändernden Anforderungen und der mit fortschreitendem Entwurf wachsenden Informationsbasis stetig überprüft und verfeinert werden. Es zeichnet sich jedoch bereits ab, dass mit der System-, der Block- und der Modulebene mindestens drei Gliederungsebenen vorhanden sein werden, siehe **Tabelle 6.2**. Die Anzahl der Ebenen ist beliebig und muss systemabhängig festgelegt werden, da sie entscheidenden Einfluss auf die Spezifikation, die Implementierung, das Testen und folglich auf die Handhabung des Gesamtsystems haben.

Struktur mehrfach verwendeter Elemente

Die Arbeit mit einem Softwaresystem ist umso intuitiver und schneller erlernbar, je öfter sich von den Anwendern oder Entwicklern verstandene Zusammenhänge wiederholen. Einheitlichkeit ist daher als ein grundlegendes Entwurfsprinzip zu verstehen, das die Orientierung im System erleichtert.

Anforderungen: 12, 13, 17, 18, 19 (siehe **Tabelle 6.1**);

Umsetzung: Vor dem Hintergrund der Einheitlichkeit des Gesamtsystems wird eine Form der strukturierten Gliederung entworfen. Die Struktur zeichnet sich dadurch aus, dass eine Aktion oder Datenhaltung auf der untersten möglichen Ebene des Systems nach **Tabelle 6.2** erfolgt, mindestens jedoch auch Modulebene. Die Struktur wird auf folgende Elemente übertragen:

- ▷ *Parameter* dienen der Applikation von Funktionen, z. B. als Schwellen, Grenzwerte, Koeffizienten. Fahrzeugabhängige und sensorspezifische Parameter finden sich als Konfigurationsmerkmale auf der obersten Ebene.
- ▷ *Bibliotheken* werden für mehrfach verwendete Elemente eingesetzt, deren zugrunde liegende Implementierung identisch ist, die sich aber je nach Anwendungsfall bezüglich der Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der Parametrierung unterscheiden.
- ▷ *Rückführungen oder Verzögerungen* werden für statische Größen benötigt, deren Wert aus dem letzten Zyklus auch im aktuellen benötigt wird.

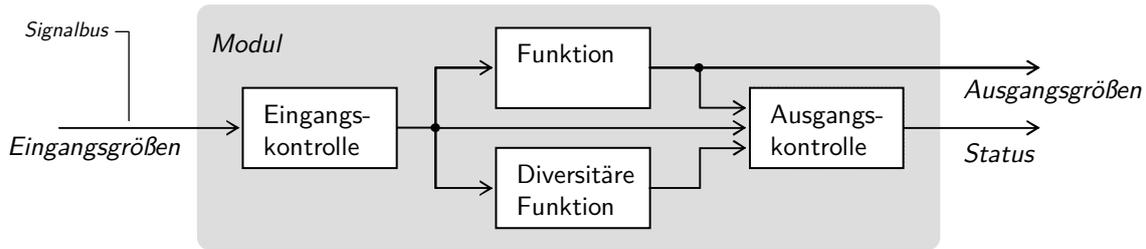


Bild 6.5: Konzept eines eigensicheren Moduls

- ▷ *Vorberechnungen* bieten sich im Gegensatz zu den drei erstgenannten Elementen oberhalb der untersten Gliederungsebene an, um Berechnungen in mehreren Modulen oder Blöcken der Implementierung zusammenzufassen und Doppelberechnungen zu vermeiden. Sie führen zur Einsparung von Rechenzeit und Speicherplatz. Im Gegensatz zu Bibliotheken wird nicht die Implementierung, sondern das Ergebnis der Berechnungen mehrfach verwendet.

Unter der Annahme, dass das System die Gliederungsebenen System, Block und Modul besitzt, erfolgt die Einordnung des Elements (bis auf die Vorberechnungen) zunächst auf Modulebene. Wird das Element dagegen von zwei Modulen desselben Blocks verwendet, findet die Eingliederung auf Blockebene statt. Im Fall einer Verwendung in unterschiedlichen Blöcken wird das Element auf Systemebene angehoben.

Eigensichere Module

Für sicherheitsrelevante Systeme ist nicht nur die Sicherstellung der Signalgenauigkeit von Bedeutung. Vielmehr muss auch dafür Sorge getragen werden, dass die zugrunde liegenden Algorithmen selbst einer Kontrollinstanz unterworfen sind, die zu jedem Zeitpunkt die Richtigkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Anforderungen: 3, 10, 12, 13, 15, 17, 20 (siehe **Tabelle 6.1**);

Umsetzung: Das Sicherstellen korrekter Ausgangsgrößen kann in drei Teilschritten erfolgen. Zunächst muss die verwendete Datenbasis auf Konsistenz geprüft werden, was mit einer *Eingangskontrolle* nach **Bild 6.5** realisiert werden kann. Die Aufgabe eines solchen Moduls sind in der Regel rudimentäre Tests auf Einhaltung von Wertebereichen. Eine Abweichung deutet auf einen Fehler in einem vorgelagerten Modul oder der Signalübertragung hin. Als zweite Instanz werden zwei diversitäre, im Idealfall von unterschiedlichen Entwicklern oder nach unterschiedlichen Ansätzen realisierte Module (*Funktion* und *diversitäre Funktion*) parallel abgearbeitet und ihre Ergebnisse verglichen. Alternativ kann die Implementierung auf unterschiedlichen Prozessoren und in getrennten Speicherbereichen zweifach gerechnet werden. Liegt die Differenz der diversitären Zweige innerhalb einer Toleranz, wird das Ergebnis von der *Ausgangskontrolle* akzeptiert und der Modulstatus als gültig belegt. Das Berechnungsergebnis der diversitären Einheit hat folglich keinen Einfluss auf die Ausgangsgrößen, sondern ausschließlich auf die Freigabe derselben. Bei zu großen Abweichungen zwischen beiden Berechnungsarten muss eine Fehlerbehandlung eingeleitet werden. Die Ausgangskontrolle kann ähnlich der Eingangskontrolle einfache Überprüfungen auf Wertebereiche etc. durchführen. Da diese Mechanismen zur Absicherung der Funktionalität auf Modulebene eingesetzt werden, wird im Folgenden von eigensicheren Modulen gesprochen.

6.2 Entwurf des Funktionsumfangs

Mit der Softwarearchitektur sind die Voraussetzungen zur Konzeption des Funktionsumfangs gegeben. Die einzelnen Entwurfsschritte setzen wie beim Architekturentwurf unterschiedliche Schwerpunkte. Ihre Zuordnung zu den erhobenen Anforderungen kann **Tabelle 6.3** entnommen werden. Neben Maßnahmen zur Erreichung und Erhöhung der geforderten Signalgenauigkeit werden Ansätze zur Überwachung der Signalqualität diskutiert sowie die Adaption des Systems an eine beliebige Umgebung sichergestellt.

6.2.1 Erhöhung der Signalgenauigkeit

Auswahl der Fahrdynamiksensorik

Die verwendete Fahrdynamiksensorik orientiert sich im ersten Schritt an der im Fahrzeug verfügbaren Sensorbasis, die vor allem durch das in der Grundausstattung des Fahrzeugs verbauten Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) geprägt wird. Die Sensorik kann bei Bedarf

Tabelle 6.3: Zuordnung der Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung zu den funktionalen Entwurfsschritten (Legende: ■ - Anforderung berücksichtigt, □ - unberücksichtigt)

Seite	Anforderung	Zuordnung						
62	Sensorbasis	■	□	□	□	□	□	□
62	Erweiterbarkeit	■	□	□	□	□	□	□
62	Signalgenauigkeit	■	■	■	■	■	■	□
63	Sensorgenauigkeit	■	■	■	■	□	□	□
63	Nullpunktfehler	■	■	■	■	■	■	□
63	Signalgüte	□	□	■	■	■	□	□
63	Überwachung der Sensoren	□	□	■	■	■	■	□
63	Standardisierte Schnittstelle	□	□	□	□	■	■	□
64	Anforderungsbasierte Nutzsignale	□	□	□	□	■	■	□
64	Rekonfiguration	□	□	■	■	■	■	□
64	Skalierbarkeit	■	■	■	■	□	□	■
64	Modularität	□	□	■	■	□	□	□
65	Spezifizier- und Testbarkeit	□	□	□	□	□	□	□
65	Zeitverhalten	■	□	□	□	□	□	■
65	Hardwareplattform	□	□	□	□	□	□	■
65	Integrierbarkeit	□	□	□	□	□	□	□
65	Einheitlichkeit	□	□	□	□	□	■	■
65	Trennung der Zuständigkeiten	□	□	□	□	□	□	■
65	Applizierbarkeit	□	□	□	□	□	□	■
65	Sicherheit	□	□	■	■	■	■	■
Seite	Entwurfsschritt	:	:	:	:	:	:	:
79	Wahl der Fahrdynamiksensorik:	:	:	:	:	:	:
80	Sensorabgleich und Signalgenauigkeit	...:	:	:	:	:	:	:
80	Überwachungskonzept:	:	:	:	:	:	:
81	Überwachungstypen:	:	:	:	:	:	:
83	Dynamisches Maß der Signalgüte:	:	:	:	:	:	:
84	Definition der Statusinformationen:	:	:	:	:	:	:
86	Anpassung an das Zielsystem:	:	:	:	:	:	:

bezüglich der Spezifikation vom Fahrzeughersteller beeinflusst werden.

Anforderungen: 1, 2, 3, 4, 5, 11, 14 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Gemäß Anforderung 1 wird die vorausgesetzte Minimalsensorkonfiguration – bestehend aus Lenkradwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit, Querb beschleunigung und vier Rad-drehzahlen – zugrunde gelegt. Die Spezifikationen sind in **Tabelle A.1, A.2, A.3** und **A.4** zusammengefasst. Um die Erweiterbarkeit des Konzepts demonstrieren zu können, wird die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte Maximalkonfiguration des Zielfahrzeugs über redundante Sensorik identischer Spezifikation für Gierwinkelgeschwindigkeit und Querb beschleunigung definiert. Eine Erweiterung auf zusätzliche Messgrößen ist nach Anforderung 2 vorgesehen und im Konzept berücksichtigt.

Abgleich der Fahrdynamiksensorik

Die Notwendigkeit von Sensorabgleichen ist zum einen von der Qualität der Messgrößen, zum anderen von ihrer Abhängigkeit von Umweltbedingungen wie der Umgebungstemperatur geprägt. Möglichkeiten zur Erhöhung der Signalgenauigkeit der Messgrößen sind über die Bestimmung von Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehlern gegeben. Im Rahmen des Konzepts einer ZSDA wird der Abgleich am Beispiel der Gierwinkelgeschwindigkeit durchgeführt.

Anforderungen: 3, 4, 5, 11, 12, 18 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Die Erfordernis eines Abgleichs ist nach **Tabelle A.1** für die Gierwinkelgeschwindigkeit gegeben, da Nullpunktfehler bis maximal $\dot{\psi}_{Np,max} = \pm 0,061 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ (ca. $\pm 3,5^\circ/\text{s}$) sowie Empfindlichkeitsfehler bis zu $\pm 5\%$ des Absolutwertes möglich sind. Aufgrund der potentiellen Wechselwirkung und gegenseitiger Beeinflussung zwischen der Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehlerbestimmung soll ausschließlich der Nullpunktfehler ermittelt werden.

Der Stand der Technik nach Abschnitt 3.3.1 eröffnet zahlreiche Möglichkeiten des Gierwinkelgeschwindigkeitsabgleichs, siehe auch **Bild 3.4**. Um die Einschränkungen einzelner Methoden auszugleichen, werden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Aus dem Bereich der Eigenreferenzbildung wird sowohl ein Stillstandsabgleich durchgeführt als auch die unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit verfügbare Histogrammmethode verfolgt. Mittels der verfügbaren Modellgrößen erfolgt außerdem ein auf Fremdreferenz beruhender Fahrtabgleich. Aus den Methoden sind in geeigneter Weise ein sensorspezifischer Nullpunktfehler sowie ein Maß für die Qualität desselben zu ermitteln.

6.2.2 Absicherung der Signalqualität

Überwachungskonzept

Die Kernaufgabe einer ZSDA ist die Überwachung der Fahrdynamiksensorik. In Abhängigkeit der verbauten Sensoren bieten sich unterschiedliche Strategien für ein Überwachungskonzept an, das auf die im Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Ansätze der Fehlererkennung und deren Bewertung zurückgreifen kann.

Anforderungen: 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 20 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Da eine ZSDA als frei skalierbares System konzipiert ist, variiert das Überwachungskonzept in Abhängigkeit der umgesetzten Konfigurationen. Zur Auswahl stehen signal-, modell- und redundanzbasierte Methoden, die in dieser Arbeit zu drei realistischen Szenari-

en kombiniert werden. Signalbasierte Ansätze bieten sich wegen ihrer Einfachheit als Ausgangsbasis aller Szenarien an. Ausgehend von der Sensoranordnung eines Fahrzeugs ist bei Einfachsensorik die Kombination mit modellbasierten Methoden (siehe Konfiguration K1 in **Tabelle 6.4**), bei verfügbarer redundanter Sensorik dagegen die Kopplung mit redundanzbasierten Ansätzen (K2) vorzusehen. Auch die Kombination der drei Fehlererkennungsmethoden erweist sich als zielführend, wenn sowohl Regler als Signalabnehmer in Frage kommen, deren Funktion lediglich Einfachsensorik voraussetzt, als auch Sensorredundanz erfordernde Systeme (K3). Als weiteres Konfigurationsmerkmal sind die Sensorabgleiche zu berücksichtigen, die in dieser Arbeit beispielhaft für die Gierwinkelgeschwindigkeitssensoren umgesetzt sind (K1 und K3).

Die Parametrierung der signalbasierten Überwachungen erfolgt in der Regel auf Basis der Sensorspezifikation und fußt daher auf einer sicheren Grundlage. Überschreitungen der Überwachungsschwellen führen direkt zu einem Fehler. Ähnlich eindeutige Aussagen liefern redundanzbasierte Ansätze, deren Funktionalität auf dem Vergleich von zwei gleichen physikalischen Messgrößen, in der Regel sogar identischen Sensortypen, beruht. Auch sie können direkt zum Ausschluss der Messgrößen oder alternativ zu einer Anhebung der Nutzsignalgüte führen. Modellbasierte Ansätze dagegen haben gegenüber den erstgenannten den Nachteil, dass den hinterlegten Modellbeziehungen Ungenauigkeiten und Vereinfachungen zugrunde liegen. Um falsche Aussagen auf Basis der Modellüberwachungen auszuschließen, sind größere Schwellen oder weitere Robustheitsmaßnahmen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.3.2 auf Seite 37).

Eine *Eingangüberwachung* zur Absicherung der Übertragung der Eingangssignale ist für alle Konfigurationen vorgesehen. Das Überwachungskonzept sieht weiter vor, dass *modell-* in Kombination mit *signalbasierten* Ansätzen direkt zu einem Fehler bzw. zu einer Anhebung der Signalgüte führen (Konfiguration K1, siehe **Bild 6.6**). Ist jedoch zusätzlich eine *redundanzbasierte* Aussage verfügbar (K3), kann die modellbasierte Überwachung nur dann wirksam werden, wenn vorher die „sichere“ Redundanzüberwachung den Fehler bestätigt. In den meisten Fällen wird die Redundanzüberwachung zuerst anschlagen, bevor der Fehler mit den Modellen detektierbar ist. Die Zuweisung des Fehlers zu einem der redundanten Sensoren erfolgt anschließend modellbasiert. Mit dieser Vorgehensweise wird die Verfügbarkeit des Systems maximiert, ohne die Sicherheit einzuschränken. Ein Risiko bestünde ausschließlich im Fall eines als unwahrscheinlich einzustufenden Mehrfachfehlers der redundanten Sensorik.

Überwachungstypen

Um das definierte Überwachungskonzept zu verwirklichen, müssen aus den im Stand der Technik vorgestellten Fehlererkennungsmethoden geeignete Ansätze ausgewählt werden. Durch die

Tabelle 6.4: Konfigurationen gegliedert nach Sensoranzahl und umgesetztem Funktionsumfang (*Legende: ■ - Auswahl berücksichtigt, □ - unberücksichtigt*)

Sensoranzahl und Funktionsumfang bezogen auf Gierwinkelgeschwindigkeits- und Querschleunigungssensoren	Konfiguration		
	K1	K2	K3
Sensoranzahl	1	2	2
Nullpunktfehlerbestimmung Gierwinkelgeschwindigkeit	■	□	■
Nullpunktfehlerbestimmung Querschleunigung	□	□	□
Signalbasierte Überwachungen	■	■	■
Modellbasierte Überwachungen	■	□	■
Redundanzbasierte Überwachungen	□	■	■

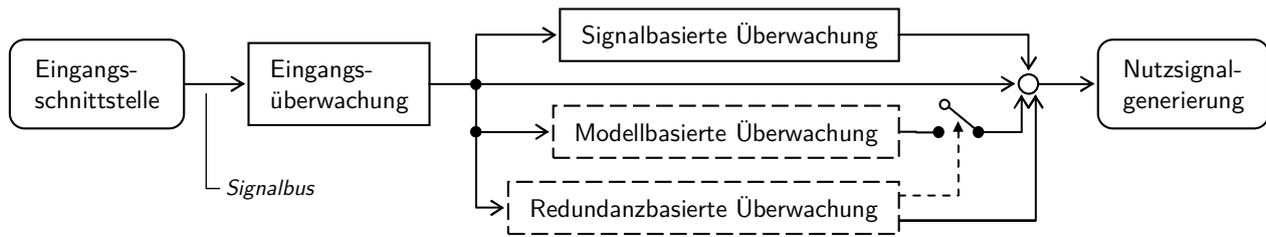


Bild 6.6: Überwachungskonzept einer zentralen Signaldatenaufbereitung mit den konfigurationsabhängigen modell- und redundanzbasierten Ansätzen

Überwachungsmethoden werden unterschiedliche Fehlerarten detektiert, die direkt einem Sensor zugeordnet werden können (im Fall von Eingangs-, Signal- und Modellüberwachungen) oder allgemein für alle redundanten Sensoren gelten (bei redundanzbasierten Methoden). Erst die Kombination der Ansätze führt zu einer wirkungsvollen Fehlererkennung. Als Entscheidungsgrundlage dient die in Abschnitt 3.3.2 (Seite 38) durchgeführte Bewertung. Zur besseren Übersicht sind alle ausgewählten Methoden in **Bild 3.6** durch Fettdruck hervorgehoben.

Anforderungen: 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 20 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Die einfachste Methode der Fehlererkennung sind *signalbasierte* Ansätze. Diese werden über Eingangs-, Wertebereichs-, Gradienten-, Rausch- und Langzeitabgleichsüberwachungen umgesetzt (vgl. Seite 29). Allen Ansätzen gemein ist ihre einfache Implementierung. Korrelationsbetrachtungen werden ausgespart, da die Gültigkeit der Überwachung in Abhängigkeit der Fahrsituation nur mit erheblichem Aufwand sichergestellt werden kann. Eine Sonderstellung nehmen die Eingangsfehler ein, die bereits beim Einlesen der Signale in eine ZSDA vorliegen. Ihre Ursachen liegen in der Sensoreigendiagnose oder in der Absicherung der Busübertragung. Da Eingangsfehler in Form von um wenige Rechenzyklen veralteten Signalen im laufenden Betrieb sporadisch auftreten können, führt ein Eingangsfehler erst nach mehrmaligem Auftreten in Folge zu einem Sensorfehler.

Paritätsgleichungen werden für die *modellbasierte* Aufdeckung von Sensorfehlern eingesetzt (vgl. Seite 30). Die Modellgrößen werden zum einen über die geometrischen Beziehungen gemäß den Gleichungen (2.12), (2.14) und (2.19) bestimmt, zum anderen aus den Bewegungsgleichungen des Einspurmodells in den Gleichungen (2.8) und (2.9). Die Aussagekraft des Einspurmodells wird außerdem über eine Parameterschätzung der Schräglaufsteifigkeiten erhöht (vgl. Seite 31). Nach [Bör03] bieten die Schräglaufsteifigkeiten gegenüber anderen Fahrzeugparametern wie Fahrzeugmasse, Fahrzeugträgheitsmoment und Schwerpunktposition nachdrücklich das größte Verbesserungspotenzial. Die Parameterschätzung wird nicht direkt zur Fehlererkennung eingesetzt, da die Fahrzeugparameter aufgrund ihrer Abhängigkeit von Beladungszustand und -art in der Regel eine große Bandbreite aufweisen, die die zu berücksichtigenden Toleranzen bei der Fehlererkennung stark anheben würde. Über den SALM-Ansatz werden weitere Modellgrößen bereitgestellt, die im Gegensatz zu den klassischen neuronalen Netzen die notwendige physikalische Interpretierbarkeit bei präzisen Ergebnissen bieten (vgl. Seite 33). Zustandsbeobachter wie der bekannte Kalman-Filter kommen wegen ihres hohen Rechenleistungsbedarfs nicht zum Einsatz (vgl. **Tabelle 3.1**).

Für die Konfigurationen einer ZSDA mit redundanter Sensorik kommen mit der Redundanzabweichungs-, der Redundanzabweichungsgradienten- sowie der statistischen Redundanzüberwachung alle bekannten *redundanzbasierten* Erkennungsmethoden zum Einsatz, da sie bei geringem Entwicklungsaufwand und niedrigem Ressourcenverbrauch eine schnelle und exakte Fehlererkennung erlauben (vgl. Seite 36).

Neben der dargestellten Überwachung einzelner Signale kann mit *diversitären* Implementierungen die Zuverlässigkeit von Teilen der Funktionsrealisierung, z. B. Modulen, sichergestellt werden (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 78). Bei aus Messungen bekannten Ein- und Ausgangsgrößen eines Moduls bietet sich die Umsetzung eines diversitären Moduls mit dem SALM-Ansatz an. Eine Umsetzung wird in dieser Arbeit aufgrund des geringen zu erwartenden Erkenntnisgewinns nicht verwirklicht.

6.2.3 Kommunikation der Signalqualität

Dynamisches Maß der Signalgüte

Die Absicherung der bereitgestellten Signale steht für eine ZSDA im Vordergrund. Einschränkungen der Sensorbasis sollten ausschließlich bei einem sicher als fehlerhaft detektierten Sensor vorgenommen werden, um eine hohe Verfügbarkeit der Systeme zu gewährleisten. Die widersprüchlichen Anforderungen werden durch die Bereitstellung einer Signalgüte für die ausgegebenen Nutzsignale aufgelöst [KRC02]. Die Signalgüte stellt ein positiv definiertes Signal dar, dessen Betrag dem zum aktuellen Zeitpunkt maximal möglichen Fehler entspricht (vgl. Abschnitt 6.1.1). Die physikalische Einheit der Signalgüte entspricht der des korrespondierenden Nutzsignals. Die nutzenden Regler fragen die Signalgüte im laufenden Betrieb fortwährend ab und berücksichtigen den Betrag (z. B. über eine Kennlinie) in Abhängigkeit der Relevanz des Nutzsignals für das Regelsystem.

Anforderungen: 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Für die Bildung der Signalgüte einer Messgröße stehen unterschiedliche Kenngrößen zur Verfügung, die abhängig von der Konfiguration des Gesamtsystems verfügbar sind:

- ▷ Da mit fortschreitendem Abgleich die Signalgüte steigt, kann aus diesem Zusammenhang ein Integritätsmaß in Form einer Abgleichstoleranz abgeleitet werden [KMPF06, WULK04a]. Beispiele sind dem Stand der Technik in Abschnitt 3.3.1 zu entnehmen.
- ▷ Ist redundante Sensorik für einzelne physikalische Größen verfügbar, fließt die Abweichung der redundanten Signale voneinander in die Signalgüte ein.
- ▷ Sieht die Konfiguration eine Modellüberwachung vor, wird äquivalent die Abweichung der Modellgröße vom Nutzsignal verwendet. Aufgrund der möglichen Ungenauigkeiten der Modellierung kann nicht die gleiche Signalgüte wie auf Basis von Redundanz erreicht werden. Des Weiteren darf die Signalgüte nur einen der beiden Einflussfaktoren – bevorzugt den höherwertigen redundanzbasierten – enthalten.
- ▷ Ein Maß für die Signalqualität ist auch das Rauschen einer Messgröße, die mit der Alterung eines Sensors oder sporadisch durch die Fahrzeug- oder Fahrbahnanregung auftreten kann.
- ▷ In der Regel sind Überwachungen mit Robustheitsmaßnahmen versehen (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 37). Diese führen zu einem dynamischen Toleranzband in Abhängigkeit von Nullpunktfehlertoleranz, Signalrauschen etc. Verlässt die den Fehler charakterisierende Größe oder das Symptom das Band, wird ein Fehler generell nicht sofort, sondern über Entprellungsmaßnahmen verzögert gesetzt. Die Zeitspanne ab dem Verlassen des Toleranzbandes kann ebenfalls genutzt werden, die eingeschränkte Qualität des Nutzsignals über die Signalgüte zu kommunizieren, siehe **Bild 6.7**.

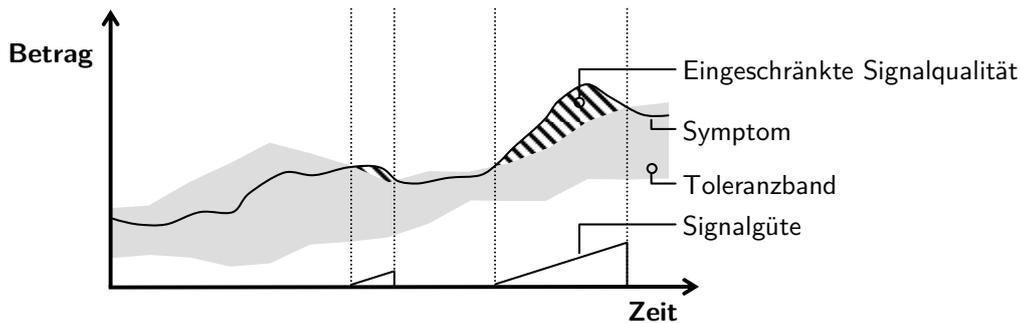


Bild 6.7: Absenkung der Signalqualität eines Nutzsignals bei Vorhandensein eines Toleranzbandes

Bestandteile der Signalgüte wie Abgleichstoleranz, Modellabweichung und Signalrauschen werden für jeden Sensor individuell bestimmt. Bilden mehrere Messgrößen ein Nutzsignal und erfolgt die Nutzsignalbildung innerhalb einer Signaldatenaufbereitung (Konzept S1, S2 und S3 nach Abschnitt 6.1.1, Seite 70), muss stets das Maximum der für die einfließenden Sensoren ermittelten Kenngrößen für die Bestimmung der Signalgüte berücksichtigt werden. Erfolgt die Bereitstellung der Signalgüte dagegen individuell für jede Messgröße (Konzept S4 und S5), muss die Handhabung der Güteinformationen festgelegt werden, die auf Basis redundanter Sensorik erfolgt. Hier bietet sich ihre Berücksichtigung für jeden Einzelsensor an.

Auf Basis der Nutzsignalgüte ist es sogar möglich, bei dynamischen Überwachungen wie den modell- und redundanzbasierten Ansätzen, denen ein kontinuierlicher Vergleich von Sensorwert und Referenz zugrunde liegt, ganz auf die Fehlererkennung zu verzichten. Stattdessen wird die Abweichung von der Referenz fortwährend über die Nutzsignalgüte kommuniziert. Jedes nutzende Regelsystem muss dann gemäß seiner Anforderungen anhand des Betrags der Güte eine individuelle Fehleridentifikation vornehmen. Auch die Möglichkeit der Fehlerkategorisierung in reversibel oder irreversibel obliegt dem Regelsystem. Auf diese Weise wird die Freiheit der Nutzsignalbildung bei einer einheitlichen Schnittstelle weiter erhöht. Der Ansatz wird in dieser Arbeit lediglich aus Gründen der Vergleich- und Bewertbarkeit unterschiedlicher dynamischer Überwachungstypen anhand ihrer Fehlererkennungsrate nicht weiter verfolgt.

Soll auch für Modell- oder Schätzgrößen ein Qualitätsmaß bereitgestellt werden, müssen andere Kriterien herangezogen werden, die sich im Einzelfall aus der Art der Bestimmung einer Größe ergeben.

Definition der Statusinformationen

Statussignale dienen der Kommunikation definierter, meist mehrfach verwendeter Informationen sowohl innerhalb einer ZSDA als auch außerhalb im Rahmen des Signalaustausches mit den Reglern. Sie bilden die Grundlage der auszuführenden Fehlerbehandlung und Rekonfiguration im Fehlerfall. Typische Beispiele sind Statusinformationen, die darüber Auskunft geben, ob ein Signal aktuell verfügbar ist und verwendet werden darf oder ob ein Fehler erkannt wurde. Eine Übersicht über die im Folgenden definierten Statustypen ist in **Bild 6.8** gegeben.

Anforderungen: 3, 5, 7, 8, 9, 10, 17, 20 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Jede Überwachung innerhalb einer Signaldatenaufbereitung verfügt über einen irreversiblen *Signalfehlerstatus*, über den ein gefundener Fehler kommuniziert wird. Irreversibel bedeutet, dass ein solches Statussignal im Betrieb nur gesetzt, aber nicht mehr zurück-

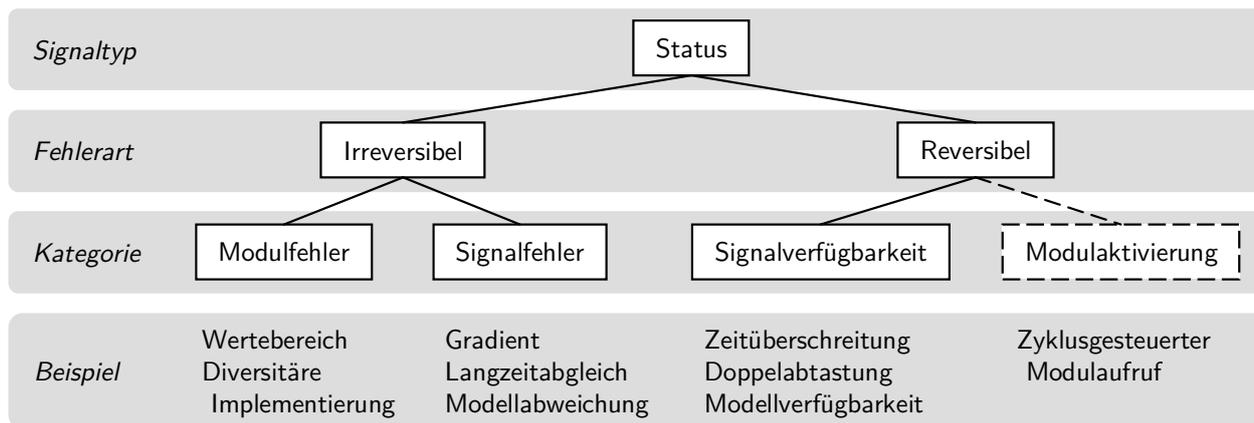


Bild 6.8: Statustypen der zentralen Signaldatenaufbereitung

genommen werden kann. Die Signalfehlerstatus haben die Aufgabe, einzelne Funktionen, die das korrespondierende Signal als Eingangsgröße nutzen, zu aktivieren bzw. zu deaktivieren. Für eine einfache Handhabung der Fehlerinformationen werden bei der Nutzsignalgenerierung alle vorhandenen sensorspezifischen Fehlerstatus zu einem Sensorgesamtstatus verschmolzen. Dieser wird von Modulen abgefragt, deren Funktion dieses Sensorsignal voraussetzt. Auf diese Weise wird die Abfrage der Fehlerstatus einzelner Fehlerarten vermieden. Die Moduleingangsschnittstellen bleiben schlank und übersichtlich.

Die Fehlerart kann auch für die die Ausgangsgrößen einer Signaldatenaufbereitung nutzenden Regler von Interesse sein, um in Abhängigkeit der Fehlerursache eine gezielte Abschaltstrategie (z. B. abruptes Abschalten, kontinuierliches Abschwächen, temporäres Aussetzen) umzusetzen. Daher kann bei Bedarf an der Ausgangsschnittstelle mit dem Nutzsignalstatus auch die Fehlerarten bereitgestellt werden.

Neben den irreversiblen Signalfehlerstatus sind die reversiblen Eingangsstatus zu berücksichtigen, die in die Kategorie der *Signalverfügbarkeitsstatus* fallen. Sie tragen die an der Eingangsschnittstelle eingelesenen Fehlerinformationen, die die Sensoren in Eigendiagnose festgestellt haben oder die temporär, durch Einschränkungen der Buskommunikation, vorliegen. Letztere werden als *Zeitüberschreitung* (engl. *timeout*) bezeichnet, wenn seit der letzten Abtastung kein neuer Signalwert empfangen wurde, oder als *Doppelabtastung* (engl. *double sampling*), sofern seit der vorausgegangenen Abtastung zwei oder mehr neue Signalwerte empfangen wurden statt der erwarteten einfachen Signalaktualisierung. Die reversiblen Eingangsstatus werden zusätzlich zum irreversiblen Sensorgesamtstatus in den Modulen geprüft. Nur wenn beide Status fehlerfrei sind, wird die Funktion freigegeben. Zusätzlich werden Signalverfügbarkeitsstatus genutzt, um die Gültigkeit einzelner Funktionen zu kennzeichnen. Diese variiert beispielsweise bei der Bereitstellung von Modellgrößen in Abhängigkeit der Fahrsituation.

Die irreversiblen *Modulfehlerstatus* der eigensicheren Module (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 78) bieten eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Systemverfügbarkeit, indem der übermittelte Status einer zentralen Fehlerbehandlung zugeführt wird. Auf Basis des in der Vernetzungsdatenbank (vgl. Abschnitt 6.1.2, Seite 73) gespeicherten, internen Signalflusses werden die betroffenen Module, die auf Informationen des fehlerhaften Moduls aufbauen, deaktiviert. Auf diese Weise können unbetroffene Teile einer Signaldatenaufbereitung aktiv bleiben. Die Verfügbarkeit des Gesamtsystems wird erhöht. Der Vernetzungsdatenbank kommt mit der Archivierung des Signalflusses neben dem Ablegen der Gesamtsystemkonfigurationen eine neue Bedeutung zu. Durch die Fusion der Modulfehlerstatus kann weiterhin ein Gesamtverfügbar-

keitsstatus einer ZSDA gebildet werden, der über die Verfügbarkeit der einzelnen Module bzw. Funktionalität und folglich die Fähigkeit der Fehlererkennung informiert.

Die Erläuterung des *Modulaktivierungsstatus* erfolgt rückwirkend in Abschnitt 7.2.1 im Zusammenhang mit der Fehlerbehandlung.

6.2.4 Applikation des Gesamtsystems

Anpassung an das Zielsystem

Eine ZSDA soll die Möglichkeit bieten, sowohl ihren Funktionsumfang als auch ihren Bedarf an Rechenleistung am Zielfahrzeug auszurichten. Darüber hinaus soll die Anpassung der Parameter weitestgehend automatisiert erfolgen, um den Aufwand einer Portierung in eine neue Umgebung zu minimieren.

Anforderungen: 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20 (siehe **Tabelle 6.3**);

Umsetzung: Die Anpassung einer ZSDA an ein Zielfahrzeug muss die vorherrschenden Rahmenbedingungen berücksichtigen. Im Wesentlichen gliedert sich die Adaption in die folgenden Schritte:

- ▷ In Abhängigkeit der Fahrdynamiksensorik eines Fahrzeugs und der Sicherheitsrelevanz der Regelsysteme wird der Funktionsumfang in Form von Modulen ausgewählt bzw. eine bestehende Konfiguration angepasst. Ausgenutzt wird vor allem die in Abschnitt 6.1.3 (Seite 75) vorgestellte hierarchische Dekomposition des Gesamtsystems und die die Erstellung von Konfigurationen unterstützende Vernetzungsdatenbank (vgl. Abs. 6.1.2, Seite 73).
- ▷ Trotz der stetig zunehmenden Speicher- und Rechenzeitressourcen kann im Einzelfall die Notwendigkeit zur Anpassung der benötigten Kapazitäten für eine ZSDA in Abhängigkeit der verfügbaren Steuergeräteleistung bestehen. Eine Möglichkeit der gezielten Beeinflussung der Rechenleistung ist die Variation der Abarbeitungszeit einzelner Module im Verhältnis zur Systemzykluszeit und ihr gezielter Aufruf in einen gewünschten Zyklus (vgl. Abschnitt 6.1.2, Seite 73). Die Variation des Zeitverhaltens einzelner Module führt zwangsläufig zur Notwendigkeit der Anpassung aller zykluszeitabhängigen Parameter, wie sie bei Filterzeitkonstanten, Integrationen, Differenziationen etc. zum Einsatz kommen. Diese Anpassung sollte durch Einbindung der vorhandenen Parameter zur Skalierung des Zeitverhaltens automatisiert stattfinden.
- ▷ Die Anpassung von fahrzeug- und sensorspezifischen Kenndaten wird durch die Sammlung dieser Parameter auf oberster Ebene unterstützt (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 77).

Die Adaption einer ZSDA wird durch diese Maßnahmen stark vereinfacht und der Bildung von Varianten entgegengewirkt. Ziel ist es, die Applikation eines Systems ausschließlich auf fahrzeug- und sensorspezifische Kenndaten zu beschränken und die restlichen funktionalen Parameter nicht oder automatisiert zu modifizieren.

6.3 Zusammenfassung

Aufbauend auf den in Kapitel 4 vorgestellten ganzheitlichen Entwurfsansätzen und den erhobenen Anforderungen aus Kapitel 5 wird in einem iterativen Prozess ein neuartiges Konzept

für eine ZSDA entwickelt, das sich aufgrund seiner Skalierbarkeit von bestehenden Ansätzen zur Sensorüberwachung abhebt. In jeder Iteration wird der Fokus auf einen Teilbereich des Gesamtsystems gerichtet und auf diese Weise schrittweise eine Konkretisierung des Ansatzes vorgenommen.

Der Softwarearchitekturentwurf legt seinen Schwerpunkt zunächst auf die nicht-funktionalen Anforderungen, die der zentralen Stellung der Signaldatenaufbereitung Rechnung tragen und sich vor allem auf den Aufbau und die Struktur des Gesamtsystems auswirken. Mit einer hierarchischen Dekomposition wird eine Gliederung der unterschiedlichen Funktionsgruppen entworfen, die die Skalierbarkeit und die Erweiterung einer ZSDA um neue Sensoren berücksichtigt. Die Übersicht im System wird durch eine einheitliche Verfahrensweise mehrfach verwendeter Elemente gewährleistet. Eine wichtige Erkenntnis stellt die Notwendigkeit einer Vernetzungsdatenbank dar, die als Konfigurationsspeicher und der partiellen Fehlerbehandlung dient. Als Konsequenz des standardisierten Signalaustausches zwischen ZSDA und beliebigen Reglern werden Varianten von Nutzschnittstellen erarbeitet, die die Unabhängigkeit der ZSDA von den Signalanforderungen der Regler gewährleisten.

Auf Basis der funktionalen Anforderungen werden bekannte und neue Funktionsteile so arrangiert, dass die geforderte Flexibilität der ZSDA unterstützt wird. Um die Fehlersensitivität der Überwachungen zu optimieren, wird der Nullpunktfehlerabgleich der Gierwinkelgeschwindigkeit parallel mit unterschiedlichen Ansätzen sichergestellt. Es wird ein Überwachungskonzept bereitgestellt, das konfigurationsabhängig die verfügbaren Überwachungen kombiniert und eine maximale Verfügbarkeit des Systems gewährleistet. Das gleiche Ziel verfolgt die Signalgüte, die die Regler kontinuierlich und dynamisch über den aktuellen Stand der Signalqualität der Nutzsignale informiert und sogar feste Fehlerschwellen innerhalb der Signaldatenaufbereitung vermeiden kann. Die Entscheidung über die Signalverwendung kann auf diese Weise für dynamische Überwachungstypen vollständig vom Regler getroffen werden und führt zu einer weiteren Entkopplung der Komponenten. Ein Konzept zur einfachen und zum Teil automatisierten Adaption einer Konfiguration an ein Fahrzeug rundet das Konzept einer ZSDA ab.

Ähnlich wie die Softwarearchitektur einen Rahmen für die Umsetzung der funktionalen Anforderungen bereitstellt, bildet das entworfene Konzept einer ZSDA das Gerüst für die im folgenden Abschnitt detailliert dargestellte Implementierung. Zielsetzung ist die vollständige Berücksichtigung des entworfenen Konzepts.

7 Implementierung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung

Nach der Anforderungserhebung und dem sich anschließenden Konzeptentwurf stellt die Implementierung den letzten Schritt zur Realisierung einer zentralen Signaldatenaufbereitung (ZSDA) dar. Im Folgenden werden die einzelnen Konzeptideen, getrennt nach Aspekten der Softwarearchitektur und Funktionsumfängen, in ihrer Umsetzung erläutert. Neben den erhobenen Anforderungen bildet der in den vorausgegangenen Kapiteln definierte Stand der Technik die Grundlage der Umsetzung. Ein Schwerpunkt derselben wird durch die in unterschiedlichen Aspekten zu berücksichtigende Variabilität des Gesamtsystems gesetzt.

7.1 Softwarearchitektur

Aspekte der Implementierung, die das Gesamtsystem sowie seine Struktur betreffen, sind Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

7.1.1 Hierarchische Dekomposition

Zur übersichtlichen Gliederung der Architektur trägt die hierarchische Dekomposition der einzelnen Architekturelemente bei. In Abschnitt 6.1.3 wurden die elementaren Strukturelemente für ein skalierbares Gesamtsystem hergeleitet. In Folge der fortschreitenden Implementierung wird die Dekomposition weiter detailliert. Neben den zu testenden architektonischen Ebenen Block und Modul kommen weitere, ausschließlich der Gliederung dienenden Ebenen, hinzu. Aufbauend auf **Bild 6.4** wird in **Bild 7.1** die Struktur anhand der Gliederungsebenen visualisiert. Ein vollständiger Überblick inklusive aller Module ist in **Tabelle 7.1** zu finden. Die in dieser Tabelle enthaltene Spalte „Taktung“ ist Gegenstand späterer Betrachtungen in Abschnitt 7.1.6, jedoch zeigt sie den Umfang einzelner Konfigurationen (vgl. auch **Tabelle 6.4**). Der Funktionsumfang der definierten *Blöcke* wird im Folgenden erläutert:

- ▷ Der Block *Vorbereitung* ist direkte Folge der ebenfalls in Abschnitt 6.1.3 (Seite 77) hergeleiteten, einheitlichen Struktur mehrfach verwendeter Elemente. Berechnungsergebnisse werden nachfolgenden Blöcken und Modulen zentral zur Verfügung gestellt.
- ▷ *Sensorspezifische* Blöcke wie Gierwinkelgeschwindigkeit und Querbeschleunigung fassen die Funktionsteile zusammen, die ein physikalisches Signal betreffen. Untergliedert wird in die einzelnen Sensoren, die wiederum die signalspezifischen Teile wie Abgleiche und Signalüberwachungen beinhalten. Nachgeschaltet wird eine Ebene für die redundanzbasierten Überwachungen, die die Signale aller Einzelsensoren erfordern.
- ▷ Der *Fahrzustandsblock* vereint die Bestimmung der den aktuellen Fahrzustand kennzeichnenden Größen. Dazu zählen der Fahrzeugstillstand, die Längsbeschleunigung und die Schräglaufsteifigkeiten.

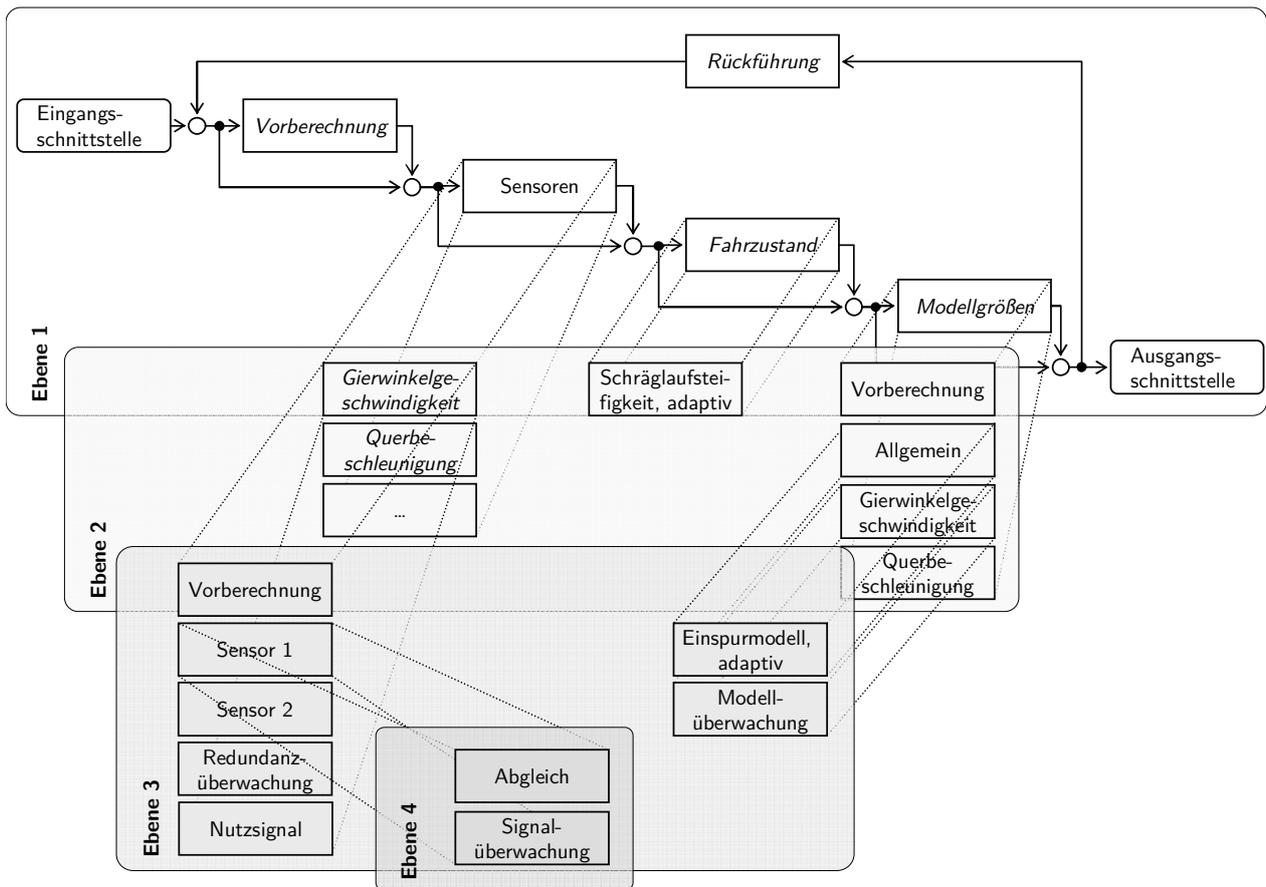


Bild 7.1: Deaillierung der Gliederungsebenen der zentralen Signaldatenaufbereitung

- ▷ Dem Block *Modellgrößen* ist ebenfalls eine Vorberechnungsebene vorangestellt. Parallel findet sich eine Struktur für die physikalischen Signale, die die Berechnung der korrespondierenden Modellgrößen sowie die Modellüberwachungen enthält. Das klassische und die beiden adaptiven Einspurmodelle, die mehr als ein physikalisches Signal nachbilden, werden in einer separaten Ebene abgelegt.
- ▷ Der *Rückführungsblock* beinhaltet gemäß Abschnitt 6.1.3 zum einen die benötigte Verzögerung auf Systemebene, zum anderen die vorgesehene Fehlerbehandlung.

Die hierarchische Dekomposition wurde auch vor dem Hintergrund der Wiederverwendung einzelner Module gewählt. Die Möglichkeit der Wiederverwendung variiert mit dem umgesetzten Funktionsumfang und ist konfigurationsabhängig in **Tabelle 7.2** zusammengefasst. Dargestellt sind die Varianten einzelner Module, die sich für die drei zugrunde liegenden Konfigurationen (vgl. **Tabelle 7.1**) ergeben, sowie die Häufigkeit der Verwendung einer Modulvariante innerhalb einer Konfiguration.

Vor allem die Abgleichs- (Module GAS, GAF, GAH und GAK) und Überwachungsfunktionalitäten (z. B. GSG, GSL, GRA) können ohne Veränderung in unterschiedlichen Konfigurationen erneut eingesetzt werden und reduzieren auf diese Weise Entwicklungsaufwand. Varianten einzelner Module sind die Ausnahme und in der Regel durch geänderte Schnittstellen (z. B. Verwendung der Sensorrohnsignale statt der kompensierten Gierwinkelgeschwindigkeiten beim Fehlen der Abgleichsmodule, Einsatz der Gradientenüberwachung für unterschiedliche Sensortypen) oder funktionale Änderungen bedingt (z. B. Nutzsinalgenerierung in Abhängigkeit der Sensoranzahl und der verfügbaren Überwachungstypen).

