
Sensordatenfusion zur hochgenauen Ortung von Kraftfahrzeugen mit integrierter Genauigkeits- und Integritätsbewertung der Sensorsignale

5. Tagung Fahrerassistenz München

Nico Dziubek¹, Hermann Winner², Matthias Becker³, Stefan Leinen⁴
München, 15. + 16. Mai 2012

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Fahrzeugtechnik

Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt:

¹dziubek@fzd.tu-darmstadt.de, 06151 / 16 - 5476

²winner@fzd.tu-darmstadt.de, 06151 / 16 - 3796

Technische Universität Darmstadt

Institut für Geodäsie

Fachgebiet Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie

Petersenstr. 13, 64287 Darmstadt:

³becker@ipg.tu-darmstadt.de, 06151 / 16 - 3109

⁴leinen@ipg.tu-darmstadt.de, 06151 / 16 - 3900



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

FZD

FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT



Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele	1
2 Systemansatz Fusion	3
2.1 Architektur	3
3 Fusionsfilter	5
3.1 Aufbau des Fusionsfilters.....	5
3.1.1 Verwendete Messdaten und Sensorik	5
3.1.2 Struktur	6
4 Integrität und Genauigkeit	8
4.1 Grundlagen.....	8
4.2 Integrität	9
4.2.1 Integritätsaussage	9
4.2.2 Konfidenz der Integrität	10
4.3 Genauigkeit	14
4.3.1 Genauigkeitsaussage	14
4.3.2 Kennwerte und Verarbeitung	14
5 Fazit, Ausblick	17
6 Abbildungsverzeichnis.....	18
7 Tabellenverzeichnis	18
8 Literaturverzeichnis	19

1 Einleitung

1.1 Motivation

Heutige Kraftfahrzeuge sind zu einem großen Teil bis ins Kleinwagensegment mit Fahrdynamikregel- und Fahrerassistenzsystemen ausgestattet. In der Regel ist jede dieser Funktionen mit ihrem eigenen, dedizierten Satz an Sensoren ausgestattet und unabhängig von anderen, im gleichen Fahrzeug verbauten Sensoren entwickelt und appliziert. Dies hat zur Folge, dass redundante Messungen stattfinden, deren Vorteile jedoch zurzeit nur in wenigen Fällen genutzt werden. Bei der immer stärker werdenden Vernetzung von Funktionen sind aktuell die abweichenden Messprinzipien der einzelnen Sensoren zu beachten, um Widersprüche oder Inkonsistenzen durch unterschiedliche Messfehler zu lösen.

Die steigende Leistungsfähigkeit von Mikroprozessoren und die Verfügbarkeit von Bussystemen in Fahrzeugen bieten eine Grundlage, die große bereits zur Verfügung stehende Menge an Messdaten zentral zu verarbeiten. Eine ganzheitliche, alle verfügbaren Sensoren umfassende Verarbeitung der Messdaten ermöglicht, einen konsistenten Datensatz mit gesteigerter Genauigkeit zu erzeugen. Eine darauf basierende Bewertung der Qualität der erzeugten Daten liefert den Nutzerfunktionen zusätzliche Informationen zur Weiterverarbeitung.

Insbesondere bei sicherheitskritischen Systemen ist der Aufwand zur Erkennung von Mess- und Sensorfehlern sehr hoch. Eine zentralisierte Bewertung der Signalintegrität bietet das Potential, einerseits die Funktionen um einen erheblichen Anteil der Fehlererkennung zu entlasten, andererseits durch Nutzung der Redundanzen die Erkennung von Fehlern zu verbessern.

1.2 Ziele

Das Forschungsprojekt in Kooperation mit der Continental AG hat zum Ziel, durch Fusion der Messdaten von Serien- bzw. seriennahen Sensoren die Berechnung von Positions- und Fahrdynamikdaten zu verbessern. Dabei wird eine fahrstreifengenaue Ortung angestrebt.

Die verwendeten Sensoren sind dabei in MEMS-Technologie gefertigte Beschleunigungs- und Drehratensensoren mit jeweils 3 Freiheitsgraden, ein Einkanal-(L1)-GPS-Empfänger mit Ausgabe von Rohdaten (Pseudorange und Trägerphasenmessung), sowie Odometriesensorik, bestehend aus Winkelimpulsen aller vier Räder und dem Lenkradwinkel. Es erfolgt kein Zugriff auf Daten aus Drittquellen wie z.B. AGPS, DGPS oder Kartendaten, um unabhängig von kostenpflichtigen Diensten und potentiell veralteten Daten zu sein. Um diese Möglichkeit dennoch für zukünftige Entwicklungen offen zu halten, und auch die Einbindung zusätzlicher Sensoren zu ermöglichen, ist ein Entwicklungsziel die Erstellung einer offenen, erweiterbaren Architektur des Fusionsfilters.

Durch die Bereitstellung von Integritätsdaten zur Erkennung von fehlerhaften Daten werden nachfolgende Steuergeräte um diese Erkennung entlastet, was zu einer Vereinfachung in Hard- und Software und damit zu einer Kostenersparnis führt. Die Bewertung der Signalqualität liefert Informationen über die Eigenschaften und die Vertrauenswürdigkeit der Signale. So ermöglicht die darin

enthaltene Bewertung der Genauigkeit der Position eine Entscheidung, ob eine Assistenzfunktion freigeschaltet wird. Bislang aus Mangel an Informationen nicht realisierbare Funktionen werden ermöglicht. Ein weiteres Ziel ist daher die Generierung eines Integritätsmaßes für Sensordaten.

2 Systemansatz Fusion

2.1 Architektur

Die Sensordatenfusion liegt strukturell als neue Ebene zwischen den im Fahrzeug vorhandenen Sensoren und den ebenfalls bereits vorhandenen Anwendungen, welche die Daten nutzen.

