

Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit

Karl Naab

Abstract – Aktive Sicherheit zielt auf die Vermeidung von Unfällen. Viele Faktoren der Fahrzeuggestaltung tragen zu diesem Ziel bei und erleichtern dem Fahrer Bedienung und Beherrschung des Fahrzeuges in schwierigen Fahrsituationen. Neben informierenden und warnenden Systemen wird zunehmend versucht, Systeme einzuführen, die automatisch Unfallvermeidungsaktionen durchführen. Der Weg zu diesen künftigen Fahrzeugsystemen führt über Fahrerassistenzsysteme, da die Wahl der „richtigen“ Führungsgrößen oft darüber entscheidet, ob kritische Fahrsituationen entstehen oder ob sie erst gar nicht auftreten. Voraussetzung ist dabei entsprechendes Wissen über den momentanen und den zu erwartenden Zustand der Fahrumgebung. In der vorliegenden Arbeit werden Strukturen für modulare Sensorik- und Datenfusionskonzepte diskutiert, die den wachsenden Anforderungen der Assistenzsysteme an die Fahrumfeldhypothese und dem künftigen technologischen Fortschritt gerecht werden können.

1 Einleitung

Die Erfassung von Information über Vorgänge in der Fahrumgebung und im Fahrzeug selbst ist Grundlage für alle künftigen Assistenzsysteme, die bei der Fahrzeugführung unterstützen sollen. Dabei bestimmt Umfang und Qualität der verfügbaren Information wesentlich den machbaren Grad und die Komplexität der jeweiligen Assistenzfunktion. Das Potential der sensorischen Erfassung und Interpretation von Fahrumgebungsinformation für sicherheitserhöhende Assistenzfunktionen kann in der redundanten Nutzung gleicher oder ähnlicher Information durch Fahrer und System gesehen werden: Ergänzend zur Informationsaufnahme des Fahrers wird durch Sensoren eine unabhängige Information gewonnen. Auch wenn auf längere Sicht die Gesamtheit der Wahrnehmungsleistungen des Menschen und seine Fähigkeit der Interpretation dieser Daten in variierenden Kontexten damit sicherlich nur schwer erreicht werden kann, sind in einzelnen Aspekten technische Sensoren durchaus überlegen, sie messen manche Größen präziser und haben beispielsweise kein Aufmerksamkeitsproblem. In dem Maße, wie nun die Sensortechnologie und das Wissen über die Vorgänge in der Fahrumgebung reift, werden auch Sys-

teme der Aktiven Sicherheit - das heißt zur Unfallvermeidung oder mindestens zur Verringerung des Unfallrisikos oder der Unfallschwere - realisierbar.

Während für „einfache“ Funktionen wie Active Cruise Control (ACC) ein einziger Sensor (Radar oder Lidar) noch ausreichend ist, werden für höherwertige Funktionen schon aus Gründen der Erfassungsgeometrie, insbesondere aber wegen der geforderten Verlässlichkeit der Sensorinformation diversitäre, multisensorielle Ansätze (unterschiedliche Radar-, Laser-, Videosysteme) mit entsprechender Signalverarbeitung notwendig. Sensor-Fusion verbindet die verschiedenen Informationsquellen, bereinigt Fehler, sorgt für mehr Robustheit und Redundanz und liefert entsprechend den hinterlegten Modellannahmen und Hypothesen „neue“, abgeleitete Information und führt sie zu einer Gesamtaussage zusammen. Struktur und Methoden der zugrundegelegten Fusion bestimmen wesentlich die erzielbaren Ergebnisse, letztendlich aber auch die im Fahrzeug zu realisierende Software-, Bus- und Steuergeräteeinheit.

Die Sensorik ist bei Assistenzsystemen ein wesentlicher Kostenfaktor. Hinzu kommt, dass sie an unterschiedliche Ausstattungsumfänge der Fahrzeuge anpassbar sein muss. Dies macht eine flexible und erweiterbare Architektur der Sensorik und eine Mehrfachnutzung der vorhandenen Sensorik-Ressourcen für unterschiedliche, aufeinander abgestimmte Assistenzfunktionen erforderlich. Eventuelle Funktions-Upgrades bedingen zunehmend offene und modulare Architekturen und Standards.

2 Informationsbedarf von Assistenzfunktionen

Die Führung eines Fahrzeugs ist ein Prozess, bei dem der Fahrer Information über sein Fahrzeug und die Fahrumgebung aufnimmt, verarbeitet und bewertet und der jeweiligen Situation entsprechende Aktionen ausführt. In den komplexen Situationen des Straßenverkehrs ist diese Information sehr vielfältig, ihre Erfassung und Bewertung ist auch vom Fahrer oft nur unvollständig leistbar, was gelegentlich zu kritischen Situationen führen kann. Will man einzelne Aufgaben der Fahrzeugführung einem technischen System übertragen oder durch ein solches System überwachen lassen, so muss die Information, die dieses System benö-

Dr.-Ing. Karl Naab ist bei der BMW Group zuständig für intelligente Sensorik und Signalverarbeitung neuer Fahrerassistenzsysteme.