Tabelle 7.1: Gliederung der zentralen Signaldatenaufbereitung mit den [Blöcken] Vorberechnung, Gierwinkelgeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Fahrzustand, Modellgrößen und Rückführung

Gliederungsebene	Nr.	Modul	Abk.	Taktung		
				K1	K2	K3
[Vorberechnung]	1	Ablaufsteuerung	VAS	1/1	1/1	1/1
	2	Datenkonvertierung	VK	1/1	1/1	1/1
	3	Fahrzeugvarianten	VFV	1/1	1/1	1/1
Sensoren	—	—	—	—	—	—
└ [Gierwinkelgeschwindigkeit] ..	4	Nutzsignal	GN	1/1	1/1	1/1
└└ Vorberechnung	5	Rauschamplitude Sensor 1	GVR1	1/1	1/1	1/1
	6	Rauschamplitude Sensor 2	GVR2	—	1/1	1/1
└└ Sensor 1	—	—	—	—	—	—
└└└ Abgleich	7	Stillstand	GAS	4/1	—	1/1
	8	Fahrt	GAF	4/2	—	1/1
	9	Histogramm	GAH	4/3	—	1/1
	10	Kompensation	GAK	4/4	—	1/1
└└└ Signalüberwachung	11	Gradient	GSG1	1/1	1/1	1/1
	12	Langzeitabgleich	GSL1	4/4	—	1/1
	13	Rauschen	GSR1	1/1	1/1	1/1
└└└ Sensor 2	14–20:	Entsprechend Sensor 1	—	—	1/1	1/1
└└└ Redundanzüberwachung ..	21	Abweichung	GRA	—	1/1	1/1
	22	Abweichungsgradient	GRG	—	1/1	1/1
	23	Statistik	GRS	—	1/1	1/1
└ [Querbeschleunigung]	24	Nutzsignal	QN	1/1	1/1	1/1
└└ Vorberechnung	25	Rauschamplitude Sensor 1	QVR1	1/1	1/1	1/1
	26	Rauschamplitude Sensor 2	QVR2	—	1/1	1/1
└└ Sensor 1	—	—	—	—	—	—
└└└ Abgleich	—	—	—	—	—	—
└└└ Signalüberwachung	27	Gradient	QSG1	1/1	1/1	1/1
	28	Rauschen	QSR1	1/1	1/1	1/1
└└└ Sensor 2	29–30:	Entsprechend Sensor 1	—	—	1/1	1/1
└└└ Redundanzüberwachung ..	31	Abweichung	QRA	—	1/1	1/1
	32	Abweichungsgradient	QRG	—	1/1	1/1
	33	Statistik	QRS	—	1/1	1/1
[Fahrzustand]	34	Stillstand	FST	2/1	—	1/1
	35	Längsbeschleunigung	FLB	2/1	—	2/1
└ Schräglaufsteifigkeit, adaptiv	36	Basis Gierwinkelgeschw.	FSSG	2/1	—	1/1
	37	Basis Querbeschleunigung	FSSQ	2/1	—	1/1
[Modellgrößen]	—	—	—	—	—	—
└ Vorberechnung	38	Zulassungsbedingungen	MVZ	2/1	—	1/1
	39	Filterung	MVF	2/1	—	1/1
└ Allgemein	40	Einspurmodell	MAE	2/2	—	1/1
└└ Einspurmodell, adaptiv ...	41	Basis Gierwinkelgeschw.	MAEG	2/2	—	1/1
	42	Basis Querbeschleunigung	MAEQ	2/2	—	1/1
└ Gierwinkelgeschwindigkeit ...	43	Geometrische Modelle	MGG	2/2	—	1/1
	44	Künstliche neuronale Netze	MGN	2/2	—	1/1
└└ Modellüberwachung	45	Sensor 1	MGU1	2/2	—	1/1
	46	Sensor 2	MGU2	—	—	1/1
└└ Querbeschleunigung	47	Geometrische Modelle	MQG	2/2	—	1/1
	48	Künstliche neuronale Netze	MQN	2/2	—	1/1
└└└ Modellüberwachung	49	Sensor 1	MQU1	2/2	—	1/1
	50	Sensor 2	MQU2	—	—	1/1
[Rückführung]	51	Fehlerbehandlung	RFB	1/1	1/1	1/1
	52	Verzögerung	RVZ	1/1	1/1	1/1

7.1.2 Vernetzungsdatenbank

Das in Abschnitt 6.1.2 (Seite 73) hergeleitete Konzept einer Vernetzungsdatenbank muss drei Hauptaufgaben erfüllen:

- ▷ Handhabung von Varianten, um je nach Konfiguration des Zielfahrzeugs bezüglich Sensoren und Fahrwerkregelsystemen die notwendigen Module zu einem Gesamtsystem zusammenzufügen.
- ▷ Erweiterungen und Änderungen einer ZSDA in dem Wissen ermöglichen, dass alle Abhängigkeiten zwischen den Modulen berücksichtigt werden.
- ▷ Nutzung der Informationen der Vernetzungsdatenbank für die Fehlerbehandlung gemäß Abschnitt 6.1.2 (Seite 78).

Den Aufgaben gemein ist der Zugriff auf Informationen über die Schnittstellengrößen der einzelnen Module, ihre Verkettung untereinander und ihre Zugehörigkeit zu bestimmten Konfigurationen in Abhängigkeit des Ausstattungsgrades des Zielfahrzeugs. Diese Informationen werden in einer Matrixstruktur nach **Bild 7.2** abgelegt. Auf der ersten Achse sind die Signale, auf der zweiten die Module aufgetragen. Signal- und Modulachse bilden für alle Konfigurationen eine identische, da vollständige Liste der definierten Signale und Module. Eine Matrix entspricht immer einer Konfiguration einer ZSDA. Unterschiedliche Konfigurationen werden über die dritte Dimension differenziert. Die aufgespannte Matrix stellt die Verknüpfung von Signalen und Modulen über einen numerischen Schlüssel her, der die Kennzeichnung von Ein- und Ausgangsgrößen sowie von nicht vorhandenen Abhängigkeiten ermöglicht:

-1 : Eingangsgröße (verzögert um einen Rechenschritt)

0 : Keine Schnittstellengröße

1 : Eingangsgröße

Tabelle 7.2: Varianten (bezüglich aller Konfigurationen) und Verwendungshäufigkeiten (innerhalb einer Konfiguration) einzelner Module der ZSDA

Funktion	Modul(e)	Var.	Häufigkeit			Abhängigkeit(en)
			K1	K2	K3	
Ablaufsteuerung	VAS	3	1	1	1	Schnittstellen
Fahrzeugvarianten	VFV	2	1	1	1	Sensoren (Anzahl, Typ)
Rauschamplitude	G/QVR*	1	2	4	4	Sensoren (Anzahl, Typ)
Stillstandsabgleich	GAS*	1	1	–	2	Sensoren (Anzahl)
Fahrtabgleich	GAF*	1	1	–	2	Sensoren (Anzahl)
Histogrammabgleich	GAH*	1	1	–	2	Sensoren (Anzahl)
Kompensation	GAK*	1	1	–	2	Sensoren (Anzahl)
Gradientenüberwachung	G/QSG*	1	2	4	4	Sensoren (Anzahl, Typ)
Langzeitabgl., Rauschüberw.	GSL*, G/QSR*	1	3	4	6	Sensoren (Anzahl, Typ)
Redundanzabweichung	G/QRA	1	–	2	2	Sensoren (Anzahl, Typ)
Redundanzgradient	G/QRG	1	–	2	2	Sensoren (Anzahl, Typ)
Redundanzstatistik	G/QRS	1	–	2	2	Sensoren (Anzahl, Typ)
Nutzsignalbildung	G/QN	3	2	2	2	Sensoren (Anzahl, Typ)
Adaptives Einspurmodell	MAEG/Q	1	2	–	2	Sensoren (Typ)
Modellüberwachung	MG/QU*	2	2	–	4	Sensoren (Anzahl, Typ)
Fehlerbehandlung	RFB	3	1	1	1	Schnittstellen
Verzögerung	RVZ	3	1	1	1	Schnittstellen

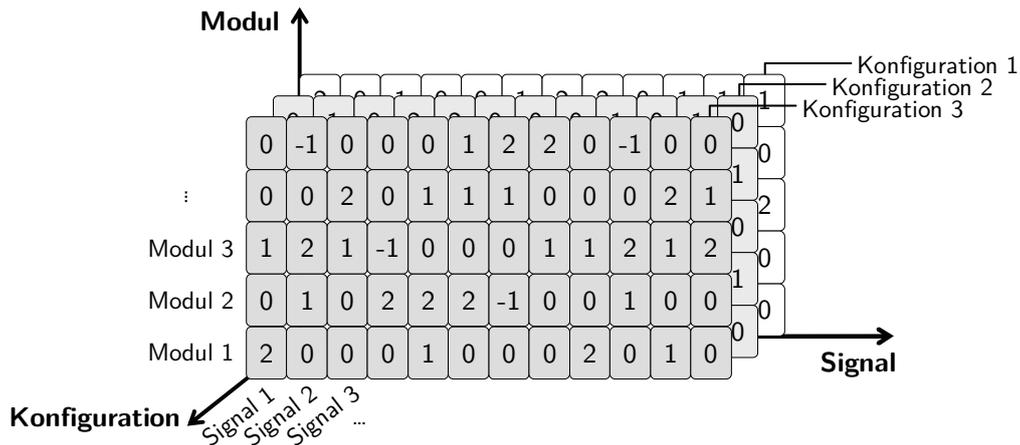


Bild 7.2: Schematische Darstellung der Vernetzungsdatenbank

2 : Ausgangsgröße

Beispielsweise ist nach **Bild 7.2** Signal 1 bezogen auf Konfiguration 3 Eingangsgröße von Modul 3 und Ausgangsgröße von Modul 1. Mit weiteren Modulen der Konfiguration 3 besteht keine Wechselwirkung.

Um die Arbeit mit der Vernetzungsdatenbank zu ermöglichen, wird die in **Bild 7.3** dargestellte Menüstruktur implementiert. Über ein Hauptmenü sind die Funktionen in fünf unterlagerten Ebenen erreichbar:

- ▷ Im Untermenü *Ausgabe/Bearbeiten der Module* besteht die Option zum Anzeigen der Module der aktuellen Konfiguration. Gleichzeitig können einzelne Module bezüglich ihrer Bezeichnung sowie Abkürzung bearbeitet, bei Bedarf vollständig gelöscht werden. Ein Löschvorgang bezieht sich stets auf alle Konfigurationen.
- ▷ Äquivalent stehen im Untermenü *Ausgabe/Bearbeiten der Signale* vergleichbare Optionen für die Signale zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Modulen können nicht nur Signalname und -symbol bearbeitet werden, sondern auch der Datenvektor, der die Funktion des Signals für ein Modul beschreibt. Alle Datenvektoren gemeinsam bilden die Abhängigkeitsmatrix für eine Konfiguration.
- ▷ Das Untermenü *Ausgabe einer Schnittstelle* ermöglicht die gezielte Ausgabe der Schnittstelle eines Moduls oder des Gesamtsystems. Für jedes ausgegebene Schnittstellensignal ist ersichtlich, ob es Ein- oder Ausgangsgröße des Moduls sowie in- oder externe Größe bezogen auf das Gesamtsystem ist.
- ▷ Über die *Ausgabe eines Signalflusses* können die Auswirkungen von Signalen bzw. von Modulausgangsgrößen nachvollzogen werden. Dabei wird dargestellt, welche Module von einem Signal oder alternativ von den Ausgangsgrößen eines Moduls beeinflusst werden. Auf diese Weise wird die interne Verkettung der Module visualisiert. Die Darstellung erfolgt stets von der Quelle bis zum Ziel. Optional kann der interne Signalfluss als Matrix ausgegeben werden. Diese beschreibt in Abhängigkeit des Quellmoduls, welche nachfolgenden Module mit Signalen versorgt werden. Diese Informationen werden für die Fehlerbehandlung genutzt (vgl. Abschnitt 7.1.4).
- ▷ Die Arbeit mit der Vernetzungsdatenbank wird immer innerhalb einer einzelnen Konfiguration durchgeführt. Das Untermenü *Konfiguration des Gesamtsystems* erlaubt die Auswahl der gewünschten Konfiguration. Wie bei Signalen und Modulen können neue

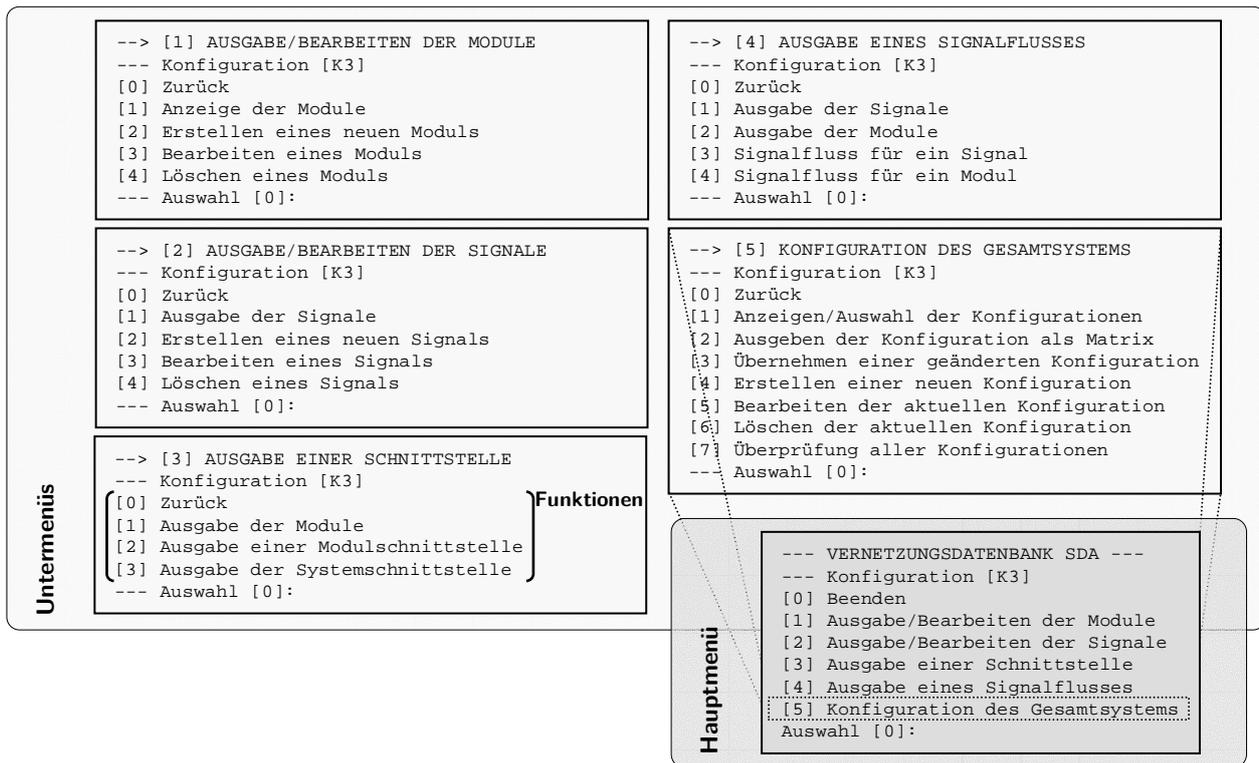


Bild 7.3: Menüstruktur der Vernetzungsdatenbank

Konfigurationen erstellt, bestehende bearbeitet oder gelöscht werden. Als zusätzliche Option können die Konfigurationen auf Konsistenz überprüft werden. Dabei wird beispielsweise sichergestellt, dass Bezeichner eindeutig definiert sind, dass Signale nur eine einzige Quelle, aber mindestens einen Abnehmer haben und dass einzelne Komponenten vollständig definiert sind.

7.1.3 Konfiguration des Gesamtsystems

Die dieser Arbeit zugrunde gelegten Konfigurationen wurden bereits in **Tabelle 6.4** eingeführt. Nach der hierarchischen Dekomposition werden die Konfigurationen konkretisiert, indem ihnen nach **Tabelle 7.1** über die Spalte „Taktung“ eine Modulauswahl zugeordnet wird (Eine Erläuterung der Bedeutung der Einträge dieser Spalte erfolgt in Abschnitt 7.1.6). Durch die unterschiedlichen Konfigurationen ergeben sich zwangsläufig Varianten einzelner Module, wie **Tabelle 7.2** zu entnehmen ist. Die Anpassung des Gesamtsystems erfolgt auf Basis der in der Vernetzungsdatenbank hinterlegten Informationen über die konfigurationsspezifischen Module. Basierend auf der Datenbank werden über Befehlsaufrufe die Modulplatzhalter im Gesamtmodell mit der gewünschten Funktionalität befüllt oder aber mit Leermodulen versehen. Auf diese Weise wird ein einfacher Wechsel zwischen den einzelnen Konfigurationen ermöglicht.

7.1.4 Fehlerbehandlung

Bei der Fehlerbehandlung sind mit externen und internen Fehlern zwei Fehlerarten zu unterscheiden. Unter externen Fehlern sind fehlerhafte Sensorsignale zu verstehen, während interne

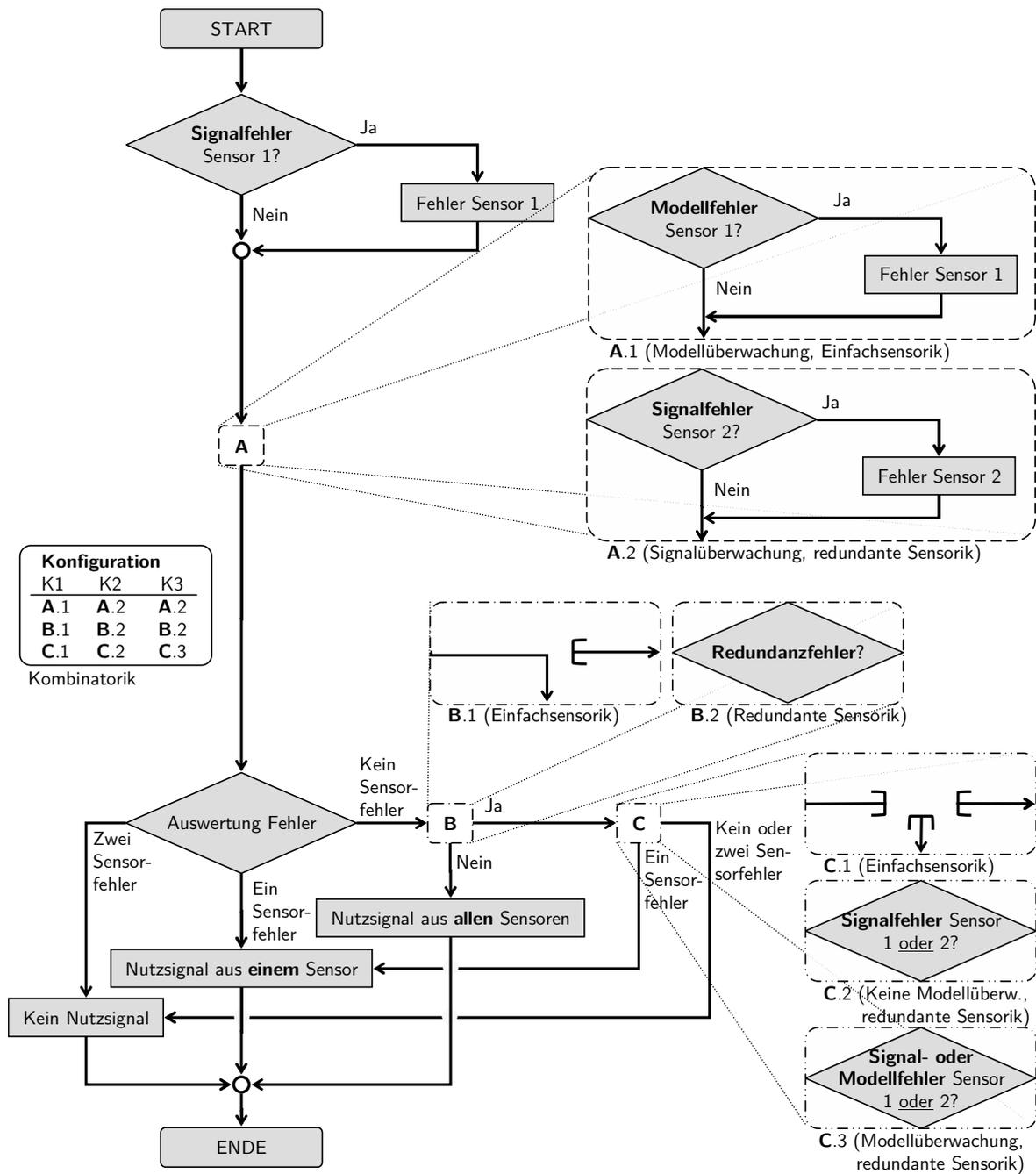


Bild 7.4: Generierung des Nutzsignals einer zentralen Signaldatenaufbereitung in Abhängigkeit von signal-, modell- und redundanzbasierten Überwachungen

Fehler auf korrupte Module hinweisen. Die individuellen Vorgehensweisen beim Auftreten der Fehlerarten werden im Folgenden erläutert.

Externe Fehler

Durch die implementierten Überwachungen nach Abschnitt 6.2.2 (Seite 81) werden unterschiedliche Fehler detektiert, die nur zum Teil eine direkte Fehlerzuordnung ermöglichen. Jede Überwachung setzt im Fehlerfall einen zugehörigen, binären Fehlerstatus, der auf einen für jeden Sensor- und jedes Nutzsignal vorhandenen Status übertragen wird. Die Fehlersta-

tus können innerhalb der ZSDA ausschließlich gesetzt werden (vgl. **Bild 6.8**). Ein Rücksetzen erfolgt nur bei Neustart oder Reinitialisierung der Software, um jedes Gefährdungspotenzial nach einer kritischen Signalabweichung auszuschließen. Vor Verwendung einer Größe muss stets ihre Verfügbarkeit durch Abfrage der zugehörigen Statussignale überprüft werden. Bei redundanter Sensorik wird über den Nutzsinalstatus außerdem mitgeteilt, wie viele der redundanten Sensoren defekt sind. Im Fall redundanter Sensorik ist der Nutzsinalstatus das einzige nicht-boolesche Statussignal.

In Abhängigkeit der Fehlerstatus und der verwendeten Konfiguration wird anschließend das Nutzsinal gebildet. Die Bereitstellungslogik ist für alle Konfigurationen in **Bild 7.4** zusammengefasst. Die Modell- ist der Redundanzüberwachung untergeordnet, da detektierte Modellfehler (über Baustein C.3) ausschließlich dann Einfluss auf die Logik nehmen können, wenn zuvor die Redundanzüberwachung (B.2) einen Fehler gefunden hat. Ist wie in Konfiguration K1 keine Redundanzüberwachung implementiert, ist die Modell- der Signalüberwachung gleichgestellt (A.1). Die Ausgabe des Nutzsinals y_{Nutz} erfolgt entsprechend der verfügbaren redundanten Sensoranzahl N und ist beispielhaft für eine einfach redundant gemessene Größe in **Tabelle 7.3** angegeben. Allgemein gilt für die Nutzsinalbildung nach Schnittstellenkonzept S3 (vgl. Abschnitt 6.1.1, Seite 70):

$$y_{\text{Nutz}} = \begin{cases} \frac{1}{n} \cdot (y_{\text{Mess},1} + \dots + y_{\text{Mess},N}) & (N > 1) \\ y_{\text{Mess},\langle 1\dots N \rangle} & (N = 1) \\ K \text{ bzw. } y_{\text{Mess},\langle 1\dots N \rangle,i-1} & (N = 0) \end{cases} \quad (7.1)$$

Das Nutzsinal wird gebildet aus den bzw. dem noch verfügbaren, fehlerfreien Sensorsignal(en) $y_{\text{Mess},\langle 1\dots N \rangle}$. Die Ausgabe des letzten gültigen Wertes $y_{\text{Mess},\langle 1\dots N \rangle,i-1}$ beim Fehlen aller Sensoren wird bevorzugt, da davon auszugehen ist, dass die mit Signalen versorgten Regler in einer solchen Situation innerhalb weniger Zyklen abgeschaltet werden oder aber auf die ausgegebene Modellgröße – sofern verfügbar – umschalten. Falls es für wenige Zyklen zu einem Abruf des falschen Sensorsignals käme, approximiert der letztgültige Wert den wahren Wert am besten. Alternativ kann ein konstanter Fehlerwert K bereitgestellt werden.

Das Schnittstellenkonzept S4 führt dagegen zu ausschließlich zwei unterschiedlichen Nutzsinalausgaben, da keine Mittelwertbildung stattfindet. Allerdings kann zusätzlich ein Ersatzwert in Form einer Modellgröße \hat{y} bereitgestellt werden:

$$y_{\text{Nutz},n} = \begin{cases} y_{\text{Mess},n} & (N = 1) \\ K \text{ bzw. } y_{\text{Mess},n,i-1} \text{ bzw. } \hat{y} & (N = 0) \end{cases} \quad (7.2)$$

Eine Modellgröße wird auch im Konzept S3 bereitgestellt, jedoch wird diese parallel zum Nutzsinal ausgegeben. Die Umschaltung erfolgt durch den Regler.

Neben den Signalfehlerstatus wird den Reglern zusätzlich die Signalgüte nach Abschnitt 6.2.3 (Seite 83) als dynamisches Qualitätsmaß zur Verfügung gestellt, um die Sensorbasis zur Bil-

Tabelle 7.3: Belegung der Statussignale und die zum Nutzsinalstatus korrespondierende Nutzsinalausgabe am Beispiel einer zweifach gemessenen (d. h. redundante verfügbaren) physikalischen Größe

Nutzsinalstatus		Nutzsinalausgabe	
Wert	Bedeutung	Konzept S3	Konzept S4
0	Alle Sensoren fehlerfrei	Mittelwert	Einzelsensorsignale
1	Ein Sensor fehlerhaft	Fehlerfreier Sensor	Letztgültiger Wert
2	Redundanzfehler	Mittelwert	Einzelsensorsignale
2	Zwei Sensoren fehlerhaft	Letztgültiger Wert	Letztgültiger Wert

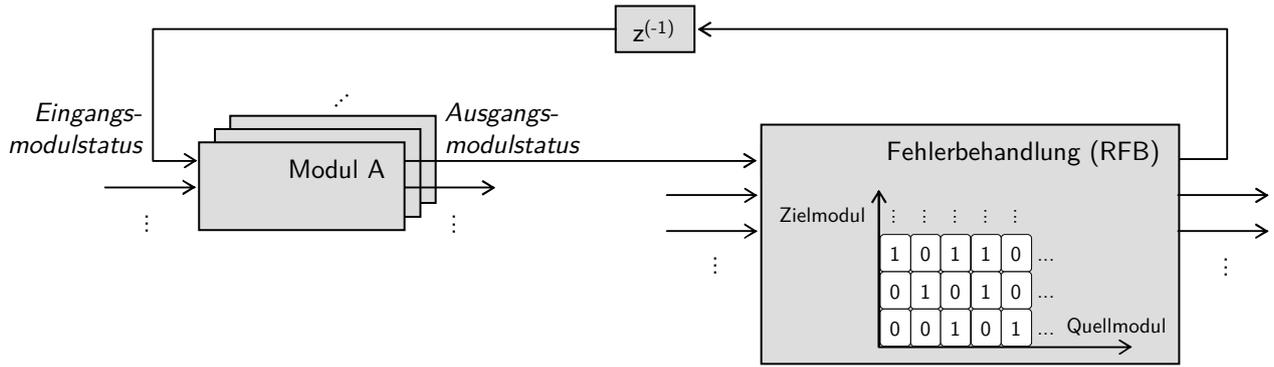


Bild 7.5: Prinzip der Modulfehlerbehandlung mittels Signalflussmatrix

zung des Nutzsignals zu definieren. Die Nutzsignalgüte wird wiederum in Abhängigkeit der Anzahl N der verfügbaren redundanten Sensoren bereitgestellt. Für das Schnittstellenkonzept S3 gilt:

$$y_{\text{Gue}} = \begin{cases} y_{\text{Abw,Red}} + \max(y_{\text{Np,Tol},\langle 1\dots N \rangle}) + \max(y_{\text{Rau},\langle 1\dots N \rangle}) & (N > 1) \\ y_{\text{Abw,Mod},\langle 1\dots N \rangle} + y_{\text{Np,Tol},\langle 1\dots N \rangle} + y_{\text{Rau},\langle 1\dots N \rangle} & (N = 1) \\ y_{\text{Gue},i-1} & (N = 0) \end{cases} \quad (7.3)$$

Im Fall redundanter Sensorik ergibt sich die Nutzsignalgüte aus der Abweichung der redundanten Sensoren $y_{\text{Abw,Red}}$ und den Maximalwerten von Nullpunktfehlertoleranz $y_{\text{Np,Tol},\langle 1\dots N \rangle}$ und Rauschamplitude $y_{\text{Rau},\langle 1\dots N \rangle}$ der beteiligten Sensoren. Ist keine Redundanz gegeben, wird die Redundanzabweichung mit der Modellabweichung $y_{\text{Abw,Mod},\langle 1\dots N \rangle}$ ersetzt und die Kenngrößen des verbleibenden Sensors verwendet. Der Ausfall aller Sensoren führt zur Ausgabe des letzten gültigen Wertes $y_{\text{Gue},i-1}$.

Das Schnittstellenkonzept S4 nutzt für die Bereitstellung der Nutzsignalgüte zwar die Redundanzabweichung, greift aber ansonsten ausschließlich auf die sensorspezifischen Kenngrößen zurück:

$$y_{\text{Gue},n} = \begin{cases} y_{\text{Abw,Red}} + y_{\text{Np,Tol},n} + y_{\text{Rau},n} & (N > 1) \\ y_{\text{Abw,Mod},n} + y_{\text{Np,Tol},n} + y_{\text{Rau},n} & (N = 1) \\ y_{\text{Gue},n,i-1} & (N = 0) \end{cases} \quad (7.4)$$

Interne Fehler

Jedes Modul hält einen Status bereit, der Auskunft über dessen Fehlerfreiheit gibt. Fehler können auftreten, wenn Ein- bzw. Ausgangsgrößen sowie Parameter spezifizierte Wertebereiche verlassen oder wenn der Vergleich zwischen Haupt- und diversitärer Implementierung eine unzulässige Abweichung aufweist (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 78). Um im Fehlerfall die Funktion bestmöglich aufrecht erhalten zu können, soll nicht die gesamte ZSDA abgeschaltet werden, sondern nur der Teil, auf den ein fehlerhaftes Modul Auswirkungen hat.

Grundlage der Fehlerbehandlung ist ein Extrakt aus der Vernetzungsdatenbank in Form einer Matrix, die für jedes fehlerhafte Modul zusammenfasst, welche weiteren Module durch Fehlerfortpflanzung in Mitleidenschaft gezogen werden, siehe **Bild 7.5**. Mit diesem Wissen werden im Fehlerfall ausschließlich die betroffenen Module über den Eingangsmodulestatus passiviert. Die nicht betroffenen Teile der ZSDA bleiben aktiv, um die Verfügbarkeit zu erhöhen, ohne die Sicherheit des Gesamtsystems zu gefährden.

7.1.5 Abtastzeitunabhängige Parametrierung

Für eine flexible Handhabung der Module ist es unerlässlich, die Parametrierung an den neuen Freiheitsgrad der variablen Abarbeitungszeit anzupassen. Das bedeutet, dass die Applikation idealerweise nur einmal für eine beliebige Zykluszeit erfolgt, danach aber automatisch an abweichende Abarbeitungszeiten angepasst wird. Die Notwendigkeit ist ausschließlich für Parameter gegeben, die eine Abhängigkeit von der Abtastzeit aufweisen.

Zur Umsetzung des Ziels werden zwei neue Parameter als zusätzliche Konfigurationsmerkmale für jedes Modul eingeführt. Über eine Zyklusangabe kann spezifiziert werden, ob die Komponente in jedem Rechenzyklus abgearbeitet wird ($n = 1$) oder nur in jedem n -ten Rechenschritt mit $n > 1$ ($n \in \mathbb{N}$). Zusätzlich wird außerdem definiert, in welchem Abtastschritt $i \leq n$ ($i, n \in \mathbb{N}$) die Abarbeitung eines Moduls erfolgen soll. Auf diese Weise lässt sich die Steuergeräteauslastung gleichmäßig über die n Rechenzyklen verteilen. Die Taktung der Module muss entsprechend ihrer Funktionalität und ihrer Bedeutung für die Sicherheit des Gesamtsystems erfolgen.

Allgemeine Parameter

Sofern die Abtastzeit in die Implementierung einfließt, muss sichergestellt werden, dass nicht mit der Systemzykluszeit t_Z , sondern mit der Modulabtastzeit $t_M = n \cdot t_Z$ mit $n \in \mathbb{N}$ gearbeitet wird. Die Information über die Variable n wird in Form eines Parameters hinterlegt, so dass eine Anpassung der Modulzykluszeit ohne funktionale Änderung erfolgt.

Filterzeitkonstanten

Zur Signalfilterung werden in der Regel Verzögerungsglieder erster und zweiter Ordnung eingesetzt. Die Differenzialgleichung $T\dot{y} + y = k_s u$ stellt den zugrunde liegenden Zusammenhang zwischen der Eingangs- u und der Ausgangsgröße y für ein Verzögerungsglied erster Ordnung dar [Lun01]. Die Filterzeitkonstante T ist ein Maß für die Stärke der Verzögerung, k_s wird als statische Verstärkung bezeichnet. Für diskrete Systeme wird das Filter als Differenzgleichung $T \frac{y_i - y_{i-1}}{t_Z} + y_{i-1} = k_s u_i$ mit der von der Systemabtastzeit t_Z abhängigen Filterzeitkonstanten $T_{t_Z} = f(t_Z)$ formuliert und führt zur rekursiven Lösung:

$$y_i = y_{i-1} + k_{t_Z} (k_s u_i - y_{i-1}) \quad \text{mit} \quad k_{t_Z} = \frac{t_Z}{T_{t_Z}} \quad (7.5)$$

Für die zweite diskrete Variante eines Verzögerungsgliedes erster Ordnung $T \frac{y_i - y_{i-1}}{t_Z} + y_i = k_s u_i$ ist die äquivalente Herleitung einer abtastzeitunabhängigen Filterzeitkonstanten in Anhang B.2.2 gegeben. Im Folgenden wird von einer statischen Verstärkung $k_s = 1$ ausgegangen. Zur Vermeidung einer möglichen Nulldivision wird der Filterkoeffizient $k_{t_Z} = \frac{t_Z}{t_Z + T_{t_Z}}$ im Nenner unter der Annahme $t_Z \ll T_{t_Z}$ um die Systemzykluszeit t_Z erweitert.

Die variable Abtastzeit eines Moduls $t_M = n \cdot t_Z$ mit $n \in \mathbb{N}$ erweitert die Beziehung aus Gleichung (7.5) um einen Freiheitsgrad. Der Filterkoeffizient ergibt sich damit zu $k_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}}$ mit der neuen Filterzeitkonstanten $T_{n \cdot t_Z}$. Um die erneute Applikation des Parameters $T_{n \cdot t_Z}$ zu vermeiden, wird unter der Annahme eines konstanten Eingangs ($\dot{u} = 0$) gezeigt, dass eine Anpassung der Filterzeitkonstanten aufgrund geänderter Modulabtastzeiten in der Regel nicht notwendig ist.

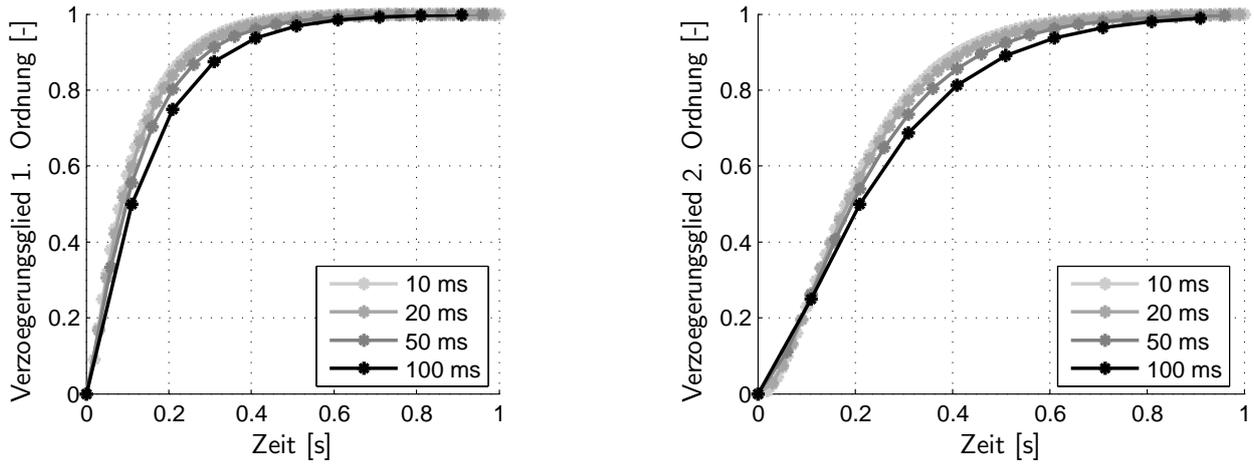


Bild 7.6: Ausgangsgrößen eines Filters erster und zweiter Ordnung mit der Filterzeitkonstanten $T_{t_Z} = 0, 1$ s. Die Abtastzeit der Filter wird zwischen 0,01 (Systemzykluszeit) und 0,1 s variiert

Ausgangspunkt ist die Forderung, dass der Ausgang eines Filters y_{t_Z} , der mit der Systemzykluszeit abgetastet wird, in jedem n -ten Zyklus identisch ist mit dem Filterausgang $y_{n \cdot t_Z}$, der nur in jedem n -ten Zyklus berechnet wird. Für $n = 2$ ergibt sich:

$$y_{t_Z,i} = y_{t_Z,i-1} + k_{t_Z}(u - y_{t_Z,i-1}) = y_{t_Z,i-2} + (2k_{t_Z} - k_{t_Z}^2)(u - y_{t_Z,i-2}) \quad (7.6a)$$

$$y_{2t_Z,j} = y_{2t_Z,j-1} + k_{2t_Z}(u - y_{2t_Z,j-1}) = y_{t_Z,i-2} + k_{2t_Z}(u - y_{t_Z,i-2}) \quad (7.6b)$$

Die Gleichungen (7.6) sind für $i = 2j$ identisch. In **Tabelle 7.4** wird ein allgemeiner Zusammenhang für die Filterkoeffizienten $k_{n \cdot t_Z}$ in Abhängigkeit von der Modulabtastzeit hergeleitet. Verallgemeinert lauten die Beziehungen (7.6):

$$y_{t_Z,i} = y_{t_Z,i-1} + k_{t_Z}(u - y_{t_Z,i-1}) = y_{t_Z,i-n} + (1 - (1 - k_{t_Z})^n)(u - y_{t_Z,i-n}) \quad (7.7a)$$

$$y_{n \cdot t_Z,j} = y_{n \cdot t_Z,j-1} + k_{n \cdot t_Z}(u - y_{n \cdot t_Z,j-1}) = y_{t_Z,i-n} + k_{n \cdot t_Z}(u - y_{t_Z,i-n}) \quad (7.7b)$$

Die Gleichungen (7.7) sind wiederum für $i = n \cdot j$ identisch. Aus $k_{n \cdot t_Z} = 1 - (1 - k_{t_Z})^n$ wird für $t_Z \ll T_{t_Z}$ die Filterzeitkonstante $T_{n \cdot t_Z}$ bestimmt, eine detaillierte Herleitung ist im Anhang B.2.1 zu finden:

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{(t_Z + T_{t_Z})^n - T_{t_Z}^n} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{t_Z^n + n \cdot t_Z^{n-1} T_{t_Z} + \dots + n \cdot t_Z T_{t_Z}^{n-1}} \approx T_{t_Z} \quad (7.8)$$

Tabelle 7.4: Zusammenhang zwischen Filterkoeffizienten k_{t_Z} und Filterzeitkonstanten T_{t_Z} bei Systemzykluszeit und einem beliebigen ganzzahligen Vielfachen dieser Abtastzeit $k_{n \cdot t_Z}$ bzw. $T_{n \cdot t_Z}$

Zykluszeit [s]	Filterkoeffizient [-]	Filterzeitkonstante [s]
Modul	Allgemein	Speziell für eine Systemzykluszeit $t_Z = 0,01$ s
t_Z	k_{t_Z}	$T_{t_Z} =$ 0,01 0,1 1 10 100
$2t_Z$	$k_{2t_Z} = 2k_{t_Z} - k_{t_Z}^2$	$T_{2t_Z} =$ (0,007) 0,095 0,995 9,995 99,995
$3t_Z$	$k_{3t_Z} = 3k_{t_Z} - 3k_{t_Z}^2 + k_{t_Z}^3$	$T_{3t_Z} =$ (0,004) 0,091 0,990 9,990 99,990
$5t_Z$	$k_{5t_Z} = 5k_{t_Z} - 10k_{t_Z}^2 + \dots$	$T_{5t_Z} =$ (0,002) (0,082) 0,980 9,980 99,980
$10t_Z$	$k_{10t_Z} = 10k_{t_Z} - \dots$	$T_{10t_Z} =$ (0,000) (0,063) 0,956 9,955 99,955
$n \cdot t_Z$	$k_{n \cdot t_Z} = 1 - (1 - k_{t_Z})^n$	— — — — —

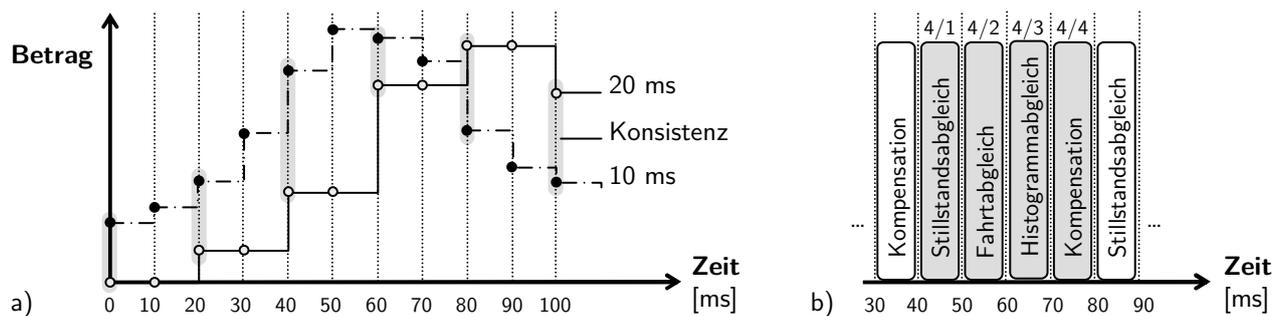


Bild 7.7: Beispiele für a) die Konsistenz von Größen mit unterschiedlichen Aktualisierungsraten sowie b) die gezielte gleichmäßige Prozessorauslastung beim Abgleich eines Gierwinkelgeschwindigkeitssensors

Die Filterzeitkonstanten $T_{n \cdot t_Z} \approx T_{t_Z}$ stimmen für $t_Z \ll T_{t_Z}$ annähernd überein. In **Tabelle 7.4** ist für eine Systemzykluszeit $t_Z = 0,01$ s und unterschiedliche Filterzeitkonstanten deren Veränderung in Abhängigkeit von der Modulabtastrzeit dargestellt. Es zeigt sich, dass gemäß der Annahme $t_Z \ll T_{t_Z}$ die Abweichung $T_{t_Z} - T_{n \cdot t_Z}$ mit steigender Filterzeitkonstante abnimmt. Je näher die Filterzeitkonstante an der Systemzykluszeit liegt, desto stärker wirkt sich eine geringere Modulabtastrzeit auf die Abweichung $T_{t_Z} - T_{n \cdot t_Z}$ aus. Die eingeklammerten Filterzeitkonstanten weisen eine Abweichung von mehr als 10% vom exakten Wert auf.

Für eine kritische, der Größenordnung der Systemzykluszeit entsprechende Filterzeitkonstante $T_{t_Z} = 0.1$ s sind die Ergebnisse für ein Verzögerungsglied erster und zweiter Ordnung in **Bild 7.6** dargestellt. Ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung ergibt sich durch die Reihenschaltung von zwei Gliedern erster Ordnung. Trotz der zum Teil großen Abweichung der Filterzeitkonstanten ergeben sich relativ eng beieinander liegende Verläufe der Filterausgangsgrößen. Je nach Anwendungsfall muss entschieden werden, ob diese Abweichungen in Abhängigkeit der Parametrierung auftreten und ob sie sich negativ auf die zu realisierende Funktion auswirken. In den meisten Fällen wird man durch diese Vorgehensweise jedoch abtastzeitunabhängige Filterzeitkonstanten realisieren können.

7.1.6 Zeitverhalten

Unterstützt durch die abtastzeitunabhängige Parametrierung kann die zeitliche Taktung einzelner Module nach Bedarf angepasst werden. Drei Fragen stehen im Mittelpunkt der Definition der modulspezifischen Abarbeitungszeiten:

1. Mit welcher Zykluszeit werden die Eingangssignale des zu taktenden Moduls eingelesen?
2. Wie wirkt sich eine gegenüber der Systemabtastzeit längere Zykluszeit und die somit eingeschränkte Verfügbarkeit einzelner Eingangsgrößen auf die Modulfunktionalität aus?
3. Welche Rolle spielt die Zykluszeit des zu taktenden Moduls und folglich die Aktualität der Ausgangsgrößen für die Gesamtheit der Signalnutzer?

Die Vorgehensweise wird am Beispiel der ZSDA verdeutlicht: Die Zykluszeit der Eingangsgrößen entspricht bei der Mehrzahl der fahrdynamischen Größen der Systemabtastrzeit von 10 ms. Eine Ausnahme stellen die Raddrehzahlen und die aus ihnen resultierende Fahrzeuglängsgeschwindigkeit dar. Sie stehen alle 20 ms aktualisiert zur Verfügung. Das Modul zur Berechnung der Fahrzeuglängsbeschleunigung kann folglich ohne Funktionseinbußen im 20-MS-Takt betrieben werden. Für alle weiteren Module, die die Raddrehzahlen oder aus ihnen gebildete Größen verwenden, muss bewertet werden, ob eine Einschränkung der modulspezifischen

Abarbeitungszeiten gerechtfertigt ist. Ein interessantes Beispiel sind die die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit voraussetzenden Modellgrößen, die in die Modellüberwachungen einfließen. Aufgrund ihres sicherheitsrelevanten Charakters steht die schnelle Reaktion auf Fehler im Fokus der Anforderungen. Da die Modellüberwachungen im Gegensatz zu signalbasierten Überwachungstypen jedoch mit unterschiedlichen Robustheitsmaßnahmen versehen sind, um ausschließlich auf tatsächlich vorhandene Fehler zu reagieren (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 37), ist die Abarbeitung mit einer Taktung von 20 ms zulässig. Der Ansatz wird für Konfiguration K1 (vgl. **Tabelle 7.1**) umgesetzt.

Bei der Festlegung der Aufteilung einzelner Module auf mehrere Zyklen sollte darauf geachtet werden, dass möglichst konsistente Eingangssignale vorliegen. Konsistenz liegt unter den Annahmen vor, dass erstens für alle Sensoren vom Zeitpunkt der Messung bis zur tatsächlichen Verfügbarkeit des Signals im Steuergerät annähernd dieselbe Zeitspanne verstreicht und zweitens alle Signale auch immer zum Zeitpunkt ihrer Aktualisierung Verwendung finden. Die Erfüllung der zweiten Konsistenzbedingung ist in **Bild 7.7a** für zwei Signale mit einer Aktualisierungsrate von 10 und 20 ms dargestellt. Immer dann, wenn beide Signale eine Aktualisierung im Sinne einer Signaländerung aufweisen, liegt Konsistenz vor. Aufgrund der Möglichkeit von Zeitüberschreitungen (vgl. Seite 84) kann jedoch der Fall auftreten, dass sich der Konsistenzzyklus verschiebt. Da das über die Festlegung der Modultaktung nicht abgebildet werden kann, wird diese Anforderung vernachlässigt. Die Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse werden aufgrund der geringen Signaländerung innerhalb von 10 ms als gering eingestuft.

Ein weiterer Anwendungsfall ist bei den Abgleichsmodulen gegeben. Sie weisen einen relativ langsamen Signalverlauf auf, der die Möglichkeit bietet, die Taktung der Module und damit die Häufigkeit der funktionalen Abarbeitung einzuschränken. Für eine gleichmäßige Auslastung des Prozessors kann neben der Taktung der Module zusätzlich ihr Aufrufzyklus gezielt variiert werden. In **Bild 7.7b** werden die Aufrufe der Abgleichsmodule Stillstand, Fahrt, Histogramm und Kompensation auf jeweils einen von immer vier Zyklen verteilt. Die verteilte Taktung der Nullpunktfehlerbestimmung wird ebenfalls für die Konfiguration K1 realisiert. Die definierten modulspezifischen Abarbeitungs- und Aufrufzyklen der Module einer ZSDA sind in **Tabelle 7.1** in der Form Abarbeitungs-/Aufrufzyklus zusammengefasst (z. B. 4/1 für einen Modulaufruf im ersten von immer vier Systemzyklen).

7.2 Funktionsumfang

Der Funktionsumfang stellt den verbleibenden Entwurfsfreiraum dar, der laut **Definition 4.1** von der Softwarearchitektur ausgespart wird. Die Funktionalität ist in den Implementierungseinheiten der untersten Ebene enthalten und wird der hierarchischen Dekomposition des Gesamtsystems entsprechend modular erläutert. Grundlage bildet die alle Module enthaltende Maximalkonfiguration K3. Ein Überblick über die Struktur der Konfigurationen ist in **Tabelle 7.1** gegeben. *Blöcke* und *Module* werden über ihre kursive Schreibweise hervorgehoben.