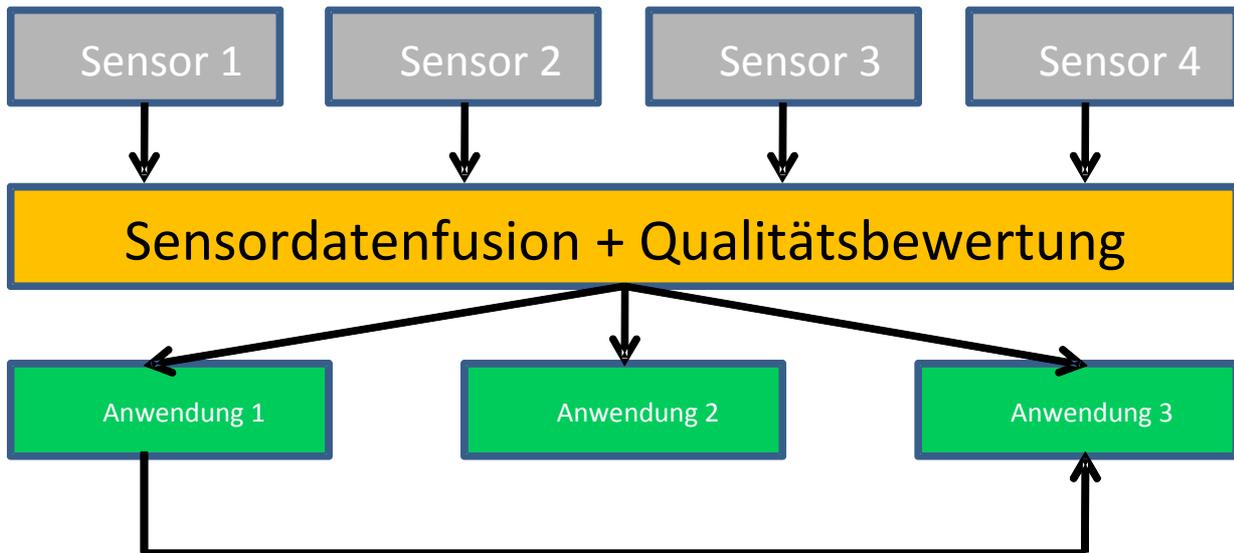


Abbildung 1: Architektur des Systems

Diese Architektur bewirkt eine Entkopplung der Sensoren, die die Daten generieren, und den Anwendungen, die die Daten nutzen. Die Sensoren geben neben den eigentlichen Messwerten auch Informationen über ihren Systemzustand, wie beispielsweise Ergebnisse eines zyklischen Selbsttests, aus. Alle diese Daten werden in der Sensordatenfusion gesammelt und als zeitlich zusammengehöriger Block (Messepoche) verarbeitet.

Auf Anwendungsseite wirkt die Sensordatenfusion wie ein einzelner, virtueller Sensor. Da dieser die Daten zentral für alle Anwendungen liefert, ist deren Konsistenz untereinander sichergestellt; eine Kommunikation zwischen einzelnen Anwendungen wird damit erleichtert.

Hierbei ist es nicht notwendig, dass alle Sensoren gleichzeitig verfügbar sind. Es werden stets die Daten sequentiell, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, fusioniert, die zu einem Verarbeitungsschritt vorliegen. Durch diese asynchrone Struktur wird erreicht, dass unterschiedliche Abstraten der Sensoren, schwankende Bearbeitungs- und Laufzeiten der Messdaten oder Aussetzer von Sensoren (beispielsweise GPS im Tunnel) keiner speziellen Behandlung bedürfen. Je genauer hierbei die einzelnen sensorindividuellen, tatsächlichen Messzeitpunkte zwecks zeitlich korrekter Anbringung der Daten bekannt sind, desto kleiner wird der durch Verzögerungen verursachte Fehler.

Die von den Sensoren ausgegebenen Diagnosedaten werden ebenso zentral gesammelt und ausgewertet. Daten, die vom Sensor selbst als ungültig gekennzeichnet sind, werden von der Fusion ausgeschlossen. Darüber hinaus findet eine Plausibilisierung der Daten statt. Hierbei werden Daten, wie in Kapitel 4.2 dargestellt, mit Methoden der Stochastik untereinander auf Plausibilität geprüft.

Dieser Vergleich ist vorteilhaft für die Detektionswahrscheinlichkeit und –geschwindigkeit von unplausiblen Messwerten im Vergleich zur Selbstanalyse der einzelnen Sensoren, da dem zentralen Algorithmus sämtliche, auch modellbasierte Daten des Systems als Testgrößen zur Verfügung stehen. Als Ergebnis ergibt sich eine eindeutige Aussage über die Integrität der Daten.

Die Bewertung der Genauigkeit, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, erfolgt einerseits aus den im Fusionsfilter vorliegenden Unsicherheiten der Ausgabegrößen, andererseits aufgrund von generellen Annahmen über Qualitätsbeschreibungen von Messgrößen. In einem verallgemeinerten Ansatz wird, in Anlehnung an typische Beschreibungen eines Sensordatenblattes, ein Satz an Kennwerten definiert, der diese charakteristischen Merkmale zur Beschreibung der Signalqualität enthält. Dabei sind die Sensoren die Quellen dieser Kenngrößen; beim Durchlaufen der Signalverarbeitungskette werden sie bei jedem durchlaufenen Verarbeitungsschritt aufdatiert, so dass der Anwendung als Informationsabnehmer eine Beschreibung aller zur weiteren Verarbeitung benötigten Signaleigenschaften zur Verfügung steht, auch wenn dynamische Änderungen in den Eigenschaften der Verarbeitungskette auftreten.

3 Fusionsfilter

3.1 Aufbau des Fusionsfilters

Zur Sensordatenfusion kommt ein Error State Space Extended Sequential Kalman Filter¹ zum Einsatz. Hierbei besteht das Basissystem, gezeigt in Abbildung 2, aus einem allgemein gehaltenen, dreidimensionalen Ansatz, in welchem die Messdaten – Beschleunigungen und Drehraten – einer Inertialmesseinheit (IMU) im Strapdown-Algorithmus um geschätzte Sensorfehler und Störgrößen korrigiert und zu Navigationsdaten (Geschwindigkeiten und Position) verrechnet werden. Dabei stellt die IMU das Basissystem dar; die von ihr gemessenen und korrigierten Größen beschreiben eine dreidimensionale Bewegung vollständig, und sie besitzt die höchste Verfügbarkeit und Abtastrate aller im System verwendeten Sensoren. Das Kalman-Filter wird synchron mit der Abtastrate des Basissystems ausgeführt und zur Korrektur der damit assoziierten Sensorfehler eingesetzt.

Der Error-State-Space-Ansatz des Kalman-Filters berechnet hierbei über ein linearisiertes Systemmodell (Extended Kalman Filter) die modellierten Fehler der IMU – Offset und Skalenfaktorfehler – und der Navigationsdaten durch Hinzunahme von Korrekturdaten. Dabei werden alle zum Zeitpunkt der Ausführung vorhandenen Korrekturdaten, unter Berücksichtigung von deren zeitlichem Versatz, angebracht. Dies wird durch das sequentielle Update ermöglicht: Nach dem Linearisierungs- und Prädiktionsschritt des Kalmanfilters wird, jeweils für die einzelnen Datenkanäle individuell, das Vorhandensein neuer Daten überprüft und diese gegebenenfalls zur Korrektur verwendet. Durch das linearisierte Systemmodell gilt für die Einzelmessungen das Superpositionsprinzip – das Ergebnis des Filters nach Ablauf der Update-Sequenz ist identisch mit dem einer Anbringung der Updates in einem einzigen Schritt. Damit wird eine automatisierte, dynamische Anpassung auf sich ändernde Verfügbarkeiten von Korrekturdaten ohne Veränderungen an den Mess- oder Systemmatrizen des Filters erreicht.

3.1.1 Verwendete Messdaten und Sensorik

Da ein Serieneinsatz des Systems vorgesehen ist, werden serientaugliche, preisgünstige Sensoren verwendet. Dabei kommen folgende Sensoren zum Einsatz:

- Inertialmesseinheit (IMU): MEMS-Beschleunigungssensoren und MEMS-Gyroskope mit jeweils drei Freiheitsgraden als dreidimensionales Basissystem
- GNSS-Empfänger: GPS-Einkanal-(L1)-Empfänger. Verwendet werden die Pseudorange (Entfernungen zwischen Satelliten und Empfangsantenne) und die differenzierten Trägerphasenmessungen (Geschwindigkeiten zwischen Satelliten und Empfangsantenne), die vom Empfänger als Rohmessdaten ausgegeben werden².

¹ Vgl. Jan Wendel: Integrierte Navigationssysteme, 2007

² Vgl. Zogg / µBlox AG: GPS und GNSS: Grundlagen der Navigation und Ortung mit Satelliten, November 2010

-
- Odometriemessungen: Raddrehwinkelimpulse mit Richtungserkennung (Wheelticks) jedes einzelnen Rades sowie der Lenkradwinkel, der über die bekannte statische Lenkübersetzung in Radlenkwinkel umgerechnet wird
 - Modellbasierte Korrekturdaten: Diese umfassen sowohl über die Prüfung von Randbedingungen getroffene Annahmen (zum Beispiel Stillstand), wie auch spezifische Annahmen für den Anwendungsfall im Automobil.

Es wird auf den Einsatz von folgenden Daten zur Korrektur und Verbesserung verzichtet:

- Daten von Drittanbietern, z.B. von SAPOS oder Assisted-GPS, um unabhängig von möglicherweise kostenpflichtigen oder eingeschränkt verfügbaren Verbindungen zu sein
- Kartendaten und Map-Matching, um Falschinformationen durch Kartenfehler und veraltete Karten zu vermeiden

3.1.2 Struktur

Das Fusionsfilter ist, wie in Abbildung 2 veranschaulicht, in zwei grundlegende Teile gegliedert. Das Basissystem führt im Strapdown-Algorithmus mit IMU-Daten und vom Filter berechneten Korrekturen die Navigationsrechnung durch. Im Korrektursystem werden die redundanten Daten in einem Messmodell miteinander verrechnet und der Fehlerhaushalt bestimmt.

Beide Teile des Filters sind ohne Einschränkungen in dreidimensionalen Koordinatensystemen erstellt. Die Allgemeinheit des Ansatzes einschränkende, auf den Anwendungsfall im Kraftfahrzeug angepasste Annahmen werden an dieser Stelle nicht getroffen. Daraus ergibt sich an alle verwendeten Korrekturdaten aus Kompatibilitäts- und Umrechnungsgründen die Anforderung, ebenso in drei Dimensionen vorzuliegen. Sind für einzelne Freiheitsgrade keine Daten verfügbar, wie beispielsweise für die Geschwindigkeit entlang der Hochachse bei Odometriemessungen, werden für diese Freiheitsgrade Modellannahmen getroffen.

Modellannahmen, die speziell für Zweispurfahrzeuge gültig sind, werden als Korrekturmessung in Form eines virtuellen Sensors angebracht. Die Gültigkeit der Modelle wird anhand von messbaren Randbedingungen festgelegt; sind die Gültigkeitskriterien erfüllt, erfolgt eine Anbringung der errechneten Modelldaten. Durch diese Struktur lässt sich das Filter auch an andere Fahrzeugtypen anpassen, indem lediglich ein virtueller Sensor ausgetauscht wird; die Grundstruktur des Filters bleibt unverändert bestehen.

Ein Beispiel für einen solchen virtuellen Sensor ist die Annahme, dass bei einem zweispurigen Kraftfahrzeug bei Geschwindigkeiten von $> 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ unter dem Einfluss von Beschleunigungen $< 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ die an den Rädern auftretenden Schräglaufwinkel ausreichend klein sind, um vereinfachend von einer Kinematik nach Ackermann³ auszugehen. Die resultierende Bewegung des Fahrzeuges lässt sich in ihrem Momentanpol, der sich im Fall eines rein vorderachsgelenkten Fahrzeuges in der

³ Braess / Seiffert: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 5. Auflage, 2007, S. 583

Mitte der Hinterachse befindet, als Geschwindigkeit entlang der x-Achse⁴ und Drehung um die z-Achse beschreiben. Die Geschwindigkeiten entlang der y- und z-Achse werden als im Mittel = 0 betrachtet, ebenso die Drehungen um die x- und y-Achse. Diese Modellannahme wird zur korrekten geschwindigkeitsbasierten Berechnung der Koordinatendrehung zwischen GPS- und Odometriemessungen benötigt, um einen sonst nicht beobachtbaren Freiheitsgrad des Systemmodells des Fusionsfilters zu schließen.

Alle für die Ermittlung der Randbedingungen notwendigen Größen sind aus Messungen bekannt, und die ausgegebenen Daten sind für alle drei translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade rechnerisch oder durch Annahmen gegeben. Auf diese Weise werden dem allgemeingültig gehaltenen Filter fahrzeugtypische, auf den Anwendungsfall angepasste Randbedingungen vermittelt.