7.2.1 Vorberechnung

Die Module einer ZSDA werden in jedem Zyklus durch einen Aktivierungsstatus freigegeben bzw. im Fehlerfall passiviert. Das Modul *Ablaufsteuerung* ist für diese Koordination verantwortlich. Es wertet zum einen die vom Modul *Fehlerbehandlung* (siehe Block *Rückführung*)

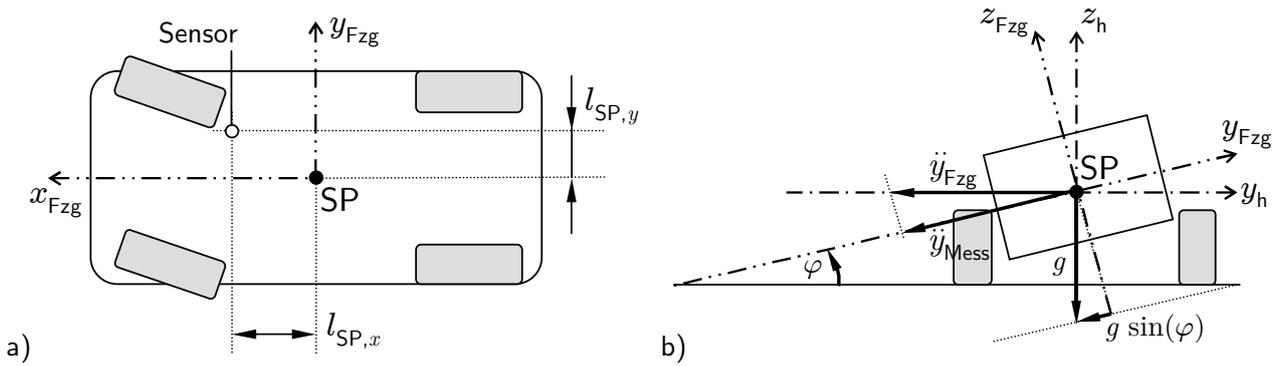


Bild 7.8: Transformation der Querschleunigung bezüglich a) der Einbaulage im Fahrzeug und b) des Wankinflusses bei Kurvenfahrt

bereitgestellten Modulstatus, zum anderen die das Zeitverhalten definierenden Parameter aus (vgl. Abschnitt 7.1.5). Der Modulaktivierungsstatus wird entsprechend **Bild 6.8** als reversibles Signal ins Statuskonzept integriert.

Das Modul *Datenkonvertierung* übernimmt die Aufgabe, das externe Datenformat der Statusgrößen an die interne Form anzupassen. In diesem Fall tragen die binär kodierten Eingangstatus je nach Belegung unterschiedliche Informationen, die mit Hilfe von Bitmasken ausgelesen werden, um sie im internen, booleschen Statusformat darzustellen.

In Abhängigkeit der Fahrzeugkonfiguration findet im Modul *Fahrzeugvarianten* eine spezifische Anpassung der Eingangsgrößen statt. Obligatorisch ist die Transformation der gemessenen Querschleunigung in den Fahrzeugschwerpunkt gemäß der Kinematik von Starrkörpern [RS08]. Einflussfaktoren sind die Gierwinkelgeschwindigkeit und die Einbaulage des Sensors in Längs- $l_{SP,x}$ und Querrichtung $l_{SP,y}$ bezüglich des Fahrzeugschwerpunktes, siehe **Bild 7.8a**:

$$\ddot{y}_{FzG} = k_{Wank} \cdot \ddot{y}_{Mess} + l_{SP,y} \cdot \dot{\psi}^2 - l_{SP,x} \cdot \ddot{\psi} \quad (7.9)$$

Durch die Wankneigung des Fahrzeugs in Kurven treten weitere Störeffekte auf. Die tatsächliche Querschleunigung y_{FzG} wird zum einen nur mit ihrer gemessenen Komponente $y_{Mess} = y_{FzG} \cdot \cos(\varphi)$ in der Wankenebene wirksam, zum anderen wird sie durch einen Anteil der Erdbeschleunigung $g \cdot \sin(\varphi)$ verfälscht, siehe **Bild 7.8b**. Um beide Effekte auszugleichen, wird die gemessene Querschleunigung mit einem Faktor k_{Wank} multipliziert. Der Faktor ist unter anderem abhängig vom Fahrwerk und der Beladung des Fahrzeugs. Der Einfluss der Transformation steigt mit zunehmenden Beträgen von Gierwinkelgeschwindigkeit und Querschleunigung und kann beispielhaft **Bild 7.9** entnommen werden. Für die Bestimmung wird daher die Messung einer stationären Kreisfahrt mit einem teilbeladenen Fahrzeug bei unterschiedlichen Querschleunigungen vorausgesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass sich die für k_{Wank} relevanten Einflussgrößen mit dem begrenzten Wankwinkel annäherungsweise linear ändern, kann für den fahrzeugrelevanten Bereich ein konstanter Faktor in der Größenordnung $k_{Wank} = [0,9 \dots 1]$ abgeleitet werden, der sich für die verwendeten Fahrzeuge zu $k_{Wank} = 0.935$ ergibt.

Des Weiteren wird eine Variante für die Audi Dynamiklenkung (vgl. Abschnitt 5.1.2) vorgehalten, um in Abhängigkeit des zusätzlich gestellten Lenkwinkels des Stellmotors und der geänderten Lenkgeometrie die Berechnung des Radlenkwinkels anzupassen.

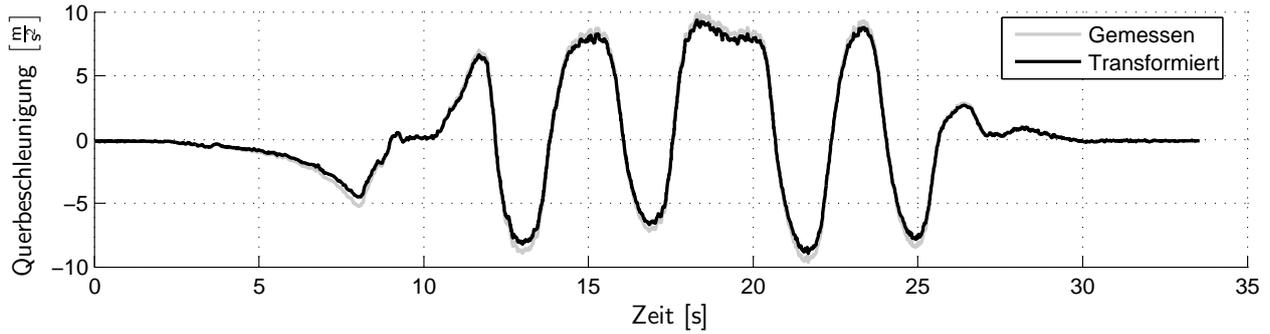


Bild 7.9: Einfluss der Transformation der gemessenen Querbeschleunigung in den Fahrzeugschwerpunkt (H9: Sinuslenken, $v_{Fzg} = [0 \dots 15] \frac{m}{s}$, $\delta = [-1, 5 \dots 1, 5] \text{ rad}$)

7.2.2 Gierwinkelgeschwindigkeit

Vorbereitung

In der Vorbereitung wird das Rauschen der einzelnen Sensorsignale im Modul *Rauschamplitude* bestimmt. Dazu wird der Betrag der Differenz der aktuellen ($y_{\text{Mess},i} - y_{\text{Mess},i-1}$) und der letzten Signaländerung ($y_{\text{Mess},i-1} - y_{\text{Mess},i-2}$) gebildet und eine einheitenbehaftete Größe erzeugt:

$$y_{\text{Rau}} = |(y_{\text{Mess},i} - y_{\text{Mess},i-1}) - (y_{\text{Mess},i-1} - y_{\text{Mess},i-2})| = |y_{\text{Mess},i} - 2y_{\text{Mess},i-1} + y_{\text{Mess},i-2}| \quad (7.10)$$

Nach einer Filterung entsteht ein Maß des Signalrauschens, das sowohl zur Signalüberwachung im Modul *Rauschen* als auch als dynamisches Qualitätsmaß verwendet wird. Alternativ könnten statt der Werte aus den vergangenen Rechenzyklen auch Hochpassfilterungen der zu überwachenden Größe eingesetzt werden.

Abgleich und Kompensation

Der Abgleich der Gierwinkelgeschwindigkeit wird nach drei Methoden durchgeführt. Das Modul *Stillstand* ist für die Nullpunktfehlerbestimmung in einem stehenden Fahrzeug zuständig (vgl. Abschnitt 3.3.1, Seite 25). Dazu wird die Stillstandsinformation des gleichnamigen Moduls im Block *Fahrzustand* eingelesen. Bei Erfüllung der Bedingungen ist davon auszugehen, dass der aktuell gemessene Wert der Gierwinkelgeschwindigkeit dem anliegenden Nullpunktfehler entspricht. Die Bestimmung erfolgt über ein Filterglied. Die Nullpunktfehlertoleranz, die beim vom Hersteller spezifizierten maximalen Fehlerwert $\psi_{\text{Np,max}}$ startet (vgl. **Tabelle A.1**), wird gleichzeitig und gleichförmig in Richtung des Abstandes des kompensierten Sensorwertes von null verringert. Die Toleranz kann damit bei einer ansteigenden Differenz auch anwachsen. Da der Abgleichstyp während der Fahrt nicht verfügbar ist, wird die Toleranz in diesem Fall langsam erhöht, um möglichen Änderungen des Nullpunktfehlers (z. B. durch Temperatureinflüsse, Alterung) Rechnung zu tragen.

Das Modul *Fahrt* übernimmt die Nullpunktfehlerbestimmung ausschließlich bei Überschreitung einer Mindestgeschwindigkeit gemäß der Stillstandserkennung. Nach Abschnitt 3.3.1 (Seite 27) wird aus Sensorsignalen, die neben der Gierwinkelgeschwindigkeit zur Verfügung stehen, über analytische Redundanz eine Referenzgröße gebildet. Um die Qualität der verwendeten Modellgrößen zu maximieren, werden Zulassungsbedingungen definiert. Die Querbeschleunigung wird auf einen Maximalwert sowie die Differenz der für den Abgleich ver-

wendeten Modellgrößen aus dem adaptiven Einspurmodell nach Gleichung (2.8) und (2.9), der Querbeschleunigung nach Gleichung (2.13) und den Hinterachsradschwindigkeiten nach Gleichung (2.19) auf eine maximale Abweichung voneinander begrenzt. Sind die Zulassungsbedingungen erfüllt, wird aus dem Minimal- und Maximalwert der Modellgrößen ein Band aufgespannt. Solange sich die mit dem aktuellen Nullpunktfehler kompensierte Messgröße innerhalb der Bandgrenzen befindet, bleibt der aktuelle Wert des Nullpunktfehlers erhalten. Liegt die kompensierte Messgröße dagegen außerhalb dieses Bandes, wird der neue Nullpunktfehler mittels einer Filterung derart angepasst, dass die kompensierte Größe wieder ins Band verschoben wird. Die Toleranz ergibt sich dagegen aus einer Filterung mit identischer Zeitkonstante vom spezifizierten maximalen Nullpunktfehler in Richtung der Summe der aktuellen Bandbreite der Modellgrößen und dem eventuell vorhandenen Abstand der kompensierten Messgröße vom Band. Sind die Bedingungen für einen Fahrtableich nicht gegeben, wächst die Toleranz langsam an, während der Nullpunktfehler konstant gehalten wird.

Der Histogrammansatz ermittelt den Nullpunktfehler ebenfalls mittels Eigenreferenz nach Abschnitt 3.3.1 (Seite 25), jedoch ist das Modul *Histogramm* sowohl während der Fahrt als auch im Stillstand aktiv. Der durch den maximal möglichen Nullpunktfehler $\dot{\psi}_{Np,max}$ vorgegebene Messbereich wird in N einzelne Intervalle nach **Bild 3.5** eingeteilt. Die aktuell gemessene Gierwinkelgeschwindigkeit wird in jedem Zyklus in das zugehörige Intervall einsortiert. Die Anzahl der Messpunkte innerhalb eines Intervalls wird über einen Zahlenwert $z_n \in [0 \dots 1]$ mit $n = 1, 2 \dots N$ beschrieben. Je stärker sich der Zahlenwert Eins annähert, desto mehr Messpunkte fielen bisher in das Intervall. Sowohl Anstieg (im Fall eines zusätzlichen Messpunktes im korrespondierenden Intervall) als auch Abstieg (andernfalls) des Zahlenwertes z_n erfolgen verzögert über einen Filter erster Ordnung. Der Abstieg ist gegenüber dem Anstieg um einen konstanten Faktor verlangsamt, um den Nullpunktfehler beispielsweise bei Kurvenfahrten nicht zu verlernen. Der Mittelwert einer definierten Anzahl von m Intervallen mit den höchsten „Füllständen“ ergibt den Nullpunktfehler, der zur Vermeidung von Sprüngen wiederum gefiltert wird. Die zugehörige Toleranz ergibt sich aus einer Filterung mit identischer Zeitkonstante ausgehend vom spezifizierten maximalen Nullpunktfehler $\dot{\psi}_{Np,max}$. Als Sollwert der Filterung ist ein Maß für die Qualität des aktuellen Nullpunktfehlers notwendig. Dieses wird aus den definierten m Intervallen mit den höchsten Füllständen gewonnen, indem die Differenz der zugehörigen minimalen und maximalen Gierwinkelgeschwindigkeit ausgewertet wird.

Das Modul *Kompensation* bildet aus den drei einzeln berechneten Nullpunktfehlern $\dot{\psi}_{Np,n}$ einen Gesamtwert $\dot{\psi}_{Np}$. Der Einfluss der N Abgleichstypen wird gemäß einer über die Toleranzen $\dot{\psi}_{Np,Tol,n}$ gewichteten Mittelwertbildung nach [BSMM01] berücksichtigt, indem eine kleinere Toleranz einen stärkeren Einfluss auf das Gesamtergebnis bewirkt. Die Nullpunktfehlertoleranz $\dot{\psi}_{Np,Tol}$ wird äquivalent aus den Einzeltoleranzen $\dot{\psi}_{Np,Tol,n}$ bestimmt:

$$\dot{\psi}_{Np,(Tol)} = \sum_{n=1}^N \dot{\psi}_{Np,(Tol),n} \cdot \left(\frac{\dot{\psi}_{Np,max} - \dot{\psi}_{Np,Tol,n}}{\dot{\psi}_{Np,Tol,max}} \right) \quad (7.11a)$$

$$\text{mit } \dot{\psi}_{Np,Tol,max} = N \cdot \dot{\psi}_{Np,max} - \sum_{n=1}^N \dot{\psi}_{Np,Tol,n} \quad (7.11b)$$

Signalbasierte Überwachungen

Wertebereichsüberprüfungen (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 29) als klassische Form der signalbasierten Überwachung sind nicht explizit in dieser Gliederungsebene zu finden. Stattdes-

sen finden sie an jeder Modulschnittstelle im Zuge der eigensicheren Module statt (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 78).

Die Überprüfung auf unzulässige Signaländerungen wird im Modul *Gradient* auf Basis der zeitlichen Ableitung des Signals vorgenommen. Bei Überschreitung einer Schwelle wird ein Fehler gesetzt. Ein Sonderfall liegt vor, wenn im aktuellen Zyklus eine Doppelabtastung vorliegt (vgl. Abschnitt 6.2.3, Seite 84). Dann wird die Fehlerschwelle aufgrund von möglicherweise zwei aufeinander folgenden, maximalen Gradienten verdoppelt.

Das Modul *Langzeitabgleich* überwacht, dass von keinem Abgleich der Maximalwert des Nullpunktfehlers nach **Tabelle A.1** überschritten wird. Es steht in direktem Kontakt mit den den Nullpunktfehler bestimmenden Modulen *Stillstand*, *Fahrt* und *Histogramm*. Äquivalent funktioniert das Modul *Rauschen* bezüglich des maximalen Signalrauschens eines Sensors, welches vom Modul *Rauschamplitude* in der Vorberechnung des Blocks *Gierwinkelgeschwindigkeit* bestimmt wird.

Redundanzbasierte Überwachungen

Die Differenz der redundanten Sensorsignale wird im Modul *Abweichung* in zwei Stufen ausgewertet. Zunächst wird die Redundanzabweichung $y_{\text{Abw,Red}}$ aus dem Betrag der halben Differenz der abgeglichenen Messgrößen $y_{\text{Mess},\langle 1,2 \rangle}$ gebildet und entspricht dem Abstand des Mittelwertes der redundanten Signale vom Band, das durch die Messgrößen aufgespannt wird. Reduziert wird die Differenz um den Mittelwert der Rauschamplituden $y_{\text{Rau},\langle 1,2 \rangle}$ nach Gleichung (7.10), um Abweichungen aufgrund von Signalrauschen auszuschließen:

$$y_{\text{Abw,Red}} = \left| \frac{y_{\text{Mess},1} - y_{\text{Mess},2}}{2} \right| - \left(\frac{y_{\text{Rau},1} + y_{\text{Rau},2}}{2} \right) \quad (7.12)$$

Überschreitet die Redundanzabweichung einen ersten Schwellwert zum Zeitpunkt t_0 , wird nicht sofort ein Fehler erkannt, sondern die Berechnung eines Fehlerintegrals der Redundanzabweichung $Y_{\text{Abw,Red}}$ gestartet. Aus Gründen der Robustheit wird die Redundanzabweichung zur Berücksichtigung des Abgleichsfortschritts um den Mittelwert der Nullpunktfehlertoleranzen $y_{\text{Np,Tol},\langle 1,2 \rangle}$ sowie aufgrund des fehlenden Empfindlichkeitsabgleichs um das Produkt aus der maximal möglichen Empfindlichkeitsabweichung $r_{\text{Em,max}}$ und dem Betrag des Nutzsignals y_{Nutz} reduziert:

$$Y_{\text{Abw,Red}} = \int_{t_0}^{t_1} y_{\text{Abw,Red}} - \left(\frac{y_{\text{Np,Tol},1} + y_{\text{Np,Tol},2}}{2} + r_{\text{Em,max}} \cdot |y_{\text{Nutz}}| \right) dt \quad (7.13)$$

Die Berechnung des Integrals erfolgt so lange, bis die Redundanzabweichung die erste Schwelle wieder unter- oder bis das Fehlerintegral eine zweite Schwelle überschreitet.

Zusätzlich wird im Modul *Abweichungsgradient* die Änderung der Abweichung der Sensorsignale geprüft. Grundlage bildet der Betrag der Differenz der Sensorrohsignale aus dem aktuellen ($y_{\text{Mess},1,i} - y_{\text{Mess},2,i}$) und dem vorausgegangenen Zyklus ($y_{\text{Mess},1,i-1} - y_{\text{Mess},2,i-1}$). Im Gegensatz zur Bestimmung der Redundanzabweichung nach Gleichung (7.12) sowie (7.13) wird der Einfluss der einzelnen Messgrößen nicht durch eine Mittelwertbildung halbiert, sondern kann sich für beide Messgrößen voll auswirken. Aus Robustheitsgründen wird die Differenz wiederum um den maximalen Empfindlichkeitsfehler reduziert, der sich aus dem Betrag der Änderung des kompensierten Nutzsignals y_{Nutz} berechnet und in diesem Fall einmal pro Sensorsignal berücksichtigt werden muss. Auch der Einfluss von Hochfrequenzrauschen wird

über die Rauschamplituden $y_{\text{Rau},(1,2)}$ berücksichtigt. Aufgrund der relativen Signaländerung ist der Einfluss des Nullpunktfehlers zu vernachlässigen:

$$y_{\text{Grd,Red}} = |(y_{\text{Mess},1,i} - y_{\text{Mess},2,i}) - (y_{\text{Mess},1,i-1} - y_{\text{Mess},2,i-1})| - 2 r_{\text{Em,max}} \cdot |y_{\text{Nutz},i} - y_{\text{Nutz},i-1}| - (y_{\text{Rau},1} + y_{\text{Rau},2}) \quad (7.14)$$

Bei Überschreitung einer definierten Schwelle wird ein Fehler direkt erkannt. Liegt im aktuellen oder im vorangegangenen Zyklus eine Doppelabtastung für eine der Messgrößen vor, wird die Schwelle verdoppelt.

Die dritte Möglichkeit der Überwachung der redundanten Sensorsignale findet im Modul *Statistik* statt. Das Vorgehen ist vollständig in Abschnitt 3.3.2 (Seite 36) beschrieben. Die Schwelle der statistischen Redundanzabweichung nach Gleichung (3.29) wird in beiden möglichen Varianten berechnet und der Minimalwert bei der Bewertung der Abweichung berücksichtigt. Für die Gierwinkelgeschwindigkeit wird der Ansatz erweitert, da eine Nullpunktfehlerbestimmung verfügbar ist. Statt der Berücksichtigung des nach der Sensorspezifikation maximal möglichen Nullpunktfehlers $\psi_{\text{Np,max}}$ wird die aktuelle Nullpunktfehlertoleranz $\psi_{\text{Np,Tol},(1,2)}$ für die Berechnung der dynamischen Fehlerschwelle berücksichtigt. Auf diese Weise kann die Schwelle bei erfolgreich durchgeführtem Abgleich gesenkt und die Empfindlichkeit gegenüber Sensorfehlern erhöht werden.

Nutzsignalschnittstelle

Die Nutzsignalgenerierung erfolgt im Modul *Nutzsignal* und ist abhängig von der aktuell verfügbaren Sensorbasis und wird in den Gleichungen (7.1) für die Schnittstellenvariante S3 und (7.2) für Konzept S4 zusammengefasst (vgl. Abschnitt 6.1.1, Seite 70). Äquivalent erfolgt die Bereitstellung der Nutzsignalgüte anhand der Gleichungen (7.3) bzw. (7.4) und die Statusbelegung gemäß **Tabelle 7.3**.

7.2.3 Querbeschleunigung

Der Block für die *Querbeschleunigung* weist wie alle sensorspezifischen Blöcke die gleiche Struktur wie die *Gierwinkelgeschwindigkeit* auf. Die Nullpunktfehlerabgleiche sind im Gegensatz zur Gierwinkelgeschwindigkeit nicht implementiert, da sie keinen Erkenntnisgewinn für das Konzept einer ZSDA erbringen. Bei einigen Modulen wie denen zur signal- und redundanzbasierten Überwachung kommen Bibliotheken zum Einsatz, die auch vom Block *Gierwinkelgeschwindigkeit* genutzt werden (vgl. **Tabelle 7.2**).

7.2.4 Fahrzustand

Der Block *Fahrzustand* fasst die die aktuelle Fahrsituation beschreibenden Kenngrößen zusammen. Ein stehendes Fahrzeug wird über das Modul *Stillstandserkennung* detektiert und dient der Freischaltung des Stillstandsabgleichs im Block *Gierwinkelgeschwindigkeit*. Der Stillstand wird primär auf Basis der Radgeschwindigkeiten (mindestens ein Rad muss verfügbar sein) sowie einer korrespondierenden Maximalgeschwindigkeitsschwelle bestimmt. Zur Absicherung von Situationen, bei denen das Fahrzeug zwar steht, sich aber weiterhin bewegt (z. B. auf einer Drehplatte oder einer Fähre), wird sowohl die Gierwinkelgeschwindigkeit als auch

ihr aktueller Gradient auf Maximalschwellen abgefragt (vgl. Ausführungen zum Nullpunktfehlerabgleich im Stillstand in Abschnitt 3.3.1, Seite 25). Die Bedingungen müssen für eine definierte Zeitspanne erfüllt sein, damit der Stillstand sicher erkannt wird.

Aus der als gegeben angenommenen Fahrzeuflängsgeschwindigkeit wird im Modul *Längsbeschleunigung* durch Bildung der zeitlichen Ableitung die Beschleunigung des Fahrzeugs berechnet.

Zur Verbesserung des klassischen Einspurmodells nach Abschnitt 2.2.2 werden in den Modulen *Basis Gierwinkelgeschwindigkeit* bzw. *Querbeschleunigung* die Schräglaufsteifigkeiten adaptiv auf Basis von Lenkradwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Querbeschleunigung bzw. Gierwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der zu bestimmenden Modellgröße ermittelt. Beispielsweise bildet die Querbeschleunigung die Eingangsgröße der Schätzgleichung, wenn eine Modellgierwinkelgeschwindigkeit bereitgestellt werden soll. Als Voraussetzung für die Schätzgleichung werden der Schwimmwinkel nach Gleichung (2.8), die Seitenkräfte für Vorder- und Hinterachse gemäß den Gleichungen (2.10) und (2.11) sowie die Schräglaufwinkel nach Gleichung (2.6) bestimmt. Anschließend wird die Schätzung der Schräglaufsteifigkeiten gemäß Gleichung (3.14) in jedem Zeitschritt erneut durchgeführt, nachdem der Korrekturvektor mit Gleichung (3.15) und die Kovarianzmatrix mit Gleichung (3.16) berechnet wurden. Die adaptiven Schräglaufsteifigkeiten der Hinter- und Vorderräder $\hat{c}_{\alpha,\langle h,v \rangle}$ werden relativ zur bekannten, konstant angenommenen Schräglaufsteifigkeit $c_{\alpha,\langle h,v \rangle}$ auf Werte im Intervall $0,5 \cdot c_{\alpha,\langle h,v \rangle} \leq \hat{c}_{\alpha,\langle h,v \rangle} \leq 1,5 \cdot c_{\alpha,\langle h,v \rangle}$ begrenzt. Zusätzlich kann eine maximale Änderungsrate für die Steifigkeiten hinterlegt werden.

7.2.5 Modellgrößen

Vorbereitung

Die Qualität der Modellgrößen ist durch die zugrunde liegende, vereinfachte Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge von Fahrdynamikgrößen beschränkt (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 37). Um die Aussagekraft der Modelle zu erhöhen, werden in [Bau08] für jede Größe Zulassungsbedingungen definiert, die den gültigen Bereich der Modellierung kennzeichnen, siehe **Tabelle 7.5**. Die Bedingungen enthalten klassische Einteilungen gemäß dem Betrag der Querbeschleunigung, Beschränkungen für den Lenkwinkel- bzw. Radgeschwindigkeitsgradienten, um hochdynamische Fahrmanöver auszuschließen, sowie Abfragen der aktuellen Fahr-situation gemäß Beziehung (2.20). Im Modul *Zulassungsbedingungen* werden die notwendigen

Tabelle 7.5: Zulassungsbedingungen der Modellgierwinkelgeschwindigkeiten, angelehnt an [Bau08]

Modell		Zulassungsbedingungen					
Ansatz	$\dot{\psi} =$	Gleichung	$ \ddot{y}_{Fzg} $	$ \frac{d\delta_v}{dt} $	$\frac{d\delta_v}{d\dot{y}_{Fzg}}$	$ v_{Fzg} $	$ \frac{dv_{\langle h,v \rangle \langle l,r \rangle}}{dt} $
Geometrisch	$f(\ddot{y}_{Fzg}, v)$	(2.13)	$\leq 6 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0,3 \frac{rad}{s}$	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	—
Geometrisch	$f(\delta_v, v)$	(2.14)	$\leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0,3 \frac{rad}{s}$	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	—
Geometrisch	$f(v_{vl}, v_{vr})$	(2.19)	$\leq 4 \frac{m}{s^2}$	—	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	$\leq 6 \frac{m}{s^2}$
Geometrisch	$f(v_{hl}, v_{hr})$	(2.19)	$\leq 5 \frac{m}{s^2}$	—	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	$\leq 6 \frac{m}{s^2}$
Einspurmod.	$f(\delta_v, v)$	(2.8)-(2.9)	$\leq 4 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0,3 \frac{rad}{s}$	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	—
Einspurmod.	$f(\delta_v, v, \ddot{y}_{Fzg})$	(3.14)-(3.16)	$\leq 6 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0,3 \frac{rad}{s}$	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	—
SALM	$f(\delta_v, v, \ddot{y}_{Fzg})$	(3.25)	$\leq 6 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0,3 \frac{rad}{s}$	$\geq 0 \frac{rad \cdot s^2}{m}$	$\geq 0,5 \frac{m}{s}$	—

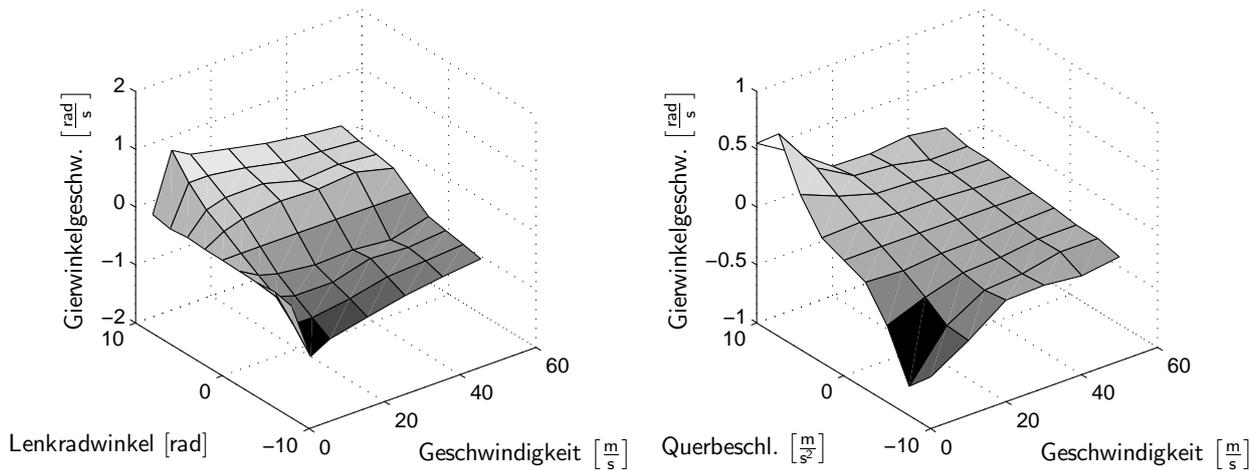


Bild 7.10: Kennfelder zur Bestimmung der Gierwinkelgeschwindigkeit nach dem SALM-Ansatz

Kriterien überprüft und für jede Modellgröße ein Status generiert, der über die Gültigkeit der korrespondierenden Modellgröße Auskunft gibt. Um die Verfügbarkeit der einzelnen Modelle zu erhöhen, werden die Zulassungsbedingungen ausschließlich auf Basis der Eingangsgrößen der einzelnen Modelle gebildet. Zur Überprüfung des Maximalwertes der Querbeschleunigung wird diese beispielsweise aus den ohnehin genutzten Größen wie der Gierwinkelgeschwindigkeit nach Gleichung (2.13) oder den Raddrehzahlen gemäß den Gleichungen (2.19) und (2.13) bestimmt.

Bereitstellung der Modellgrößen

Die Berechnung der nach Abschnitt 6.2.2 (Seite 81) zugrunde gelegten Modellgrößen wird auf mehrere Module verteilt. Das Modul *Geometrische Modelle* bestimmt Modellgrößen unter der Annahme eines linearen Fahrzeugverhaltens aus Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. Querbeschleunigung für eine gleichförmige Kreisbewegung nach Beziehung (2.13), aus dem Lenkwinkel nach Gleichung (2.14) sowie den Raddrehzahlen einer Achse anhand der Gleichung (2.19).

Die Berechnung der Fahrzeugkenngrößen nach dem *Einspurmodell* erfolgt im gleichnamigen Modul anhand der Bewegungsgleichungen (2.8) und (2.9). Im Gegensatz zum klassischen Ansatz verwenden die adaptiven Einspurmodelle in den Modulen *Basis Gierwinkelgeschwindigkeit* bzw. *Querbeschleunigung* die in den identisch bezeichneten Modulen im Block *Fahrzustand* geschätzten Schräglaufsteifigkeiten.

Der im Rahmen des Standes der Technik zur Fehlererkennung beschriebene SALM-Ansatz (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 33) wird im Modul *Künstliche neuronale Netze* in Form von Kennlinien und -feldern umgesetzt. Entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Modellgröße haben die Trainingsdaten. Aussagekräftige Ergebnisse werden für den abgedeckten Wertebereich der Eingangsdaten erzielt. Über den Wertebereich hinaus ist dem Ansatz lediglich die Adaption der Eingangsinformationen möglich. Idealerweise liegen alle Messgrößen über ihren Wertebereich gleichmäßig verteilt vor, um eine Gewichtung zugunsten eines Teilbereiches auszuschließen. Es zeigt sich jedoch, dass die angestrebte Gleichverteilung nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren ist, so dass beispielsweise eine Fokussierung in Richtung einer Geradeausfahrt – der häufigsten Fahrsituation – toleriert wird. Das Ziel der Gleichverteilung wird jedoch durch die Spiegelung der Eingangsdaten und ein auf diese Weise angenommenes, ideal sym-

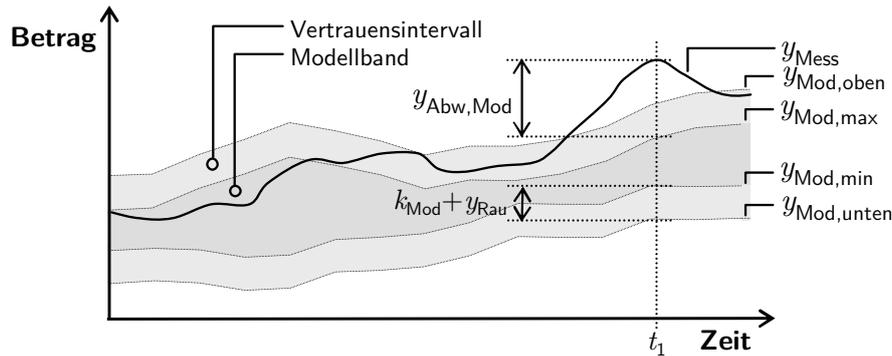


Bild 7.11: Bildung des Toleranzbandes bei modellbasierter Überwachung

metrisches Fahrverhalten unterstützt. In **Bild 7.10** sind die Kennfelder zur Bestimmung der Gierwinkelgeschwindigkeit auf Basis des Lenkradwinkels δ , der Querbewegungsbeschleunigung \ddot{y}_{Fzg} und der Geschwindigkeit v_{Fzg} dargestellt. In beiden Kennfeldern $(v_{Fzg}, \delta, \hat{\psi}_1)$ und $(v_{Fzg}, \ddot{y}_{Fzg}, \hat{\psi}_2)$ ist die künstlich erzeugte Symmetrie bezüglich der Mittelachse $(v_{Fzg}, 0, 0)$ ersichtlich. Die Teileinflüsse $\hat{\psi}_{(1,2)}$ werden zur Bestimmung des Gesamtergebnisses $\hat{\psi}_{SALM}$ addiert:

$$\hat{\psi}_{SALM} = \hat{\psi}_1(v_{Fzg}, \delta) + \hat{\psi}_2(v_{Fzg}, \ddot{y}_{Fzg}) \quad (7.15)$$

Bei der Auslegung der Kennlinien und -felder ist darauf zu achten, dass keine Kompensationseffekte auftreten. Diese führen dazu, dass in einer Fahrsituation das Ergebnis eines Teileinflusses durch das betragsmäßig gleiche, aber mit umgekehrten Vorzeichen behaftete Ergebnis eines zweiten Einflusses eliminiert und die physikalische Interpretierbarkeit eingeschränkt wird.

Modellbasierte Überwachungen

Der Kern der Modellüberwachung ist ein Vertrauensintervall auf Basis der Modellgrößen, das den gültigen Bereich für das Sensorsignal definiert. Neben den sieben verfügbaren Modellgrößen wird auch der zu überwachende Sensor in die Bildung des Bandes einbezogen, da die Wahrscheinlichkeit eines den Sensor umschließenden Bandes und damit die Robustheit der Vorgehensweise erhöht wird. Auf diese Weise lässt sich vor allem auf Niedrigreißwert, wenn der Radlenkwinkel oftmals nicht die Fahrzeugbewegung widerspiegelt, eine robustere Fehlererkennung realisieren. Einen negativen Einfluss auf die Fehlererkennung hat diese Vorgehensweise nicht, da sichergestellt wird, dass im Fall eines fehlerhaften Sensorsignals über die Auswahllogik eine Fehlererkennung ausschließlich über die Modelle erfolgt.

Wenn mindestens fünf Größen – darunter kann sich bereits das Sensorsignal befinden – und das zu überwachende Signal verfügbar sind, wird die modellbasierte Überwachung im Modul *Sensor 1* bzw. bei redundanter Sensorik auch in *Sensor 2* aktiviert. Aus diesen Signalen werden alle Kombinationen mit jeweils vier ausgewählten Größen bewertet, indem die aktuelle Bandbreite, d. h., der Betrag des Abstandes des größten vom kleinsten Signal, bestimmt wird. Aus der Menge der Kombinationen wird diejenige ausgewählt, die im Sinne einer vertrauensvollen Aussage die kleinste Bandbreite aufweist. Modelle mit eingeschränkter Qualität oder ein fehlerhafter Sensor werden auf diese Weise vernachlässigt, sofern ihr Betrag von den anderen Größen abweicht. Die ausgewählte Kombination bilden ein Band, dessen Grenzen $y_{Mod,(\min,max)}$ mit Hilfe des Parameters k_{Mod} und der Rauschamplitude y_{Rau} zum Vertrauensintervall $y_{Mod,(\unten,oben)}$ aufgeweitet werden, siehe **Bild 7.11**. Die Modellabweichung $y_{Abw,Mod}$

stellt die Abweichung vom Modellband dar, sofern der Sensor y_{Mess} außerhalb des Vertrauensintervalls liegt:

$$y_{\text{Abw,Mod}} = \begin{cases} y_{\text{Mess}} - y_{\text{Mod,max}} & \text{wenn } y_{\text{Mod,oben}} < y_{\text{Mess}} \\ 0 & \text{wenn } y_{\text{Mod,unten}} \leq y_{\text{Mess}} \leq y_{\text{Mod,oben}} \\ y_{\text{Mod,min}} - y_{\text{Mess}} & \text{wenn } y_{\text{Mess}} < y_{\text{Mod,unten}} \end{cases} \quad (7.16a)$$

$$\text{mit } y_{\text{Mod,oben}} = (y_{\text{Mod,max}} + k_{\text{Mod}} + y_{\text{Rau}}) \quad (7.16b)$$

$$y_{\text{Mod,unten}} = (y_{\text{Mod,min}} - k_{\text{Mod}} - y_{\text{Rau}}) \quad (7.16c)$$

Verlässt das Sensorsignal das Vertrauensintervall, wird der Abstand zwischen Sensorsignal und der nächstgelegenen Bandgrenze $y_{\text{Abw,Mod}}$ unter Berücksichtigung der Nullpunktfehlertoleranz $y_{\text{Np,Tol}}$ und des Betrages des möglichen Empfindlichkeitsfehlers $r_{\text{Em,max}} \cdot |y_{\text{Mess}}|$ aufintegriert:

$$Y_{\text{Abw,Mod}} = \int_{t_0}^{t_1} y_{\text{Abw,Mod}} - (y_{\text{Np,Tol}} + r_{\text{Em,max}} \cdot |y_{\text{Mess}}|) dt \quad (7.17)$$

Bewegt sich das Sensorsignal zurück in das Vertrauensintervall, wird das Integral auf null zurückgesetzt. Andernfalls wird beim Erreichen einer Schwelle ein Fehler erkannt. Das Vorgehen ähnelt der Überwachung der Redundanzabweichung gemäß den Gleichungen (7.12) und (7.13).

7.2.6 Rückführung

Das Modul *Fehlerbehandlung* verantwortet wie in Abschnitt 7.1.4 beschrieben die Auswertung der Modulstatus. Grundlage bilden die aus der Vernetzungsdatenbank generierten Signalfflussinformationen, die Auskunft über die Fehlerfortpflanzung geschädigter Module geben. Die Passivierung erfolgt über das Modul *Ablaufsteuerung* (siehe Block *Vorbereitung*). Im Block *Rückführung* befindet sich des Weiteren die oberste Ebene der Signalverzögerungsmodule (vgl. Abschnitt 6.1.3, Seite 77).

7.3 Zusammenfassung

Um im folgenden Kapitel eine Validierung des Konzepts der ZSDA vornehmen zu können und seine Anwendbarkeit zu demonstrieren, wird das entworfene Konzept aus Kapitel 6 zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem weiterentwickelt. Dieses kann variabel in unterschiedlichen Konfigurationen bzw. Funktionsumfängen betrieben werden und setzt somit die Forderung nach Skalierbarkeit um. Auf diese Weise wird zum einen eine schnelle Anpassung an das Zielfahrzeug bzw. auch das parallele Entwickeln unterschiedlicher Konfigurationen ermöglicht. Zum anderen dient das in der Vernetzungsdatenbank hinterlegte Wissen über den internen Signalffluss und die Verkettung der Module der Fehlerbehandlung bei internen Fehlern, wie z. B. bei Abweichungen zwischen Haupt- und diversitärer Implementierung.

Einen zusätzlichen Freiheitsgrad stellt die individuelle Skalierung der Taktung einzelner Module dar, die eine variable Anpassung des Ressourcenbedarfs der ZSDA bei der Integration auf unterschiedliche Steuergeräte ermöglicht. Darüber hinaus wird gezeigt, dass die Adaption der zykluszeitabhängigen Modulparameter in Abhängigkeit des Verhältnisses von Systemzykluszeit zu Filterzeitkonstante zur Einsparung von Entwicklungsaufwand automatisiert erfolgen kann.

Die Implementierung wird gemäß dem erarbeiteten Konzept vervollständigt und unter anderem der Entwurf des SALM-Ansatzes für die Bestimmung von Gierwinkelgeschwindigkeit und Querschleunigung realisiert. Anhand der sich ergebenden Kennfelder wird der zugrunde liegende Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen visualisiert und für den Entwickler ähnlich einer mathematischen Gleichung bewertbar. Das ermöglicht die Übertragbarkeit des auf neuronalen Netzen basierenden Ansatzes auf neue Anwendungsgebiete, vor allem in sicherheitsrelevanten Bereichen. Über die Modellüberwachungen kann der Ansatz Einfluss auf die Fehlererkennung und damit auf die Nutzschnittstelle nehmen, für die exemplarisch die beiden Schnittstellenkonzepte S3 und S4 realisiert sind (vgl. **Bild 6.1**).

Die Fehlerbehandlung externer Fehler stellt sicher, dass diese sicher erkannt werden und das betroffene Signal innerhalb der ZSDA keine Verwendung mehr findet, aber auch für den Regler eine Kennzeichnung über Nutzschnittstellenstatus und -güte erfolgt. Letztere ist der Schlüssel für eine Entkopplung der ZSDA von den Signalanforderungen einzelner Regler und schafft die Grundlage für die Versorgung unterschiedlicher Regelsysteme mit Signalen.

Die Maximalkonfiguration K3 enthält trotz des eingeschränkten Funktionsumfangs 52 Module, von denen sich aber nur 29 über ihre Implementierung unterscheiden (K1: 26 von 33, K2: 10 von 23, vgl. **Tabelle 7.1** und **7.2**). Die Differenz wird über die Wiederverwendung von einzelnen Implementierungseinheiten ermöglicht, um eine Minimierung von Spezifikations-, Entwicklungs- und Testaufwand zu realisieren. Im Gegensatz dazu müssen für sechs Module, die in mehreren Konfigurationen zum Einsatz kommen, Varianten generiert werden, da sich entweder die Schnittstellengrößen ändern oder funktionale Anpassungen aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen vorgenommen werden. Das Entstehen von Varianten einzelner Implementierungsteile ist für ein skalierbares System wie die ZSDA unvermeidlich. Ziel muss es sein, die Zahl der betroffenen Module so gering wie möglich zu halten. Resultat ist ein in drei unterschiedlichen Konfigurationen zu betreibendes Gesamtsystem.

8 Bewertung des Konzepts einer zentralen Signaldatenaufbereitung

Nach der Implementierung muss die zentrale Signaldatenaufbereitung (ZSDA) umfassend analysiert und als Gesamtsystem beurteilt werden. Zu diesem Zweck werden die erhobenen und dem Entwurf zugrunde liegenden funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen gemäß **Tabelle 5.2** auf den Grad ihrer Erfüllung untersucht. Für eine bessere Übersicht sind in **Tabelle 8.1** die Anforderungen zu einzelnen Bewertungsschritten, deren Realisierung abschnittsweise untersucht wird, zusammengefasst. Ausgangspunkt ist die Betrachtung der Nullpunktfehlerbestimmung der Gierwinkelgeschwindigkeit, der sich die Analyse der signal-, modell- und redundanzbasierten Überwachungen anschließt. Die unterschiedlichen Fehlererkennungsverfahren werden zunächst separat beurteilt, um abschließend eine gesamtheitliche

Tabelle 8.1: Zuordnung der Anforderungen an eine zentrale Signaldatenaufbereitung zu den einzelnen Bewertungsschritten dieses Kapitels (*Legende: ■ - Anforderung berücksichtigt, □ - unberücksichtigt*)

Seite	Anforderung	Zuordnung						
62	Sensorbasis	□	□	□	□	□	□	■
62	Erweiterbarkeit	□	□	□	□	□	■	□
62	Signalgenauigkeit	■	■	■	□	■	□	□
63	Sensorgenauigkeit	■	■	■	□	□	□	□
63	Nullpunktfehler	■	□	■	□	□	□	□
63	Signalgüte	□	□	□	□	■	□	□
63	Überwachung der Sensoren	□	■	■	□	■	□	□
63	Standardisierte Schnittstelle	□	□	□	□	■	□	□
64	Anforderungsbasierte Nutzsignale	□	□	□	□	■	□	□
64	Rekonfiguration	□	□	□	□	■	□	□
64	Skalierbarkeit	□	□	□	■	□	□	□
64	Modularität	□	□	□	□	□	■	□
65	Spezifizier- und Testbarkeit	□	□	□	□	□	■	□
65	Zeitverhalten	□	□	□	■	□	□	□
65	Hardwareplattform	□	□	□	□	□	□	■
65	Integrierbarkeit	□	□	□	□	□	■	□
65	Einheitlichkeit	□	□	□	□	□	■	□
65	Trennung der Zuständigkeiten	□	□	□	□	□	■	□
65	Applizierbarkeit	□	□	□	□	□	■	□
65	Sicherheit	■	■	■	■	■	□	□
Seite	Bewertungsschritt	:	:	:	:	:	:	:
114	Nullpunktfehlerbestimmung	:	:	:	:	:	:	:
117	Fehlererkennungsmethoden	:	:	:	:	:	:	:
131	Einfluss von Abgleichen auf Fehlererk.	:	:	:	:	:	:	:
132	Reduzierte Taktung einzelner Funktionen	:	:	:	:	:	:	:
133	Fehlerbehandlung	:	:	:	:	:	:	:
138	Nicht-funktionale Anforderungen	:	:	:	:	:	:	:
140	Unbewertete Anforderungen	:	:	:	:	:	:	:

und vergleichende Bewertung vorzunehmen. Der Abschnitt über die Modellüberwachungen ist um die Bewertung der Qualität der bereitgestellten Modellgrößen erweitert.

Da die drei verwendeten Konfigurationen der ZSDA unterschiedliche Schwerpunkte bezüglich ihres Funktionsumfang setzen, werden weitere Ergebnisse bezüglich des Einflusses von Signalabweichungen auf Überwachungen abgeleitet. Anschließend werden Auswirkungen reduzierter zeitlichen Taktungen einzelner Module analysiert. Es folgt eine Auseinandersetzung mit der umgesetzten Behandlung von internen und externen Fehlern, die um die Bewertung der Nutzschnittstelle zwischen ZSDA und Regelsystemen erweitert ist. Abgeschlossen wird mit einer Beurteilung der nicht-funktionalen Anforderungen sowie einem Vergleich der zentralen mit einer konventionellen Signaldatenaufbereitung. Den Bewertungen vorangestellt ist eine Beschreibung der zugrunde gelegten Versuchsumgebung.

8.1 Versuchsaufbau

Grundlage der Bewertung der ZSDA bildet der Versuchsaufbau. Neben den verwendeten Fehlermodellen wird im Folgenden auf die zugrunde gelegten Versuchsfahrzeuge und die mit diesen durchgeführten Messfahrten eingegangen. Diskutiert werden außerdem die vorherrschenden Rahmenbedingungen.

8.1.1 Fehlerarten

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Fehlererkennungsmethoden werden nach Abschnitt 3.3.2 (Seite 29) sprung- und rampenförmige Fehleraufschaltungen unterschieden. Charakteristisches Merkmal eines Signalsprungs ist die Sprunghöhe Δy , während für Rampen die konstante Rampensteigung Δj angegeben wird. Alle im folgenden vorgenommenen Manipulationen von Messfahrten werden in dieser Form dokumentiert.

8.1.2 Versuchsfahrzeuge

Grundlage der Untersuchungen bilden Fahrzeuge der Marke Audi. Zum Einsatz kommen die Mittelklassemodelle Audi A4 in den Fahrzeugvarianten Limousine und Avant sowie das Coupé Audi A5 aus den Modelljahren 2007 und 2008. Die Fahrzeuge weisen als Sonderausstattung das Audi Sportdifferenzial, zum Teil auch die Audi Dynamiklenkung sowie die Audi Dämpferregelung auf (vgl. Abschnitt 5.1).

8.1.3 Versuchsumgebung

Der Anspruch an die Überwachungsalgorithmen ist, Sensorfehler in jeder Fahrsituation schnell und robust zu erkennen und somit die Einhaltung der durch die Regler vorgegebenen Signalanforderungen zu garantieren. Für die Bewertung der entworfenen ZSDA ist die Simulation zuvor aufgezeichneter Fahrmanöver ausreichend.

In einem zweiten Schritt muss sichergestellt werden, dass die Ergebnisse auch im realen Fahrzeug und in Verbindung mit den Regeleingriffen der verfügbaren – nicht zwangsläufig die Signale einer ZSDA nutzenden – Fahrwerkregelsysteme sichergestellt werden können. Die Eingriffe können über die Beeinflussung des Fahrverhaltens auf Basis fehlerfreier, aber auch

manipulierter Messgrößen zu Sensordaten führen, die von den Aufzeichnungen mit einem Fahrzeug abweichen, das entweder mit der gleichen oder aber mit einer neuen Kombination von Regelsystemen ausgestattet ist. Diese Verifizierung der Ergebnisse ist für die Entwicklung von ausgereifter und abgesicherter Software notwendig, aber nicht Gegenstand dieser Arbeit.

8.1.4 Fahrmanöver

Die in dieser Arbeit herangezogenen Fahrzeugmessungen sind in **Tabelle 8.2** zusammengefasst. Fahrbahnuntergrund, Fahrmanöver, Geschwindigkeit und Lenkaufwand variieren für eine repräsentative Auswahl typischer Fahrsituationen. Jede Hoch- bzw. Niedrigreibwertmessung ist über die Kennung H1...10 bzw. N1...5 eindeutig zu identifizieren und wird in Anhang C in Form eines standardisierten Graphen visualisiert. Im oberen Teil dieses Graphen werden die elementaren Fahrdynamikgrößen Quereschleunigung, Gierwinkelgeschwindigkeit, Lenkradwinkel und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit gezeigt. Der untere Teil veranschaulicht die auf Basis von Fahrzeuggeschwindigkeit, Gier- und Schwimmwinkel berechnete Fahrzeugbewegung in einem ortsfesten Koordinatensystem (x_0, y_0) . Startpunkt jeder Messung ist der Koordinatenursprung $(0, 0)$. Im Abstand von einer Sekunde wird zusätzlich der maßstabsgetreue Umriss des Fahrzeugs in Abhängigkeit der aktuellen Fahrtrichtung abgebildet. Um einen besseren Bezug zur Messung herstellen zu können, wird der Fahrzeugumriss zu Beginn der Messung und anschließend im Abstand von zehn Sekunden schwarz eingefärbt (siehe beispielhaft **Bild C.10**).

Aufgrund der für die Darstellung notwendigen Integration von Gierwinkel- und Fahrzeuglängsgeschwindigkeit kann es bei längeren Messungen zu Abweichungen der Darstellung vom realen Kursverlauf kommen, was sich vor allem bei Rundkursen wie in **Bild C.6** bemerkbar macht. In diesem Fall macht sich zusätzlich die in der Steilkurve aufgrund der Seitenneigung der Fahrbahn zu gering gemessene Gierwinkelgeschwindigkeit bemerkbar.

Tabelle 8.2: Verwendete Hoch- und Niedrigreibwertmessungen

Bezeichnung	Fahrmanöver	Länge [s]	Bild
<i>Hochreibwert</i>			
H1	Beschl. Geradeausfahrt, Abbremsen, Asphalt	68,8	C.1
H2	Handlingkurs, Asphalt	102,3	C.2
H3	Kreisfahrt, Schotter	40,0	C.3
H4	Sinuskurven, mittlere Lenkfrequenz, Asphalt	64,2	C.4
H5	Lastwechsel, Asphalt	108,1	C.5
H6	Hochgeschwindigkeitsovalbahn, Asphalt	231,0	C.6
H7	Stadt-/Überlandfahrt, Asphalt	100,0	C.7
H8	Stillstand, Asphalt	30,0	C.8
H9	Sinuskurven, niedrige Lenkfrequenz, Asphalt	33,5	C.9
H10	Schlechtwegstrecke, Schotter	20,0	C.10
<i>Niedrigreibwert</i>			
N1	Beschleunigte Geradeausfahrt, Abbremsen, Eis	50,0	C.11
N2	Wendekreis, beidseitig, Schneedecke	40,0	C.12
N3	Handlingkurs, Eis	206,9	C.13
N4	Tiefschneefahrt	63,5	C.14
N5	Steigungsstrecke mit Serpentinaen, Schneedecke	136,2	C.15

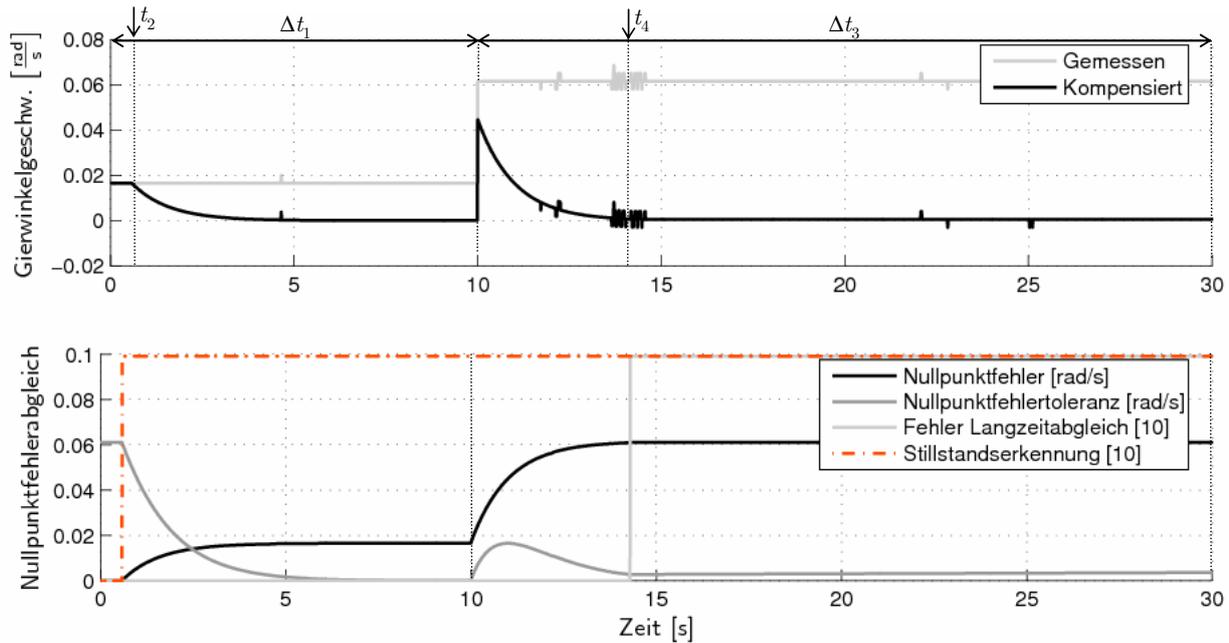


Bild 8.1: Nullpunktfehlerbestimmung im Stillstand (H8: Fahrzeugstillstand, $v_{\text{Fzg}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; Manipulationen: $\Delta\dot{\psi}(0\dots 10\text{ s}) = 0,02 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\Delta\dot{\psi}(10\dots 30\text{ s}) = 0,065 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$)

8.2 Bewertung der Nullpunktfehlerbestimmung

Zur Nullpunktfehlerbestimmung werden nach Abschnitt 7.2.2 drei Methoden eingesetzt, die bei Fahrzeugstillstand, während der Fahrt oder – im Fall des Histogrammansatzes – in beiden Situationen aktiv sind.

Stillstandsabgleich

Der Stillstandsabgleich ist aufgrund der vorausgesetzten Fahrsituation zwar nur eingeschränkt verfügbar, bietet jedoch den Vorteil, dass mit der Nulllage des Sensors eine sichere Referenz vorhanden ist. Der Abgleich erfolgt daher mit einer Filterzeitkonstanten $T_{\text{St}} = 1\text{ s}$ relativ schnell. In **Bild 8.1** ist im Zeitbereich $\Delta t_1 = [0\dots 10]\text{ s}$ ein Nullpunktfehler von $\Delta\dot{\psi}(\Delta t_1) = 0,02 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ vorgegeben, der im darauf folgenden Intervall $\Delta t_3 = [10\dots 30]\text{ s}$ auf einen Betrag von $\Delta\dot{\psi}(\Delta t_3) = 0,065 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ oberhalb des spezifizierten Maximalwertes $\dot{\psi}_{\text{Np,max}} = 0,061 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ angehoben wird (vgl. **Tabelle A.1**). Die Bestimmung des Nullpunktfehlers samt Toleranz beginnt ab dem Zeitpunkt der Stillstandserkennung bei $t_2 = 0,7\text{ s}$. Beide Größen weisen den für Verzögerungsglieder erster Ordnung typischen Verlauf auf. Der Nullpunktfehler nähert sich einem Wert von ca. $\dot{\psi}_{\text{Np}} = 0,017 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ an. Die Differenz von $0,003 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ zum beaufschlagten Fehler ist durch den tatsächlichen Nullpunktfehler des Sensors begründet. Die Toleranz sinkt vom Maximalwert $\dot{\psi}_{\text{Np,max}}$ bis auf null ab, um nach dem Signalsprung zu Beginn der Phase Δt_3 wieder anzusteigen. Die Bestimmung von Nullpunktfehler und Toleranz erfolgt erneut wie beschrieben. Bei $t_4 = 14,2\text{ s}$ überschreitet der Nullpunktfehler den hinterlegten Maximalwert $\dot{\psi}_{\text{Np,max}}$, so dass der Sensor als fehlerhaft erkannt wird. Der Nullpunktfehler wird auf dem letzten gültigen Wert gehalten, die Toleranz dagegen steigt im Fehlerfall, aber auch während der Fahrt, langsam an, um Veränderungen des Nullpunktfehlers über die Zeit Rechnung zu tragen. Im Gegensatz zum dargestellten Verlauf kann das Anwachsen der Toleranz auch ungefiltert erfolgen, um die gegenwärtige Größe des Nullpunktfehlers widerzuspiegeln. Die Störungen in der

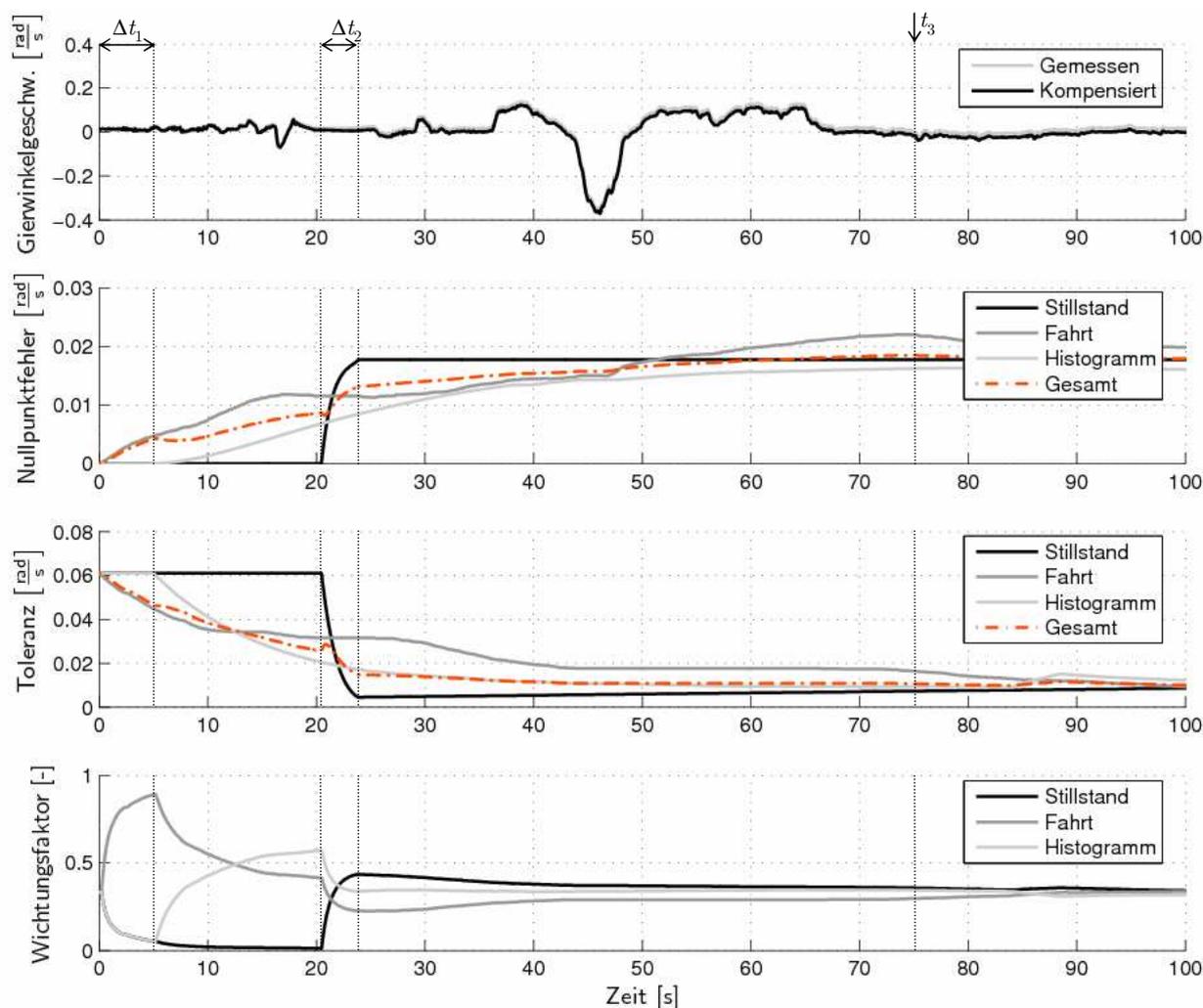


Bild 8.2: Kompensation der Gierwinkelgeschwindigkeit mittels der Ergebnisse der Einzelabgleiche (H7: Stadt-/Überlandfahrt, $v_{Fzg} = [0 \dots 30] \frac{m}{s}$, $\delta = [-2, 5 \dots 0, 5] \text{ rad}$; Manipulation: $\Delta\dot{\psi} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$)

Messgröße zum Zeitpunkt t_4 sind aller Voraussicht nach durch Erschütterungen des Fahrzeugs zu erklären, z. B. das Zuschlagen von Türen.

Fahrt- und Histogrammabgleich

Die Nullpunktfehler von Fahrt- und Histogrammansatz werden wie der Stillstandsabgleich mit einer Filterung bestimmt. Die Zeitkonstante ist mit $T_{Fa} = T_{Hi} = 10 \text{ s}$ jedoch größer gewählt, um die unsichere Referenz in Form einer Modellgröße bzw. die Mittelwertbildung zu berücksichtigen. In **Bild 8.2** sind die Verläufe aller Abgleichsarten für einen Ausschnitt aus einer Stadt-/Überlandfahrt dargestellt, welche mit einem konstanten Nullpunktfehler von $\Delta\dot{\psi} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$ beaufschlagt wird. Die unsichere Referenz wird beispielsweise beim Fahrtabgleich deutlich, dessen Nullpunktfehler bei $t_3 = 75 \text{ s}$ einen Überschwinger bis auf $0,023 \frac{\text{rad}}{s}$ aufweist, um anschließend wieder in Richtung des tatsächlichen Betrags zu streben. Im Intervall $\Delta t_2 = [20, 5 \dots 24] \text{ s}$ ändert sich der Fahrtabgleichswert samt Toleranz nicht mehr, da ein Fahrzeugstillstand vorliegt, der in dieser Phase zur Aktivierung des Stillstandsabgleichs führt.

Der Histogrammansatz strebt gezielt in Richtung der Nullpunktfehlervorgabe. Die Vorgehens-

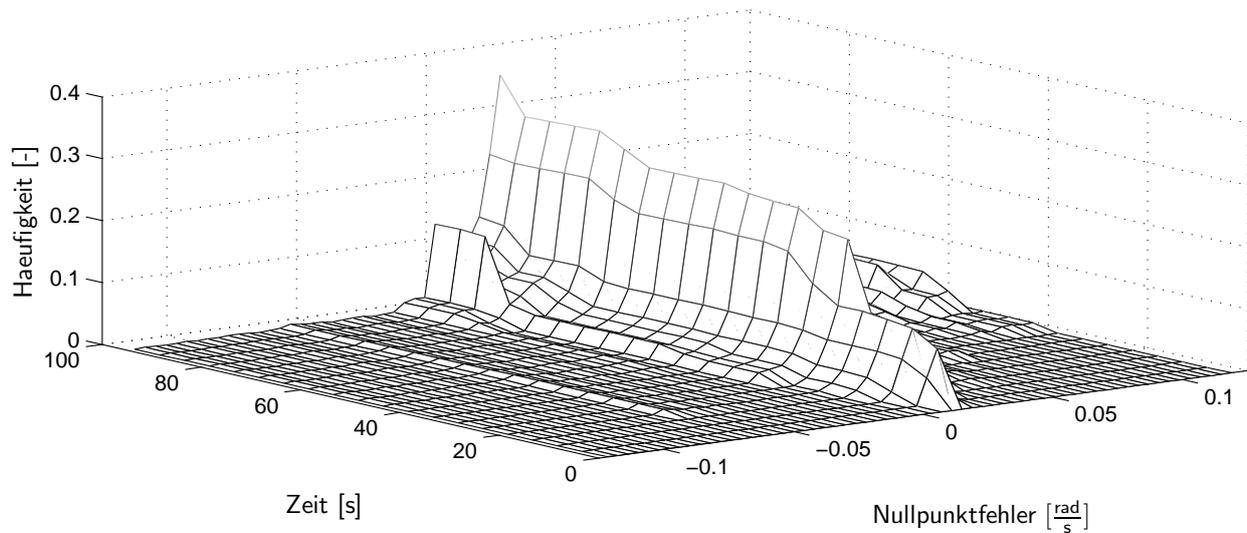


Bild 8.3: Häufigkeitsverteilung des Histogrammabgleichs (H7: Stadt-/Überlandfahrt, $v_{Fzg} = [0...30] \frac{m}{s}$, $\delta = [-2,5...0,5] \text{ rad}$; Manipulation: $\Delta\dot{\psi} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$)

weise ist vergleichbar mit einer Referenzbildung über eine starke Filterung der gemessenen Gierwinkelgeschwindigkeit. Die zugrunde liegende Häufigkeitsverteilung dieser Messung über die Zeit kann **Bild 8.3** entnommen werden. Die Maxima sind gegenüber dem Nullpunkt in Richtung des vorgegebenen Nullpunktfehlers verschoben. Die Eindeutigkeit der Häufigkeitsverteilung bildet die Grundlage zur Bestimmung der zugehörigen Toleranz.

Kompensation

Die Kompensation erfolgt auf Grundlage der bei jedem Abgleichstyp ermittelten Nullpunktfehlertoleranz und der daraus ermittelten Wichtungsfaktoren $(\dot{\psi}_{\text{Np,max}} - \dot{\psi}_{\text{Np,Tol,n}}) / \dot{\psi}_{\text{Np,Tol,max}}$ nach Gleichung (7.11). Je kleiner die Toleranz ist, desto vertrauenswürdiger ist der korrespondierende Nullpunktfehler und desto stärker fließt der Abgleichstyp in die Bildung von Gesamt nullpunktfehler und -toleranz ein. Der Verlauf der Wichtungsfaktoren ist in **Bild 8.2** dargestellt. Ihr Betrag ist auf das Intervall $[0...1]$ begrenzt. In der Anfangsphase $\Delta t_1 = [0...5] \text{ s}$ ist ausschließlich der Fahrtableich aktiviert, so dass die zugehörige Toleranz vom Startwert $\dot{\psi}_{\text{Np,max}}$ in Richtung null strebt, während der Wichtungsfaktor aufgrund der niedrigen Toleranz im Vergleich zu den beiden anderen Abgleichstypen ansteigt. Der Histogrammansatz startet verzögert mit der Datenausgabe, da zunächst eine Mindestanzahl von Messwerten ausgewertet wird. Gegen Ende des Abschnitts Δt_1 beginnt die Toleranz des Histogrammansatzes zu sinken, was zum Anstieg des korrespondierenden Wichtungsfaktors und zur Berücksichtigung des Nullpunktfehlers führt. Sobald der Stillstandsabgleich im Zeitraum Δt_2 in Aktion tritt, fließt auch dieser Anteil in die Bildung der Gesamtwerte ein. Da die Stillstandstoleranz zunächst hoch und der korrespondierende Nullpunktfehler klein ist, kommt es zu einem moderaten Anstieg der Gesamttoleranz sowie zu einem Innehalten des Anstiegs des Gesamt nullpunktfehlers. Beide Größen nähern sich aber kurz darauf wieder dem ursprünglichen Verlauf an. Da sich die Nullpunktfehlertoleranzen nach Δt_2 immer stärker annähern, pendeln sich auch die Wichtungsfaktoren im Intervall $[0,3...0,4]$ ein, so dass die einzelnen Abgleichstypen nahezu identischen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Die Summe der Wichtungsfaktoren ist immer eins.

Bewertung

Der Nullpunktfehlerabgleich der Gierwinkelgeschwindigkeit wird mit drei unterschiedlichen Ansätzen umgesetzt, die sich sowohl bezüglich der vorausgesetzten Fahrsituation als auch bezüglich der eingesetzten Methoden unterscheiden. Auf diese Weise wird das Risiko eines fehlerhaften Abgleichs minimiert. Die Nullpunktfehlerbestimmungen liefern jede für sich akkurate Ergebnisse, die jedoch nach unterschiedlichen Zeiten erreicht werden. Um die Bildung des Gesamtnullpunktfehlers immer auf Basis der fortgeschrittensten und genauesten Abgleichstypen durchzuführen, wird für jeden Einzelnullpunktfehler eine Toleranz bereitgestellt, der diese Informationen zugrunde liegen. Gesamtnullpunktfehler und -toleranz werden dynamisch in Abhängigkeit der Beträge der Einzeltoleranzen gebildet. Die Summe der einzelnen Ansätze lässt ein leistungsfähiges System für eine sichere und dynamische Nullpunktfehlerbestimmung entstehen.

8.3 Bewertung der Fehlererkennungsmethoden

Zur Erkennung von Sensorfehlern werden in der ZSDA signal-, modell- und redundanzbasierte Methoden eingesetzt. Sie werden im Folgenden bezüglich ihrer Funktion und ihrer Performanz untersucht und einander gegenübergestellt.

Die Modellüberwachung, die Redundanzabweichungs- und die statistische Methode nutzen die Nullpunktfehlertoleranzen der Gierwinkelgeschwindigkeitssensoren in ihren Algorithmen. Die Toleranzen benötigen in der Regel mehrere Minuten und unterschiedliche Fahrsituationen, um vom Initialwert $\dot{\psi}_{\text{Np,max}} = 0,061 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ im Zuge des Abgleichsfortschritts auf einen repräsentativen Betrag zu fallen. Da die zugrunde gelegten Messungen kürzere Zeitabschnitte betrachten, wird für die Bewertung der Überwachungen eine konstante Nullpunktfehlertoleranz $\dot{\psi}_{\text{Np,Tol,(1,2)}} = 0,01 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ beider Sensoren unter der Annahme kleiner vorliegender Nullpunktfehler vorausgesetzt. Für die Querschleunigungssensoren sind keine Abgleiche implementiert, so dass für die Toleranzen $\ddot{y}_{\text{Fzg,Np,Tol,(1,2)}}$ der maximale Nullpunktfehler laut Herstellerspezifikation $\ddot{y}_{\text{Fzg,Np,max}} = 0,98 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ nach **Tabelle A.2** verwendet wird.

8.3.1 Signalbasierte Methoden

Drei Ansätze kommen gemäß Abschnitt 7.2.2 (Seite 103) zum Einsatz, die sich allein auf die mit dem zu überwachenden Sensorsignal übermittelten Informationen stützen. Ihre Arbeitsweise wird nachfolgend diskutiert.

Signalgradient

Mit der Überwachung des Signalgradienten kommt eine einfache, aber wirkungsvolle Überwachung zum Einsatz. Sie besticht vor allem durch den geringen Informationsbedarf, der für ihre Umsetzung notwendig ist, und die einfache Realisierbarkeit. Geeignet ist dieser Überwachungstyp ausschließlich für spontane, sprungförmige Signalfehler. In **Bild 8.4** wird sowohl für Sensor 1 der Gierwinkelgeschwindigkeit als auch der Querschleunigung im Zeitintervall $\Delta t_1 = [50...60] \text{s}$ eine Abweichung von $\Delta\dot{\psi}_1(\Delta t_1) = 0,75 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ bzw. $\Delta\ddot{y}_{\text{Fzg,1}}(\Delta t_1) = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ überlagert. Die Erkennungsschwellen ergeben sich für die Gierwinkelgeschwindigkeit aus **Tabelle A.1** zu $\dot{\psi}_{\text{Grd,max}} = 71,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$, für die Querschleunigung aus Messungen im Fahrzeug

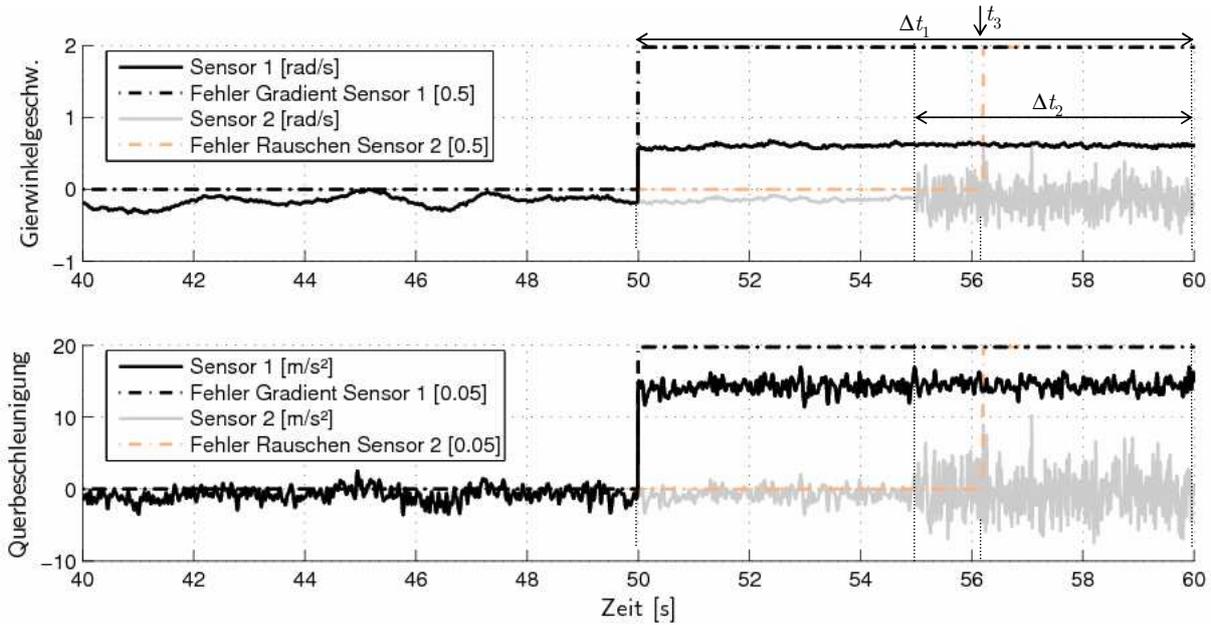


Bild 8.4: Signalbasierte Überwachungen am Beispiel des Signalgradienten und des -rauschens (H10: Schlechtwegstrecke, $v_{Fzg} = [4...9] \frac{m}{s}$, $\delta = [-2...0] \text{ rad}$; Manipulationen: $\Delta\dot{\psi}_1(50...60s) = 0,75 \frac{\text{rad}}{s}$, $\Delta\ddot{y}_{Fzg,1}(50...60s) = 15 \frac{m}{s^2}$, $\sigma_{\dot{\psi}_2}(55...60s) = 0,187 \frac{\text{rad}}{s}$, $\sigma_{\ddot{y}_{Fzg,2}}(55...60s) = 2,65 \frac{m}{s^2}$)

zu $\dot{y}_{Fzg,Grd,max} = 1500 \frac{m}{s^3}$. Die Überwachung kann und muss die Fehler sofort detektieren, da eine Detektion ausschließlich im Zyklus des Auftretens möglich ist. Dementsprechend werden die korrespondierenden Fehlerstatus direkt zu Beginn der Phase Δt_1 gesetzt und die Sprünge erfolgreich erkannt. Treten Signalgradienten unterhalb des Grenzwertes auf, kann kein Fehler erkannt und keine Aussage über den Status des Sensors getroffen werden.

Langzeitabgleich

Der Langzeitabgleich hat die Aufgabe, fortwährend die Überschreitung des vom Hersteller spezifizierten Maximalwertes $\dot{\psi}_{Np,max} = 0,061 \frac{\text{rad}}{s}$ durch die Beträge der Nullpunktfehler der Einzelabgleiche (vgl. Abschnitt 8.2) zu überprüfen. Tritt dieser Fall ein, wird, wie bereits an **Bild 8.1** am Beispiel des Stillstandsabgleichs erläutert, ein Fehler erkannt. Die Fehlerschwelle kann aus Robustheitsgründen auch oberhalb des spezifizierten Maximalwertes angesiedelt sein, sofern eine vertrauenswürdige Nullpunktfehlerbestimmung durchgeführt wird.

Signalrauschen

Unzulässige Hochfrequenzbestandteile eines Sensors werden durch die Prüfung der Rauschamplitude ausfindig gemacht, die durch eine gefilterte Gradientenänderung nach Gleichung (7.10) bestimmt wird. Bei der Auslegung der Fehlerschwelle kann die Sensorspezifikation wie in **Tabelle A.1** Orientierungshilfe geben. Die Festlegung erfolgt jedoch auf Basis des zugrunde gelegten Messfahrtenkatalogs. Bei der Wahl der Schwelle muss berücksichtigt werden, dass die Signale – insbesondere die Querbeschleunigung – auch im normalen Fahrbetrieb einen Rauschanteil aufweisen. Dieser steigt bei Fahrten auf unebenem Untergrund weiter an. In **Bild 8.4** wurde daher die Messung einer Schlechtwegstrecke gewählt, um diesen Überwachungstyp zu demonstrieren. Im Bereich $\Delta t_2 = [55...60] \text{ s}$ wird Rauschen additiv auf den zweiten

Sensor der Gierwinkelgeschwindigkeit und der Querbeschleunigung mit einer Standardabweichung von $\sigma_{\dot{\psi}_2}(\Delta t_2) = 0,187 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ bzw. $\sigma_{\dot{y}_{\text{Fzg},2}}(\Delta t_2) = 2,65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ aufgeschaltet, was sich an dem stark angeregten Verlauf der Signale zeigt. In beiden Fällen wird das verstärkte Rauschen bei ca. $t_3 = 56.2\text{s}$ als Signalfehler erkannt und der zugehörige Fehlerstatus gesetzt. Folglich liegt eine Überschreitung der Schwellen von $\dot{\psi}_{\text{Rau,max}} = 0,014 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ bzw. $\dot{y}_{\text{Fzg,Rau,max}} = 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Bewertung

Die signalbasierten Überwachungsmethoden bieten bei einfacher Realisierung eine Fehlererkennung, die ausschließlich Informationen der zu überwachenden Signale selbst nutzt. Dieses Informationsdefizit, aber auch die Leistungsdaten der verwendeten Sensorik führen zu relativ weiten Überwachungsschwellen. Fehler werden jedoch bei Überschreitung der Grenzwerte im selben Rechenzyklus erkannt. Es zeigt sich außerdem, dass die einen Signalgradienten oder eine Gradientenänderung (Signalrauschen) nutzenden Methoden sowie die nachfolgend beschriebene Überwachung des Gradienten der Abweichung redundanter Signale bei ähnlichen Symptomen – einer abrupten Signaländerung – ansprechen.

8.3.2 Modellbasierte Methoden

Wesentlicher Bestandteil der modellbasierten Methoden sind die einfließenden Modellgrößen. Daher wird zunächst die Qualität der zur Verfügung stehenden Modelle untersucht, bevor eine Bewertung der Überwachungsmethodik vorgenommen wird.

Qualität der Modellgrößen

Zur Beurteilung der Modellgrößen \hat{y}_i wird ihre Abweichung vom aktuellen Messwert y_{Mess} ausgewertet. Dabei kommt mit den $i_{\text{max}} = 15$ Fahrmanövern H1...7 und N1...5 aus **Tabelle 8.2** eine Kombination aus Hoch- und Niedrigreibwertmessungen zum Einsatz. In der Statistik ist die Standardabweichung σ_{stat} ein adäquates Mittel zur Quantifizierung einer Verteilung. Sie ergibt sich aus dem Mittelwert der Abweichung einer Anzahl von insgesamt N Stichproben y_n vom Mittelwert der Verteilung \bar{y} [BSMM01]:

$$\sigma_{\text{stat}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2 \quad (8.1)$$

In Anlehnung an die statistische Standardabweichung wird für die Auswertung der Messfahrten die statische Referenz \bar{y} durch die gemessene Größe $y_{\text{Mess},n}$ im Zeitschritt n ersetzt, die aktuelle Stichprobe y_n dagegen durch die Modellgröße \hat{y}_n :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_{\text{Mess},n})^2 \quad (8.2)$$

Für die Auswertung der einzelnen Messungen wird zwischen zwei Varianten der Standardabweichung unterschieden. Während $\sigma_{\text{verf},i}$ alle Zeitschritte auswertet, in denen die vom Modell i benötigten Eingangsgrößen gemäß ihrer Statussignale verfügbar sind, fließt in $\sigma_{\text{zul},i} \subseteq \sigma_{\text{verf},i}$ die Teilmenge ein, die zusätzlich die Zulassungsbedingungen nach **Tabelle 7.5** erfüllt. Die Standardabweichungen werden nacheinander für jede Messfahrt i bestimmt und anschließend

ein Gesamtwert gebildet, der einmal über die Zeit $t_{\text{verf},i}$, in der die Verfügbarkeit gegeben ist, im anderen Fall über $t_{\text{zul},i}$, in der zusätzlich die Zulassungsbedingungen eingehalten werden, gewichtet ist:

$$\sigma_{\langle \text{verf, zul} \rangle} = \frac{\sum_i^{i_{\text{max}}} \sigma_{\langle \text{verf, zul} \rangle, i} \cdot t_{\langle \text{verf, zul} \rangle, i}}{\sum_i^{i_{\text{max}}} t_{\langle \text{verf, zul} \rangle, i}} \quad (8.3)$$

Das Verhältnis der beiden Zeitspannen $\frac{t_{\text{zul}}}{t_{\text{verf}}}$ erlaubt eine Aussage über die Verfügbarkeit der Modelle bei Erfüllung der Zulassungsbedingungen und folglich über die Verfügbarkeit der Modellüberwachung. Schließlich wird der Maximalwert der Abweichung zwischen Modell- \hat{y} und Messgröße y_{Mess} über die insgesamt i_{max} Messungen und die jeweils verfügbaren N_i Zeitschritte ermittelt:

$$\Delta y_{\text{max}} = \max_{i,n} (\hat{y}_{i,n} - y_{\text{Mess},i,n}) \quad \text{mit } i = 1, 2, \dots, i_{\text{max}} \quad \text{und } n = 1, 2, \dots, N_i \quad (8.4)$$

Für die Modellgierwinkelgeschwindigkeiten sind die Ergebnisse in **Tabelle 8.3** zusammengefasst. Das beste Teilergebnis ist jeweils durch Fettdruck hervorgehoben. Zum Einsatz kommen die bekannten vier geometrischen Modelle, das klassische und das adaptive Einspurmodell sowie zwei Realisierungen nach dem SALM-Ansatz. Die Implementierung wird zum einen mit zwei Kennfeldern (KF) nach Gleichung (7.15) umgesetzt. Das Training erfolgt in diesem Fall ausschließlich mit Hochreibwertmessungen. Zum anderen erfolgt eine Realisierung mit drei Kennfeldern, die den vorangegangenen Entwurf um einen vom Lenkradwinkel und der Querbeschleunigung abhängigen Term $\hat{\psi}_3(\ddot{y}_{\text{FzG}}, \delta)$ ergänzt und auf Basis von Hoch- und Niedrigreibwertmessungen entsteht. Grundsätzlich werden für das Training und die Bewertung unterschiedliche Messungen verwendet:

$$\hat{\psi}_{\text{SALM},2} = \hat{\psi}_1(v_{\text{FzG}}, \delta) + \hat{\psi}_2(v_{\text{FzG}}, \ddot{y}_{\text{FzG}}) + \hat{\psi}_3(\ddot{y}_{\text{FzG}}, \delta) \quad (8.5)$$

Die zwei SALM-Implementierungen zeigen die höchste Modellqualität. Der schlanke Ansatz auf Basis von zwei Kennfeldern (2 KF) und Hochreibwertmessungen schneidet bezüglich der Standardabweichungen unter Berücksichtigung der Zulassungsbedingungen am besten ab, zeigt jedoch eine relativ große maximale Abweichung von der Referenz. Derartige Situationen müssen über die Zulassungsbedingungen noch stärker ausgeschlossen werden. Das Vorgehen auf Basis eines zusätzlichen Kennfeldes (3 KF) weist neben der kleinsten absoluten Abweichung die zweitkleinsten Standardabweichungen σ_{zul} auf. Das schlechtere Abschneiden gegenüber dem schlankeren Ansatz deutet auf Kompensationseffekte beim Auslegen der Kennfelder

Tabelle 8.3: Qualität der Modellgierwinkelgeschwindigkeiten auf Basis der Messungen H1...7 und N1...5

Modell		Modellqualität (Rang)				
Ansatz	$\dot{\psi} =$	Gleichung	$\Delta \dot{\psi}_{\text{max}} [\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$	$\sigma_{\text{verf}} [\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$	$\sigma_{\text{zul}} [\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$	$\frac{t_{\text{zul}}}{t_{\text{verf}}} [\%]$
Geometrisch	$f(\ddot{y}_{\text{FzG}}, v)$	(2.13)	1,705 (5)	0,0942 (4)	0,0785 (4)	56,4 (2)
Geometrisch	$f(\delta_v, v)$	(2.14)	1,278 (4)	0,1434 (8)	0,0942 (8)	58,5 (1)
Geometrisch	$f(v_{vl}, v_{vr})$	(2.19)	5,858 (7)	0,1424 (7)	0,0905 (7)	51,7 (5)
Geometrisch	$f(v_{hl}, v_{hr})$	(2.19)	2,848 (6)	0,1215 (6)	0,0818 (6)	55,4 (3)
Einspurmodell	$f(\delta_v, v)$	(2.8)-(2.9)	1,143 (3)	0,0991 (5)	0,0738 (3)	54,0 (4)
Einspurmodell	$f(\delta_v, v, \ddot{y}_{\text{FzG}})$	(3.14)-(3.16)	1,119 (2)	0,0894 (3)	0,0794 (5)	58,5 (1)
SALM (2 KF)	$f(\delta_v, v, \ddot{y}_{\text{FzG}})$	(3.25),(7.15)	6,005 (8)	0,0640 (2)	0,0517 (1)	58,5 (1)
SALM (3 KF)	$f(\delta_v, v, \ddot{y}_{\text{FzG}})$	(3.25),(8.5)	1,075 (1)	0,0636 (1)	0,0544 (2)	58,5 (1)

hin (vgl. Abschnitt 7.2.5, Seite 107). Auf den folgenden Rängen liegen die weiteren Modellgrößen eng beieinander, weisen aber einen deutlichen Abstand zu den SALM-Ansätzen auf. Sowohl im verfügbaren σ_{verf} als auch im zulässigen Bereich σ_{zul} reihen sich die auf der Querbeschleunigung und den Einspurmodellen beruhenden Größen hinter den Erstplatzierten ein. Die schlechtesten Ergebnisse liefern die Modellgrößen auf Basis der Radgeschwindigkeiten und des Lenkradwinkels.

Die zum Teil ähnlichen Zahlenwerte der Verfügbarkeit $\frac{t_{\text{zul}}}{t_{\text{verf}}}$ treten immer dann auf, wenn zum einen die den Modellgrößen zugrunde liegenden Sensoren übereinstimmen und damit ähnliche Verfügbarkeitszeiträume $t_{\text{verf},i}$ bestehen. Zum anderen sind sie durch die homogene Definition der Zulassungsbedingungen nach **Tabelle 7.5** begründet.

Die Ergebnisse für die Modellquerbeschleunigungen in **Tabelle 8.4** zeigen ein ähnliches Bild. Herausragende Ergebnisse zeigt wiederum der SALM-Ansatz, gefolgt vom klassischen und adaptiven Einspurmodell sowie der Modellquerbeschleunigung aus der Gierwinkelgeschwindigkeit. Die Resultate des adaptiven Einspurmodells bleiben dabei hinter dem klassischen Ansatz zurück. Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der Gierwinkelgeschwindigkeit. Der Aufwand für die Parameterschätzung der adaptiven Einspurmodelle ist daher fragwürdig. Es folgen die Modellgrößen aus den Raddrehzahlen. Schlusslicht ist wiederum der geometrische Ansatz auf Basis von Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit, der vor allem auf Niedrigreibwert beim Einsatz der Lenkung zur Stabilisierung des Fahrzeugs zu großen Abweichungen vom realen Fahrverhalten führen kann.

Die Qualität der Modelle kann in der Regel mit der Anzahl der verwendeten Eingangsgrößen verbessert werden. Hier zeigt sich wiederum der Vorteil des SALM-Ansatzes, in den beliebig viele Eingangsgrößen integriert werden können.

Modellbasierte Überwachung

Für die Modellüberwachung wird zunächst nach Abschnitt 7.2.5 (Seite 108) ein Vertrauensintervall gebildet, welches zum einen die Unsicherheit der Modellgrößen über die Intervallbildung und -aufweitung nach Gleichung (7.16) berücksichtigt, zum anderen die Signalunsicherheit über Rauschamplitude, Nullpunktfehlertoleranz sowie den maximalen Empfindlichkeitsfehler zusätzlich in Gleichung (7.17) einfließen lässt. Die Fehlerart spielt bei der Detektierung einer Sensorabweichung keine Rolle, weshalb in **Bild 8.5** im Zeitbereich $\Delta t_1 = [30...40]$ s der erste Gierwinkelgeschwindigkeitssensor mit einer Rampe der Höhe $\Delta \dot{\psi}_1(\Delta t_1) = -0,04 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ und der erste Querbeschleunigungssensor mit einem Sprung der Höhe $\Delta \ddot{y}_{\text{Fzg},1}(\Delta t_1) = 4,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ beaufschlagt wird. Für das Gesamtsystem liegt folglich ein Doppelfehler vor. Die Messung einer

Tabelle 8.4: Qualität der Modellquerbeschleunigungen auf Basis der Messungen H1...7 und N1...5

Modell Ansatz	$\ddot{y}_{\text{Fzg}} =$	Gleichung	Modellqualität (Rang)			
			$\Delta \ddot{y}_{\text{Fzg},\text{max}} [\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$	$\sigma_{\text{verf}} [\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$	$\sigma_{\text{zul}} [\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$	$\frac{t_{\text{zul}}}{t_{\text{verf}}} [\%]$
Geometrisch	$f(\psi, v)$	(2.13)	8,468 (1)	1,045 (2)	0,909 (3)	59,1 (1)
Geometrisch	$f(\delta_v, v)$	(2.13)-(2.14)	46,100 (7)	7,838 (7)	6,085 (7)	58,5 (2)
Geometrisch	$f(v_{vl}, v_{vr})$	(2.13),(2.19)	61,295 (6)	2,191 (5)	1,430 (5)	51,7 (5)
Geometrisch	$f(v_{hl}, v_{hr})$	(2.13),(2.19)	27,054 (5)	2,404 (6)	2,128 (6)	55,4 (3)
Einspurmodell	$f(\delta_v, v)$	(2.8)-(2.9)	20,843 (4)	1,290 (3)	0,902 (2)	54,0 (4)
Einspurmodell	$f(\delta_v, v, \dot{\psi})$	(3.14)-(3.16)	13,124 (3)	1,401 (4)	1,017 (4)	54,4 (3)
SALM (2 KF)	$f(\delta_v, v, \dot{\psi})$	(3.25)	8,728 (2)	0,783 (1)	0,608 (1)	54,4 (3)

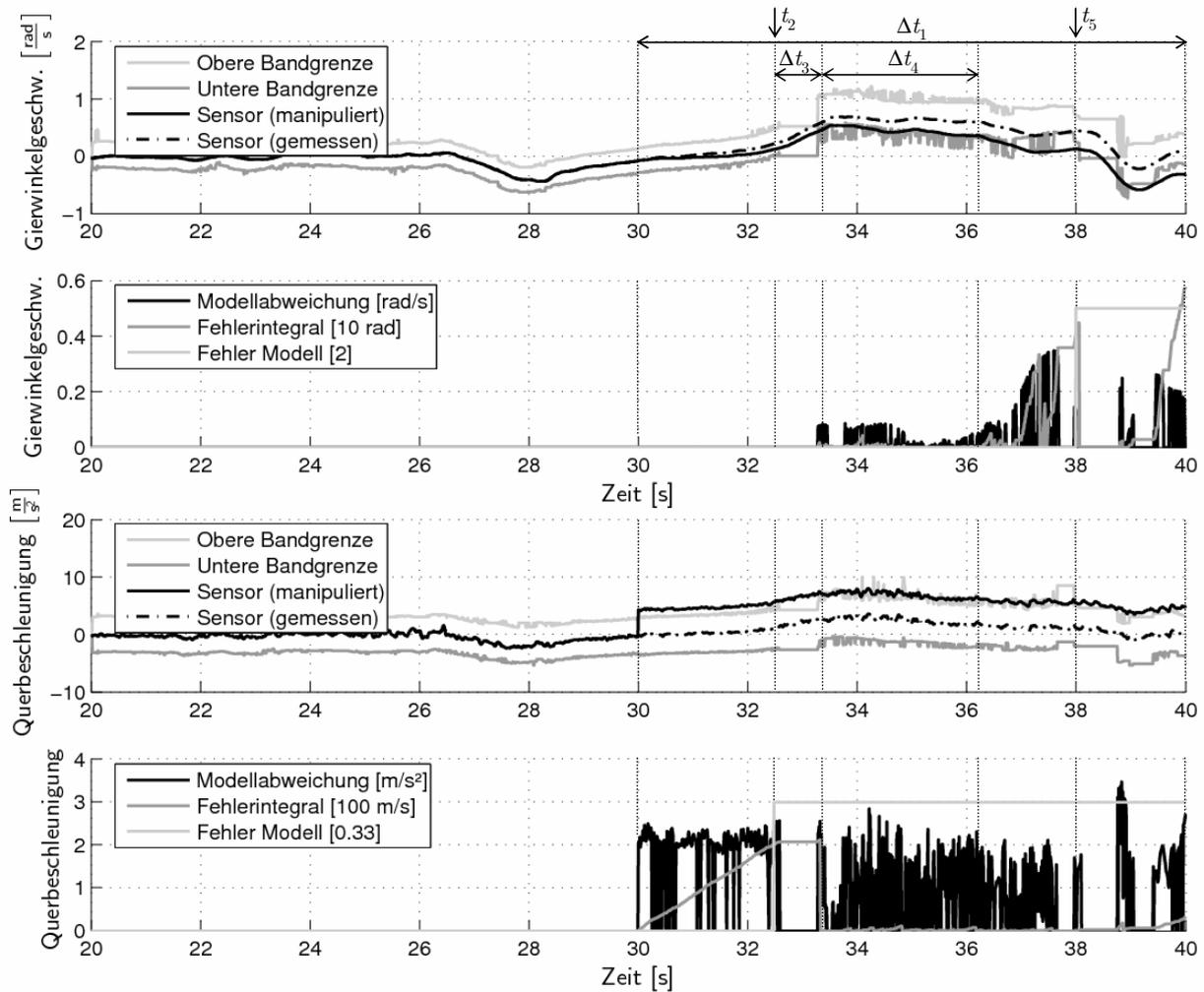


Bild 8.5: Überwachungen der Modellabweichung der Einzelsensoren (N4: Tiefschneefahrt, $v_{Fzg} = [3...6] \frac{m}{s}$, $\delta = [-4...7] \text{ rad}$; Manipulationen: $\Delta\ddot{\psi}_1(30...40s) = -0,04 \frac{\text{rad}}{s^2}$, $\Delta\dot{y}_{Fzg,1}(30...40s) = 4,4 \frac{m}{s^2}$)

Tiefschneefahrt N4 wird auch für die folgenden Überwachungstypen für eine bessere Vergleichbarkeit herangezogen. Die Messfahrt macht beispielsweise im Bereich $\Delta t_3 = [32, 5...33, 3] \text{ s}$ für die Gierwinkelgeschwindigkeit deutlich, dass das Vertrauensintervall nicht fortwährend verfügbar ist. Die obere und untere Grenze werden auf dem letzten gültigen Wert gehalten, während die Modellüberwachung deaktiviert ist. Des Weiteren tritt im Bereich $\Delta t_4 = [33, 3...36, 2] \text{ s}$ eine weitere Einschränkung des Ansatzes hervor. Das Vertrauensintervall hängt stark von der Qualität der Modellgrößen ab. Da aber die vier am engsten beieinander liegenden Größen als Grundlage des Intervalls dienen, kann es vorkommen, dass die Grenzen des Intervalls abrupt springen. In der Regel treten diese Sprünge in für Modelle schwer abzubildenden Fahrsituationen auf.

Im Gegensatz zur Querbeschleunigung benötigt der rampenförmige Fehler der Gierwinkelgeschwindigkeit einige Sekunden, bis er zu einer Abweichung führt, die ein Verlassen des Vertrauensintervalls nach sich zieht. Erreicht die Abweichung von der überschrittenen Intervallgrenze eine Schwelle von $\psi_{Abw,Mod,max} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$ bzw. $\dot{y}_{Fzg,Abw,Mod,max} = 1 \frac{m}{s^2}$, wird das Fehlerintegral gestartet. Wenn dieses eine abtastzeitabhängige Schwelle von $\psi_{Abw,Mod,max}(t_M) = 4 \text{ rad}$ bzw. $\dot{y}_{Fzg,Abw,Mod,max}(t_M) = 200 \frac{m}{s}$ mit $t_M = 0,01 \text{ s}$ überschreitet, wird ein Fehler erkannt. Das ist bei $t_2 = 32,5 \text{ s}$ für die Querbeschleunigung und bei $t_5 = 38,0 \text{ s}$ für die Gierwinkelgeschwin-

digkeit der Fall.