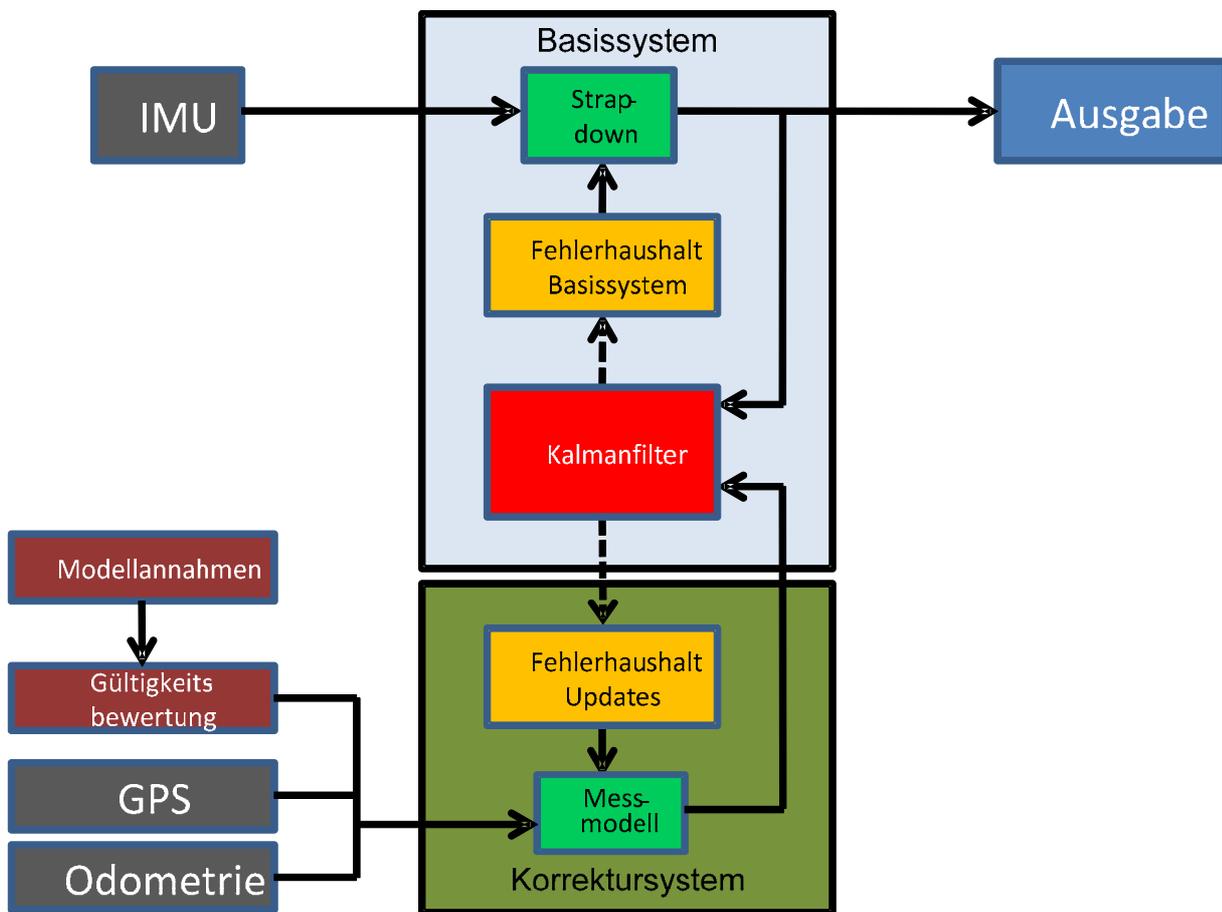


Abbildung 2: Struktur des Fusionsfilters

⁴ Nach: Deutsches Institut für Normung, DIN70000, 1994

4 Integrität und Genauigkeit

Mit der in Kapitel 2.1 beschriebenen Architektur des Fusionsfilters ist eine Basis geschaffen, die die Integration von modellbasiert ermittelten und gemessenen Daten ermöglicht und eine Verbesserung der Genauigkeit erzielt. Die von diesem virtuellen Sensor ausgegebenen Daten besitzen variable, von den aktuell verfügbaren Sensoren abhängige Qualitäten. Um die in Kapitel 1.2 beschriebenen Vorteile der Verbesserungen durch die Fusion zu nutzen, wird eine Beschreibungsweise dieser Qualitäten untersucht. Dieser Ansatz des Integritäts- und Genauigkeitsmaßes hat zum Ziel, die Qualitäten von Signalen anhand von Kenngrößen zu definieren und zu berechnen, und somit eine Weiterverarbeitung in beliebigen, auch sicherheitskritischen Anwendungen zu ermöglichen. Dabei ist der Ansatz allgemein gehalten und unabhängig vom konkreten Aufbau des Fusionsfilters.

4.1 Grundlagen

Die verwendeten Begriffe Integrität und Genauigkeit leiten sich aus der Motivation einer allgemeinen Qualitätsbeschreibung für Signale ab. Ziel hierbei ist, eine möglichst einfache und vollständige Beschreibung von Sensorsignalen zu erhalten, um nachfolgenden Funktionen alle zu einer weiteren Verarbeitung oder Regelung benötigten Informationen über diese zur Verfügung zu stellen. Die Beschreibung der Signale beginnt in den Sensoren, die den von ihnen ausgegebenen Daten die entsprechenden, aus der Spezifikation bekannten Qualitätsinformationen zuordnen. Diese Informationen werden über die gesamte Signalverarbeitungskette weitervererbt und dynamisch, entsprechend der stattfindenden Signalverarbeitung, angepasst, so dass eine Nutzerfunktion stets die der tatsächlichen Messung und Verarbeitung entsprechende Qualitätsbeschreibung erhält. Die Aufgaben einer solchen, auch für sicherheitskritische Systeme tauglichen Qualitätsbeschreibung sind:

- Zur Fehlererkennung wird der Zustand der Signalverarbeitungskette in Form einer allgemeinen Aussage über die Widerspruchsfreiheit aller verfügbaren, gegeneinander überprüfbaren Daten beschrieben.
- Bereitstellung einer über die gesamte Signalverarbeitungskette gehenden Beschreibung der Genauigkeit und Fehler der Messdaten, von den Datenquellen fortgepflanzt bis hin zu den Datensinken.
- Dynamische Berechnung der Qualitätsbeschreibung, um Änderungen der Verarbeitungskette korrekt zu modellieren, wenn diese zum Beispiel durch temporäre Nichtverfügbarkeit von Sensoren oder durch zeitliche Änderungen der Charakteristik in adaptiven Filtern auftreten.
- Zeitliche Prädiktion der maximalen, im schlechtesten Fall zutreffenden Unsicherheit eines Signals. Dies ist insbesondere Grundlage für erweiterte Fahrerassistenzfunktionen, die Funktionen nur dann anbieten, wenn die benötigte Mindestgenauigkeit über die maximale Ausführungszeit der Funktion zur Verfügung steht.