Trotz des Doppelfehlers werden beide Fehler zuverlässig erkannt. Ein Grund dafür sind die verwendeten Eingangsgrößen der einzelnen Modelle, die zu einem großen Teil Lenkradwinkel, Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten als Ausgangsbasis nutzen und deren Modellgrößen folglich von der Fehleraufschaltung auf Gierwinkelgeschwindigkeit und Querbeschleunigung unbeeinträchtigt sind. Darüber hinaus wird bei verfügbarer Mehrfachsensoren ein Fehler auf einem der redundanten Signale nur zu 50 % auf das Nutzsignal übertragen, so dass der mögliche Fehlereinfluss auf die Modelle abgeschwächt wird. Alternativ könnte in diesem Fall auch für jedes der redundanten Signale eine Modellgröße bereitgestellt werden. Auf diese Weise stünde bei einem Einfachfehler immer eine fehlerfreie Modellgröße zur Verfügung, während die fehlerbehaftete aller Voraussicht nach über die Auswahllogik der Modellüberwachung (vgl. Abschnitt 7.2.5, Seite 108) vernachlässigt werden würde.

Bewertung

Mit einer robusten Parametrierung zeigen die modellbasierten Überwachungen zuverlässige Ergebnisse auf Basis von analytischer Redundanz und folglich ohne Mehrkosten für zusätzliche Bauteile. Ihre Funktion weist jedoch eine Reihe von Einschränkungen auf. Um eine sichere Funktion zu gewährleisten, werden in **Tabelle 7.5** Zulassungsbedingungen definiert, die die Qualität der Modelle anheben, aber im Gegenzug zu einer eingeschränkten Verfügbarkeit führen. Im Fahrbetrieb reihen sich daher Phasen mit und ohne verfügbarer Modellüberwachung aneinander, so dass nicht zu jedem Zeitpunkt ein Fehler erkannt werden kann. Hinderlich wirkt sich weiterhin aus, dass die verschiedenen Modelle in der Regel in ähnlichen Fahrsituationen an die Grenzen der Abbildbarkeit des realen Fahrverhaltens stoßen und folglich die Verfügbarkeit der Modelle gesamtheitlich eingeschränkt ist. Im Gegensatz dazu ist in den gültigen Phasen die Auswahl der Modellgrößen für die Bildung des Toleranzbandes größer.

Problematisch wirkt sich zusätzlich die Kombination der ausgewählten Modellgrößen aus. Das klassische und das adaptive Einspurmodell sowie die geometrische Beziehung nach Gleichung (2.14) basieren primär auf dem Lenkradwinkel. In einigen Fahrsituationen, wie sie beispielsweise auf dem Eishandlungskurs N3 vorkommen, kann es passieren, dass diese drei Modelle ein sehr enges, aber nicht die Realität widerspiegelndes Toleranzband bilden und einen nicht vorhandenen Fehler detektieren. Die verwendeten Modelle müssen für ein optimales Ergebnis daher auf möglichst unterschiedlichen Ansätzen beruhen. Die Fahrt auf dem Hochgeschwindigkeitsoval N6 zeigt dagegen die Notwendigkeit einer Seitenneigungsbestimmung, um die Modellgrößen in diesen speziellen Situationen zu optimieren, da der Einfluss der Fahrzeugneigung und der Erdbeschleunigung zu einer Verfälschung der gemessenen Querbeschleunigung führt. Beide Situationen lassen sich durch die Einbindung des zu überwachenden Sensorsignals in die Toleranzbandbildung entschärfen (vgl. Abschnitt 7.2.5, Seite 108).

8.3.3 Redundanzbasierte Methoden

Stehen zwei Sensoren zur Messung einer physikalischen Größe zur Verfügung, empfehlen sich redundanzbasierte Methoden zur Fehlererkennung. Die drei realisierten Ansätze nach Abschnitt 7.2.2 (Seite 104) werden im Folgenden auf ihre Wirksamkeit untersucht. Für eine bessere Vergleichbarkeit liegt der Analyse der Ansätze dieselbe Messfahrt zugrunde.

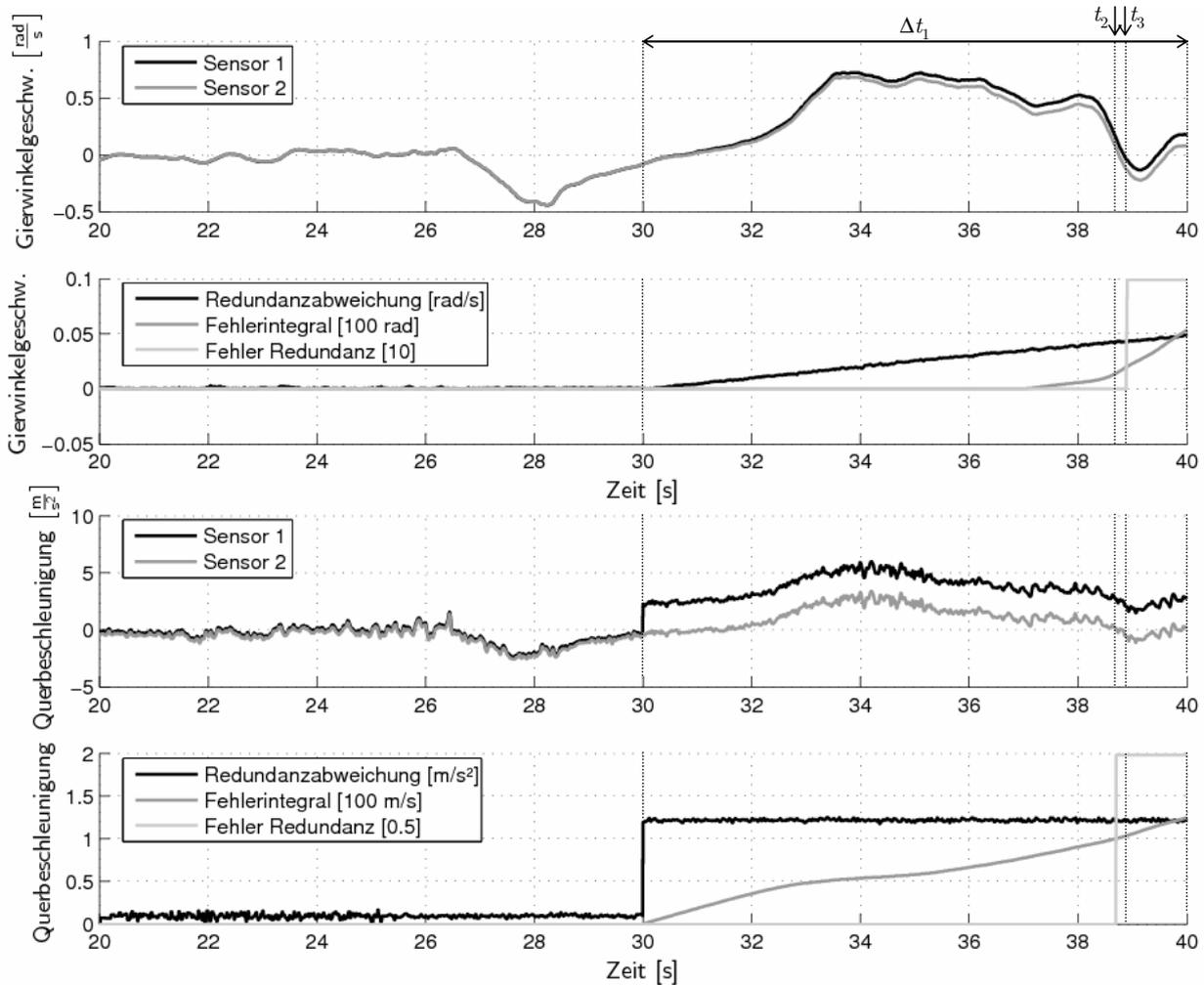


Bild 8.6: Überwachungen der Abweichung der redundanten Sensoren (N4: Tiefschneefahrt, $v_{Fzg} = [3...6] \frac{m}{s}$, $\delta = [-4...7] \text{ rad}$; Manipulationen: $\Delta \ddot{\psi}_1(30...40s) = 0,01 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$, $\Delta \ddot{y}_{Fzg,1}(30...40s) = 2,4 \frac{m}{\text{s}^2}$)

Redundanzabweichung

Die Überwachung der Abweichung redundanter Sensorsignale erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird nach Gleichung (7.12) die Differenz der Signale unter Berücksichtigung der Rauschamplituden bestimmt. Die Überwachung spricht daher sowohl bei sprung- als auch bei rampenförmigen Abweichungen an. In **Bild 8.6** wird im Bereich $\Delta t_1 = [30...40] \text{ s}$ der erste Sensor der Gierwinkelgeschwindigkeit mit einer Rampe der Steigung $\Delta \dot{\psi}_1(\Delta t_1) = 0,01 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ überlagert, der erste Querbeschleunigungssensor dagegen mit einem Sprung der Höhe $\Delta \ddot{y}_{Fzg,1}(\Delta t_1) = 2,4 \frac{m}{\text{s}^2}$. Beide Fehleraufschaltungen spiegeln sich im Verlauf der korrespondierenden Redundanzabweichungen wider, aufgrund der Mittelwertbildung der Sensorabweichung betragsmäßig nur zur Hälfte.

Überschreitet die Redundanzabweichung eine Schwelle, wird die Abweichung nach Gleichung (7.13) aufintegriert. Während die Schwelle der Querbeschleunigung $\ddot{y}_{Fzg,Abw,Red,max} = 0,5 \frac{m}{\text{s}^2}$ zum Zeitpunkt des Sprungs überschritten wird, erfolgt das Anwachsen des Fehlerintegrals der Gierwinkelgeschwindigkeit erst nach Überschreitung der Schwelle von $\dot{\psi}_{Abw,Red,max} = 0,01 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ durch die Redundanzabweichung. Da bei der Integration des Weiteren die Nullpunktfehlertoleranzen und die möglichen Empfindlichkeitsfehler einbezogen werden, erfolgt das Anwachsen

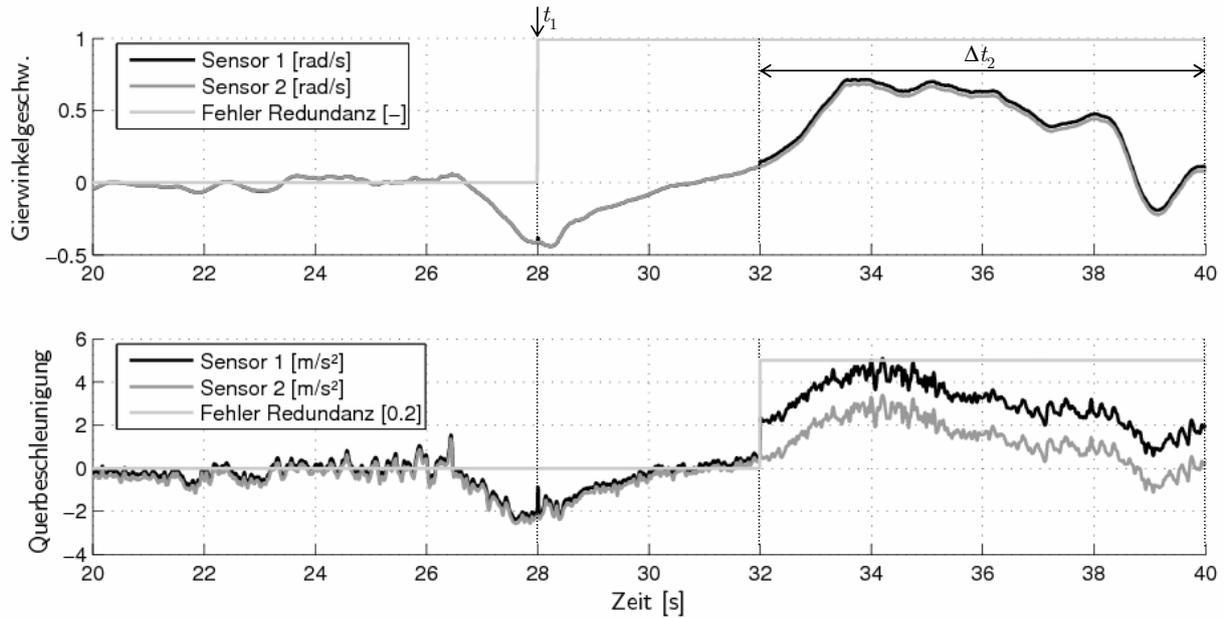


Bild 8.7: Überwachungen des Gradienten der Abweichung der redundanten Sensoren (N4: Tiefschneefahrt, $v_{Fzg} = [3...6] \frac{m}{s}$, $\delta = [-4...7] \text{ rad}$; Manipulationen: $\Delta \dot{\psi}_1(28, 32...40s) = 0,032 \frac{\text{rad}}{s}$, $\Delta \dot{y}_{Fzg,1}(28, 32...40s) = 1,5 \frac{m}{s^2}$)

bei der Gierwinkelgeschwindigkeit verzögert. Sobald das Fehlerintegral eine zweite, abtastzeitabhängige Schwelle überschreitet ($\psi_{Abw,Red,max}(t_M) = 2 \text{ rad}$ bzw. $\dot{y}_{Fzg,Abw,Red,max}(t_M) = 100 \frac{m}{s}$ mit $t_M = 0,01 \text{ s}$), wird zum Zeitpunkt $t_2 = 38,7 \text{ s}$ der Fehler der Querbeschleunigung erkannt, bei $t_3 = 38,9 \text{ s}$ der der Gierwinkelgeschwindigkeit. Im Gegensatz zur modellbasierten Überwachung, die dieselben Robustheitsmaßnahmen nutzt, betragen die Schwellen nur die Hälfte. Eine detaillierter Vergleich erfolgt in Abschnitt 8.3.4.

Gradient der Redundanzabweichung

Da es sich beim Gradienten der Redundanzabweichung um eine relative Signaländerung handelt, muss nach Gleichung (7.14) nur der Empfindlichkeitsfehler und die Rauschamplituden in die Berechnung einfließen, nicht aber die Nullpunktfehlertoleranzen. In **Bild 8.7** wird Sensor 1 zum Zeitpunkt $t_1 = 28 \text{ s}$ ein nur einen Zyklus währender Impuls, im Intervall $\Delta t_2 = [32...40] \text{ s}$ eine konstante Abweichung überlagert. Für die Gierwinkelgeschwindigkeit hat die Manipulation einen Betrag von $\Delta \dot{\psi}_1(t_1, \Delta t_2) = 0,032 \frac{\text{rad}}{s}$, für die Querbeschleunigung von $\Delta \dot{y}_{Fzg,1}(t_1, \Delta t_2) = 1,5 \frac{m}{s^2}$. Im Fall der Gierwinkelgeschwindigkeit wird der Fehler sofort zum Zeitpunkt t_1 gesetzt. Bei der Querbeschleunigung erfolgt die Erkennung erst zu Beginn der Phase Δt_2 , weil der Signalsprung bei t_1 aufgrund der Berücksichtigung des nach **Tabelle A.2** zu tolerierenden Empfindlichkeitsfehlers des Nutzsignals nicht ausreicht, um die Schwelle zu überschreiten. Diese liegt für die Gierwinkelgeschwindigkeit bei $\ddot{\psi}_{Grd,Red,max} = 3 \frac{\text{rad}}{s^2}$ bzw. für die Querbeschleunigung bei $\ddot{y}_{Fzg,Grd,Red,max} = 150 \frac{m}{s^3}$ und somit deutlich unterhalb der Schwellen der Signalgradientenüberwachung, vgl. Abschnitt 8.3.4.

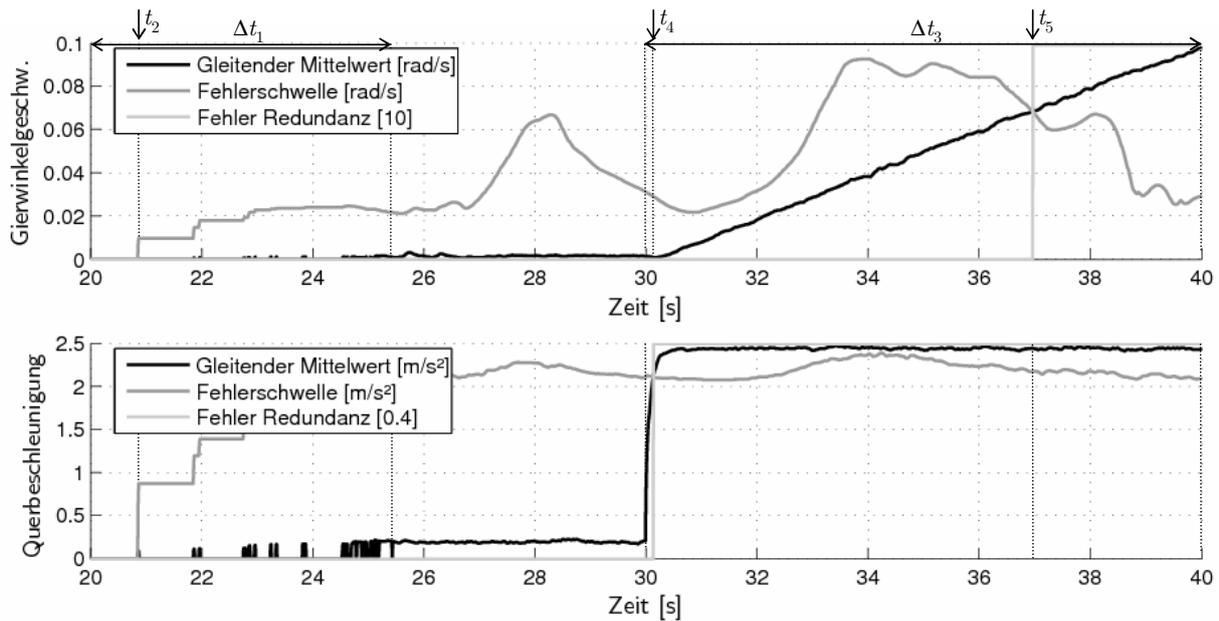


Bild 8.8: Statistische Überwachungen der Abweichung der redundanten Sensoren (N4: Tiefschneefahrt, $v_{Fzg} = [3...6] \frac{m}{s}$, $\delta = [-4...7] \text{rad}$; Manipulationen: $\Delta \ddot{\psi}_1(30...40s) = 0,01 \frac{\text{rad}}{s^2}$, $\Delta \ddot{y}_{Fzg,1}(30...40s) = 2,4 \frac{m}{s^2}$)

Statistische Redundanzabweichung

Die statistische Redundanzabweichung basiert auf dem Vergleich eines gleitenden Mittelwertes der Abweichung der redundanten Sensoren mit einer adaptiven Schwelle nach Gleichung (3.29). In den Grenzwert fließen sowohl das Sensorrauschen als auch die maximal möglichen Nullpunkt- und Empfindlichkeitsfehler ein. Gemäß Abschnitt 7.2.2 (Seite 104) kann bei der Gierwinkelgeschwindigkeit aufgrund der verfügbaren Nullpunktfehlerabgleiche die Überwachungsschwelle bei uneingeschränkter Robustheit abgesenkt werden. In **Bild 8.8** wird erneut die Tiefschneefahrt N4 verwendet sowie zur Untersuchung der Redundanzabweichungsüberwachung identische Fehleraufschaltungen $\Delta \ddot{\psi}_1(\Delta t_3) = 0,01 \frac{\text{rad}}{s^2}$ bzw. $\Delta \ddot{y}_{Fzg,1}(\Delta t_3) = 2,4 \frac{m}{s^2}$ im Bereich $\Delta t_3 = [30...40] \text{s}$ vorgenommen. Im Zeitabschnitt $\Delta t_1 = [20...25,4] \text{s}$ liegt eine dichte Folge von Zeitüberschreitungen und Doppelabtastungen vor (vgl. Abschnitt 6.2.3, Seite 84). Sie führen bei allen Redundanzüberwachungen zu einer eingeschränkten Verfügbarkeit, jedoch sind die Auswirkungen vor allem bei der statistischen Redundanzüberwachung sichtbar, da sowohl der gleitende Mittelwert als auch die dynamische Überwachungsschwelle erstmals zum Zeitpunkt $t_2 = 20,9 \text{s}$ berechnet werden können.

Die Abhängigkeit der dynamischen Fehlerschwelle vom möglichen Empfindlichkeitsfehler des Nutzsignals ist vor allem für die Gierwinkelgeschwindigkeit im Vergleich mit dem Verlauf der Messgrößen in **Bild 8.6** sichtbar. Während der gleitende Mittelwert aufgrund des rampenförmigen Fehlers bei der Gierwinkelgeschwindigkeit kontinuierlich ansteigt, um bei $t_5 = 36,9 \text{s}$ den Grenzwert zu überschreiten, erfolgt die Änderung bei der Querbeschleunigung abrupt und führt zu einer schnellen Fehlererkennung bei $t_4 = 30,2 \text{s}$. Das kurzzeitige und geringfügige Anwachsen der dynamischen Schwelle der Querbeschleunigung zu Beginn der Phase Δt_3 resultiert aus dem Signalsprung von Sensor 1. Zum einen führt dieser zu einem kurzzeitig ansteigenden Rauschanteil, zum anderen zu einem höheren potentiellen Empfindlichkeitsfehler durch den größeren Betrag des Sensors zu diesem Zeitpunkt.

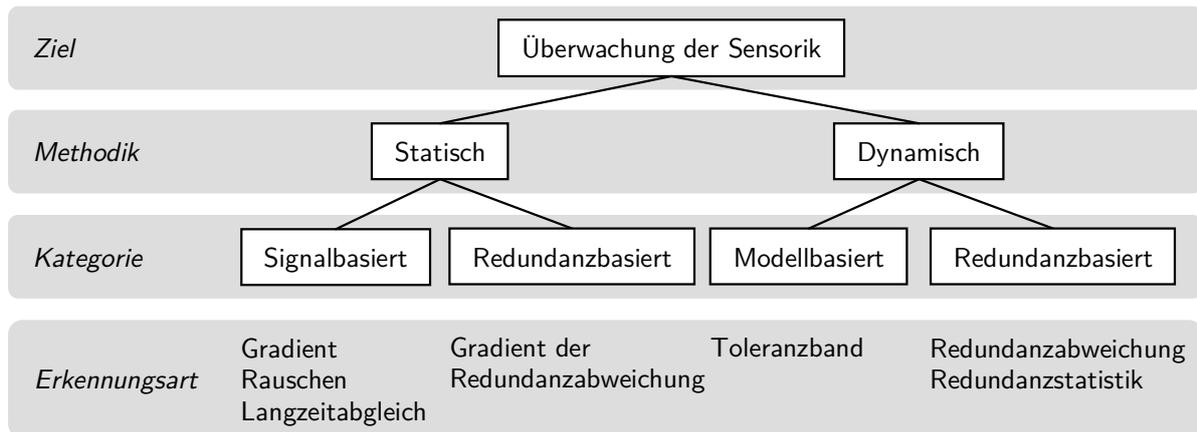


Bild 8.9: Eingesetzte statische und dynamische Fehlererkennungsmethoden

Bewertung

Den redundanzbasierten Methoden ist gemein, dass sie robust und bei geringem Rechenaufwand eine schnelle Fehlererkennung ermöglichen. Jedoch sind sie aufgrund der erforderlichen redundanten Sensorik mit Mehrkosten verbunden und ermöglichen keine Zuordnung der aufgedeckten Fehler zu einem Sensor. Das ist nur in Kombination mit signal- und modellbasierten Ansätzen möglich. Im Vergleich zur Signalgradientenüberwachung ergeben sich für den Ansatz auf Basis des Gradienten der Abweichung der redundanten Sensoren deutlich geringere Überwachungsschwellen. Die statistische und die die Redundanzabweichung nutzende Überwachung liefern bei unterschiedlichen Ansätzen ähnliche Ergebnisse. Zum Teil erfolgt die Fehlersetzung bei der Redundanzabweichungsüberwachung verzögert, da als Robustheitsmaßnahme ein Fehlerintegral implementiert ist. Die hohen Beträge der erkannten Fehler der Querbeschleunigung resultieren zum einen aus dem relativ starken Grundrauschen der Sensoren, das sich direkt auf die Redundanzabweichung auswirkt, zum anderen aus den in dieser Arbeit nicht umgesetzten Nullpunktfehlerbestimmungen und der daraus resultierenden maximal zu berücksichtigenden Nullpunktfehler bzw. -toleranz.

8.3.4 Vergleich der Fehlererkennungsmethoden

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde die Funktion der verwendeten Überwachung demonstriert. Die Schwellen der einzelnen Überwachungstypen werden so gewählt, dass vorhandene Fehler zuverlässig erkannt werden, jedoch im fehlerfreien Betrieb keine Einschränkung der Verfügbarkeit auftritt. Um die Effizienz der einzelnen Methoden zu beurteilen, werden sie nach **Bild 8.9** in statische und dynamische Ansätze eingeteilt. Die statischen Ansätze

Tabelle 8.5: Fehlerschwellen der statischen Überwachungen

Überwachung	Gierwinkelgeschw.		Querbeschleunigung	
	$\dot{\psi}$ [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$]	$\ddot{\psi}$ [$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$]	\ddot{y}_{Fzg} [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$]	$\ddot{\dot{y}}_{\text{Fzg}}$ [$\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$]
Langzeitabgleich	0,061	—	(0,981)	—
Signalgradient	—	71,5	—	1500
Signalrauschen (Gradientenänderung)	0,014	—	0,2	—
Gradient der Redundanzabweichung	—	3	—	150

zeichnen sich durch feste Schwellen aus, die bei Überschreitung sofort zu einem Fehler führen. Die Grenzwerte sind in **Tabelle 8.5** zusammengefasst. Der Vergleich zwischen signalbasierter und redundanzbasierter Gradientenüberwachung zeigt, dass durch den Einsatz von redundanter Sensorik die Fehlerschwellen um den Faktor 10 (Querbeschleunigung) bis 24 (Gierwinkelgeschwindigkeit) abgesenkt werden können, ohne an Robustheit einzubüßen. Der Langzeitabgleich ist wie die Nullpunktgleichung in der zugrunde liegenden prototypischen Implementierung ausschließlich für die Gierwinkelgeschwindigkeit implementiert, da kein Erkenntnisgewinn für die Untersuchung einer ZSDA zu erwarten ist.

Im Gegensatz zu den statischen Methoden variiert die Fehlererkennung der dynamischen Ansätze mit der Fehlergröße und der seit dem Fehlerauftreten verstrichenen Zeit. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit dieser Methoden werden die Fehlererkennungszeiten wie in **Bild 8.10** in Abhängigkeit der Fehleramplitude verglichen. Gemäß Abschnitt 6.1.1 (Seite 70) können diese Diagramme zur Verifizierung der von den Signalnutzern erhobenen Anforderungen an die Nutzsignale eingesetzt werden. Die Amplitude bildet sich aus der Sprunghöhe bei sprungförmigen bzw. aus der Steigung bei rampenförmigen Fehlern. Ein vertikaler Balken markiert den Bereich, der durch die minimale und maximale Fehlererkennungszeit je Fehleramplitude aufgespannt wird. Ein Kreis im Balken kennzeichnet den zugehörigen Mittelwert der Fehlererkennungszeiten. Zusätzlich sind je Fehleramplitude prozentual die erkannten Fehler angegeben. Ausgangspunkt der Untersuchungen sind Einfachfehler, das heißt, pro simulierter Messfahrt wird ausschließlich ein Sensor mit einem Fehler beaufschlagt. Die Graphen beruhen auf den Fahrmanövern H1...7 und N1...5 nach **Tabelle 8.2**. Jede Fehleramplitude wird sowohl positiv als auch negativ zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten einem Sensor überlagert. Die Zeitpunkte werden bei 10 sowie 40 % der Gesamtlänge der Messung gewählt, um auch bei kurzen Messfahrten Zeit für die Fehlererkennung zu gewährleisten. In Summe ergibt sich aus zwölf Messungen, zwei Fehleraufschaltzeitpunkten und fünf Fehleramplituden je Fehlerart pro Sensor eine Gesamtzahl von 480 Fehleraufschaltungen als Grundlage der Bewertung.

Die Ergebnisse für die Gierwinkelgeschwindigkeit sind in **Bild 8.10** zusammengefasst. Die Erkennung von sprungförmigen Fehlern beginnt bei $0,02 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ durch die statistische Redundanzüberwachung mit einer Erkennungsrate von nahezu 50 %. Hier machen sich die fehlenden Robustheitsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 3.3.2, Seite 37) gegenüber der Überwachung der Redundanzabweichung bemerkbar. Letztere nutzt ein Fehlerintegral zur Entprellung und erkennt Fehler ab der doppelten Amplitude, die bei beiden redundanzbasierten Ansätzen zu Erkennungsraten von (annähernd) 100 % führt. Gleichzeitig verkürzen sich die Fehlererkennungszeiten drastisch von maximal 80 s auf wenige Sekunden bei $0,08 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Ab dieser Sprunghöhe ist auch die Modellüberwachung in der Lage, Fehler aufzuspüren, jedoch mit zehnfach längeren Erkennungszeiten im Vergleich zu den redundanzbasierten Ansätzen. Die Zuverlässigkeit der Fehlererkennung steigt in Form der Erkennungsrate mit zunehmender Fehleramplitude moderat an, erreicht jedoch auch bei einer Fehleramplitude von $0,16 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ nur eine Quote von 10 %. Die Ergebnisse erreichen weder bezüglich Fehleramplitude noch -erkennungszeit das durch die Redundanzüberwachungen vorgegebene Niveau. Die Modellüberwachungen sind durch die zugrunde liegenden Modellgrößen bezüglich der Referenzbildung limitiert, was sich vor allem in höheren Überwachungsschwellen widerspiegelt. Auf diese Weise können auch in für die Modelle schwer abzubildenden Fahrsituationen durch Einschränkung der Sensitivität gegenüber Fehlern zuverlässige Ergebnisse erzielt werden. Sensorfehler mit kleinen Amplituden werden mit dem modellbasierten Ansatz im Gegenzug schlechter erkannt.

Rampenförmige Fehler werden im Gegensatz zu Signalsprüngen in jedem Fall erkannt, da sie mit fortschreitender Zeit zwangsläufig zu großen Abweichungen führen. Limitierender Faktor

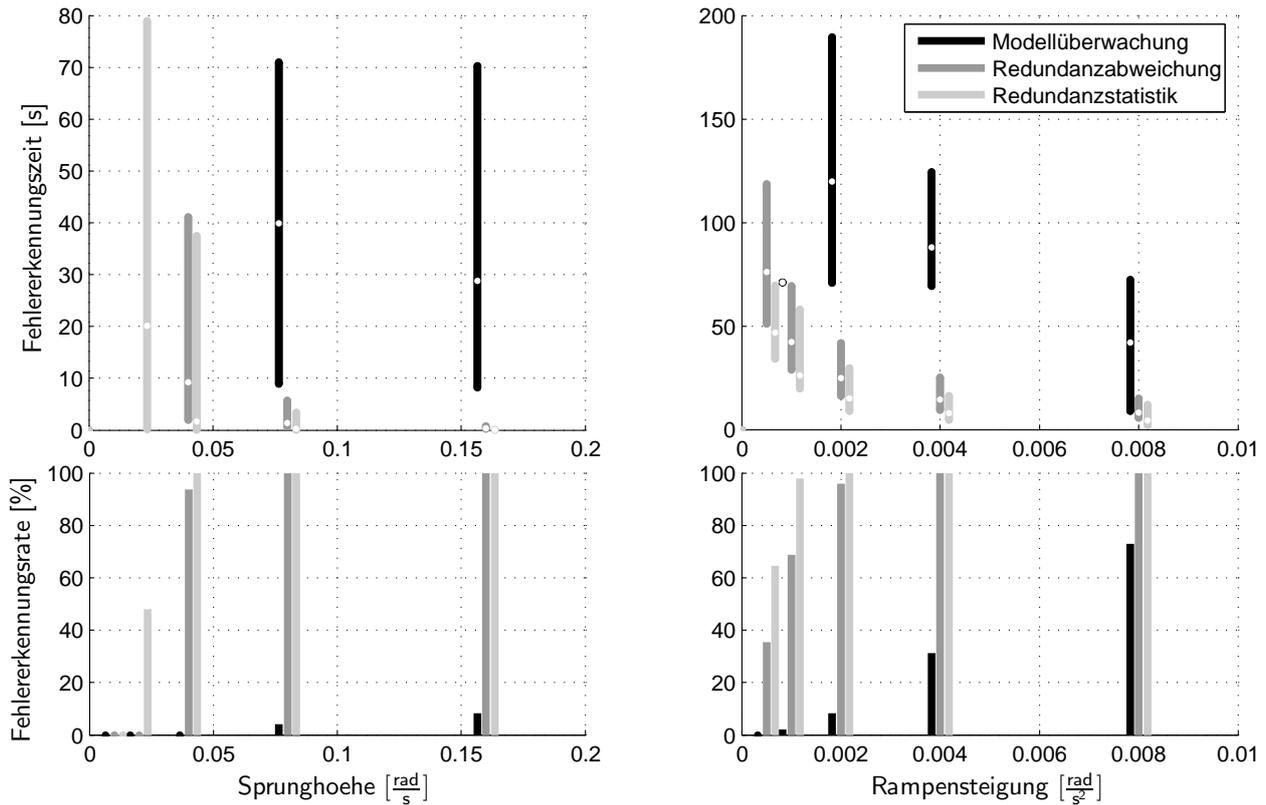


Bild 8.10: Fehlererkennungszeit und -rate in Abhängigkeit von sprung- und rampenförmigen Fehlern für die dynamischen Überwachungen der Gierwinkelgeschwindigkeit

ist bei der folgenden Untersuchung die Länge der Messungen, die eine Fehlererkennung verhindern kann. Bezogen auf die zugrunde gelegten Messfahrten beginnt die Erkennung bei einer Steigung von $0,0005 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$. Folglich steigen zum einen die Fehlererkennungsraten mit zunehmender Rampensteigung, zum anderen sinken die Fehlererkennungszeiten. Die redundanzbasierten Ansätze sind der modellbasierten Überwachung wiederum bezüglich beider Kriterien überlegen.

In **Bild 8.11** folgen die Resultate für die Querbeschleunigung, die ein ähnliches Bild im Vergleich zur Gierwinkelgeschwindigkeit zeigen. Allerdings relativiert sich das Ergebnis der Modellüberwachung bezogen auf die kleinsten erkannten Fehleramplituden und die Fehlererkennungszeiten, da sich die modellbasierte Überwachung in beiden Kategorien verbessern kann. Während die redundanzbasierten Ansätze sprungförmige Fehler ab einer Amplitude von $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erstmals und mit kleiner Fehlererkennungsrate detektieren, ermöglichen die Modelle eine Detektion bereits ab der doppelten und nicht erst bei der vierfachen Amplitude wie bei der Gierwinkelgeschwindigkeit. Die Fehlererkennungsrate ist mit über 70 % vergleichsweise hoch. Sichere Fehlererkennungen und damit Quoten von 100 % liegen für die redundanzbasierten Ansätze ebenfalls erst ab dieser Fehleramplitude vor, jedoch ist die Fehlererkennungszeit sowohl bei sprung- als auch bei rampenförmigen Fehlern um den Faktor 2 bis 50 geringer als bei der Modellüberwachung.

Die rampenförmigen Fehler werden von allen Methoden ab einer Steigung von $0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$ erkannt. Die Fehlererkennungsraten und -zeiten der Modellüberwachung bleiben dabei fortwährend hinter den Vorgaben der Redundanzansätze zurück, zeigen jedoch wiederum ein besseres Bild im Vergleich zur Gierwinkelgeschwindigkeit. Die Gründe für das bessere Abschneiden der

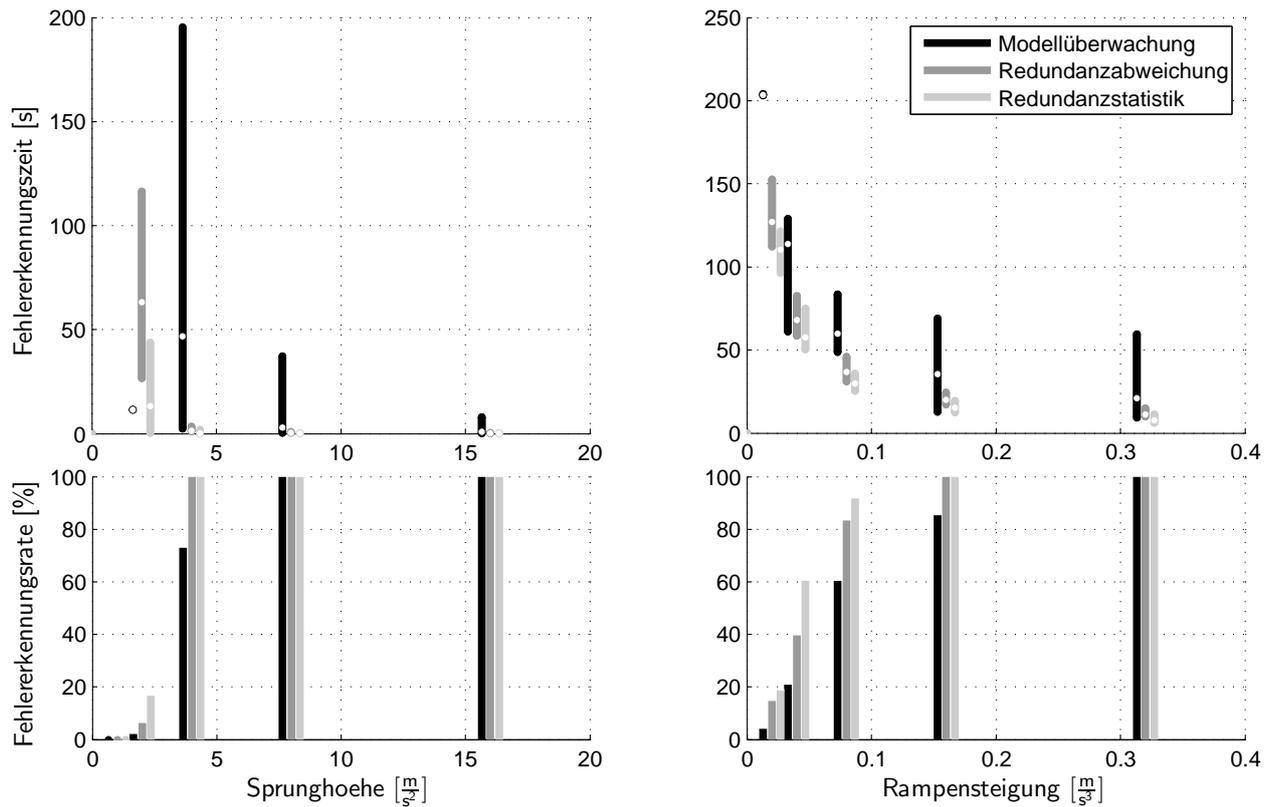


Bild 8.11: Fehlererkennungszeit und -rate in Abhängigkeit von sprung- und rampenförmigen Fehlern für die dynamischen Überwachungen der Querbeschleunigung

Modellüberwachung liegen vor allem in den stark verrauschten Signalen der Querbeschleunigungssensoren und dem fehlenden Nullpunktfehlerabgleich, die die Mindestfehlerschwellen insbesondere bei den redundanzbasierten Methoden – im Vergleich zu anderen Einflussgrößen wie dem Empfindlichkeitsfehler – mit $\dot{y}_{Fzg,Np,max} = 0,981 \frac{m}{s^2}$ verhältnismäßig stark ansteigen lassen.

Insgesamt bestätigt sich eine Überlegenheit der redundanz- gegenüber den modellbasierten Ansätzen bezüglich Fehlererkennungsrate und -zeit. Der auf Redundanzstatistik fußende Ansatz zeigt dabei stets etwas bessere Ergebnisse vergleichen mit der Redundanzabweichungsmethode. Ausschlaggebender Grund ist hier jedoch nicht die Leistungsfähigkeit des Ansatzes, sondern die bei der Redundanzabweichungsüberwachung zusätzlich implementierten Robustheitsmaßnahmen.

Aus den Auswertungen der dynamischen Überwachungen ist ersichtlich, dass die in Anforderung 3 (Seite 62) geforderten Signalgenauigkeiten nicht erreicht werden. Im Fall der Querbeschleunigung wird der Grenzwert $\dot{y}_{Fzg,max} = \pm 2,0 \frac{m}{s^2}$ um den doppelten Betrag verfehlt. Ausschlaggebender Grund ist vor allem der im ZSDA-Prototyp nicht implementierte Nullpunktfehlerabgleich. Der Algorithmus arbeitet folglich nicht mit der potentiell möglichen Leistungsfähigkeit. Die Schwelle der Gierwinkelgeschwindigkeit von $\dot{\psi}_{max} = \pm 0,122 \frac{rad}{s}$ kann trotz der Nullpunktfehlerbestimmung nicht eingehalten werden. Ein maßgeblich Einflussfaktor ist an dieser Stelle der nicht implementierte Empfindlichkeitsabgleich, der zu einer fortwährenden Aufweitung der Überwachungsschwellen um 5% des Betrages des Sensorwertes führt. Weiteres Optimierungspotential bietet eine fehlersensitivere Parametrierung und eine weniger strikte Umsetzung von Robustheitsmaßnahmen.

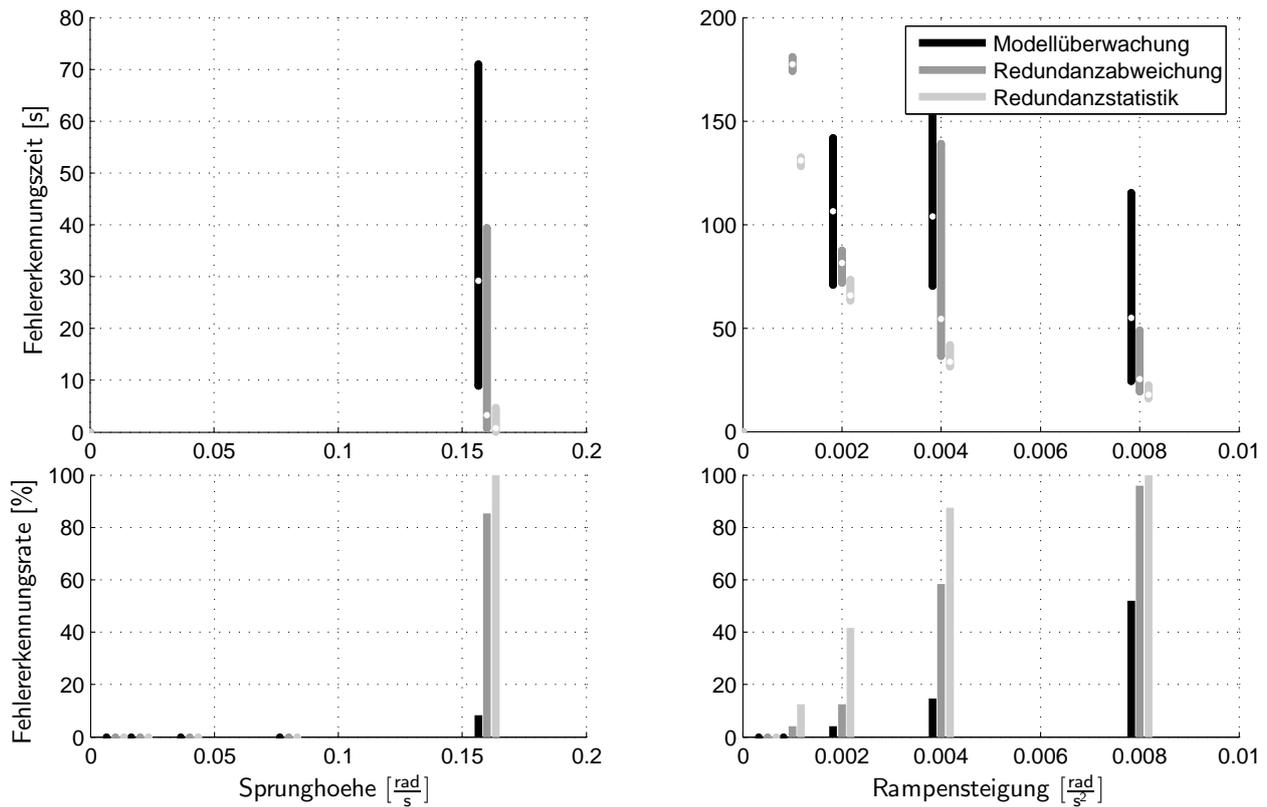


Bild 8.12: Fehlererkennungszeit und -rate in Abhängigkeit von sprung- und rampenförmigen Fehlern für die dynamischen Überwachungen der Gierwinkelgeschwindigkeit bei fehlendem Nullpunktfehlerabgleich

8.4 Bewertung des Einflusses von Sensorabgleichen auf die Fehlererkennung

Die beispielhaft für eine ZSDA umgesetzten Konfigurationen werden bezüglich unterschiedlicher Aspekte variiert (vgl. **Tabelle 6.4** und **Tabelle 7.1**). Mittels der Konfigurationen mit (K1/K3) und ohne (K2) Nullpunktfehlerabgleich für die Gierwinkelgeschwindigkeit kann der bereits diskutierte Einfluss auf die dynamischen Überwachungen belegt werden. In **Bild 8.10** in Abschnitt 8.3.4 wurde die Untersuchung für die Gierwinkelgeschwindigkeit bezüglich Fehlererkennungszeit und -rate gezeigt, wenn eine einen fortgeschrittenen Abgleich kennzeichnende Nullpunktfehlertoleranz von $0,01 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ zugrunde gelegt wird. Ohne Nullpunktfehlerbestimmung muss nach **Tabelle A.1** der maximal mögliche Nullpunktfehler $\dot{\psi}_{\text{Np,max}} = 0,061 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ berücksichtigt werden. Die Ergebnisse in **Bild 8.12** zeigen bei identischen Fehleramplituden die erwarteten, drastischen Verschlechterungen. Die detektierten Amplituden verdoppeln (im Fall der Modellüberwachungen) bis verachtfachen sich (Redundanzstatistik) durch die Einsparung der Abgleiche, gleichzeitig steigen Fehlererkennungszeiten an bzw. sinken die Erkennungsraten ab. Die Ergebnisse ähneln den Resultaten für die Überwachung der Querbeschleunigung in **Bild 8.11**, da der fehlende Nullpunktfehlerabgleich zu einer Annäherung der modell- an die redundanzbasierten Ansätze führt. Ein leistungsfähiges Gesamtsystem muss als Konsequenz eine Kombination von dynamischen Überwachungen mit Nullpunktfehlerabgleichen aufweisen.

Weiteres Potenzial bietet der mit seinem Maximalwert einfließende Empfindlichkeitsfehler der Sensoren. Dieser ist sowohl für die Gierwinkelgeschwindigkeit nach **Tabelle A.1** als auch für

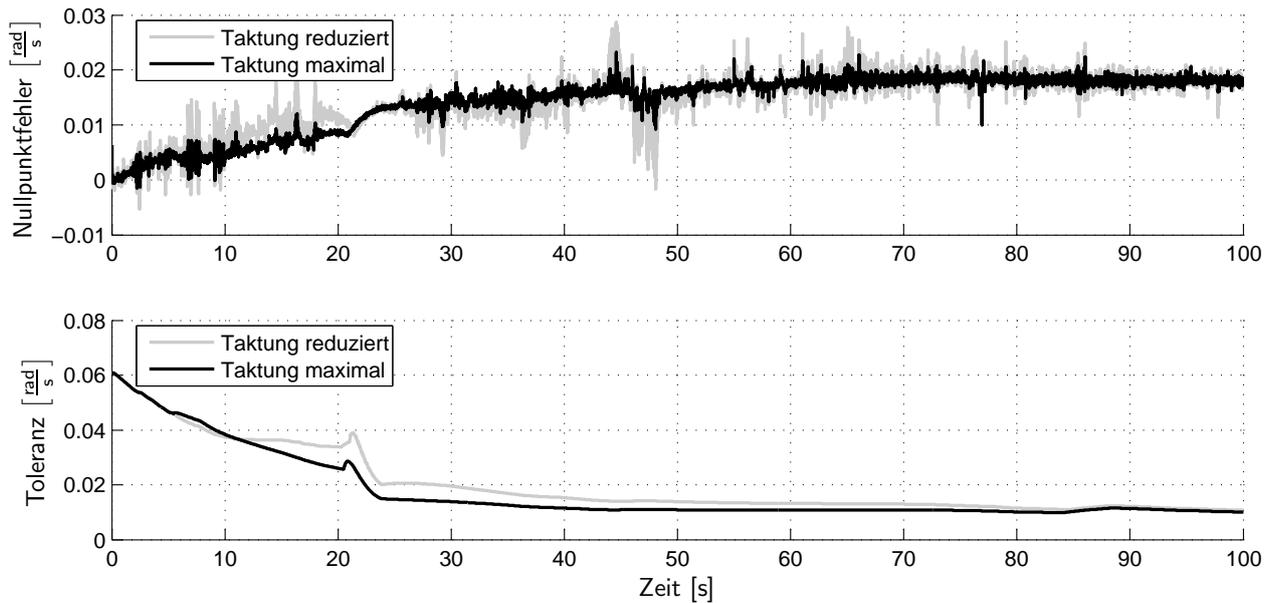


Bild 8.13: Nullpunktfehler und -toleranz der Gierwinkelgeschwindigkeit für maximale (10 ms) und reduzierte (40 ms) zeitliche Modultaktungen (H7: Stadt-/Überlandfahrt, $v_{Fzg} = [0...30] \frac{m}{s}$, $\delta = [-2, 5...0, 5] \text{ rad}$; Manipulation: $\Delta\dot{\psi} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$)[AS09]

die Querschleunigung nach **Tabelle A.2** mit 5% des aktuellen Betrages der Messgröße beziffert und kann mit steigenden Amplituden eine erhebliche Einschränkung der dynamischen Überwachungen mit sich bringen. Wenn es gelingt, diesen Fehler zu korrigieren und ein Maß für den Abgleichsfortschritt in Form einer Empfindlichkeitsfehler toleranz bereitzustellen, können die Fehlerschwellen der dynamischen Überwachungen weiter abgesenkt werden, ohne an Robustheit einzubüßen. Eine Auswahl derartiger Ansätze ist in Abschnitt 3.3.1 (Seite 28) zu finden.