Messsignale enthalten Störungen und Fehler aufgrund unterschiedlicher Ursachen. Da sich diese in ihren Auswirkungen und Eigenschaften stark unterscheiden, ist zur Beschreibung der Signalqualität

eine Einteilung in verschiedene Fehlerklassen notwendig. Durch eine Betrachtung des reinen Signals lässt sich weder im Zeit- noch im Frequenzbereich eine eindeutige Klassifikation dieser Störungen vornehmen; beispielsweise ist eine Bias-Drift je nach Betrachtungsweise als quasistatische Konstante oder als niederfrequentes Rauschen zu sehen. Zur Erreichung einer eindeutigen Einteilung werden die Effekte daher nach ihren Ursachen unterschieden:

- Rauschen: bandbegrenzte, mittelwertfreie statistische Verteilung der Messwerte um den Erwartungswert. Rauschen ist vom Arbeitspunkt unabhängig und nähert sich bei unendlich langer Mittelung dem Erwartungswert an.
- Offset / Bias: Ein vom Arbeitspunkt unabhängiger, bei unveränderten Umgebungsbedingungen als konstant angenommener Wert, der den Messergebnissen additiv überlagert wird.
- Skalenfaktorfehler: Ein vom Arbeitspunkt abhängiger, bei unveränderten Umgebungsbedingungen als konstant angenommener Wert, der mit dem gemessenen Wert nach Abzug des Offsets multipliziert wird.
- Offset- / Skalenfaktordrift: Zeitliche Veränderung von Offset oder Skalenfaktorfehler, der auf sich ändernde Umweltbedingungen zurückzuführen ist, z.B. Temperaturänderungen, Schwankungen der Versorgungsspannung.
- Alterung des Sensors: wird vernachlässigt, da sich solche Effekte über im Vergleich zur ununterbrochenen Einschaltdauer der Sensoren signifikant längere Zeiträume abspielen.
- Zeitliche Einflüsse: Veränderungen des Signals, die im Zeitbereich erkennbar sind, beispielsweise Totzeiten und Filter-Gruppenlaufzeit
- Frequenzeinflüsse: Veränderungen des Signals, die im Frequenzbereich beschrieben werden können, beispielsweise Nutz- und Störunterdrückungsbandbreite

4.2 Integrität

4.2.1 Integritätsaussage

Die möglichen Zustände des Ergebnisses einer Überprüfung der Integrität eines Signals sind:

- Ein Fehler wurde detektiert.
- Es wurde innerhalb definierter Grenzen kein Fehler erkannt.

Die Bewertung der Integrität eines Signals erfolgt durch den Vergleich mit Referenzen. Diese Referenzen sind beispielsweise redundante Messungen der gleichen Größe, rechnerisch aus anderen Messungen ermittelt oder durch Grenzwerte bzw. Modellannahmen gegeben. Ebenso sind die von der Sensordatenfusion ausgegebenen Daten mit einzubeziehen, um zur Bewertung der Integrität des gesamten Systems auch mögliche Fehler des Fusionsfilters zu erkennen. Eine Detektion eines Fehlers setzt voraus, dass dieser beobachtbar ist, und dass ein mit den Beobachtungen im Widerspruch stehender Referenzwert verfügbar ist. Da diese Bedingungen von äußeren Einflüssen und dem Arbeitspunkt des Systems abhängig sind, ist eine stochastische Beschreibung der Entde-

ckungswahrscheinlichkeit, der Zeit bis zur Entdeckung, sowie der Konfidenz der Integritätsaussage nötig. In Kapitel 4.2.2 wird eine Definition und ein Ansatz zur Beschreibung der Konfidenz vorgestellt. Die Integritätsaussage lässt folglich nicht allgemein auf die vollständige Fehlerfreiheit des Systems schließen (notwendige Bedingung: Beobachtbarer Widerspruch), ein detektierter Widerspruch in den Sensordaten liefert dagegen eine sichere Aussage über die Fehlerhaftigkeit des Systems (hinreichende Bedingung: tatsächlich beobachteter Widerspruch). Eine weitere Quelle zur Fehlerdetektion sind die von der Selbstdiagnose eines Sensors ausgegebenen Statusdaten; diese werden ebenfalls zur Integritätsbewertung herangezogen.

Die Integritätsbewertung lässt sich in zwei grundlegenden Modi verwenden:

- Systemtest / Validierung: unter der im Testbetrieb durch weitere Mittel kontrollierten Bedingung der Fehlerfreiheit der Sensoren bedeutet die Entdeckung eines Fehlers durch die Integritätsbewertung, dass innerhalb der Signalverarbeitungskette ein Fehler vorliegt, beispielsweise ein Parametrierungsfehler oder die Instabilität eines Filters.
- Überwachung / Betrieb: wird im Betrieb des Systems innerhalb der validierten Grenzen ein Fehler detektiert, so ist auf einen Sensorfehler zu schließen.

4.2.2 Konfidenz der Integrität

Sensormesswerte weisen eine Streuung auf. Die maximal zulässige Streuung ist in der Regel durch die Sensorspezifikation festgelegt. Eine Forderung für eine positive Integritätsaussage ist, dass Abweichungen des gleichen, auf verschiedenen Wegen ermittelten Messwertes, auch im Vergleich mit anderen Sensoren innerhalb dieser Grenzen liegen. Werden Messwerte miteinander verglichen, so ergibt sich durch die Auswertung der Überlappung der einzelnen Streubreiten ein Maß für die Übereinstimmung der Messwerte, und damit eine Grundlage für die Bewertung der Integrität. Die Sicherheit, mit der die Integritätsaussage getroffen wird, hier als Konfidenz bezeichnet, ist dabei noch nicht berücksichtigt. Im aktuellen Entwicklungsstand werden zur Beschreibung der Konfidenz der Integrität zwei charakteristische Kriterien verwendet, die im Folgenden beschrieben werden.

So ist beispielsweise die Integritätsaussage durch den Vergleich von Sensoren mit niedriger Streuung schärfer als bei breiter Streuung, ebenso ist eine geringe Differenz zwischen Messwerten positiver zu bewerten als eine große, möglicherweise nur noch im Randbereich der Spezifikation liegende Differenz. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich zur Beschreibung der Konfidenz die Anforderung nach einem relativen Maß, das die Streuung und die Überdeckung von Messungen bewertet. Dieses ist im Weiteren als Überdeckungsmaß bezeichnet.