8.5 Bewertung der reduzierten Taktung einzelner Funktionen

Zusätzliches Unterscheidungsmerkmal ist die unterschiedliche zeitliche Taktung der Module. Konfiguration K1 (vgl. **Tabelle 7.1**) weist zum einen eine Staffelung der Abgleichsmodule gemäß **Bild 7.7b** auf, zum anderen werden die die Bereitstellung von Modellgrößen betreffenden Module aufgrund der nur alle 20 ms aktualisierten Fahrzeuggeschwindigkeit (Systemabtastzeit: 10 ms) auf zwei Berechnungszyklen verteilt. Gemäß den Betrachtungen in Abschnitt 7.1.6 ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse für Nullpunktfehlerabgleich und Modellüberwachung nahezu identisch sind. Eine Gegenüberstellung der Abgleiche bei einem Nullpunktfehler von $\Delta\dot{\psi} = 0,02 \frac{\text{rad}}{s}$ ist für die aus **Bild 8.2** bekannte Stadt-/Überlandfahrt in **Bild 8.13** dargestellt. Die Verläufe der Nullpunktfehler sind tendenziell gleich, jedoch weist das Resultat von Konfiguration K1 mit reduzierter Taktung höhere Amplituden auf als dasjenige von K3. Die größeren Ausschläge sind das Ergebnis der automatisch angepassten Filterzeitkonstanten. Da die Filter nur alle vier Zyklen aktiv sind, lassen sie entsprechend **Bild 7.6** in jedem Rechenschritt auch größere Signaländerungen der gefilterten Größe zu. Abhilfe schaffen würde neben einer Anpassung der Parametrierung eine Mittelwertbildung der Eingangsgrößen, im Fall der

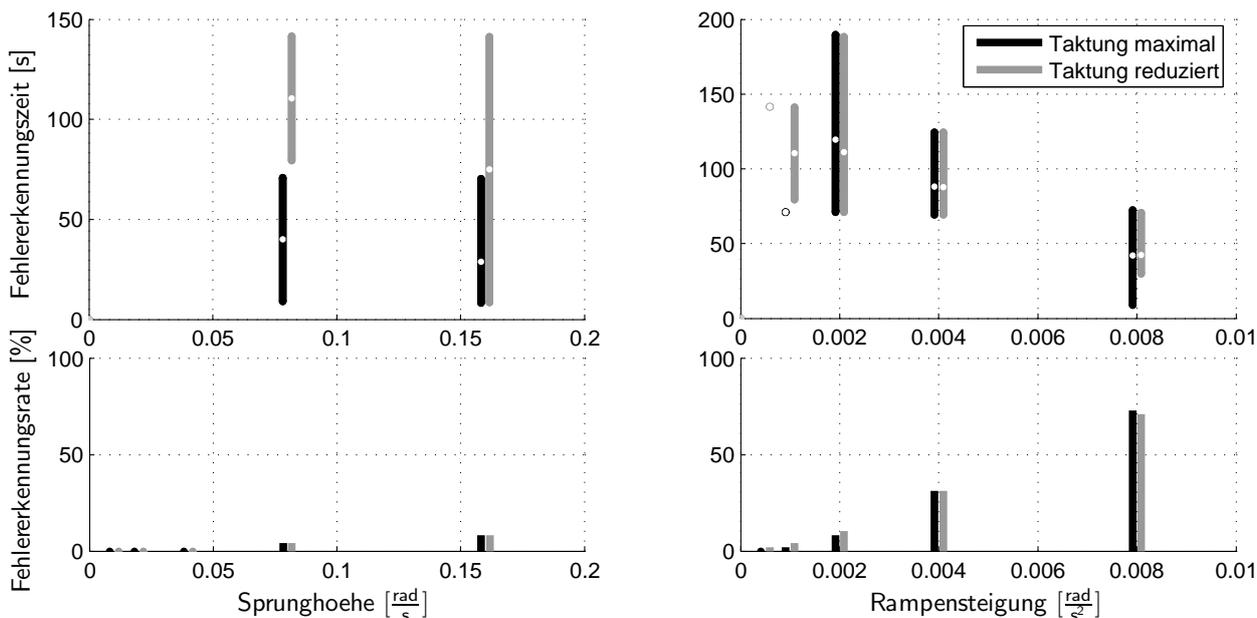


Bild 8.14: Fehlererkennungszeit und -rate der modellbasierten Überwachung für unterschiedliche zeitliche Taktungen betroffener Module

Ableichsmodule über die letzten vier Zyklen. Auf diese Weise werden große Amplituden vermieden, jedoch verlieren die Eingangsgrößen wie bei dem trägeren Verlauf einer Filtergröße an Aktualität. Neben den Nullpunktfehlern weisen die -toleranzen ebenfalls tendenziell gleiche Verläufe auf. Die Abweichungen sind neben den angepassten Parametern die Folge der durch die Taktung eingeschränkten Datenbasis.

Die mit reduzierter Taktung ermittelten Nullpunktfehler wirken sich über die Kompensation des Sensorsignals direkt auf das Nutzsignal der Gierwinkelgeschwindigkeit und damit auf die das Nutzsignal verwendenden Module aus. Folglich besteht eine direkte Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Modellgrößen sowie der modellbasierten Überwachung. Die Resultate der Modellüberwachungen sind in **Bild 8.14** für Konfigurationen K1 mit reduzierter (20 ms) und K3 mit maximaler Taktung (10 ms) gegenübergestellt. Die Ergebnisse für maximale Taktung der Module sind mit denen in **Bild 8.10** identisch. Die mit reduzierter Taktung erzielten Fehlererkennungszeiten liegen bei sprungförmigen Amplituden hinter der Vorgabe mit Maximaltaktung. Im Fall von rampenförmigen Fehlern ist das Niveau dagegen sehr ähnlich. Bei einer Rampensteigung von $0,0005 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ werden von der Implementierung mit reduzierter Taktung sogar Fehler erkannt, die mit Maximaltaktung nicht detektiert werden. Die Fehlererkennungsraten beider Konfigurationen weisen wie erwartet eine hohe Übereinstimmung auf. Die Ursachen der Abweichungen gleichen den im Zusammenhang der Nullpunktfehlerbestimmung diskutierten. Darüber hinaus besteht für die Implementierung mit maximaler Taktung der Vorteil, dass mehr Zyklen für eine Fehlererkennung vorhanden sind. Folglich werden auch die Modellgrößen und die Modellüberwachungen eine höhere Verfügbarkeit aufweisen, was zu einer schnelleren Fehlererkennung beiträgt.

8.6 Bewertung der Fehlerbehandlung

Für die Fehlerbehandlung sind zwei Fehlerarten zu unterscheiden. Externe Fehler, d. h., Fehler der fahrdynamischen Eingangssignale der ZSDA, sollen über die implementierten Erkennungs-

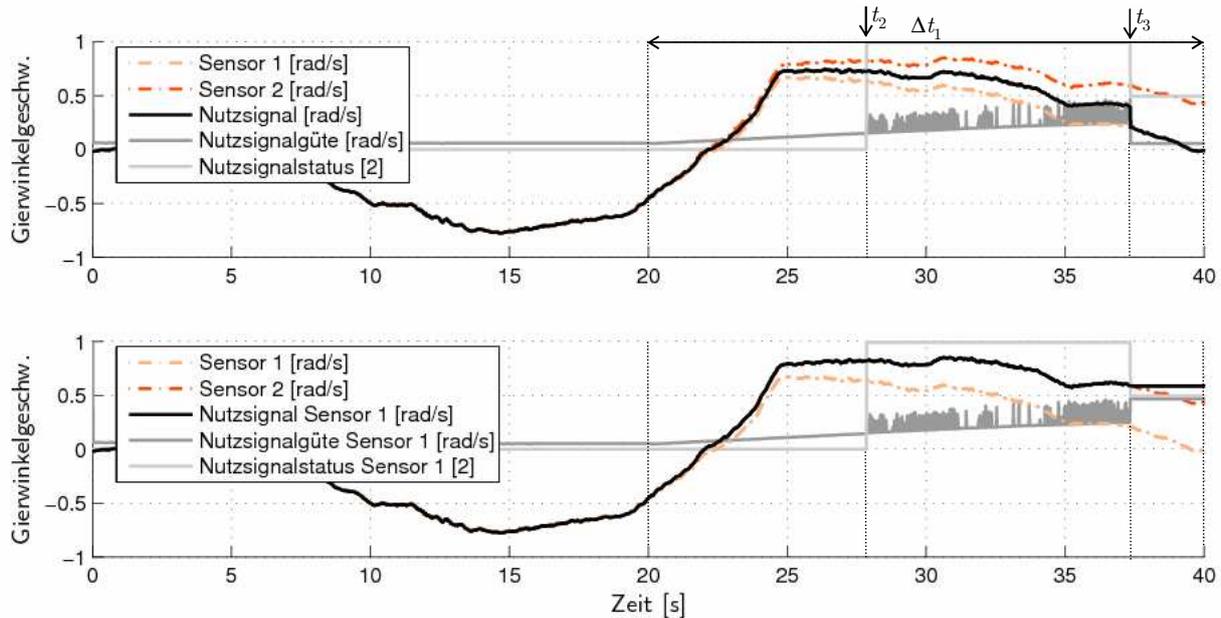


Bild 8.15: Nutzschnittstelle: Oben auf Basis der redundanten Sensoren der Gierwinkelgeschwindigkeit nach Konzept S3 sowie unten sensorindividuell nach Konzept S4 (N2: Beidseitiger Wendekreis auf Schneedecke, $v_{Fzg} = [2...12] \frac{m}{s}$, $\delta = [-8...8] \text{ rad}$; Manipulation: $\Delta \ddot{\psi}_1(20...40s) = 0,025 \frac{\text{rad}}{s^2}$)

methoden detektiert und die weitere Verwendung der Signale unterbunden werden. Interne Fehler, die von einzelnen Implementierungseinheiten der ZSDA induziert werden, stellen eine weitere Fehlerquelle dar. Die Strategien zur Fehlerbehandlung in beiden Fällen werden nachfolgend bewertet.

8.6.1 Externe Fehler

Im Folgenden wird zwischen Einfach- und Mehrfachfehlern unterschieden. Erstere dienen zur Beschreibung der Auswirkungen auf die Nutzschnittstelle, letztere dem Zusammenspiel der unterschiedlichen Überwachungstypen innerhalb der ZSDA.

Einfachfehler

Als Nutzschnittstelle werden zu Vergleichszwecken die zwei aus Abschnitt 6.1.1 (Seite 70) bekannten Konzepte S3 und S4 realisiert. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf dem Nutzsignal, der Nutzsignalgüte und dem -status. Nachfolgend erfolgt daher die Beurteilung der Kommunikation dieser Informationen an die Signalnutzer. Die Bereitstellung eines Ersatzwertes in Form einer Modellgröße wird trotz ihrer Verfügbarkeit nicht demonstriert, da keine neuen Erkenntnisse zu erwarten sind und die Entscheidung für eine Vorgehensweise (Notwendigkeit einer Ersatzgröße, Auswahl einer geeigneten analytischen Redundanz, Umgang mit Verfügbarkeitsinformationen etc.) in Abstimmung mit den nutzenden Reglern erfolgen muss.

In **Bild 8.15** (oben) wird Sensor 1 der Gierwinkelgeschwindigkeit im Zeitraum $\Delta t_1 = [20...40] \text{ s}$ mit einem rampenförmigen Fehler $\Delta \ddot{\psi}_1(\Delta t_1) = 0,04 \frac{\text{rad}}{s^2}$ beaufschlagt. Da Konzept S3 die redundante Sensorik zur Bereitstellung des Nutzsignals verwendet, verläuft dieses als Mittelwert stets zwischen den Einzelsensorsignalen. Bei $t_2 = 27,8 \text{ s}$ wird ein Redundanzfehler erkannt,

der zum Setzen des Nutzsinalstatus auf den Wert 2 für zwei potentiell fehlerhafte Sensoren führt. Da der Fehler keinem Sensor zuzuordnen ist, wird als Nutzsinal weiterhin der Mittelwert ausgegeben. Erst nach Zuordnung des Fehlers über die Modellüberwachung bei $t_3 = 37,3\text{ s}$ springt das Nutzsinal auf den Verlauf des fehlerfreien Sensors 2. Die Handhabung dieses Signalsprungs, der über den Nutzsinalstatus kommuniziert wird, ist von jedem nutzenden Regelsystem individuell und in Abhängigkeit seiner Signalanforderungen vorzunehmen. Der Nutzsinalstatus wird aufgrund des identifizierten fehlerfreien Sensors auf eins zurückgesetzt. Die Nutzsinalgüte nach Gleichung (7.3) wird anfangs nahezu ausschließlich von der Nullpunktfehlertoleranz dominiert. Mit dem Beginn der Phase Δt_1 und dem rampenförmigen Fehler beginnt sie mit der Redundanzabweichung anzusteigen. Nach dem erkannten Redundanzfehler wird weiterhin das durch mindestens einen fehlerhaften Sensor beeinträchtigte Nutzsinal ausgegeben. Um diesen Umständen Rechnung zu tragen, wird die Toleranz in diesem Bereich neben den Nullpunktfehlertoleranzen $y_{\text{Np,Tol},\langle 1,2 \rangle}$ und den Rauschamplituden $y_{\text{Rau},\langle 1,2 \rangle}$ im Fall $N > 1$ aus dem Maximum der weiterhin berechneten Redundanzabweichung $y_{\text{Abw,Red}}$ und im Gegensatz zu Gleichung (7.3) zusätzlich aus den Modellabweichungen $y_{\text{Abw,Mod},\langle 1,2 \rangle}$ gebildet:

$$y_{\text{Gue}} = \max(y_{\text{Abw,Red}}, y_{\text{Abw,Mod},\langle 1,2 \rangle}) + \max(y_{\text{Np,Tol},\langle 1,2 \rangle}) + \max(y_{\text{Rau},\langle 1,2 \rangle}) \quad (8.6)$$

Folglich steigt die Toleranz bis t_3 stetig an, wobei ihr Betrag den maximal möglichen Fehler widerspiegelt. Die Ausschläge nach oben resultieren aus den temporär detektierten Modellabweichungen auf Basis der aktuellen Referenzgrößen. Nach Zuordnung des Fehlers ist die Bestimmung der Redundanzabweichung nicht mehr möglich. Die Nutzsinalgüte wird stattdessen mit der Modellabweichung gebildet. Da diese aufgrund der nun vorliegenden Fehlerfreiheit des Systems keine Abweichung detektiert, sinkt die Nutzsinalgüte abrupt auf ihren Betrag vor Auftreten des Fehlers.

Die Vorgehensweise nach Konzept S4 ist ähnlich, jedoch wird kein gemitteltetes Nutzsinal ausgegeben, sondern eines für jedes Einzelsignal. In **Bild 8.15** (unten) ist die Ausgabe beispielhaft für den fehlerhaften Sensor 1 dargestellt. Im Gegensatz zu Konzept S3 ist das Nutzsinal für Sensor 1 bis zur Fehlerzuordnung bei t_3 identisch mit diesem, um anschließend auf dem letztgültigen Wert gehalten zu werden. Parallel zu diesem Verlauf steht Sensor 2 als verbleibendes Nutzsinal zur Verfügung. Die Degradation von Sensor 1 und die damit verbundene Umschaltung auf den fehlerfreien Sensor erfolgt durch den Regler.

Beide Nutzsinalschnittstellen werden anhand von Konfiguration K3 nach **Tabelle 6.4** vorgestellt, das heißt, auf Basis der Kombination von modell- und redundanzbasierten Überwachungsmethoden. Ohne modellbasierte Methoden wie in Konfiguration K2 kann ein einzelner Sensorfehler bei redundanter Sensorik nicht zugewiesen werden, so dass bereits ab dem Zeitpunkt des erkannten Redundanzfehlers t_2 der letztgültige Mittel- bzw. Signalwert beider Sensoren ausgegeben wird. Ist dagegen neben der signal- ausschließlich die modellbasierte Überwachung vorhanden wie in Konfiguration K1, fehlt die Fehlerinformation zum Zeitpunkt t_2 . Der Fehler wird erst bei t_3 erkannt und sogleich zugeordnet. Die Degradation des Nutzsinalsignals erfolgt ebenfalls zu diesem Zeitpunkt. Liegt Einfachsensorik vor, ist dieses Vorgehen ähnlich dem Konzept S4.

Allgemein gilt, dass der Regler über die Nutzsinalgüte zu jedem Zeitpunkt über die maximal mögliche Abweichung des Sensorsignals vom tatsächlichen Wert informiert wird. Des Weiteren wird über die Nutzsinalstatus kommuniziert, ob bereits ein Fehler detektiert wurde. Die Entscheidung über die Verwendung der Nutzsinalsignale auf Basis der bereitgestellten Informationen sowie der reglerindividuellen Signalanforderungen obliegt dem Regelsystem. Ob Konzept S3 oder S4 die geeignete Wahl darstellt, kann ebenfalls nur in Abstimmung mit den

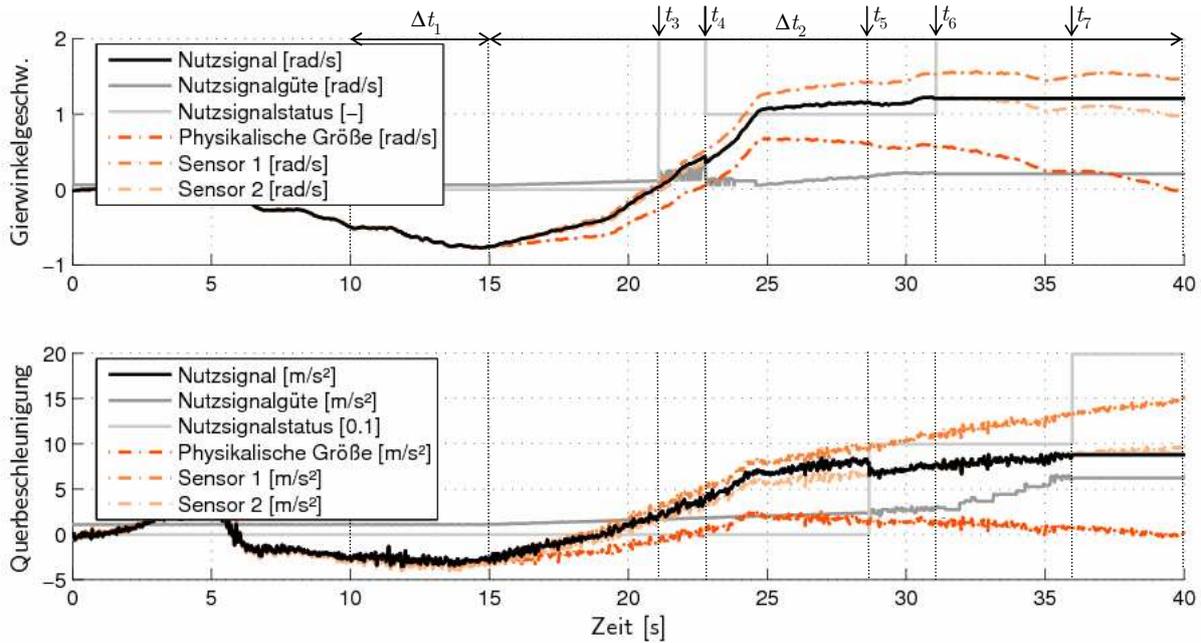


Bild 8.16: Auswirkungen von Mehrfachfehlern auf die Nutzschnittstelle nach Konzept S3 (N2: Beidseitiger Wendekreis auf Schneedecke, $v_{Fzg} = [2...12] \frac{m}{s}$, $\delta = [-8...8] \text{rad}$; Manipulationen: $\Delta\ddot{\psi}_1(15...40s) = 0,05 \frac{rad}{s^2}$, $\Delta\ddot{\psi}_2(15...40s) = 0,025 \frac{rad}{s^2}$, $\Delta\dot{y}_{Fzg,1}(15...40s) = 0,6 \frac{m}{s^3}$, $\Delta\dot{y}_{Fzg,2}(15...40s) = 0,4 \frac{m}{s^3}$)

nutzenden Regelsystemen erfolgen und hängt stark mit den gewünschten Freiheitsgraden zur Nutzschnittstelle zusammen.

Wie bereits in Abschnitt 6.2.3 diskutiert, bestünde außerdem die Möglichkeit, Fehler ausschließlich mit statischen Erkennungsmethoden (vgl. Klassifizierung in **Bild 8.9**) zu detektieren. Dynamische Ansätze führen im Gegenzug lediglich zu einem Anstieg der Nutzschnittstelle als dynamisches Qualitätsmaß. Auf diese Weise wird die Entscheidung über die Verwendung eines Nutzschnittstelle an das Regelsystem als Signalnutzer übertragen, was unterschiedliche Interpretationen eines Sensorsignals je nach Signalanforderung eines Regelsystems erlaubt. Folglich erhöht sich der Freiheitsgrad bezüglich Signalverwendung und Nutzschnittstelle weiter, was dem zentralen Anspruch der ZSDA unterstreicht. Eine Umsetzung in dieser Arbeit erfolgt nicht, um eine bessere Vergleichbarkeit der dynamischen Fehlererkennungsmethoden in Abschnitt 8.3.4 zu ermöglichen.

Mehrfachfehler

Gegenüber der Kommunikation von Fehlern an die Signalnutzer steht die Bewertung der Performanz der Fehlererkennung im Mittelpunkt der folgenden Beurteilung. Grundsätzlich können mit der aktuellen Umsetzung Fehler der Gierwinkelgeschwindigkeits- und Querbeschleunigungssensoren erkannt werden. Ist wie in Konfiguration K2 und K3 nach **Tabelle 6.4** zusätzlich redundante Sensorik vorhanden, können maximal vier fehlerhafte Sensoren zugewiesen werden. Dieser für das zugrunde liegende Konzept schlimmste anzunehmende Mehrfachfehlerfall soll gepaart mit gleichzeitig, aber schleichend auftretenden Fehlern als Ausgangsbasis der folgenden Untersuchung dienen. Die Nutzschnittstelleausgabe erfolgt nach Schnittstellenkonzept S3 nach Abschnitt 6.1.1 (Seite 70).

In **Bild 8.16** werden im Bereich $\Delta t_2 = [15...40]$ s die vier überwachten Sensoren mit rampenförmigen Fehlern $\Delta\dot{\psi}_1(\Delta t_2) = 0,05 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ und $\Delta\dot{\psi}_2(\Delta t_2) = 0,025 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ für die Gierwinkelgeschwindigkeit sowie $\Delta\dot{y}_{\text{Fzg},1}(\Delta t_2) = 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$ und $\Delta\dot{y}_{\text{Fzg},3}(\Delta t_2) = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$ für die Querbeschleunigung beaufschlagt. Der Verlauf der fehlerfreien physikalischen Größen ist zur besseren Übersicht zusätzlich eingezeichnet. Die Rampensteigungen der redundanten Sensoren werden jeweils unterschiedlich gewählt, da gemäß Abschnitt 6.2.2 die modell- in Kombination mit den redundanzbasierten Ansätzen nur dann zu einem Fehler führen, wenn vorher mindestens eine Redundanzüberwachung einen Fehler detektiert. Auf diese Weise wird unter Vernachlässigung eines unwahrscheinlichen zeitgleichen Zweifachfehlers auf beiden redundanten Sensoren sichergestellt, dass sich potentielle Ungenauigkeiten der Modellgrößen und folglich der modellbasierten Fehlererkennung nicht auf die Verfügbarkeit des Gesamtsystems auswirken. Zusätzlich informiert die Nutzsignalgüte wie gewohnt zu jedem Zeitpunkt über den maximal möglichen Fehler.

Zum Zeitpunkt $t_3 = 21,1$ s werden die fehlerhaften Gierwinkelgeschwindigkeitssensoren von den Redundanzüberwachungen erkannt. Die Zuordnung des Fehlers zum Sensor 1 erfolgt bei $t_4 = 22,8$ s. Das Nutzsignal springt auf das zweite, ebenfalls fehlerhafte Sensorsignal. Der zweite Sensor wird nachträglich bei $t_6 = 31,1$ s von der Modellüberwachung als unplausibel erkannt, was zum Halten des letztgültigen Nutzsignals führt. Äquivalent erfolgt die Fehlererkennung für den ersten Querbeschleunigungssensor redundanzbasiert bei $t_5 = 28,6$ s. Der Nutzsignalstatus nimmt nicht den Wert zwei, sondern eins an, da vor der Redundanz- bereits die Modellüberwachung einen Fehler detektiert hat. Diese Fehlerdetektion hat jedoch erst eine Konsequenz auf die Nutzsignalausgabe, sobald die Redundanzüberwachung den Fehler bestätigt. Zum Zeitpunkt $t_7 = 36,0$ s erfolgt schließlich die Erkennung des vierten defekten Sensors.

Die Fehlererkennung und -zuordnung ist folglich auch bei einer eingeschränkten Sensorbasis möglich. Die fehlerhaften Signale werden nach der Erkennung nicht mehr verwendet und können sich nicht auf die Funktionslogik auswirken. Die Modellüberwachungen sind trotz der fehlerhaften Sensoren funktionsfähig, da auch auf die in diesem Konzept nicht überwachten, aber als verfügbar angenommenen Sensoren wie Raddrehzahlen und Lenkradwinkel zurückgegriffen wird.

8.6.2 Interne Fehler

Zur Maximierung der Verfügbarkeit werden die Module einer ZSDA mittels Wertebereichsüberwachungen und – je nach Sicherheitsanforderungen an das Gesamtsystem – auch mittels einer diversitären Implementierung gemäß Abschnitt 6.1.3 (Seite 78) überprüft. Insbesondere die Umsetzung einer diversitären Funktionsrealisierung kann mit erheblichem Aufwand verbunden sein, da diese zwar nach denselben Anforderungen, aber von unterschiedlichen Entwicklern oder mit unterschiedlichen Methoden realisiert werden muss. Hier bietet sich erneut der SALM-Ansatz an, der bereits bei der Bereitstellung von Modellgrößen bezüglich der Qualität der generierten Signale nach Abschnitt 8.3.2 überzeugte. Die Voraussetzung für eine Anwendung ist gegeben, da die Ein- und Ausgangsgröße(n) aufgrund der existierenden Hauptimplementierung generell verfügbar sind. Stehen weiterhin Trainings- und Validierungsdaten in Form von Messungen bereit, kann der Entwurf des diversitären Funktionszweigs erfolgen. Nachteilig wirkt sich aus, dass für jede benötigte Ausgangsgröße ein eigener Entwurf vollzogen werden muss. Ist die Nachbildung einer großen Anzahl von Signalen notwendig, steigt auch der Entwicklungsaufwand proportional an. Des Weiteren ist nur die Anwendung

auf kontinuierliche Zusammenhänge möglich.

Im Rahmen des Konzepts einer ZSDA wird die Beurteilung der Modulfunktionalität ausschließlich auf Basis der Wertebereichsüberwachungen realisiert. Bei entsprechender Parametrierung weist eine Wertebereichsüberschreitung auf einen Fehler in einer Implementierungseinheit bzw. in den von dieser genutzten Speicherbereichen des Steuergerätes hin. Um die Funktionalität und die Verfügbarkeit einer Signaldatenaufbereitung im Modulfehlerfall nur minimal einzuschränken, werden ausschließlich das fehlerhafte Modul und die mit diesem in Verbindung stehenden Einheiten passiviert. Im Zuge der Arbeit mit der Vernetzungsdatenbank und der aus dieser extrahierten Vernetzungsmatrix nach Abschnitt 7.1.4 (Seite 96) zeigt sich, dass zwischen den einzelnen Implementierungseinheiten ein starker Austausch von Schnittstellengrößen sowohl direkt als auch indirekt über andere Module und Rückführungen stattfindet. Diese starke Vernetzung hat zur Folge, dass ein fehlerhaftes Modul einen Großteil oder sogar die Gesamtheit der Module beeinflussen und daher die Funktionalität als Ganzes zum Erliegen bringen kann. Die angestrebte partielle Deaktivierung einer Teilmenge der Module ist folglich nicht realisierbar.

Alternativ ist daher eine „intelligendere“ Fehlerbehandlung denkbar, die zunächst ausschließlich den Einfluss des betroffenen Moduls auf das System eliminiert. Statt der fehlerhaften Ausgangsgrößen werden Ersatzwerte bereitgestellt, die allen signalnutzenden Modulen zur Verfügung gestellt werden. Ein Ersatzwert ist ein alternatives Signal mit ähnlichem Informationsgehalt oder aber ein konstanter Fehlerwert. Wird beispielsweise ein Modul zur Bestimmung eines Abgleichwertes als fehlerhaft erkannt, können statt des dynamischen Nullpunktfehlers der Fehlerwert null und statt der Nullpunktfehlertoleranz der Maximalwert ausgegeben werden. Auf diese Weise ist die Modulfunktionalität aller betroffenen Implementierungseinheiten zwar eingeschränkt, das Gesamtsystem aber weiterhin verfügbar. Allerdings ist dieses Vorgehen mit erheblichem Aufwand bezüglich Spezifikation, Implementierung und Test verbunden, der sich ausschließlich im als selten einzustufenden Fall von Modulfehlern auszahlt. Eine Entscheidung über eine Umsetzung muss auf Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse und anhand der geltenden Sicherheitsanforderungen erfolgen.

8.7 Bewertung nicht-funktionaler Anforderungen

Die Bewertung der nicht-funktionalen Anforderungen ist gleichzusetzen mit einer Bewertung der entworfenen Softwarearchitektur. Nach Abschnitt 4.5 bezieht die Architekturbewertung die Gesamtheit der Projektbeteiligten in die Bewertung ein. Da es sich bei der in dieser Arbeit entwickelten ZSDA jedoch um einen Prototyp innerhalb der Vorentwicklung handelt, sind viele Rollen noch nicht besetzt oder sind auf wenige beteiligte Personen konzentriert. Die Bewertung muss daher bei Konkretisierung der Rollen wiederholt und verfeinert werden.

Die Definition der Anforderungen sind in Kapitel 5 ab Seite 62 zu finden.

Anforderung 2 (Erweiterbarkeit) Die Erweiterbarkeit um neue Sensoren wird durch die hierarchische Dekomposition nach Abschnitt 6.1.3 vorgehalten, weil die einen Sensor betreffende Funktionalität ausschließlich in einer Implementierungsebene angesiedelt ist. Auf diese Weise ist bei einer Erweiterung der Sensorbasis die Änderung der Implementierung lokal konzentriert. Weitere Module sind ausschließlich über Schnittstellenänderungen betroffen, wenn beispielsweise statt einer Modellgröße der neu integrierte Sensor verwendet wird. Änderungen bezüglich Spezifikation und Test treten nur dann auf, wenn die erwähnten Schnittstellenände-

rungen notwendig sind oder sich innerhalb eines Sensorblocks Varianten ergeben (z. B. einfache oder redundante Sensorik, Variationen des Funktionsumfangs). Trotz geänderter Schnittstellen können Anforderungen und Testfälle mit geringen Modifikationen wiederverwendet werden.

Anforderung 12 (Modularität) Die Modularität der Implementierung stellt die Generalisierung der Erweiterbarkeit dar. Während letztere ihren Schwerpunkt auf variable Fahrdynamiksensorik legt, ist das Ziel der Modularisierung die Strukturierung des Gesamtsystems. Sie wird konsequent umgesetzt und in **Tabelle 7.1** zusammengefasst. Es wird darauf geachtet, dass einzelne Teile der Funktionalität wie Überwachungstypen und Abgleiche einfach in das Gesamtsystem integriert bzw. aus diesem herausgelöst werden können. Eine wichtige Rolle bei der Definition der Funktionsumfänge spielt die Wiederverwendbarkeit einzelner Module, die anhand der Definition von Bibliotheken nach **Tabelle 7.2** bestätigt wird und einen Beitrag zur Einsparung von Entwicklungsaufwand leistet.

Anforderung 13 (Spezifizier- und Testbarkeit) Die im Zusammenhang mit Anforderung 12 umgesetzte Beschränkung auf beherrschbare Teile der Implementierung legt außerdem nahe, dass sowohl die Spezifizier- als auch die Testbarkeit der einzelnen Module gewährleistet ist. Die Spezifikation wird anhand der Dokumentation der funktionalen Implementierung in Abschnitt 7.2 grundlegend demonstriert. Eine abschließende Bewertung kann jedoch erst nach der expliziten Ausführung dieser Tätigkeiten erfolgen. Neben der funktionalen Implementierung in Form der Module müssen auch die übergeordneten Integrationsebenen validiert werden. Die Realisierung von Spezifikation und Test auf diesen Ebenen hängt eng mit dem Grad der Abstraktion bei der Formulierung der Anforderungen zusammen.

Anforderung 16 (Integrierbarkeit) Die Integrierbarkeit wird für die verwendete Entwicklungsumgebung unter Beweis gestellt. Die Grundlage bildet das Modul *Datenkonvertierung*, das die Anpassungen der externen Signale und Statusinformationen an den internen Standard verantwortet. Ist eine Adaption an neue Rahmenbedingungen notwendig, beschränken sich die Anpassungen auf ein einzelnes Modul, während der Großteil des Systems unberührt bleibt.

Anforderung 17 (Einheitlichkeit) Das Entwurfsprinzip der Einheitlichkeit stellt einen elementaren Ansatz dar, ein System nicht nur beherrschbar, sondern vielmehr für Entwickler und Anwender effizient zu gestalten. Vor diesem Hintergrund werden unterschiedliche Maßnahmen umgesetzt. Dazu zählen die einheitliche Strukturierung mehrfach verwendeter Elemente wie Bibliotheken, Parameter etc. und die gleichartige Untergliederung der sensorspezifischen Blöcke (vgl. Abschnitt 6.1.3). Auch der gesamtheitlich verfolgte Ansatz der eigensicheren Module nach **Bild 6.5** unterstützt die Umsetzung der Anforderung. Darüber hinaus werden mehrfach verwendete Funktionen generisch entwickelt und nach **Tabelle 7.2** beliebig oft im Systemverbund eingesetzt. Die Maßnahmen unterstützen die Orientierung im Gesamtsystem und helfen, den Entwicklungsaufwand zu senken.

Anforderung 18 (Trennung der Zuständigkeiten) Die Forderung nach der Trennung der Zuständigkeiten ist ein in der Praxis bewährtes Entwurfsprinzip, das Änderungen innerhalb des Systems durch separate, im Idealfall autonome Implementierungseinheiten vereinfachen

soll (vgl. Abschnitt 4.2). Die Anforderung verfolgt ähnliche Ziele wie die Modularität, jedoch fokussiert sie stärker den Gesamtkontext der einzelnen Module bezüglich der Abhängigkeiten untereinander. Bis auf wenige Ausnahmen wie die Trennung der Schätzung der Schräglaufsteifigkeiten von der Verwendung in den adaptiven Einspurmodellen und der damit verbundenen Aufteilung auf die Blöcke *Fahrzustand* und *Modellgrößen* ist das Prinzip berücksichtigt worden. In einigen Fällen führt diese Vorgehensweise zu kompakten Modulen wie den Langzeitabgleichs- und den Rauschüberwachungen. Die erwähnte Ausnahme zeigt das für einen Softwarearchitekturentwurf notwendige Abwägen zwischen gegensätzlichen Zielen. Im genannten Beispiel wird die funktionale Gliederung und die Anforderungen nach Spezifizierung und Testbarkeit höher gewichtet als die Modularität.

Anforderung 19 (Applizierbarkeit) Applizierbarkeit ist unter den in diesem Abschnitt bewerteten Qualitätsattributen das einzige, das einen funktionalen Charakter besitzt. Funktional deshalb, weil die Tätigkeit der Applikation unterstützt werden soll, was durch die Strukturierung der Parameter nach Abschnitt 6.1.3 (Seite 77) und die Handhabung von Fahrzeugvarianten gemäß Abschnitt 6.2.4 erreicht wird. In dieser Arbeit werden die Fahrzeugvarianten nach **Tabelle A.5** abgedeckt. Auch die Arbeit mit unterschiedlichen Konfigurationen wird nach Abschnitt 6.1.2 unterstützt. Neben den funktionalen Aspekten wird die in Abschnitt 7.1.5 beschriebene Anpassung des Zeitverhaltens realisiert, die eine automatisierte Variation der Parametrierung und folglich eine gezielte Beeinflussung des Rechenzeitbedarfs zulässt.

8.8 Unbewertete Anforderungen

Zwei der erhobenen Anforderungen können nicht bewertet werden. Anforderung 1 definiert die minimale Sensorbasis einer ZSDA. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch lediglich ein Prototyp umgesetzt wird, ist die Vernachlässigung einzelner Funktionsteile wie die Nullpunktfehlerbestimmung der Querschleunigung und des Lenkradwinkels gerechtfertigt. Sie können jedoch dank der vorgehaltenen Variabilität einfach in das Gesamtsystem integriert werden.

Daneben beinhaltet Anforderung 15 die Forderung nach einem ausreichend dimensionierten Träger der Algorithmen in Form eines Steuergeräts. Diese Anforderung gewinnt erst dann an Relevanz, wenn eine ZSDA das Stadium der Vorentwicklung verlässt und seriennah in einem Fahrzeug umgesetzt werden soll.

8.9 Bewertung gegenüber konventioneller Signaldatenaufbereitung

Auf Basis der erhobenen Anforderungen werden die Errungenschaften der ZSDA gegenüber einer konventionellen, auf ein einzelnes Regelsystem zugeschnittenen Signaldatenaufbereitung zusammengefasst. Eine Übersicht der Bewertung ist in **Tabelle 8.6** zu finden.

Die Anforderungen an die Sensorbasis, die Signal- und Sensorgenauigkeit sowie die Sicherheit treffen beide Ausprägungen der Signaldatenaufbereitung gleichermaßen. Sie sind entscheidende Treiber des Entwurfs. Gleiches gilt für die Anforderung nach funktionalen Inhalten wie Abgleichen und Überwachungen. Jedoch kann die ZSDA durch die Bündelung von Wissen und Entwicklungsaktivitäten einen Vorteil für die Umsetzung der Funktionen verbuchen. Das

gilt ebenfalls für die Forderung nach Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit des Funktionsumfangs, die im Fall der ZSDA auf die gewählte Ausprägung der Softwarearchitektur eingewirkt haben und infolgedessen im Entwurf Berücksichtigung finden.

Die Signalgüte ist für konventionelle Ansätze in der Regel nicht realisiert, da durch die Versorgung eines Regelsystems harte Fehlererkennungsschwellen vorgesehen werden. Folglich existiert durch die Spezialisierung auf eine Systemkonfiguration weder eine standardisierte noch eine anforderungsbasierte Nutzschnittstelle. Der zentrale Ansatz ist dagegen auf eine vollwertige Ausprägung dieser Eigenschaften ausgelegt, da nur durch eine strikte Entkopplung von Signaldatenaufbereitung und Regler eine Mehrfachnutzung der Nutzsignale sichergestellt werden kann.

Nicht-funktionale Anforderungen wie Modularität, Spezifizier-/Testbarkeit, Einheitlichkeit und das Prinzip der Trennung der Zuständigkeiten können nicht objektiv beurteilt werden, zumal die Realisierung bei konventionellen Ansätzen stark variieren kann. In den Entwurf der ZSDA sind diese Anforderungen jedoch eingeflossen, vor allem bezüglich der zugrunde liegenden hierarchischen Dekomposition des Gesamtsystems und der daraus resultierenden Wiederverwendbarkeit einzelner Implementierungseinheiten, so dass die Handhabung und Pflege des Gesamtsystems unterstützt wird.

Die Rekonfiguration hängt stark von der notwendigen Verfügbarkeit der Signaldatenaufbereitung im Systemverbund und mit dem investierten Entwicklungsaufwand zusammen. Nutzen zeigt das Vorgehen ausschließlich dann, wenn eine unwahrscheinliche Einschränkung der Rahmenbedingungen eintritt (z. B. Ausfall eines Sensors). In der ZSDA ist der Umgang von Sensor- oder Signalausfällen in die Umsetzung integriert. Die Behandlung von Fehlern

Tabelle 8.6: Vergleich zwischen konventioneller und zentraler Signaldatenaufbereitung anhand der erhobenen Anforderungen (*Legende: ■ - Anforderung erfüllt, ☒ - teilweise erfüllt, □ - nicht erfüllt, × - nicht bewertet*)

Anforderung		Signaldatenaufbereitung	
Seite	Titel	Konventionell	Zentral
62	Sensorbasis	■	■
62	Erweiterbarkeit	☒	■
62	Signalgenauigkeit	■	■
63	Sensorgenauigkeit	■	■
63	Nullpunktfehler	■	■
63	Signalgüte	□	■
63	Überwachung der Sensoren	■	■
63	Standardisierte Schnittstelle	☒	■
64	Anforderungsbasierte Nutzsignale	☒	■
64	Rekonfiguration	☒	☒
64	Skalierbarkeit	□	■
64	Modularität	☒	■
65	Spezifizier- und Testbarkeit	☒	■
65	Zeitverhalten	□	■
65	Hardwareplattform	×	×
65	Integrierbarkeit	☒	■
65	Einheitlichkeit	☒	■
65	Trennung der Zuständigkeiten	☒	☒
65	Applizierbarkeit	☒	■
65	Sicherheit	■	■

einzelner Implementierungseinheiten über Rückfallebenen der Module ist für beide Ansätze denkbar.

Bei der Applizierbarkeit liegt ebenfalls eine große Varianz konventioneller Konzepte vor. In der ZSDA ist neben einem Konzept zur Parameterverwaltung auch die automatisierte Applikation zeitabhängiger Parameter realisiert, die zu einer Einsparung von Entwicklungsaufwand beiträgt. Ein weiterer Vorteil der ZSDA ist die Adaption der Taktung einzelner Module, um eine Skalierung des benötigten Rechenzeitbedarfs an beliebige Steuergeräte sicherzustellen.

Da nur zwei Module die Kommunikation an der Eingangs- und Ausgangsschnittstelle der ZSDA übernehmen, ist auch eine einfache Integration in wechselnde Umgebungen möglich. Die Anforderung an die gezielte Auslegung der Steuergeräte betrifft den konventionellen und den zentralen Ansatz gleichermaßen, bleibt aber aufgrund der speziellen Rahmenbedingungen in einzelnen Projekten bei der Bewertung außen vor.

8.10 Zusammenfassung

Das funktionsfähige Gesamtsystem dient als Grundlage der Simulationen, mit denen der Grad der Zielerreichung auf Basis der erhobenen Anforderungen bewertet wird. Die funktionale Leistungsfähigkeit von Sensorabgleichen und Fehlererkennungen wird demonstriert. Die Nullpunktfehlerabgleiche der Gierwinkelgeschwindigkeit werden mittels unterschiedlicher Ansätze bestimmt, die jeder für sich und in unterschiedlichen, aber sich gegenseitig ergänzenden Fahrsituationen exakte Ergebnisse liefern. Die Kopplung der Einzelergebnisse wird dynamisch über die den Abgleichsfortschritt kennzeichnenden Toleranzen umgesetzt.

Die signal-, modell- und redundanzbasierten Überwachungsansätze werden einander gegenübergestellt und ein Diagrammtyp entworfen, die eine Bewertung dynamischer Methoden bezüglich Fehlererkennungszeit und -rate in Abhängigkeit der Fehleramplitude ermöglicht. Die Überlegenheit der redundanzbasierten gegenüber den modellbasierten Ansätzen bestätigt sich ebenso wie die Untrennbarkeit von Sensorabgleichen und dynamischen Überwachungen für die Güte der Fehlererkennung. Der im Stand der Technik erläuterte und aus der Antriebssteuerungsentwicklung stammende SALM-Ansatz wird in dieser Arbeit erstmals auf fahrdynamische Zusammenhänge übertragen. Ein mittels statistischer Methoden ausgeführter Vergleich der verfügbaren Modellgrößen zeigt die Überlegenheit des kennfeldbasierten SALM-Ansatzes gegenüber analytischen und adaptiven Methoden. Seine Anwendbarkeit erstreckt sich von der Modellierung fahrdynamischer Zusammenhänge bis zur Realisierung diversitärer Implementierungen für sicherheitsrelevante Systeme auf beliebige kontinuierliche, über Datensätze beschriebene Abhängigkeiten.

Die Analyse der Fehlerbehandlung demonstriert darüber hinaus das zuverlässige Erkennen von Einfach- und Mehrfachfehlern. Die standardisierte Schnittstelle vermag in diesem Zusammenhang den Zielkonflikt zwischen Sicherheit und Verfügbarkeit über ein kontinuierliches und dynamisches Gütemaß aufzulösen und die Bedienung unterschiedlicher Regleranforderungen sicherzustellen. Statische Fehlererkennungen führen aufgrund ihrer harten Erkennungsschwelle dagegen sofort zur Kennzeichnung des betroffenen Sensors.

Mit der Erweiterbarkeit um neue Sensoren sowie der Wiederverwendung und Skalierung von Funktionsumfängen wird die Wirksamkeit der Softwarearchitektur aufgezeigt. Die Variabilität des Gesamtsystems bezüglich der zeitlichen Taktung der Module gewährt einen neuen Freiheitsgrad bei der Systemauslegung. Einen elementaren Beitrag leisten die über nicht-funktionale Anforderungen eingeflossenen Eigenschaften wie Modularität und Einheitlichkeit

der Umsetzung.

Es bestätigt sich, dass sich die Realisierung der ZSDA gegenüber den gegensätzlichen Anforderungen funktionaler und nicht-funktionaler Natur behauptet. Trotz der gegenüber konventionellen Ansätzen gestiegenen Anforderungen kann ein leistungsfähiges und dabei flexibles Gesamtsystem realisiert werden.

9 Zusammenfassung

Im Bereich des automobilen Fahrwerks ist eine starke Zunahme von mechatronischen Systemen zu beobachten. Aufgrund ihres Potentials zur Markendifferenzierung leistet die Gruppe der Fahrwerkregelsysteme einen entscheidenden Beitrag. Die vorherrschende parallele Entwicklungsweise einzelner Regelsysteme eröffnet dabei zahlreiche Synergien, die sich von der Funktionsintegration über die Hardware- und Softwarearchitektur bis zum Entwicklungsprozess erstrecken. Eine mögliche Herangehensweise zur Beherrschung der wachsenden Komplexität und zur Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems ist die Zentralisierung einzelner Komponenten in der Wirkungskette der Regelsysteme und damit einhergehend die Bündelung von Wissen und Entwicklungsumfängen. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Szenarios einer zentralen Signaldatenaufbereitung für Fahrwerkregelsysteme.

Der Entwurf stützt sich auf drei Themenbereiche, die das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Zum einen müssen die neuen Herausforderungen in Verbindung mit der zentralen Stellung der Signaldatenaufbereitung analysiert und in das Konzept integriert werden. Da in diesem Schritt eine Reihe nicht-funktionaler Anforderungen einfließen, muss zum anderen eine geeignete Softwarearchitektur entworfen werden, die die Umsetzung dieser Qualitätsattribute sicherstellt. Darüber hinaus bildet sie den Rahmen für die zu realisierenden funktionalen Inhalte, die die dritte Säule eines leistungsfähigen Gesamtsystems bilden.

Die Einzelbereiche werden bezüglich ihrer Möglichkeiten analysiert und der Stand der Technik umfassend recherchiert. Es wird deutlich, dass eine Softwarekomponente mit ähnlichen Eigenschaften bisher nicht untersucht und publiziert wurde. Vor diesem Hintergrund wird als erster Schritt zur Realisierung eine Anforderungsanalyse im Bereich der Fahrerassistenzsysteme mit dem Schwerpunkt auf der Fahrwerkregelung durchgeführt und herausgearbeitet, dass eine Vielzahl von Regelsystemen identische oder ähnliche Fahrdynamiksensorik voraussetzt. Diese Systeme kommen zum Teil miteinander kombiniert in einem Fahrzeug zum Einsatz. Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass im Vergleich zu den aktuell verfügbaren Signaldatenaufbereitungen zusätzliche Anforderungen nicht-funktionaler Natur Berücksichtigung finden müssen. Dazu zählen vor allem die Erweiterbarkeit eines bestehenden Systems um neue Sensoren und die Skalierbarkeit zwischen unterschiedlichen Funktionskonfigurationen, um eine variable Anpassung an das Zielfahrzeug und seine Ausstattung zu ermöglichen.