In Systemen mit nicht immer verfügbaren Sensoren (z.B. GPS) oder mit sich dynamisch ändernden Signaleigenschaften (z.B. bei den von der Sensordatenfusion ausgegebenen Daten) kann die relative Bewertung der Messdaten untereinander bewirken, dass das Auftreten einer Nichtverfügbarkeit eines im Vergleich zu den anderen Sensoren sehr genauen Sensors zu einer höheren Konfidenz führt. Dies ist der Fall, wenn zwischen den Messwerten eine Differenz bestand, die durch den Wegfall des genauen Sensors verschwindet. Da sich hierbei jedoch das gesamte Konfidenzniveau verschlechtert hat, ergibt sich die Anforderung für eine Beschreibung dieses Zusammenhangs mit ei-

nem zusätzlichen absoluten Maß, das die maximale, im Falle einer idealen Überdeckung aller verfügbaren Messungen erreichbare Konfidenz bewertet. Dieses ist im Weiteren als Streuungsmaß beschrieben.

4.2.2.1 Übereinstimmungsmaß / relative Konfidenz

Ziel dieses Teiles des Konfidenzmaßes ist, die Übereinstimmung der verfügbaren Messdaten relativ zu beschreiben. Dazu werden die Übereinstimmung der Messungen sowie deren Unsicherheiten aufeinander gewichtet. Daraus werden die Anforderungen an das Übereinstimmungsmaß hergeleitet:

- Unabhängigkeit von der Anzahl der verglichenen Messwerte und deren absoluter stochastischer Unsicherheit
- Höhere relative Gewichtung von Messwerten mit kleiner Unsicherheit
- Unabhängigkeit von den absoluten Messwerten / Arbeitspunkten, Abhängigkeit von den Differenzen der Messungen untereinander
- Unabhängigkeit von der Art der Verteilungsfunktion (z.B. Normalverteilung, Gleichverteilung)
- Angabe der Übereinstimmung anhand einer festen Skala zwischen „völlige Divergenz“ und „vollständige Übereinstimmung“

Diese Kriterien werden durch eine Gewichtung der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichten aufeinander erfüllt, wobei die zugehörigen Dichten aus den Spezifikationen der Messdaten bekannt sind. Die relative Konfidenz wird messepochenweise ausgewertet, indem um die einzelnen Messwerte eines Zeitschrittes die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichten gelegt, überlagert und summiert werden. Eine Normierung findet statt, um unabhängig von der Art der Verteilungsfunktionen, der absoluten Unsicherheit der Messwerte und der Anzahl der verfügbaren Quellen von Messdaten die Konfidenz innerhalb einer festen Werteskala zu beschreiben.

4.2.2.2 Streuungsmaß / absolute Konfidenz

Ziel dieses Teiles des Konfidenzmaßes ist, das allgemeine Unsicherheitsniveau aller verfügbaren Messdaten anhand eines absoluten Wertes zu beschreiben, und somit die höchstens erreichbare Schärfe der Konfidenzprüfung zu erhalten. Daraus werden die Anforderungen an das Übereinstimmungsmaß hergeleitet:

- Signale mit großer Unsicherheit haben geringen, Signale mit kleiner Unsicherheit haben großen Beitrag zur Verbesserung
- Angabe des bestmöglichen Konfidenzniveaus, Unabhängigkeit von der tatsächlichen Überdeckung der Wahrscheinlichkeitsdichten
- Unabhängigkeit von Arbeitspunkt und Messwerten
- Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Signale - jede hinzukommende Datenquelle verbessert die Bewertung, da eine weitere Möglichkeit der Überprüfung verfügbar ist

Diese Kriterien werden beispielsweise - im Falle einer Normalverteilung - durch eine reziproke Addition von Varianzen erfüllt. Um auch andere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wie eine Gleichverteilung zu berücksichtigen, werden entsprechende Umrechnungen bzw. Gewichtungen vorgesehen. Als Ergebnis steht ein ausschließlich von den verfügbaren Sensoren, aber nicht von einzelnen Messwerten abhängiges Maß zur Verfügung, das die absolute Schärfe der Integritätsprüfung bewertet.

4.2.2.3 Beispiel: Übereinstimmungsmaß und Streuungsmaß

In Abbildung 3 sind drei beispielhafte Wahrscheinlichkeitsdichten dargestellt. Der Erwartungswert entspricht dabei dem gemessenen Wert des entsprechenden Sensors in der betrachteten Messepoche, die um diesen Messwert gelegte Streuung entspricht der spezifizierten Unsicherheit des zugehörigen Sensors. Die Werte sind normalverteilt mit:

- $p_1 = \mathcal{N}(0,1)$ repräsentativ für einen Sensor mit mittlerer Unsicherheit
- $p_2 = \mathcal{N}(2,0.5)$ repräsentativ für einen Sensor mit niedriger Unsicherheit und Abweichung des Messwertes von den anderen Sensoren
- $p_3 = \mathcal{N}(0,3)$ repräsentativ für einen Sensor mit hoher Unsicherheit und ohne Versatz zu p_1

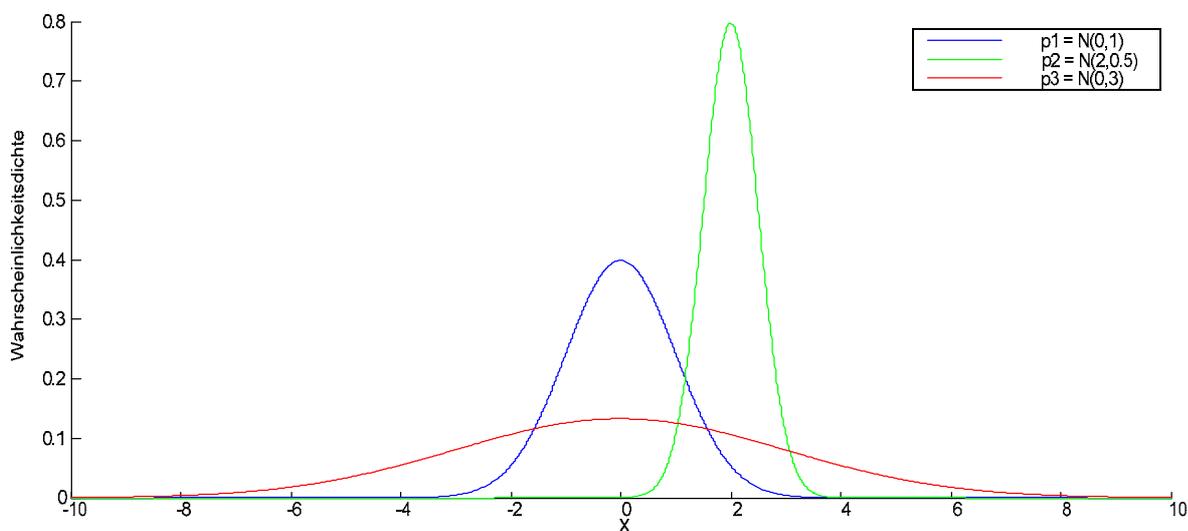


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsdichten

Die Ergebnisse der Konfidenzberechnungen der verschiedenen Verteilungen gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.2.2.1 und 4.2.2.2 sind in Tabelle 1 angegeben.