Basierend auf den erhobenen Anforderungen wird ein Konzept erarbeitet, das im Rahmen eines Softwarearchitekturentwurfs die erhobenen Ziele verwirklicht. Kern der Architektur ist eine hierarchische Dekomposition, die sich durch die Zusammenfassung der einen Sensor betreffenden Funktionsumfänge auszeichnet. Auf diese Weise kann neue Sensorik mit minimalen Wechselwirkungen zu anderen Implementierungseinheiten in das Gesamtsystem integriert werden. Als optionaler Bestandteil von Konfigurationen sind die Bereitstellung von Modellgrößen und die modellbasierten Überwachungen von den sensorspezifischen Umfängen getrennt, was das Skalierungsverhalten auch bezüglich Spezifikations- und Testaufwand optimiert. Unterstützt wird das Konzept durch die Standardisierung von Teilen der zentralen Signaldatenaufbereitung, die sich in der Wiederverwendbarkeit einmal entwickelter Funktionen wie Gradientenüberwachungen oder Abgleichmodulen sowie in der strukturierten Vorgehensweise innerhalb des Systementwurfs widerspiegelt. Dazu zählt die einheitliche Handhabung mehr-

fach verwendeter Elemente wie Vorberechnungen, Bibliotheksfunktionen und Parametern.

Die Skalierbarkeit der zentralen Signaldatenaufbereitung wird anhand von drei Konfigurationen mit unterschiedlichen Funktionsumfängen demonstriert. Über eine Vernetzungsdatenbank ist eine schnelle Anpassung des Gesamtsystems an ein Zielfahrzeug möglich, aber auch das parallele Entwickeln unterschiedlicher Varianten. Teil der Konfigurationen sind die das Zeitverhalten einzelner Implementierungseinheiten charakterisierenden Parameter. Auf diese Weise eröffnet sich ein neuer Freiheitsgrad zur individuellen Anpassung von Funktionen an die zur Verfügung stehenden Ressourcen eines Steuergeräts. Darüber hinaus wird eine Vorgehensweise entwickelt, die eine automatisierte Anpassung der Parameter an eine geänderte zeitliche Taktung eines Moduls sicherstellt und den Applikationsaufwand deutlich reduziert. Weitere Konfigurationsmerkmale sind die Anzahl der verfügbaren Sensoren und der umgesetzte Funktionsumfang.

Grundlage der modellbasierten Fehlererkennung sind Schätzgrößen, die mit verschiedenen Methoden bereitgestellt werden. Aufgrund der fehlenden physikalischen Interpretierbarkeit ist der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen – trotz hoher erzielbarer Genauigkeit – im Bereich sicherheitsrelevanter Systeme bisher nicht gegeben. Der in dieser Arbeit erstmals auf fahrdynamische Zusammenhänge übertragene SALM-Ansatz basiert auf abschnittsweise linear definierten Kennlinien sowie -feldern und nutzt für den Entwurf die über Messungen bereitgestellten physikalischen Zusammenhänge. Der Methode gelingt es, die Vorteile einer akkuraten Modellierung mit einer präzisen graphischen Darstellung des Einflusses beteiligter fahrdynamischer Größen zu kombinieren. Die generische Vorgehensweise ist auf beliebige kontinuierliche Zusammenhänge übertragbar und kann aufgrund des linearen Ansatzes ressourcenschonend eingesetzt werden.

Besondere Bedeutung kommt der Schnittstelle zwischen zentraler Signaldatenaufbereitung und den die plausibilisierten Signale nutzenden Regelsystemen zu. Die Bereitstellung einer reglerindividuellen Schnittstelle ist sowohl aufgrund des entstehenden Entwicklungsaufwands auf Seiten der Signaldatenaufbereitung als auch wegen des entstehenden umfangreichen und damit ressourcenintensiven Signalaustausches ausgeschlossen. Abhilfe schafft ein standardisierter und generalisierter Ansatz, der mit einer minimalen Anzahl von Schnittstellengrößen den Reglern eine maximale Individualisierung der Nutzung der Fahrdynamikmessgrößen gewährleistet. Kern ist die Aufteilung der ausgetauschten Größen in Nutzsignal, -güte und -status. Über die Güte wird zu jedem Zeitpunkt die Qualität des Nutzsignals in Form des größtmöglichen Fehlers kommuniziert. Bei Bedarf wird das Nutzsignal weiter in die an seiner Bildung beteiligten Sensorsignale separiert und deren Güte und Status sensorindividuell ausgegeben. Die Entscheidung über eine Signalverwendung kann auf diese Weise von der Reglerentwicklung anforderungsbasiert und äußerst flexibel getroffen werden. Eine weitere Steigerung bietet der Verzicht auf die Fehlererkennung durch Überwachungen mit dynamischen Schwellen. Die Information über die eingeschränkte Signalqualität wird in diesem Fall ausschließlich über die Nutzsignalgüte übertragen und ermöglicht eine weitere Individualisierung der Reaktion einzelner Regler, da die Abschaltsschwellen nicht mehr zentral in der ZSDA hinterlegt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Realisierung einer zentralen Signaldatenaufbereitung nicht nur möglich ist, sondern mittelfristig erhebliches Einsparpotenzial vor dem Hintergrund des erforderlichen Entwicklungsaufwandes bietet. Dieses steigt mit der Zahl der versorgten Fahrwerkregelsysteme. Neben dem Einsatz der zentralen Signaldatenaufbereitung als zentrale Einheit für einen vollständig umgesetzten Integrationsansatz für vernetzte Fahrwerkregelsysteme bietet sich alternativ die Bereitstellung maßgeschneiderter Konfigurationen für einzelne

Fahrwerkregelsysteme auf separaten Steuergeräten an. Die zu entwickelnde Komponente ist in beiden Fällen identisch, die zu erwartenden Synergien beträchtlich. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind als Entwicklungshilfsmittel anzusehen und unterstützen den Entwurf und die Umsetzung einer ZSDA, die die Grundlage für alle weiteren, zentralen Komponenten der Fahrwerksregelung bildet.

Literaturverzeichnis

- [AHKS02] AUERSWALD, M., M. HERRMANN, S. KOWALEWSKI und V. SCHULTE: *Entwurfsmuster für fehlertolerante softwareintensive Systeme*. Automatisierungstechnik, 50(8):389–398, 2002.
- [Ahr06] AHRHOLDT, W.: *Softwareblockspezifikation der Signaldatenaufbereitung für das Audi Sportdifferenzial*. AUDI AG, 2006.
- [ALR01] AVIZIENIS, A., J. LAPRIE und B. RANDELL: *Fundamental Concepts of Computer System Dependability*. In: *IARP/IEEE RAS Workshop On Robot*, 2001.
- [Anr04] ANRIG, B.: *Künstliche Neuronale Netze – Eine Einführung*. Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Informatik Biel, März 2004.
- [AR98] ASHRAFI, B. und D. RECKER: *Unites States Patent US 5,742,918: Method and apparatus for dynamically compensating a lateral acceleration of a motor vehicle*. Ford Global Technologies, LLC, 1998.
- [Arn04] ARNDT, D.: *Deutsches Patent DE 102 47 992 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung des Offsetwertes*. Robert Bosch GmbH, 2004.
- [AS08] AHRHOLDT, W. und R. SCHWARZ: *Zentrale Signaldatenaufbereitung für vernetzte Fahrwerkregelsysteme – Herausforderungen und Lösungsansätze*. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. AUDI AG, Oktober 2008.
- [AS09] AHRHOLDT, W. und R. SCHWARZ: *Central signal processing unit for chassis control systems*. ATZautotechnology, 9(2):22–26, April 2009.
- [Bau08] BAUER, M.: *Entwicklung eines Überwachungskonzepts für redundante Fahrdynamiksensorik*. Diplomarbeit, Institut für Automatisierungstechnik (IAT), TU Darmstadt, 2008.
- [BBB⁺08] BILLIG, C., H. BOEDRICH, J. BRACK, B. HÖLL, M. HOLLE und F. KIMMICH: *Die Dynamic Performance Control von BMW*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 110(11):984–992, November 2008.
- [BBF⁺06] BERTRAM, T., M. BÖRNER, D. FISCHER, R. ISERMANN, F. NIEWELS, R. SCHWARZ, A. TRÄCHTLER et al.: *Fahrdynamik-Regelung. Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. Vieweg, 1. Auflage, 2006.
- [BBK00] BACHMANN, F., L. BASS und M. KLEIN: *Illuminating the Fundamental Contributors to Software Architecture Quality*. Technischer Bericht, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2000.
- [BBK03] BACHMANN, F., L. BASS und M. KLEIN: *Deriving Architectural Tactics: A Step Toward Methodical Architectural Design*. Technischer Bericht, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2003.
- [BCK03] BASS, L., P. CLEMENTS und R. KAZMAN: *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley, 2. Auflage, 2003.
- [BFH⁺02] BENZINGER, M., R. FREITAG, W. HUBER, M. WIMMER und R. WOLPERT:

- Deutsches Patent DE 101 62 689 A1: Vorrichtung und Überwachung von in einem Fahrzeug angeordneten Sensormitteln.* DaimlerChrysler AG, 2002.
- [BG04] BABAR, M. und I. GORTON: *Comparison of Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods.* In: *11th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)*, Seiten 600–607, Korea, 2004.
- [BKB02] BASS, L., M. KLEIN und F. BACHMANN: *Quality Attribute Design Primitives.* Technischer Bericht, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2002.
- [BKK01] BASS, L., R. KAZMAN und M. KLEIN: *Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies.* Addison-Wesley, 2001.
- [BMW08a] BMW TECHNIKLEXIKON: *Dynamic Drive.* http://www.bmw.com/com/de/insights/technology/technology_guide/articles/dynamic_drive.html, August 2008.
- [BMW08b] BMW TECHNIKLEXIKON: *Dynamic Performance Control.* http://www.bmw.com/com/de/insights/technology/technology_guide/articles/mm_dynamic_performance_control.html, August 2008.
- [BPH01] BAUMANN, M., C. PFISTER und R. HERBST: *Deutsches Patent DE 199 19 860 C2: Verfahren zum Abgleich eines Lenkwinkelsignals.* DaimlerChrysler AG, 2001.
- [Bör03] BÖRNER, M.: *Adaptive Querdynamikmodelle für Personenkraftfahrzeuge – Fahrzustandserkennung und Sensorfehlertoleranz.* Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2003.
- [Bre05] BRETTHAUER, G.: *Automatisierungstechnik – Quo vadis? Neun Thesen zur zukünftigen Entwicklung.* at – Automatisierungstechnik, 53(4-5):155–157, 2005.
- [BS07] BRAESS, H.-H. und U. SEIFFERT: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* Vieweg+Teubner, 5. Auflage, 2007.
- [BSMM01] BRONSTEIN, I., K. SEMENDJAJEW, G. MUSIOL und H. MÜHLIG: *Taschenbuch der Mathematik.* Verlag Harri Deutsch, 5. Auflage, 2001.
- [CCA02] COELINGH, E., P. CHAUMETTE und M. ANDERSSON: *Open-Interface Definitions for Automotive Systems.* In: *SAE World Congress*, März 2002.
- [CH03] COSSY, M. und F. HEPPELLE: *Softwarearchitektur für sicherheitsrelevante Systeme im Automobil.* Automotive Electronics, März 2003.
- [Cos03a] COSSY, M.: *Software Safety Architecture to Fulfill Increased Safety and Availability Requirements.* In: *SAE 2003 World Congress, Detroit, USA*, März 2003.
- [Cos03b] COSSY, M.: *Software-Sicherheitsarchitektur für Steuergeräte im Fahrzeug.* In: *Entwicklerforum Kfz-Elektronik Design & Elektronik*, Mai 2003.
- [Cos03c] COSSY, M.: *Software-Sicherheitsarchitektur zur Tolerierung von Hardware- und Softwarefehlern.* In: *GI Jahrestagung (Schwerpunkt: Sicherheit - Schutz und Zuverlässigkeit)*, Seiten 249–260, September 2003.
- [CZ02] CHIA, M. und S. ZARABADI: *United States Patent US 6,486,661 B2: Sensor bias drift compensation.* Delphi Technologies, Inc., 2002.
- [DB07] DANNENBERG, J. und J. BURGARD: *2015 Car Innovations - A comprehensive study on innovations in the automotive industry.* Oliver Wyman, 2007.
- [Deu90] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 40041: Zuverlässigkeit; Begriffe,*

- 1990.
- [Deu95] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 55350: Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik – Teil 11: Begriffe des Qualitätsmanagements*, 1995.
- [DH00] DING, E. und R. HERBST: *Deutsches Patent DE 199 36 439 A1: Sensoranordnung mit Überwachungseinrichtung, insbesondere für ein ESP-System für Fahrzeuge*. Continental Teves AG & Co. oHG, 2000.
- [Din99] DING, E.: *Modellgestützte Sensorüberwachung eines ESP-Systems*. Automatisierungstechnische Praxis (atp), Juli 1999.
- [Din00] DING, E.: *Deutsches Patent DE 199 39 872 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Sensorüberwachung insbesondere für ein ESP-System für Fahrzeuge*. Continental Teves AG & Co. oHG, 2000.
- [Din03] DING, E.: *Deutsches Patent DE 199 36 434 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung einer Mehrzahl von einen Prozess erfassenden Sensoren, insbesondere für ein ESP-System für Fahrzeuge*. Continental Teves AG & Co. oHG, 2003.
- [DM05] DING, E. und T. MASSEL: *Neues Konzept zur redundanten Überwachung von Querbeschleunigungssensoren*. Automobiltechnische Zeitung (ATZ), Seiten 324–329, April 2005.
- [DN02] DOBRICA, L. und E. NIEMELA: *A Survey on Software Architecture Analysis Methods*. IEEE Transactions on Software Architecture, 28(7):638–653, Juli 2002.
- [DSDR05] DING, S., S. SCHNEIDER, E. DING und A. REHM: *Advanced model-based diagnosis of sensor faults in vehicle dynamics*. In: *IFAC World Congress, Prag, Tschechische Republik*, 2005.
- [EPK⁺02] ECKRICH, M., M. PISCHINGER, M. KRENN, R. BARTZ und P. MUNNIX: *Aktivlenkung - Anforderungen an Sicherheitstechnik und Entwicklungsprozess*. In: *11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, Seiten 1169–1184, 2002.
- [FGdF06] FRICKE, N., C. GLASER und M. DE FILIPPIS: *Passive und Aktive Sicherheitsmaßnahmen im Kraftfahrzeug*. MMI interaktiv, 10:39–47, 2006.
- [For07] FORM, T.: *Vorlesung Fahrzeugelektronik: Fahrwerk*. Lehrstuhl für elektronische Fahrzeugsysteme, Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig, Februar 2007.
- [Fro04] FROST & SULLIVAN: *Strategic Analysis of the European Integrated Chassis System Market*. 2004.
- [GAACB95] GACEK, C., A. ABD-ALLAH, B. CLARK und B. BOEHM: *On the Definition of Software System Architecture*. Technischer Bericht, University of Southern California, 1995.
- [Goe07] GOERG, P.: *Softwaremodulspezifikation Abgleich Gierrate für das Audi Sportdifferenzial*. AUDI AG, 2007.
- [Gor06] GORTON, I.: *Essential Software Architecture*. Springer, 1. Auflage, 2006.
- [GS94] GARLAN, D. und M. SHAW: *An Introduction to Software Architecture*. Technischer Bericht, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1994.
- [Hal08] HALBE, I.: *Modellgestützte Informationsplattform für längs- und querdynamische Kfz-Sensoren – Anwendungen zur Sensorfehlerdiagnose und Sensorfehlertoleranz*. Doktorarbeit, Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, 2008.

- [HBS⁺06] HEINECKE, H., J. BIELEFELD, K.-P. SCHNELLE, N. MALDENER, H. FENNEL, O. WEIS, T. WEBER, J. RUH, L. LUNDH, T. SANDÉN, P. HEITKÄMPER, R. RIMKUS, J. LEFLOUR, A. GILBERG, U. VIRNICH, S. VOGET, K. NISHIKAWA, K. KAJIO, T. SCHARNHORST und B. KUNKEL: *AUTOSAR – Current results and preparations for exploitation*. In: *7th Euroforum conference ‚Software in the vehicle‘*, Mai 2006.
- [HE07] HEISSING, B. und M. ERSOY: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Vieweg, 1. Auflage, 2007.
- [Her07] HERDT, A.: *Anforderungen von Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsystemen an die Fahrdynamiksensorik: Gesprächsprotokolle*. AUDI AG, 2007.
- [Hes06] HESTERMEYER, T.: *Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs*. Doktorarbeit, Universität Paderborn, 2006.
- [Höf96] HÖFLING, T.: *Methoden zur Fehlererkennung mit Parameterschätzung und Paritätsgleichungen*. Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1996.
- [HNS00] HOFMEISTER, C., R. NORD und D. SONI: *Applied software architecture*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2000.
- [Hof03] HOFMANN, D.: *Entwicklung einer zentralen Sensorauswertung für die Fahrzeugbewegung*. In: *VDI Berichte Nr. 1789*. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2003.
- [Hof06] HOFFMANN, J.: *Taschenbuch der Messtechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 4. Auflage, 2006.
- [HOR06] HILLENBRAND, S., S. OTTERBEIN und A. REHM: *System zur Überwachung und Schätzung fahrdynamischer Signale*. In: *VDI-Berichte Nr. 1931*, Seiten 239–248. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2006.
- [HS06] HOHENBICHLER, N. und K. SIX: *Potentiale aktiver und semiaktiver Skyhook-Regelgesetze in der Sekundärfederstufe von Schienenfahrzeugen*. at – Automatisierungstechnik, 2006.
- [HSF⁺04] HEINECKE, H., K.-P. SCHNELLE, H. FENNEL, J. BORTOLAZZI, L. LUNDH, J. LEFLOUR, J.-L. MATÉ, K. NISHIKAWA und T. SCHARNHORST: *Automotive open system architecture - an industry-wide initiative to manage the complexity of emerging automotive E/E architectures*. In: *Convergence Transportation Electronics Association*, 2004.
- [IHO02] IONITA, M., D. HAMMER und H. OBBINK: *Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods: An Overview*. In: *International Conference on Software Engineering (ICSE)*, Florida, USA, 2002.
- [Int98] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61508-1: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements*, 1998.
- [Ise96] ISERMANN, R.: *Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose Technischer Systeme (Teil 1)*. *Automatisierungstechnische Praxis (atp)*, 38(5):9–20, 1996.
- [Ise05] ISERMANN, R.: *Mechatronic Systems. Fundamentals*. Springer, 1. Auflage, 2005.
- [Ise06] ISERMANN, R.: *Fault-Diagnosis Systems – An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. 1. Auflage, 2006.

- [ISS02] ISERMANN, R., R. SCHWARZ und S. STÖLZL: *Fault-tolerant drive-by-wire systems*. IEEE Control Systems Magazine, Seiten 64–81, Oktober 2002.
- [JBB⁺01] JURR, R., S. BEHNSEN, H. BRUNS, G. HELD, M. HOCHGREBE, M. STRASSBERGER und F. ZIEGLMEIER: *Das aktive Wank-Stabilisierungssystem Dynamic Drive*. Automobiltechnische Zeitung (ATZ)/Motortechnische Zeitung (MTZ) Extra: Der neue BMW 7er, Seiten 76–81, November 2001.
- [JSB03] JURR, R., M. STRASSBERGER und H. BRUNS: *Dynamic Drive – Das Wankstabilisierungssystem des 7er und des neuen 5er*. In: *Hydraulik im Kraftfahrzeug – Systeme und Komponenten*. Haus der Technik, Essen, November 2003.
- [Kel08] KELZ, G.: *Einführung in die Fahrzeugmesstechnik*. Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz, 2008.
- [KESS06] KOEHN, P., M. ECKRICH, H. SMAKMANN und A. SCHAFFERT: *Integrated Chassis Management: Introduction into BMW's Approach to ICM*. In: *SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA*. BMW Group, April 2006.
- [KFKK03] KUSTOSCH, M., R. FREI, W. KIND und R. KALLENBACH: *Flexible Markencharakterisierung mit der CARTRONIC-Systemarchitektur*. Auto & Elektronik, Januar 2003.
- [KG02a] KIRRMANN, H. und K.-E. GROSSPIETSCH: *Fehlertolerante Steuerungs- und Regelungssysteme*. at – Automatisierungstechnik, 50(8):362–374, 2002.
- [KG02b] KIRRMANN, H. und K.-E. GROSSPIETSCH: *Fehlertolerante Systeme in der Automatisierungstechnik*. at – Automatisierungstechnik, 50(8):359–361, 2002.
- [KH02] KALLENBACH, R. und W. HERMSEN: *CARTRONIC Systemarchitektur zur Vernetzung elektronischer Fahrzeugsysteme*. In: *VDA Technischer Kongress*, Seiten 249,251–260. Bosch Gruppe, 2002.
- [Köh06] KÖHLER, D.: *Entwicklung eines rechnergestützten „greybox“-Verfahrens zur Abbildung von Nichtlinearitäten komplexer Triebwerke für die saugrohrbasierte Berechnung der Frischluftfüllung im Brennraum*. Diplomarbeit, Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, 2006.
- [KI87] KAWABE, T. und K. ITO: *United States Patent US 4,706,771: Vehicle steering control system using desired vehicle model*. Nissan Motor Co., Ltd., 1987.
- [KMPF06] KRETSCHMANN, M., A. MAYER, H. PREIS und J. FIEDLER: *Verfahren zur Generierung von eigensicheren und qualitätsoptimierten Fahrdynamik Sensorsignalen*. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, Seiten 1553–1572. Siemens VDO Automotive AG, Oktober 2006.
- [KRC02] KONIK, D., P. REDLICH und E. COELINGH: *Integrated Vehicle Dynamics Control – Interface Requirements*. In: *Tag des Fahrwerks*, Seiten 65–74, Oktober 2002.
- [KRSV06] KOEHN, P., T. RICHTER, H. SMAKMANN und H. VIELER: *Integrated Chassis Management – ein Weg zur Integrierten Fahrdynamikregelung*. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, Seiten 775–792. BMW Group, Oktober 2006.
- [Kru95] KRUCHTEN, P.: *Architectural Blueprints – The 4+1 View Model of Software Architecture*. IEEE Software, 12(6):42–50, November 1995.

- [Lan07] LANNOIJE, M.: *Lastenheft Audi Dynamiklenkung: SCU-Funktionen und Sicherheitskonzept*. AUDI AG, 2007.
- [LF00] LEFFLER, H. und W. FOAG: *Prospects and Aspects of An Integrated Chassis Management ICM*. In: *SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA*. BMW Group, März 2000.
- [LMP98] LOHRENZ, F., F. MENTEN und G. PROBST: *United States Patent US 5,719,790: Method and circuit configuration for compensating for signal errors of a yaw velocity sensor*. Siemens AG, 1998.
- [Lun01] LUNZE, J.: *Regelungstechnik*, Band 1. Springer, 3. Auflage, 2001.
- [Lun02] LUNZE, J.: *Regelungstechnik*, Band 2. Springer, 2. Auflage, 2002.
- [MA01] MADAU, D. und B. ASHRAFI: *United States Patent US 6,314,329 B1: Compensating algorithm for initializing yaw rate sensor's zero point offset*. Visteon Global Technologies, Inc., 2001.
- [Meh07] MEHOFER, F.: *Softwaremodulspezifikation Überwachung Gierrate für das Audi Sportdifferenzial*. AUDI AG, 2007.
- [Mei06] MEISSNER, T.: *Systemanforderungsspezifikation Audi Sportdifferenzial*. AUDI AG, 2006.
- [Mei08] MEISSNER, T. C.: *Verbesserung der Fahrzeugquerdynamik durch variable Antriebsmomentenverteilung*. Doktorarbeit, TU München, 2008.
- [Mey08] MEYERS LEXIKONVERLAG: *Eigenlenkverhalten*. <http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Eigenlenkverhalten&oldid=188243>, Februar 2008.
- [MF02] MERCER MANAGEMENT CONSULTING und FRAUNHOFER GESELLSCHAFT: *Materialien zur Automobilindustrie: Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 – die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie*, Band 32. Verband der Automobilindustrie (VDA), 2002.
- [Mie05] MIELKE, A.: *Neuronale Netze*. Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, März 2005.
- [MKA⁺07] MAO, Y., J. KARIDAS, C. ARNDT, M. LAKEHAL-AYAT, R. GRAAF und O. HOFMANN: *Beobachtung von Fahrzeugzuständen der Querdynamik mit integrierter Reibwertschätzung*. *Automobiltechnische Zeitung (ATZ)*, 5:450–455, Mai 2007.
- [Mül96] MÜLLER, K.: *Entwurf robuster Regelungen*. B. G. Teubner Stuttgart, 1. Auflage, 1996.
- [Mül08] MÜLLER, R.: *Risikoanalyse Electric Power Steering*. AUDI AG, 2008.
- [Mor06] MORGAN, G.: *Auswirkungen von AUTOSAR auf zukünftige Steuergerätesoftware*. *Automobiltechnische Zeitung elektronik (ATZelextronik)*, 3:6–13, September 2006.
- [Mot04] MOTOR INDUSTRY RESEARCH ASSOCIATION: *MISRA-C: 2004 – Guidelines for the use of the C language in critical systems*. 2004.
- [MPMS09] MEISSNER, T., U. PINSCHMIDT, F. MARTIN und R. SCHWARZ: *The new Sport Differential in the Audi S4*. In: *9. European All-Wheel Drive Congress Graz*. AUDI AG, April 2009.

- [MSB04] MAHMOUD, R., A. SUISSA und F. BÖTTIGER: *Deutsches Patent DE 196 07 429 B4: Fehlertolerante Steuerungseinrichtung für ein physikalisches System, insbesondere Fahrdynamikregelung für ein Kraftfahrzeug*. DaimlerChrysler AG, 2004.
- [Mun02] MUNNIX, P.: *Entwicklung einer robusten Sensorüberwachung für den integrierten Fahrwerksregler*. In: *11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik*, Seiten 1111–1125. StabiControl GmbH, München, 2002.
- [Mun06] MUNNIX, P.: *Nutzsignalaufbereitung und funktionale Sicherheit bei der Integration der Fahrwerksregelung*. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik*, Seiten 1541–1551. StabiControl GmbH, München, Oktober 2006.
- [MUV96] MERGENTHALER, R.-H., W. URBAN und A. VOLKART: *Deutsches Patent DE 196 36 443 A1: Vorrichtung und Verfahren zur Überwachung von Sensoren in einem Fahrzeug*. Robert Bosch GmbH, 1996.
- [MW04] MITSCHKE, M. und H. WALLENTOWITZ: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 4. Auflage, 2004.
- [Nus01] NUSEIBEH, B.: *Weaving Together Requirements and Architectures*. IEEE Computer, 34(3):115–119, März 2001.
- [OT94] OKUDA, E. und M. TAKIGAWA: *United States Patent US 5,321,616: Vehicle control apparatus*. Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 1994.
- [PCC03] PATOK, K., A. CHANDY und M. COLOSKY: *United States Patent US 6,564,125 B2: Method for updating a sensor using a robust sensor offset learning algorithm*. Delphi Technologies, Inc., 2003.
- [Pfe98] PFEUFER, T.: *Modellgestützte Fehlererkennung und Diagnose am Beispiel eines Kraftfahrzeugaktors*. Doktorarbeit, Institut für Automatisierungstechnik (IAT), TU Darmstadt, 1998.
- [PK04] PUSCHNIG, A. und R. KOLAGARI: *Requirements Engineering in the Development of Innovative Automotive Embedded Software Systems*. In: *RE '04: Proceedings of the Requirements Engineering Conference, 12th IEEE International (RE'04)*, Seiten 328–333, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [RB06] RÜHMANN, H. und H. BUBB: *Fahrerassistenzsysteme – Ein Gewinn an Sicherheit und Komfort oder elektronischer Schnickschnack?* Ergonomie aktuell, 1(7):2–13, 2006.
- [RBK06] RUMPE, B., C. BERGER und H. KRAHN: *Softwaretechnische Absicherung intelligenter Systeme im Fahrzeug*. In: *21. VDI/VW-Gemeinschaftstagung - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*, Wolfsburg, Oktober 2006.
- [RDH01] RIETH, P., S. DRUMM und M. HARNISCHFEGER: *Elektronisches Stabilitätsprogramm: Die Bremse, die lenkt*, Band 223. Verlag Moderne Industrie, 1. Auflage, 2001.
- [Rei92] REISS, T.: *Fehlerfrüherkennung an Bearbeitungszentren mit den Messsignalen des Vorschubantriebs*. Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1992.
- [Rei03] REICHEL, H.: *Elektronische Bremssysteme: Vom ABS zum Brake-by-Wire*. Expert Verlag, 2. Auflage, 2003.
- [RH06] REUSSNER, R. und P. HASSELBRING: *Handbuch der Software-Architektur*.

- dpunkt.verlag, 1. Auflage, 2006.
- [RS08] RICHARD, H. und M. SANDER: *Technische Mechanik. Dynamik*. Vieweg, 1. Auflage, 2008.
- [Sag06] SAGEFKA, M.: *Funktionsanforderungsspezifikation Audi Sportdifferenzial*. AUDI AG, 2006.
- [Sam08] SAMENFINK, P.: *Kundenlastenheft Electric Power Steering*. AUDI AG, 2008.
- [SB06] SAMUEL, S. und T. BROWN: *Deutsches Patent DE 603 02 506 T2: Verfahren und System zur Korrektur von Sensor-Offsets*. Ford Global Technologies, LLC, 2006.
- [SB07] SCHWARZ, R. und A. BIESALSKI: *Audi drive select – individualisierbares Fahrerlebnis im neuen Audi A4*. In: *16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*. AUDI AG, September 2007.
- [Sch02a] SCHLAICH, J.: *Beitrag zur Entwicklung eines Dispositionswerkzeuges zur Optimierung betriebsbedingter Wartezeiten im schienengebundenen Verkehr*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2002.
- [Sch02b] SCHULZE, M.: *Zuverlässigkeit im Schienenverkehr*. Universität Oldenburg, 2002.
- [Sch04] SCHWARZ, R.: *Systemvernetzung und Funktionseigenentwicklung im Fahrwerk – Neue Herausforderungen für Hersteller und Zulieferer*. In: *Tag des Fahrwerks*. AUDI AG, Oktober 2004.
- [Sch06] SCHULLER, J.: *Risikoanalyse Audi Dynamiklenkung*. AUDI AG, 2006.
- [SDM+08] SCHWARZ, R., W. DICK, T. MEISSNER, U. PINSCHMIDT und F. MARTIN: *Dynamic steering and quattro with sport differential – Two perfect partners for highest agility and active safety*. In: *FISITA World Automotive Congress*. AUDI AG, September 2008.
- [SK94] SHIRAISHI, S. und H. KIRYU: *United States Patent US 5,333,058: Yaw motion control device*. Honda Giken Konyo Kabushiki Kaisha, 1994.
- [SLM07] SCHULLER, J., M. LANNOIJE und M. MEYS: *Entwurf und Realisierung des Sicherheitskonzepts der Audi Dynamiklenkung*. In: *Mechatronik – Innovative Produktentwicklung*. VDI Wissensforum IWB GmbH, 2007.
- [SLS+06] SCHULLER, J., M. LANNOIJE, M. SAGEFKA, W. DICK und R. SCHWARZ: *Achieving Functional Safety of Audi Dynamic Steering using a structured Development Process*. In: *4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Heidelberg, 2006.
- [SR02] SCHWARZ, R. und P. RIETH: *Global Chassis Control – Systemvernetzung im Fahrzeug*. In: *Autoreg, Mannheim*. Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt, April 2002.
- [SVE+06] STÜTZLE, T., U. VIREECK, M. ENNING, A. STRIBERSKY und W. RULKA: *Adaptiver Gleitschutz für Schienenfahrzeuge*. at – Automatisierungstechnik, 2006.
- [TO98] TRÄNKLER, H.-R. und E. OBERMEISTER: *Sensortechnik*. Springer, 1. Auflage, 1998.
- [VOS+08] VIELER, H., D. ODENTHAL, H. SMAKMAN, T. RICHTER und P. KÖHN: *Integrated Chassis Management – ein Weg zur Integrierten Fahrdynamikregelung*. In: *Autoreg, Baden-Baden*. BMW Group, München, Februar 2008.

- [vZ04] ZANTEN, A. VAN: *Fahrdynamik und Fahrdynamikregelsysteme*. Schulungsunterlagen, Robert Bosch GmbH, 2004.
- [Wal05] WALLENTOWITZ, H.: *Vertikal-/Querdynamik von Kraftfahrzeugen*. Institut für Kraftfahrwesen (ika), Aachen, 7. Auflage, 2005.
- [WIHS04] WINNER, H., R. ISERMANN, H. HANSELKA und A. SCHÜRR: *Wann kommt By-Wire auch für Bremse und Lenkung?* In: *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG*, Seiten 59–72, 2004.
- [Wil93] WILLIAMS, D.: *United States Patent US 5,274,576: Aparatus for measuring the yaw rate of a vehicle*. Group Lotus PLC, 1993.
- [Wil05] WILSON, D.: *Electric power steering: one good turn deserves another*. http://www.embedded.com/columns/technicalinsights/164904435?_requestid=387788, Juni 2005.
- [WK04] WU, W. und T. KELLY: *Safety Tactics for Software Architecture Design*. In: *28th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, September 2004.
- [WK06a] WU, W. und T. KELLY: *Deriving Safety Requirements as Part of System Architecture Definition*. In: *24th International System Safety Conference*, Albuquerque, USA, August 2006.
- [WK06b] WU, W. und T. KELLY: *Managing Architectural Design Decisions for Safety-Critical Software Systems*. In: *2nd International Conference on the Quality of Software Architectures QoSA*, Juni 2006.
- [WS99] WOLFRIED, S. und W. SCHIFFER: *Active Body Control (ABC) – Das neue aktive Federungs- und Dämpfungssystem des CL-Coupés von DaimlerChrysler*. In: *VDI-Berichte Nr. 1494*, Seiten 305–333, 1999.
- [WULK04a] WINTER, H., W. URBAN, J. LUEDER und F. KELLER: *United States Patent US 6,704,631 B2: Method and device for determing a corrected offset value*. Robert Bosch GmbH, 2004.
- [WULK04b] WINTER, H., W. URBAN, J. LUEDER und F. KELLER: *United States Patent US 6,810,311 B2: Method and device for determing offset values by a histogramm method*. Robert Bosch GmbH, 2004.
- [WW00] WEICHERT, N. und M. WÜLKER: *Messtechnik und Messdatenerfassung*. Oldenburg, 1. Auflage, 2000.
- [Yeh98] YEH, Y.: *Design Considerations in Boeing 777 Fly-By-Wire Computers*. In: *Third IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium*, Seite 64f., 1998.
- [Zom87] ZOMOTOR, A.: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Vogel Buchverlag, 1. Auflage, 1987.

A Technische Daten

A.1 Entwicklungsumgebung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für Modellierung und Simulation genutzt:

- ▷ Matlab[®] Version 7.0.4 (R14SP2) sowie 7.2 (R2006a)
- ▷ Simulink[®] Version 6.2.1 (R14SP2+)
- ▷ Real-Time Workshop[®] Version 6.2.1 (R14SP2+)
- ▷ System Behaviour Analysis (Entwicklungsumgebung für den SALM-Ansatz)

A.2 Sensorspezifikationen

Die Spezifikation der Fahrdynamiksensorik ist für die Gierwinkelgeschwindigkeit in **Tabelle A.1** zusammengefasst, für die Querschleunigung in **Tabelle A.2**, für den Lenkradwinkel in **Tabelle A.3** und für die Raddrehzahlen in **Tabelle A.4**.

Tabelle A.1: Spezifikation Gierwinkelgeschwindigkeitssensor

Eigenschaft	Minimum	Maximum	Einheit
Messbereich	± 100	—	$^{\circ}/s$
Messbereich Gradient	± 4096	—	$^{\circ}/s^2$
Empfindlichkeitsfehler	-5	5	%
Nichtlinearität	-1	1	$^{\circ}/s$
Nullpunktfehler, absolut	-3,5	3,5	$^{\circ}/s$
Nullpunktfehler, Änderungsrate	-0,2	0,2	$(^{\circ}/s)/min$
Auflösung, absolut	—	0,1	$^{\circ}/s$
Rauschen	—	0,2	$^{\circ}/s_{rms}$
Lebensdauer	15	—	a
Einsatzzeit	6 000	—	h
Einsatztemperatur	-40	85	$^{\circ}C$

Tabelle A.2: Spezifikation Querbeschleunigungssensor

Eigenschaft	Minimum	Maximum	Einheit
Messbereich	$\pm 1,8$	—	g
Empfindlichkeitsfehler	-5	5	%
Nichtlinearität	-0,072	0,072	g
Nullpunktfehler, absolut	-0,1	0,1	g
Nullpunktfehler, Änderungsrate	-0,03	0,03	g/min
Auflösung, absolut	—	0,01	g
Rauschen	—	0,01	g _{rms}
Lebensdauer	15	—	a
Einsatzzeit	6 000	—	h
Einsatztemperatur	-40	85	°C

Tabelle A.3: Spezifikation Lenkradwinkelsensor

Eigenschaft	Minimum	Maximum	Einheit
Messbereich	± 800	—	°
Nullpunktfehler, absolut	-7,5	7,5	°
Auflösung, absolut	—	0,5	°
Auflösung, Gradient, absolut	± 3000	—	°/s
Lebensdauer	15	—	a
Einsatzzeit	7 500	—	h
Einsatztemperatur	-40	85	°C

A.3 Fahrzeugdaten

In dieser Arbeit werden Fahrzeuge der Marke Audi aus den Modelljahren 2007 und 2008 für die Simulation verwendet. Zur Anwendung kommen die Fahrzeugvarianten A4 Limousine und A4 Avant sowie das Coupé A5. Die relevanten Fahrzeugdaten sind in **Tabelle A.5** aufgeführt.

Die Lenkwinkelkennlinie wird als Polynom dritter Ordnung angenommen und gibt den Zusammenhang zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel für Fahrzeuge mit Standardlenkung sowie mit Audi Dynamiklenkung wieder, siehe **Tabelle A.6**. Die Kennlinien sind für die Fahrzeugvarianten A4 Limousine und A5 annähernd identisch. Die Koeffizienten nullter und zweiter Ordnung werden unter der Annahme eines symmetrischen Fahrzeugverhaltens vernachlässigt.

Tabelle A.4: Spezifikation Raddrehzahlsensoren

Eigenschaft	Minimum	Maximum	Einheit
Messbereich	± 100	—	m/s
Auflösung, absolut	—	0,016	m/s
Lebensdauer	15	—	a
Einsatzzeit	4 500	—	h
Einsatztemperatur	-40	159	°C

Tabelle A.5: Fahrzeugdaten Audi A4 und A5 (Modelle 2007)

Eigenschaft	A4	A5	Einheit
Radstand	2811	2755	mm
Spurweite, hinten	1554	1577	mm
Spurweite, vorn	1566	1589	mm
Abstand Schwerpunkt–Vorderachse	1214	1197	mm
Fahrzeugmasse, minimal	1382	1388	kg
Massenträgheitsmoment um die Hochachse	3000	2809	kg m ²
Schräglaufsteifigkeit, hinten	238807	238807	N/rad
Schräglaufsteifigkeit, vorn	146637	146637	N/rad
Radradius, dynamisch	325	325	mm

Tabelle A.6: Koeffizienten der Lenkwinkelkennlinie für Fahrzeuge mit Standardlenkung sowie Audi Dynamiklenkung

Koeffizient	Standardlenkung	Audi Dynamiklenkung	Einheit
1. Ordnung	0,0608	0,0731	—
3. Ordnung	$7,042 \cdot 10^{-5}$	$1,205 \cdot 10^{-4}$	—

B Mathematische Herleitungen

B.1 Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert \bar{y}_k stützt sich bei seiner Berechnung auf die letzten N gemessenen Werte y_{i-n} :

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_{i-n}$$

In Abhängigkeit der Anzahl der Messwerte N muss sowohl Speicherplatz bereitgestellt als auch Rechenzeit vorgehalten werden. Für Berechnungen im laufenden Betrieb wird die rekursive Darstellung bevorzugt [DM05]:

$$\bar{y}_{i+1} = \frac{1}{N+1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} y_{i-n} + y_{i+1} \right)$$

$$\bar{y}_{i+1} = \frac{1}{N+1} (N\bar{y}_i + y_{i+1})$$

$$\bar{y}_{i+1} = \frac{N}{N+1} \bar{y}_i + \frac{1}{N+1} y_{i+1}$$

Mit der Einführung des Koeffizienten $k_M = \frac{N}{N+1}$ ergibt sich:

$$\bar{y}_{i+1} = k_M \bar{y}_i + (1 - k_M) y_{i+1}$$

Der neue Mittelwert benötigt als Eingang ausschließlich den aktuellen Messwert y_{i+1} und den Mittelwert aus dem letzten Zyklus \bar{y}_i . Die Beziehung entspricht der Darstellung eines diskreten Verzögerungsgliedes erster Ordnung, siehe Anhang B.2.2.

B.2 Abtastzeitunabhängige Filterzeitkonstante für ein diskretes Verzögerungsglied erster Ordnung

Nachfolgend ist die Herleitung einer abtastzeitunabhängigen Zeitkonstante für die diskreten Filter erster Ordnung $T \frac{y_i - y_{i-1}}{t_Z} + y_{i-1} = k_s u_i$ (Variante 1) und $T \frac{y_i - y_{i-1}}{t_Z} + y_i = k_s u_i$ (Variante 2) gegeben. Angenommen wird eine statische Verstärkung von $k_s = 1$.

B.2.1 Variante 1

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die allgemeine Beziehung der Filterkoeffizienten für ein Modul mit der Systemabtastzeit k_{t_Z} und eines mit der n -fachen Abtastzeit $k_{n \cdot t_Z}$ (vgl. **Tabelle 7.4**):

$$k_{n \cdot t_Z} = 1 - (1 - k_{t_Z})^n$$

Das Ersetzen der Filterkoeffizienten mittels des äquivalenten Ausdrucks $k_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}}$ in Abhängigkeit der Filterzeitkonstanten führt zu:

$$\frac{n \cdot t_Z}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}} = 1 - \left(1 - \frac{t_Z}{t_Z + T_{t_Z}}\right)^n$$

Beidseitige Multiplikation der Gleichung mit dem Term $(t_Z + T_{t_Z})^n$ liefert:

$$\frac{n \cdot t_Z \cdot (t_Z + T_{t_Z})^n}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}} = (t_Z + T_{t_Z})^n - T_{t_Z}^n$$

Das Auflösen nach $T_{n \cdot t_Z}$ ergibt:

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z \cdot (t_Z + T_{t_Z})^n}{(t_Z + T_{t_Z})^n - T_{t_Z}^n} - n \cdot t_Z$$

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{(t_Z + T_{t_Z})^n - T_{t_Z}^n}$$

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{t_Z^n + n \cdot t_Z^{n-1} T_{t_Z} + \dots + n \cdot t_Z T_{t_Z}^{n-1}}$$

Eine Approximation des Ausdrucks unter der Annahme $t_Z \ll T_{t_Z}$ führt zur Näherung $T_{n \cdot t_Z} \approx T_{t_Z}$.

B.2.2 Variante 2

Für diese Variante $T \frac{y_i - y_{i-1}}{t_Z} + y_i = u_i$ ergibt sich die rekursive Lösung der Differenzialgleichung zu:

$$y_i = \frac{T_{t_Z}}{t_Z + T_{t_Z}} y_{i-1} + \frac{t_Z}{t_Z + T_{t_Z}} u = c_{t_Z} y_{i-1} + (1 - c_{t_Z}) u$$

Der Zusammenhang zwischen den Filterkoeffizienten von Modulen mit unterschiedlichen Abtastzeiten ist in **Tabelle B.1** dargestellt. Für identische Filterausgangsgrößen muss allgemein gelten:

$$c_{n \cdot t_Z} = c_{t_Z}^n$$

Das Ersetzen der Filterkoeffizienten mittels des äquivalenten Ausdrucks $c_{n \cdot t_Z} = \frac{T_{n \cdot t_Z}}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}}$ in Abhängigkeit der Filterzeitkonstanten führt zu:

$$\frac{T_{n \cdot t_Z}}{n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z}} = \left(\frac{T_{t_Z}}{t_Z + T_{t_Z}}\right)^n$$

Tabelle B.1: Zusammenhang zwischen der Modulabtastzeit als beliebiges ganzzahliges Vielfaches der Systemzykluszeit $n \cdot t_Z$ und dem Filterkoeffizienten $c_{n \cdot t_Z}$ mit $n \in \mathbb{N}$

Modulzykluszeit [s]	Filterkoeffizient [-]
t_Z	c_{t_Z}
$2 t_Z$	$c_{2 t_Z} = c_{t_Z}^2$
$3 t_Z$	$c_{3 t_Z} = c_{t_Z}^3$
$n \cdot t_Z$	$c_{n \cdot t_Z} = c_{t_Z}^n$

Beidseitige Multiplikation der Gleichung mit dem Term $(n \cdot t_Z + T_{n \cdot t_Z})$ und das Auflösen nach $T_{n \cdot t_Z}$ liefert:

$$T_{n \cdot t_Z} \left[1 - \left(\frac{T_{t_Z}}{t_Z + T_{t_Z}} \right)^n \right] = \left(\frac{T_{t_Z}}{t_Z + T_{t_Z}} \right)^n n \cdot t_Z$$

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{(t_Z + T_{t_Z})^n - T_{t_Z}^n}$$

$$T_{n \cdot t_Z} = \frac{n \cdot t_Z T_{t_Z}^n}{t_Z^n + n \cdot t_Z^{n-1} T_{t_Z} + \dots + n \cdot t_Z T_{t_Z}^{n-1}}$$

Eine Approximation des Ausdrucks unter der Annahme $t_Z \ll T_{t_Z}$ führt wie bei Variante 1 zur Näherung $T_{n \cdot t_Z} \approx T_{t_Z}$.

B.3 Rekursive Parameterschätzung

Um die Parameterschätzung im laufenden Betrieb verwenden zu können, soll eine rekursive Darstellung hergeleitet werden, die ausschließlich auf den Messwerten des aktuellen und des vorausgegangenen Zyklus aufbaut [Höf96]. Auf diese Weise wird der Speicherbedarf stark eingeschränkt.

Zunächst wird die Kovarianzmatrix aus Gleichung (3.16) umgeformt. Zu unterscheiden ist der Signalvektor Γ von der Signalmatrix $\mathbf{\Gamma}$:

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{\Gamma}^T(k)\mathbf{\Gamma}(k)]^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k) = \left[\begin{pmatrix} \mathbf{\Gamma}(k-1) \\ \mathbf{\Gamma}^T(k) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{\Gamma}(k-1) \\ \mathbf{\Gamma}^T(k) \end{pmatrix} \right]^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{\Gamma}^T(k-1)\mathbf{\Gamma}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k)]^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{P}^{-1}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k)]^{-1}$$

Durch Inversion erhält man:

$$\mathbf{P}^{-1}(k) = \mathbf{P}^{-1}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k)$$

Multiplikation mit $\mathbf{P}(k)$ von links:

$$\mathbf{I} = \mathbf{P}(k)\mathbf{P}^{-1}(k-1) + \mathbf{P}(k)\mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k).$$

Sowie Multiplikation mit $\mathbf{P}(k-1)\mathbf{\Gamma}(k)$ von rechts:

$$\mathbf{P}(k-1)\mathbf{\Gamma}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{\Gamma}(k) [\mathbf{I} + \mathbf{\Gamma}(k)^T\mathbf{P}(k-1)\mathbf{\Gamma}(k)]$$

Umgeformt wird auch die Rechenvorschrift aus Gleichung (3.13):

$$\hat{\Theta}(k) = [\mathbf{\Gamma}^T(k)\mathbf{\Gamma}(k)]^{-1} \mathbf{\Gamma}^T(k)\mathbf{y}$$

$$\hat{\Theta}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k)\mathbf{y}(k)$$

$$\hat{\Theta}(k) = \mathbf{P}(k) \begin{pmatrix} \Gamma^T(k-1) & \Gamma(k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{y}(k-1) \\ y(k) \end{pmatrix}$$

$$\hat{\Theta}(k) = \mathbf{P}(k) [\Gamma^T(k-1)\mathbf{y}(k-1) + \Gamma(k)y(k)]$$

$$\hat{\Theta}(k) = \mathbf{P}(k) [\mathbf{P}^{-1}(k-1)\hat{\Theta}(k-1) + \Gamma(k)y(k)]$$

Durch Einführung des Korrekturvektors γ

$$\gamma(k) = \mathbf{P}(k)\Gamma(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\Gamma(k)}{\Gamma^T(k)\mathbf{P}(k-1)\Gamma(k) + 1}$$

ergibt sich durch Einsetzen desselben die Kovarianzmatrix zu

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \gamma(k)\Gamma^T(k)] \mathbf{P}(k-1)$$

und die Schätzgleichung zu

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) - \gamma(k) [y(k) - \Gamma^T(k)\hat{\Theta}(k-1)].$$

C Messungen

Alle in dieser Arbeit angeführten Messungen sind in **Tabelle 8.2** zusammengefasst und nachfolgend in graphischer Form abgebildet. Bei einigen Messungen ist die Achsbeschriftung aus Gründen der Geheimhaltung entfernt worden.

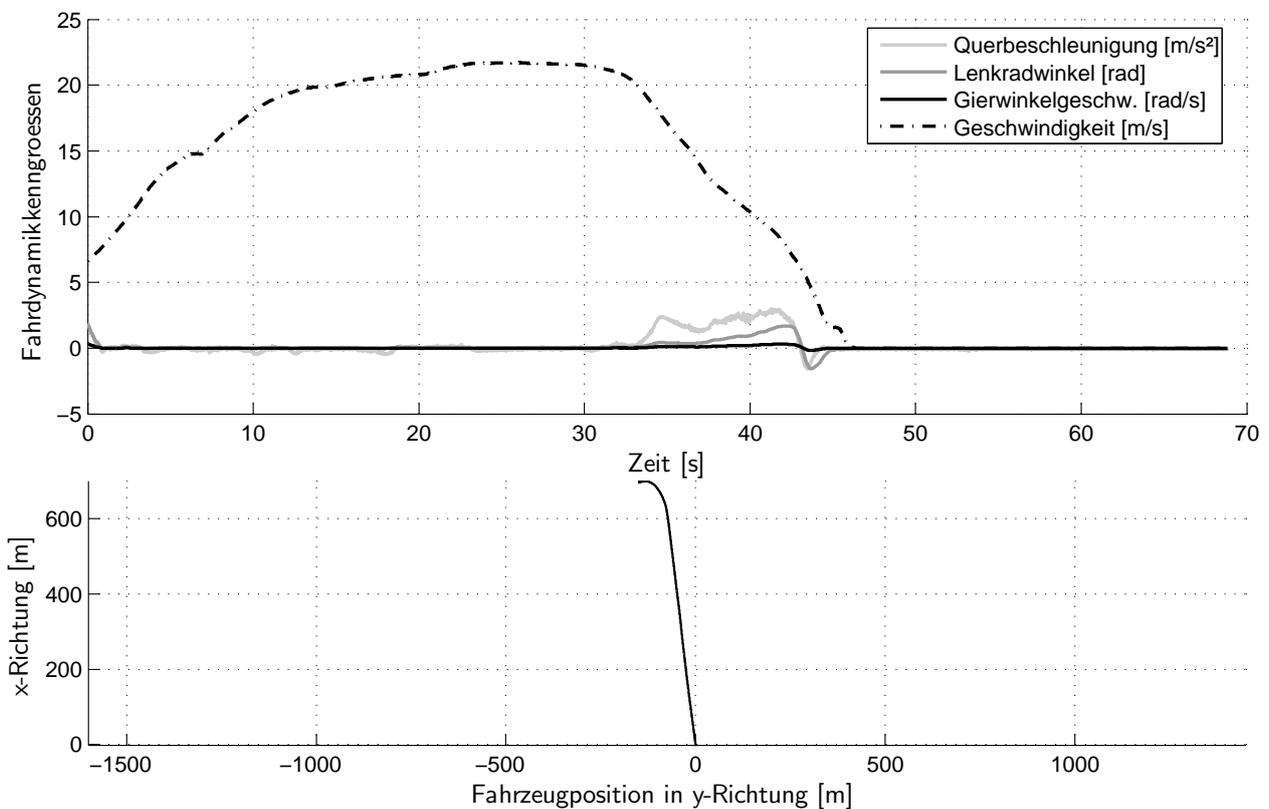


Bild C.1: Messung H1: Beschleunigte Geradeausfahrt, Abbremsen, Asphalt

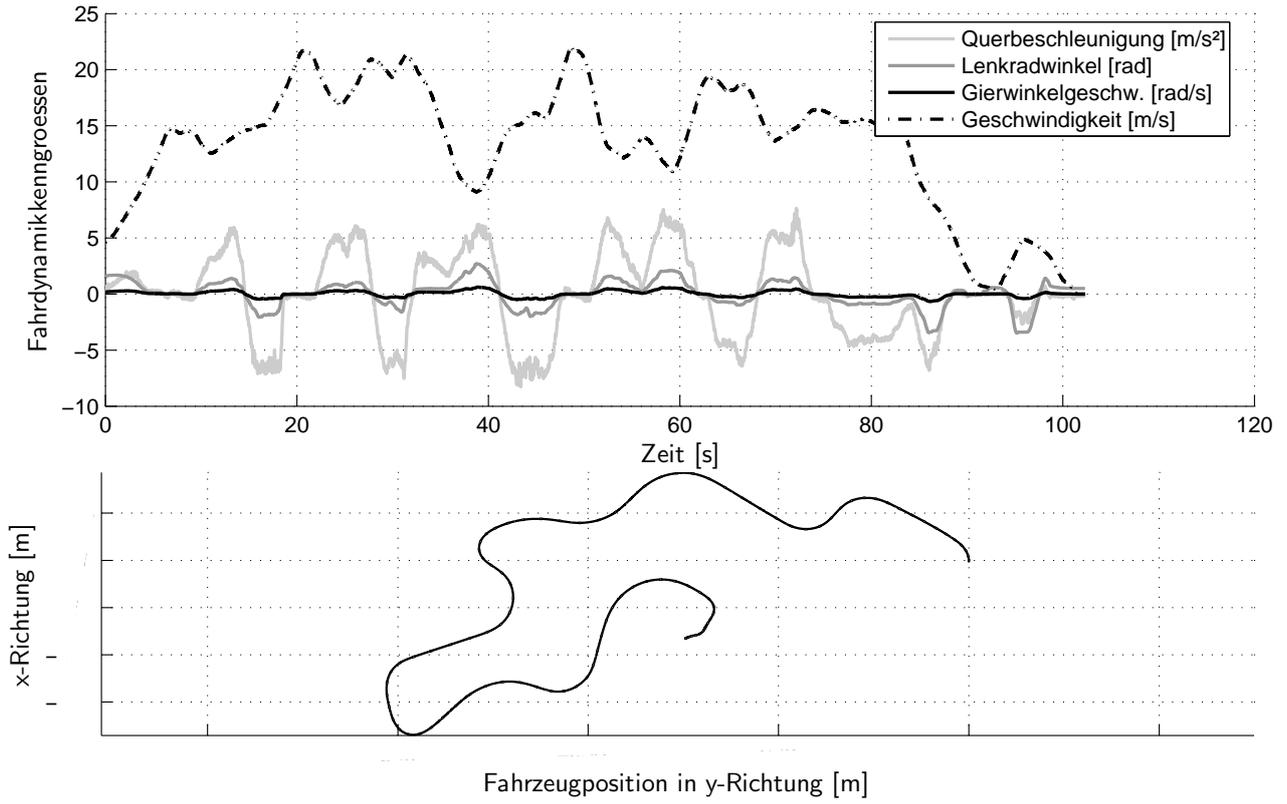


Bild C.2: Messung H2: Handlingkurs, Asphalt

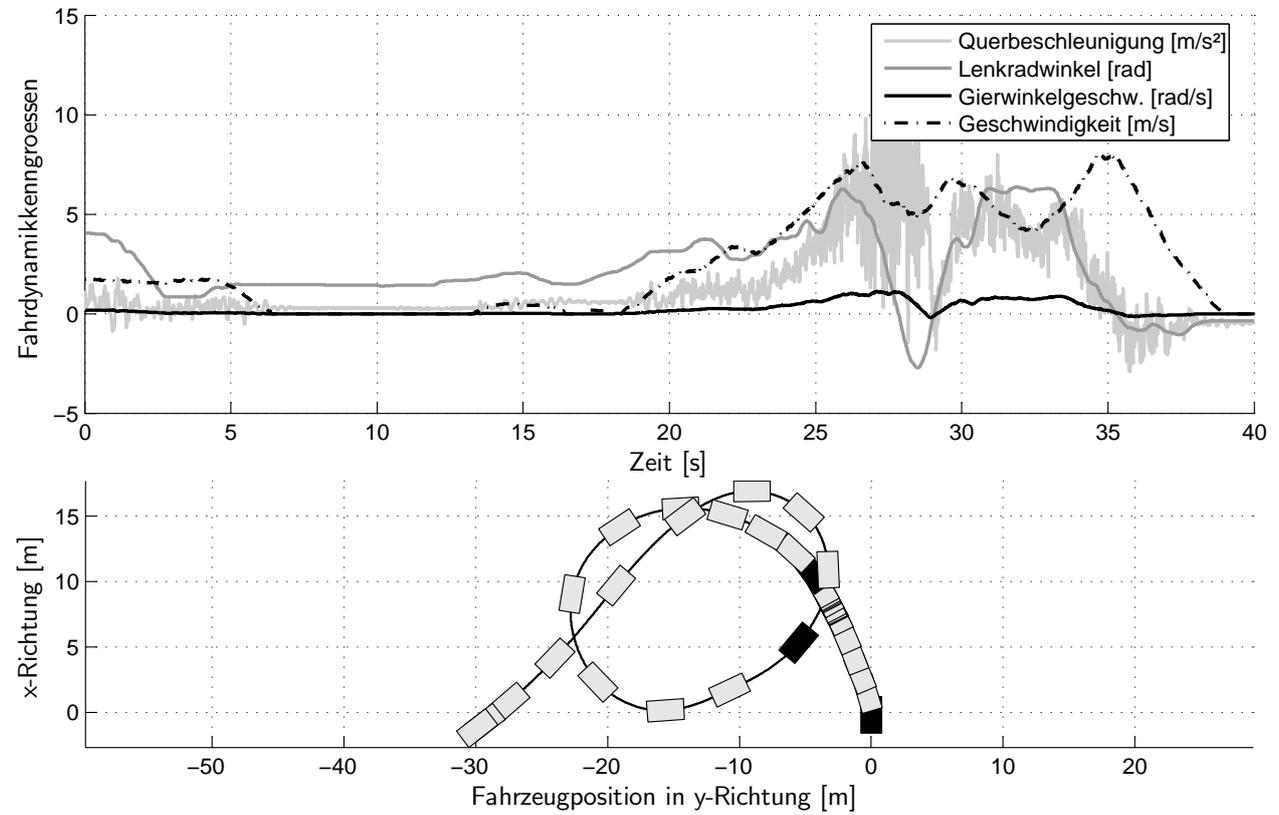


Bild C.3: Messung H3: Kreisfahrt, Schotter

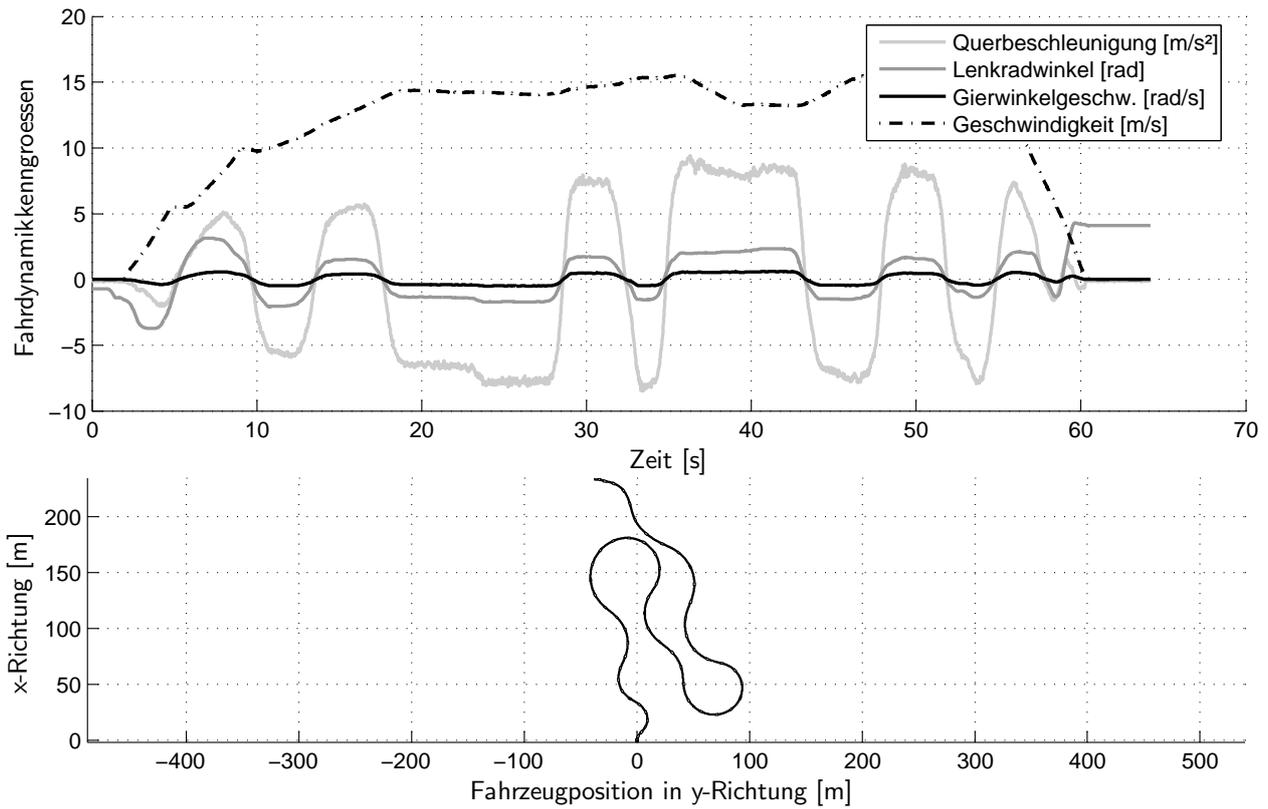


Bild C.4: Messung H4: Sinuskurven, mittlere Lenkfrequenz, Asphalt

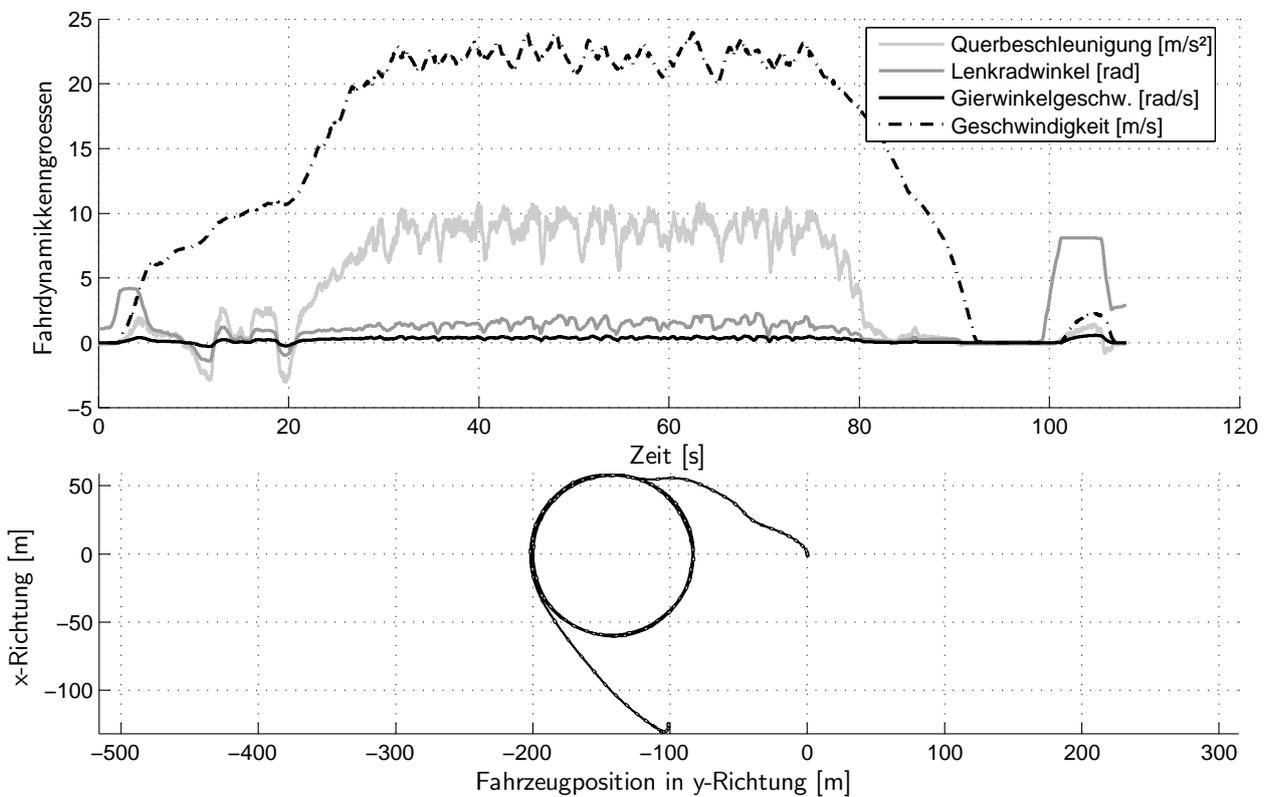


Bild C.5: Messung H5: Lastwechsel, Asphalt

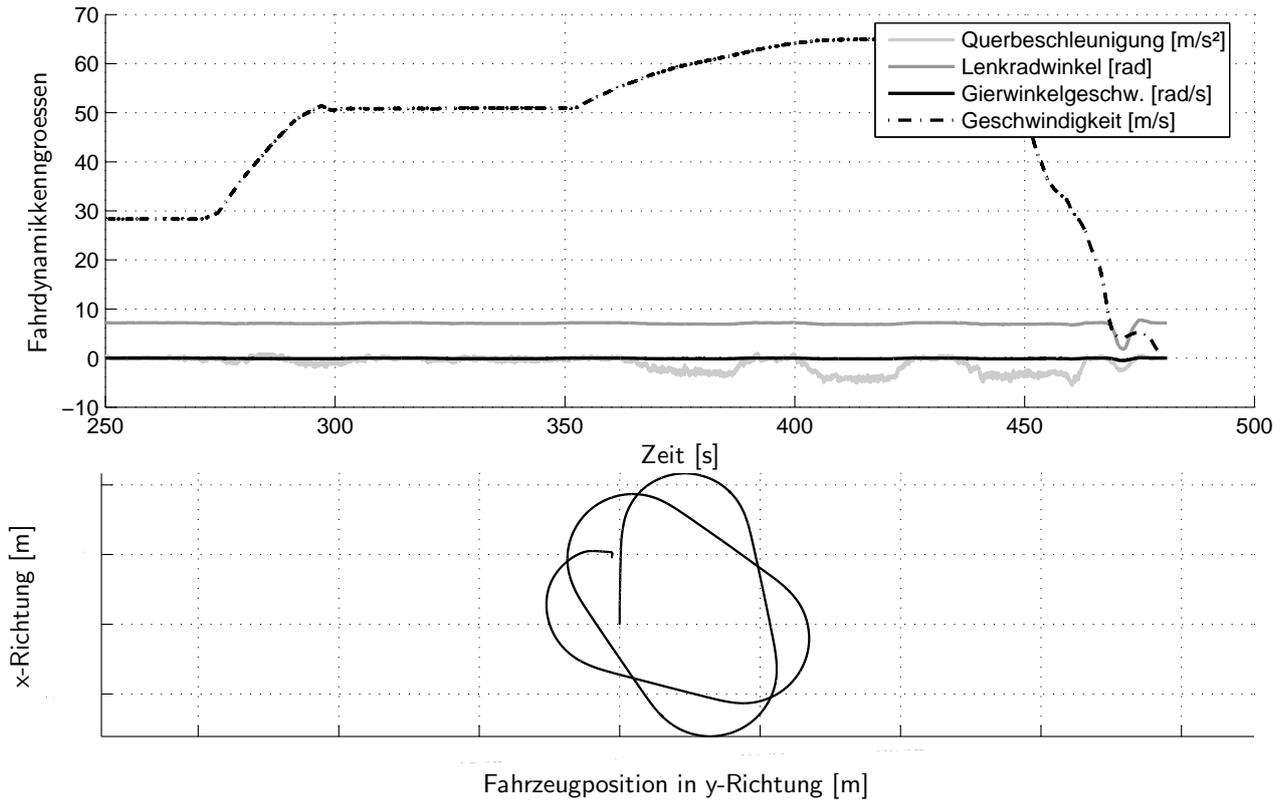


Bild C.6: Messung H6: Hochgeschwindigkeitsovalbahn, Asphalt

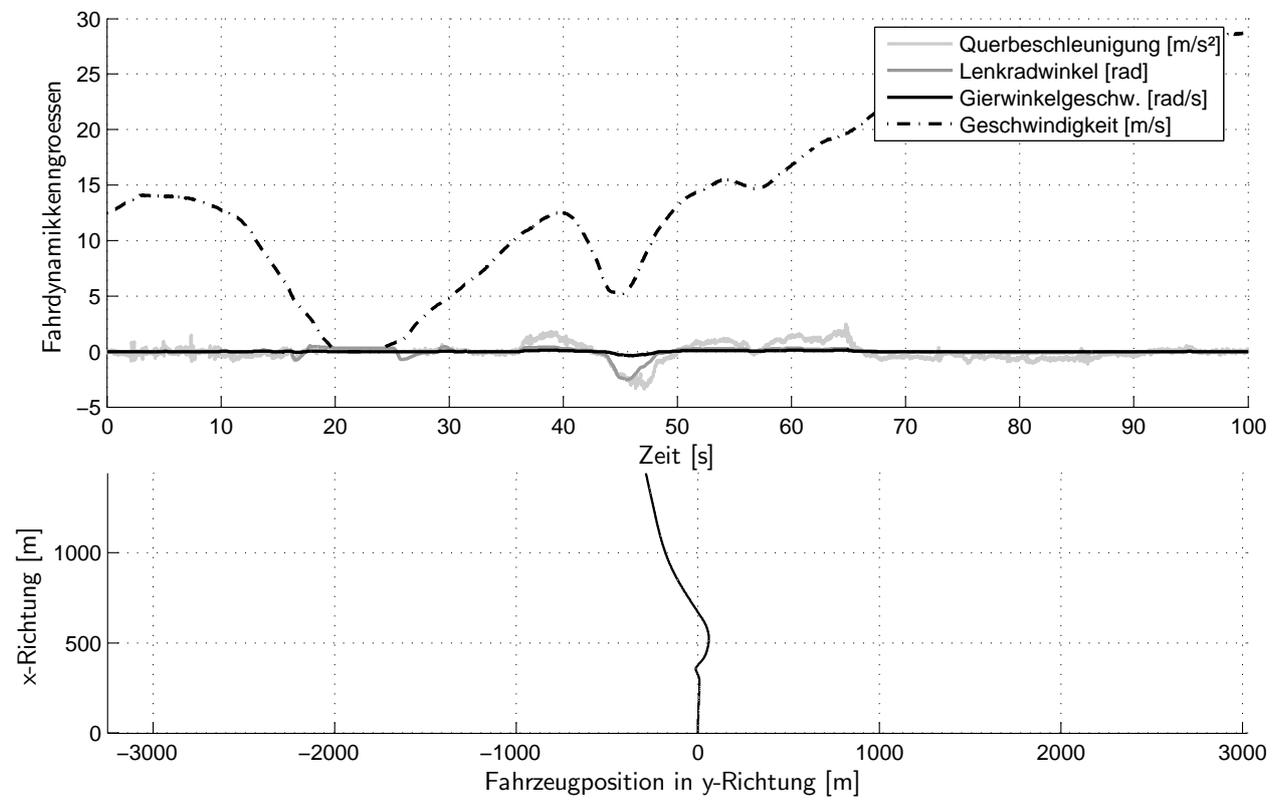


Bild C.7: Messung H7: Stadt-/Überlandfahrt, Asphalt

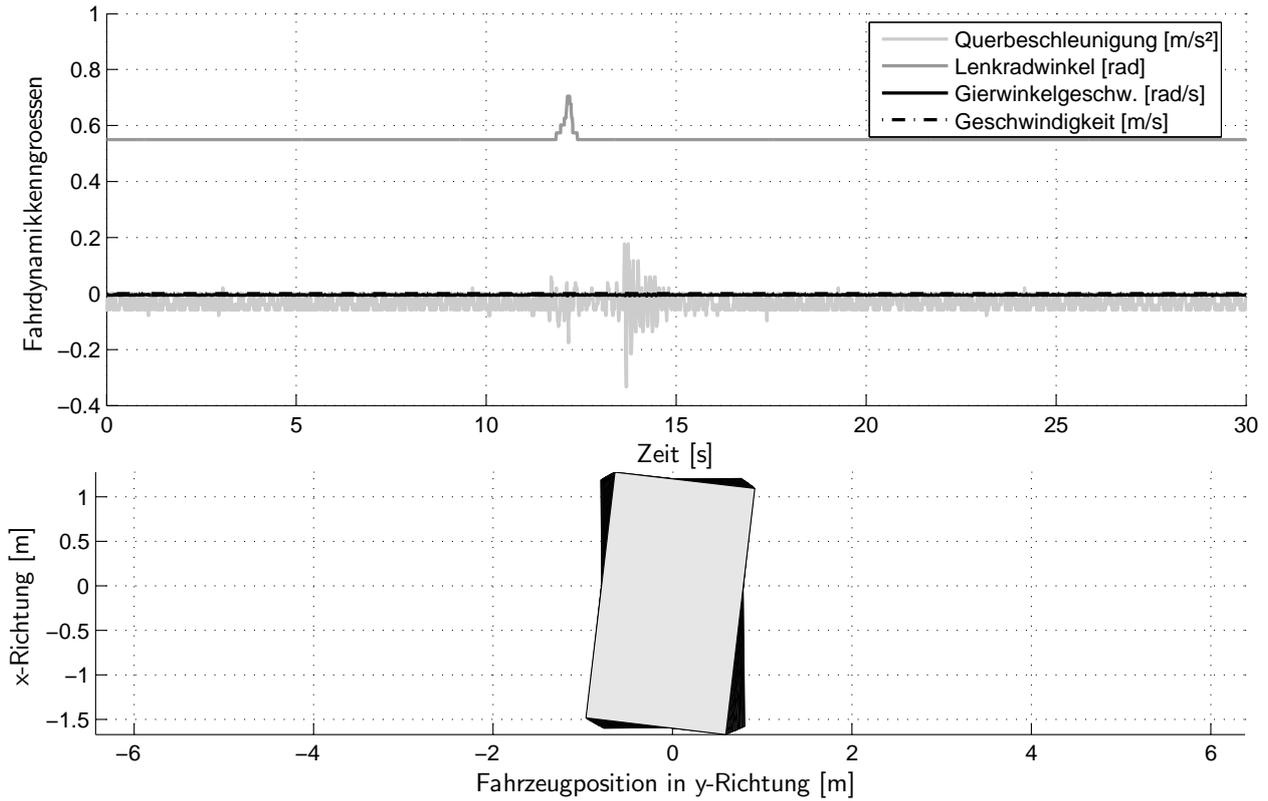


Bild C.8: Messung H8: Stillstand, Asphalt

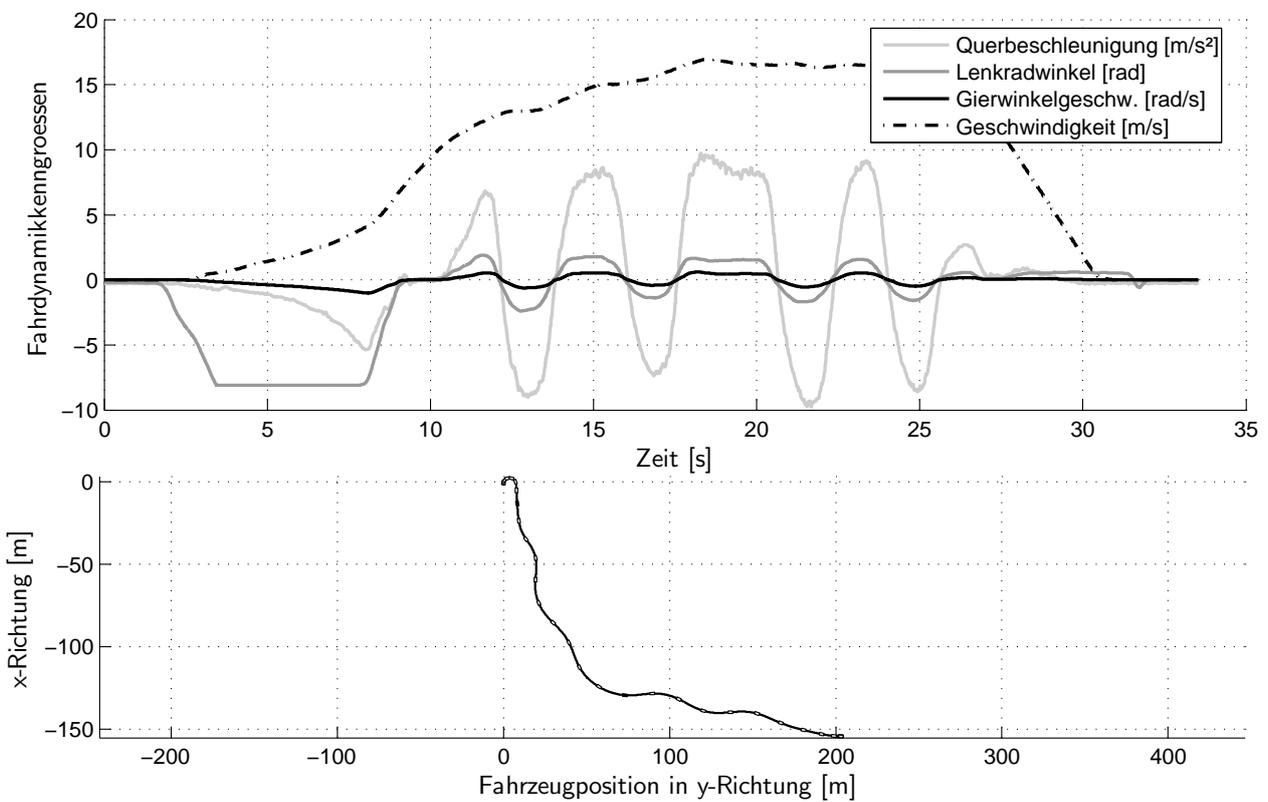


Bild C.9: Messung H9: Sinuskurven, niedrige Lenkfrequenz, Asphalt

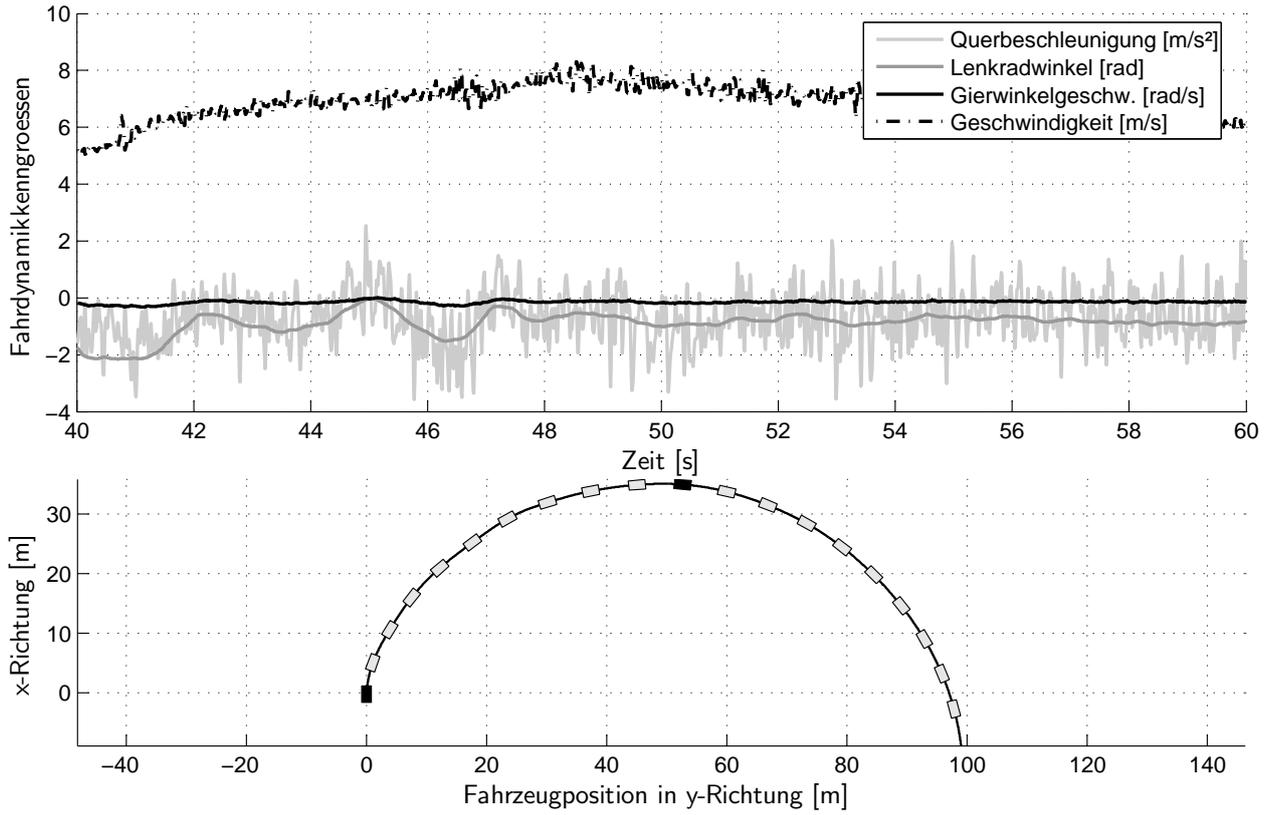


Bild C.10: Messung H10: Schlechtwegstrecke, Schotter

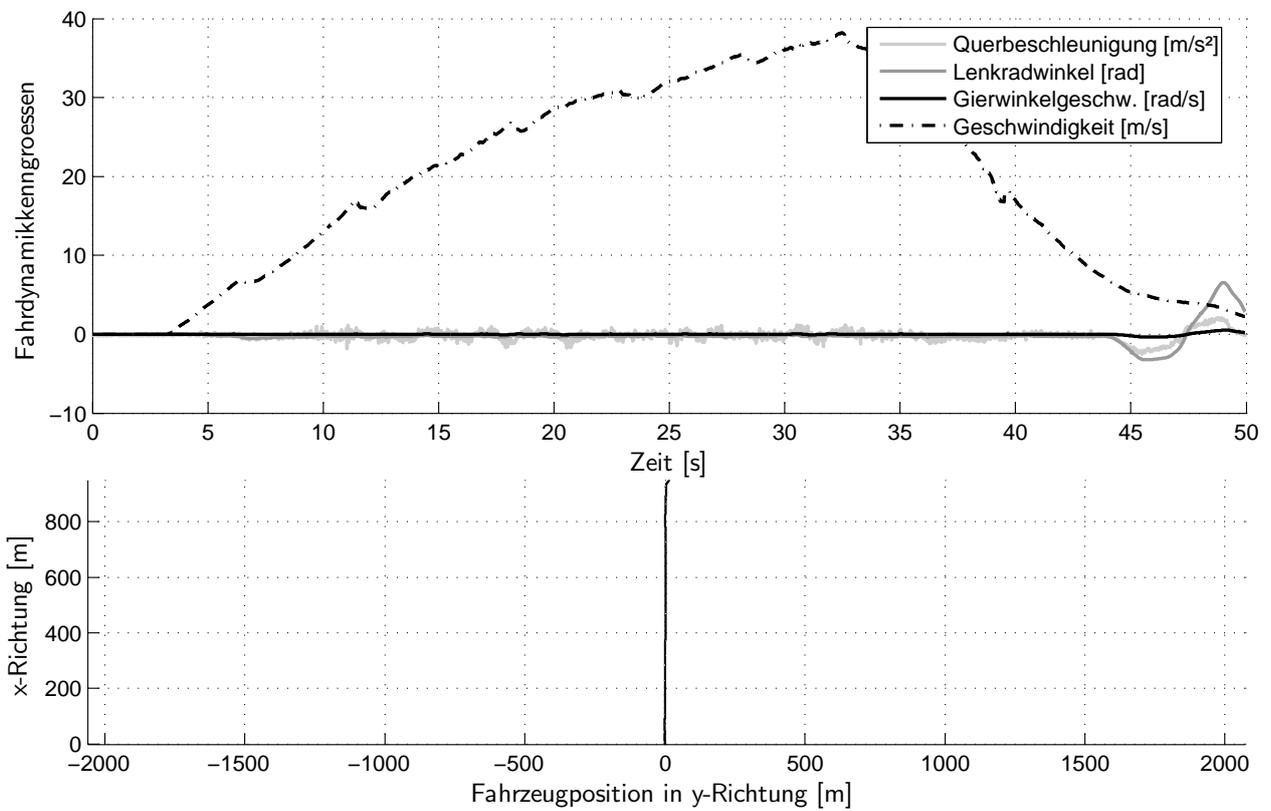


Bild C.11: Messung N1: Beschleunigte Geradeausfahrt, Abbremsen, Eis

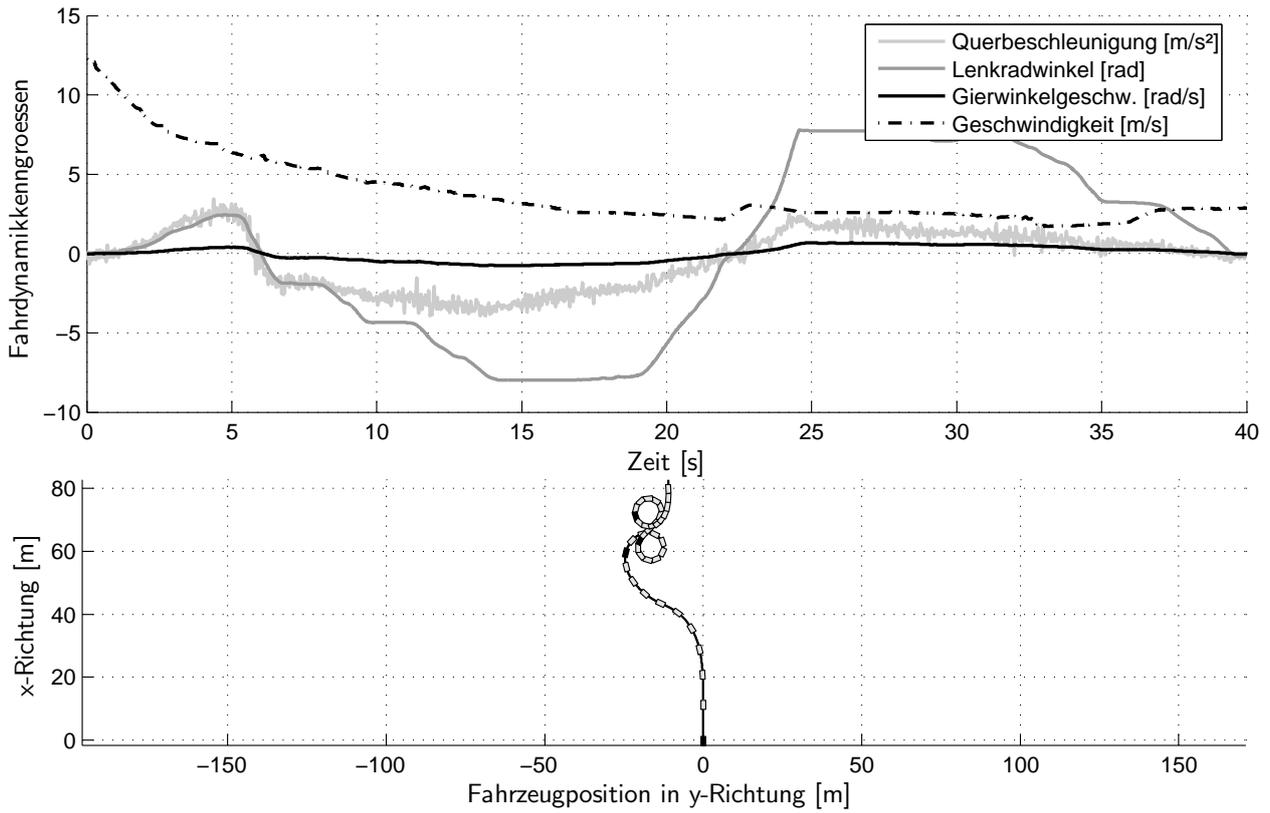


Bild C.12: Messung N2: Wendekreis, beidseitig, Schneedecke

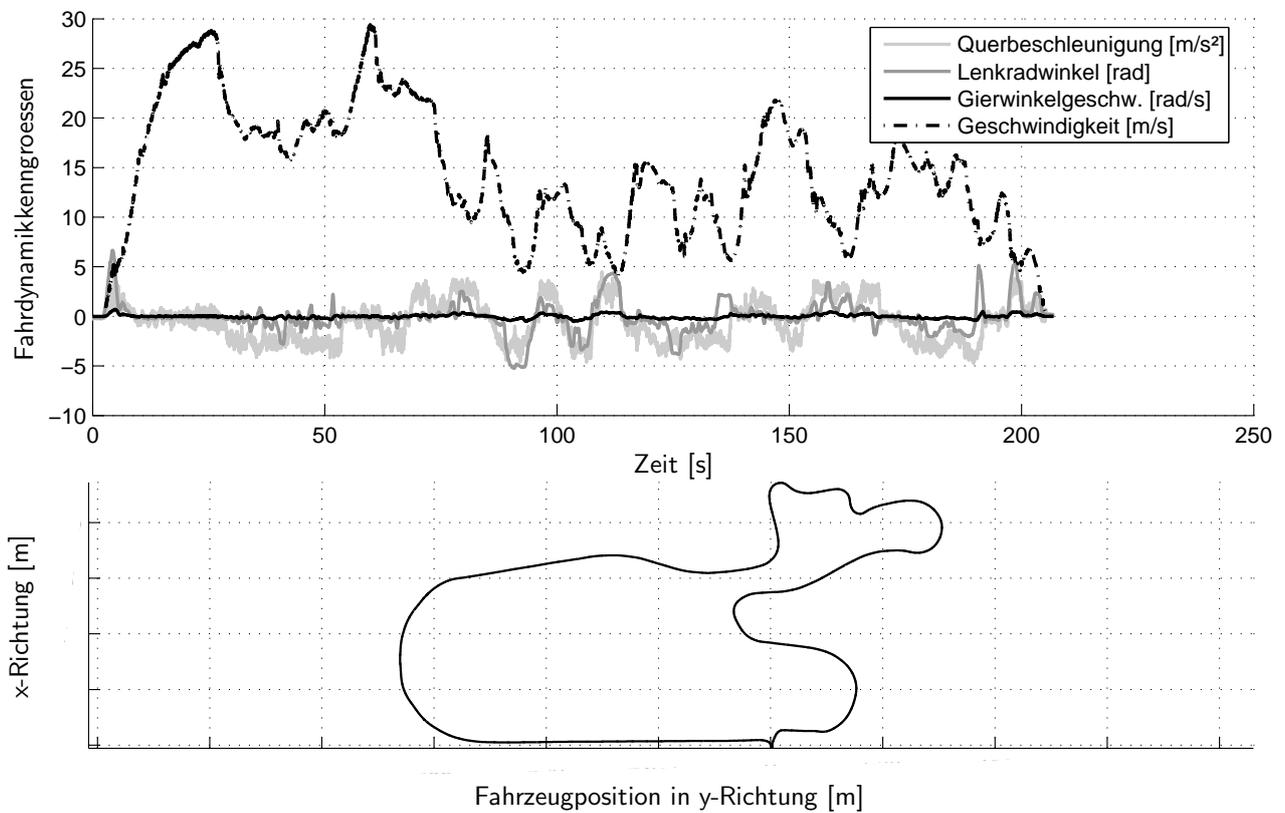


Bild C.13: Messung N3: Handlingkurs, Eis

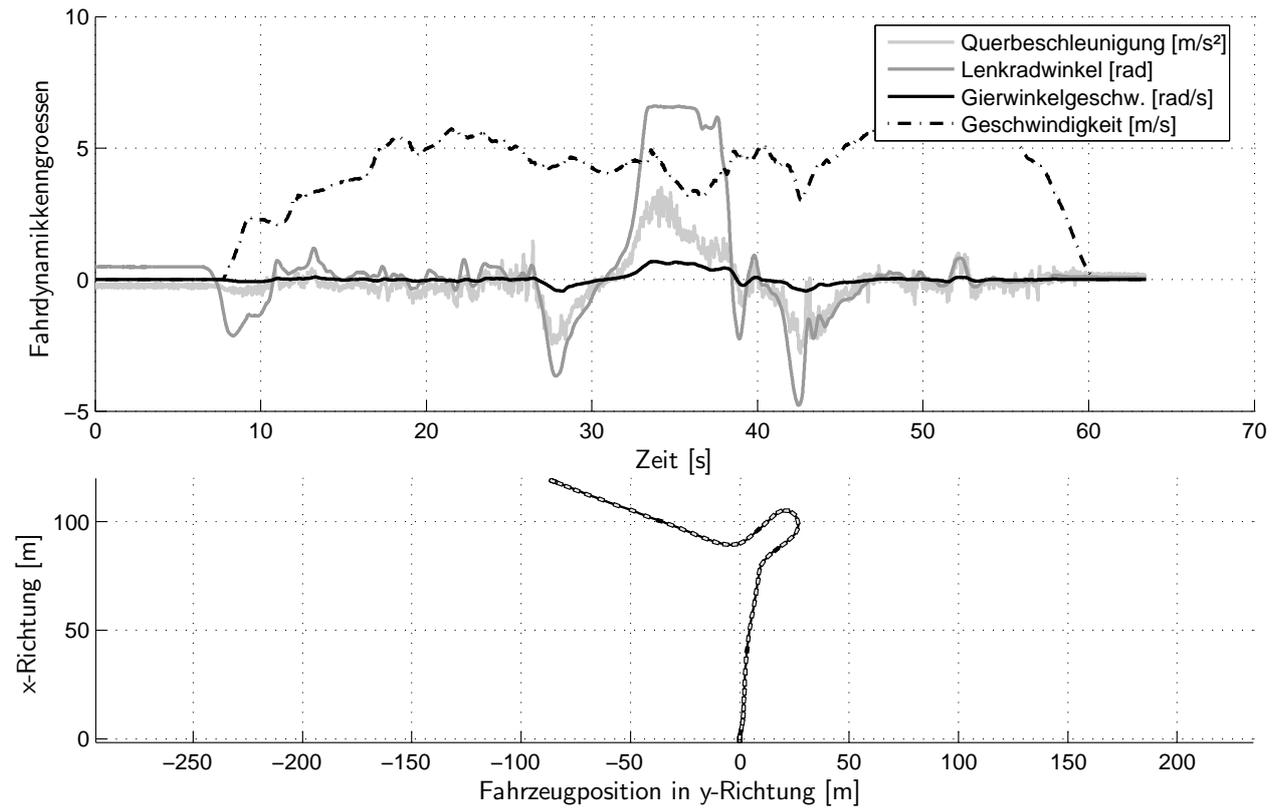


Bild C.14: Messung N4: Tiefschneefahrt

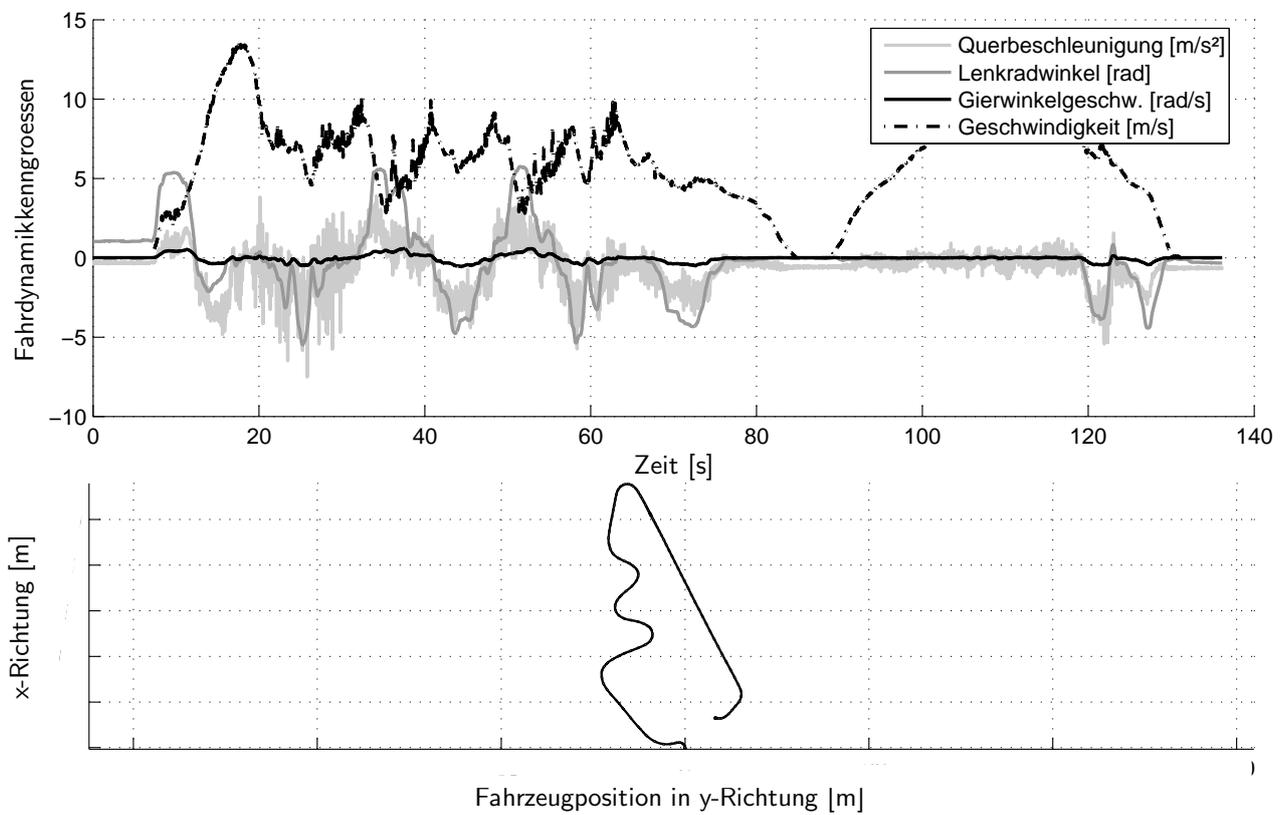


Bild C.15: Messung N5: Steigungsstrecke mit Serpentinaen, Schneedecke