Im Vergleich 1 ist erkennbar, dass durch die Berücksichtigung zweier Messungen mit unterschiedlicher Unsicherheit durch die Übereinstimmung der Mittelwerte das Übereinstimmungsmaß maximal wird, während das Streuungsmaß aufgrund der hohen Unsicherheit von p_3 sich nur wenig von der Unsicherheit von p_1 unterscheidet. In Vergleich 2 ist eine Abnahme von K_r erkennbar, da durch den Versatz der Mittelwerte ein Widerspruch zwischen p_1 und p_2 besteht. In Vergleich 3 ist diese Abnahme trotz des gleichen Versatzes wie bei Vergleich 2 deutlich geringer, da p_3 eine höhere Unsicherheit als p_2 besitzt. In Vergleich 4 wird durch die Verwendung von drei Wahrscheinlichkeitsdichten die Abweichung von p_2 deutlicher erkennbar; dies resultiert in einer Abnahme von K_r . Weiterhin ist zu erkennen, dass das Streuungsmaß K_a in den Vergleichen 2 bis 4 maßgeblich von der niedrigen Unsicherheit von p_2 beeinflusst wird.

Nr.	Verglichene Wahrscheinlichkeitsdichten	Übereinstimmungsmaß K_r	Streuungsmaß K_a
1	$p_1 \cdot p_3$	1.0000	0.9487
2	$p_1 \cdot p_2$	0.2019	0.4472
3	$p_2 \cdot p_3$	0.8056	0.4932
4	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$	0.1757	0.4423

Tabelle 1: Werte für Konfidenzmaße

4.2.2.4 Zusammenfassung Konfidenz

Die gezeigten Konfidenzmaße sind Bausteine des sich zurzeit in der Entwicklung befindlichen Integritäts- und Genauigkeitsmaßes, die die Integritätsaussage erweitern. Die zunächst binäre Bewertung der Tatsache, ob sich die verglichenen Messdaten innerhalb laut Spezifikation plausibler Grenzen befinden, erhält als Zusatzinformation das Übereinstimmungsmaß, das die relative Abweichung der Messdaten voneinander beschreibt, sowie das Streuungsmaß, das eine absolute Aussage über das Genauigkeitsniveau der zum Vergleich verfügbaren Messdaten enthält. Die gleichzeitige Betrachtung des relativen, messwertabhängigen Teils sowie des absoluten, von der Messwertverfügbarkeit abhängigen Teils, ermöglicht die Beschreibung der Konfidenz der Integritätsaussage in Form einer Übereinstimmung von Messdaten, sowie die mit diesen vorliegenden Messdaten erreichbare Bewertungsschärfe. Damit bieten sie grundlegende Informationen, um über die Verwendbarkeit der Daten, auch in sicherheitskritischen Systemen, zu entscheiden. Durch das Bausteinprinzip der Konfidenzbeschreibung ist eine Erweiterung um zusätzliche Maße ohne Änderungen an den bestehenden Blöcken möglich.

Werden auch die Ergebnisse des - als Black Box betrachteten - Fusionsfilters mit in den Vergleich mit einbezogen, so ist eine Überprüfung des Filters mit seinen Eingangsdaten erreicht, wodurch auch mögliche Instabilitäten des Filters, die zum Widerspruch mit dessen Eingangsdaten führen, erkennbar werden.

4.3 Genauigkeit

4.3.1 Genauigkeitsaussage

Während bei der Integritätsbewertung über stochastische Modellierung lediglich Grenzwerte zur Bewertung des Systemzustandes ermittelt werden, ist das Ziel der Genauigkeitsaussage die Berechnung von signalspezifischen, deren tatsächliche Eigenschaften beschreibenden Kennwerten. In einer Sensordatenfusion kommen häufig adaptive Filter zum Einsatz, wie beispielsweise das Error-State-Space-Kalman-Filter, welche ihre Charakteristik über die Zeit ändern. Steuergeräte, die die vom Filter ausgegebenen Werte z.B. zur Fahrdynamikregelung verwenden, benötigen daher Informationen über die aktuelle Charakteristik der Signale.

In der Regel sind die Eigenschaften der von einem Sensor ausgegebenen Daten aus dessen Spezifikation bekannt oder durch Messungen ermittelt. Um die Anforderung an eine korrekte Beschreibung des verarbeiteten Signals zu erfüllen, wird der Ansatz gewählt, eine Signalbeschreibung vom Sensor ausgehend auszulegen und diese durch alle an der Signalverarbeitungskette beteiligten Systeme, entsprechend ihrer jeweils intern bekannten Parameter, aufzudatieren. Dabei besitzt jeder Block Ein- und Ausgänge für diesen Beschreibungsparametersatz, ist ansonsten aber als Black Box betrachtet.

Die zur Beschreibung verwendeten Kennwerte werden aus typischen Angaben⁵ in Sensordatenblättern und üblichen Sensorfehlermodellen⁶ abgeleitet. Die Berechnungen zur Weiterverarbeitung in der Signalkette werden aus Basisoperationen der digitalen Signalverarbeitung hergeleitet. Als Grundlage dienen die in Kapitel 4.1 genannten Fehlerklassen.

4.3.2 Kennwerte und Verarbeitung

4.3.2.1 Signalbeschreibung

Der ausgewählte Satz an Kenngrößen für die Beschreibung eines Datensignals setzt sich zusammen aus:

- Rauschen: stochastischer, mittelwertfreier Fehler
- Offset / Bias: additiver Fehler
- Skalenfaktor: multiplikativer Fehler
- Nichtlinearität: arbeitspunktabhängig, Angabe des maximalen Fehlers
- Offset- und Skalenfaktordrift: maximale zeitliche Änderungsrate
- Bandbreite / Grenzfrequenz: Frequenzbereich des Nutzsignals, ggf. der Störunterdrückung
- Verzögerungs- / Totzeit: Durchschnittliche Gruppenlaufzeit innerhalb der Bandbreite

⁵ Vgl. J. Niebuhr / G. Lindner: Physikalische Messtechnik mit Sensoren, 2002, S. 13ff, S. 129ff

⁶ Vgl. Jan Wendel: Integrierte Navigationssysteme, 2007, Seite 194

Die unverarbeiteten Rohwerte der Sensoren bilden dabei die Quelle der Beschreibung dieser Kennwerte. Diese werden bei der Weiterverarbeitung von Signalen modifiziert. Die Weiterverarbeitung wird in drei Operationen eingeteilt: Integration, Differentiation und Filterung. Eine Berechnung entsprechend der Fehlerklasse und die Fehlerfortpflanzungsrechnung sind anzuwenden; die Auswirkungen auf die Kennwerte sind im Folgenden beschrieben.

Fehlerfortpflanzung bei **Integration** des Signals:

- Rauschen: Änderung der Charakteristik, Gewichtung der Leistungsdichte mit f^{-2} .
- Offset / Bias: wird zu einer Drift über die Integrationszeit
- Skalenfaktor: bleibt ein Faktor des integrierten Signals
- Nichtlinearität: hebt sich im langfristigen Mittel über den gesamten Messbereich auf
- Drift: wird zu quadratischer Drift über die Integrationszeit
- Bandbreite / Grenzfrequenz: keine Änderung, aber andere Charakteristik: $\frac{1}{f}$
- Verzögerungs- / Totzeit: bleibt bestehen, Verzug der Integralsumme

Fehlerfortpflanzung bei **Differentiation** des Signals:

- Rauschen: Änderung der Charakteristik, Gewichtung der Leistungsdichte mit f^2 .
- Offset / Bias: verschwindet durch Differentiation
- Skalenfaktor: bleibt ein Faktor des differenzierten Signals
- Nichtlinearität: wird zu einem arbeitspunktabhängigem Offset
- Drift: wird zu einem Offset
- Bandbreite / Grenzfrequenz: Änderung der Charakteristik (Hochpasscharakter: f)
- Verzögerungs- / Totzeit: bleibt bestehen

Fehlerfortpflanzung bei **allgemeiner Filterung** des Signals:

- Rauschcharakteristik wird verändert
- Änderung der Bandbreite / Grenzfrequenzen entsprechend der Filterung
- Verzögerungs- / Totzeit wird verlängert durch
 - Gruppenlaufzeit innerhalb der Bandbreite
 - Verarbeitungszeit des digitalen Filters

4.3.2.2 Zusammenfassung Genauigkeit

Die Genauigkeitsaussage in Form einer an Datenblätter angelehnten Beschreibung ermöglicht die Charakterisierung von Messdaten von ihrer Quelle durch die Signalverarbeitungskette bis hin zu ihrer Senke. Im Gegensatz zur Integritätsbeschreibung, in der die Einhaltung von Grenzwerten des gesamten Datenkollektivs beurteilt wird, werden bei der Genauigkeitsbeschreibung die tatsächlichen Eigenschaften individueller Messdaten adressiert, indem durch die Genauigkeitsbewertung in Anlehnung an eine Beschreibung aus Datenblättern deren dynamische Spezifikation fortlaufend berechnet wird.

Diese Beschreibungsdaten lassen sich abhängig von den Anforderungen der Benutzerfunktion auswerten, so ist beispielsweise eine adaptive Regelung oder das genauigkeitsabhängige Angebot von Zusatzfunktionen von Fahrerassistenzsystemen möglich.

5 Fazit, Ausblick

Ein Modell für ein echtzeitfähiges Fusionsfilter und für eine allgemeine Sensorarchitektur wurde umgesetzt. Für die Beschreibung der Integrität und der Genauigkeit der gemessenen und fusionierten Daten wurde ein Ansatz gezeigt.

Zukünftig wird die Integritäts- und Genauigkeitsbeschreibung in das Echtzeitmodell integriert werden. Dabei ist noch zu untersuchen, ob das Überdeckungs- und Streuungsmaß ausreichend für die Beschreibung der Integrität ist, oder ob noch weitere Kriterien zur Bewertung benötigt werden.

Eine Erweiterung der Genauigkeitsbeschreibung um die Bewertung der maximalen Abweichung eines Signales vom wahren Wert durch Filterung ist sinnvoll. Damit werden durch Filterdynamik entstehende zeitliche Abweichungen des Signals beschrieben, wie sie beispielsweise bei der Tiefpassfilterung einer Sprungfunktion entstehen, und nicht hinreichend genau durch eine reine Totzeit abzubilden sind.

Es ist vorgesehen, für das Konfidenzmaß eine stochastische Beschreibung der Entdeckungswahrscheinlichkeit und der Entdeckungszeit von Fehlern zu entwickeln, um die zeitliche Entwicklung der Integritätsaussage zu beschreiben.

Ebenso ist die Prädiktion der zeitlichen Entwicklung der Genauigkeit der vom Fusionsfilter ausgegebenen Daten als weitere Funktion vorgesehen. Hierbei wird das Fusionsfilter nicht mehr als Black Box betrachtet, und, anhand der Worst-Case-Annahme von nicht verfügbaren Verbesserungsmessungen, mit Hilfe des stochastischen Modells des Filters die zukünftige Entwicklung der minimal erreichten Genauigkeit abgeschätzt.

Weiterhin sind stochastische und deterministische Modelle vorgesehen, um die Zeit bis zur Detektion eines Fehlers in Abhängigkeit von der tatsächlichen und der erwarteten Verfügbarkeit von Vergleichsdaten abzuschätzen.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Architektur des Systems	3
Abbildung 2: Struktur des Fusionsfilters	7
Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsdichten	12

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werte für Konfidenzmaße.....	13
---	----

8 Literaturverzeichnis

Deutsches Institut für Normung: **DIN70000**

Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Beuth Verlag, 1994

Zogg, J.-M., µBlox AG: **GPS und GNSS: Grundlagen der Navigation und Ortung mit Satelliten**

Thalwil, Februar 2009, Aktualisiert Oktober 2011

http://zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf

besucht: 16.11.2011.

Jan Wendel: **Integrierte Navigationssysteme**. Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation.

Verlag: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 19. 01. 2007. ISBN 978-3-4865-8160-7

J. Niebuhr / G. Lindner: **Physikalische Messtechnik mit Sensoren**.

Verlag: Oldenbourg Industrieverlag, 5. überarbeitete Auflage, 2002. ISBN 3-486-27007-9

Braess, Seiffert: **Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

Verlag: Vieweg Verlag, 5. Auflage, 2007. ISBN 987-3-8348-0222-4