Adresse: BMW Group, Abteilung EF-60, D-80788 München
Tel.: ++49 89 382 44991, Email: karl.naab@bmw.de

tigt, Fahr Situationen in sehr ähnlicher Weise beschreiben, wie sie vom Fahrer als Ausschnitt einer Verkehrssituation wahrgenommen werden [7]. Da die Verkehrsumgebungen für Kraftfahrzeuge so gestaltet sind, dass sie für menschliche Fahrer möglichst gut beherrschbar sind, muss auch eine technische Sensorik solche relevanten Merkmale erfassen können.

Die Analyse und Spezifikation des Informationsbedarfs beginnt bei der Fahr Situation bzw. dem Aktionschema, das diese Fahr Situation charakterisiert. Aktions schemen sind Verhaltensregeln für bestimmte Situationen etwa wie:

„Befindet sich im Verkehrsraum vor mir ein Fahrzeug, das in meiner Spur langsamer in gleicher Richtung fährt, als ich geplant habe, und wird es auch dort bleiben und will (oder kann) ich nicht überholen, dann verzögere und folge diesem Fahrzeug in vernünftigen Abstand“.

Dies stellt die Grundregel der Abstandsregelung (ACC) dar. Die Grundregel eines Notbremsassistenten könnte z.B. lauten:

„Taucht (plötzlich) ziemlich nah vor mir in meiner Fahrspur ein Fahrzeug (Hindernis) auf, das sehr viel langsamer ist oder sogar still steht, (oder bremst das Fahrzeug sehr stark) und wird dieses Fahrzeug in meiner Spur bleiben und kann (oder will) ich nicht ausweichen und reagiere ich (als Fahrer) nicht oder nur unzureichend, dann führe selbsttätig eine Notbremsung so aus, dass eine Kollision vermieden wird.“

Grundregeln von Spurhalteassistenten könnten lauten:

„Nähert sich mein Fahrzeug dem Fahrspurrand (bzw. der Fahrspurbegrenzungslinie) und droht diesen zu überfahren, ohne dass ich beabsichtige, die Spur zu wechseln, dann gib eine Warnung aus (oder helfe mir aktiv in meine Spur zurückzukommen)“.

Diese Situationen haben natürlich weitere, zum Teil stärker detaillierte Varianten. Aus Fahrersicht verwandte Situationen und Aktions schemen werden zu sinnvollen Einheiten zusammengefasst, sie bilden dann die eigentlichen (Assistenz-) Systeme im obigen Sinne. Analysiert man z.B. die obige Regel für ACC, dann lässt sich der Informationsbedarf konkreter fassen:

Situations-Aspekt	Zugehörige Information
„Befindet sich im Verkehrsraum vor mir ein Fahrzeug“:	Objekt vorne vorhanden, Art („Fahrzeug“), Abstand hierzu
„das in meiner Spur“:	Fahrbahn, Fahrspur(en), Eigenposition relativ zu Fahrspuren, Objektposition relativ zur Fahrspuren
„langsamer in gleicher Richtung fährt“:	Relativgeschwindigkeit, mitbewegt
„als ich geplant habe“:	Eigengeschwindigkeit, Wunschgeschwindigkeit
„und wird es auch dort bleiben“:	Spurwechselabsicht des Objekts
„und will ich nicht überholen“:	Spurwechselabsicht des Fahrers

„oder kann ich nicht überholen“:

Nebenspuren vorhanden, ggf. Belegung der Nebenspuren, Ort und Relativgeschwindigkeit von Objekten, Verbotsschilder, Kuppen, Einmündungen

„in vernünftigem Abstand“:

Abstandswunsch des Fahrers

Die technische Realisierung z.B. des zugehörigen Folge-reglers braucht noch weitere Informationen wie (Relativ-)Beschleunigung und Eigenzustand des Fahrzeugs, Fahrwiderstände usw.

Man kann nicht davon ausgehen, dass diese zum Teil sehr komplexe Information vollständig verfügbar oder immer verlässlich zu ermitteln ist. Um die Lücken zu schließen, müssen Hypothesen eingeführt werden. Ist z.B. die Information über Fahrbahn und Spuren nicht vorhanden, so setzt man oft als Hypothese an, dass die eigene Fahrspur genügend genau durch die mittels der Gierrate bestimmten Fortschreibung der momentanen Bewegungstrajektorie des eigenen Fahrzeugs repräsentiert wird. Die Spuruordnung eines Objekts wird dann durch dessen seitliche Ablage von dieser Bewegungstrajektorie ersetzt. Auch wird z.B. angenommen, dass ein Objekt keine Spurwechselabsicht hat. Ist die Art eines Objekts nicht direkt verfügbar (aus der Art lassen sich oft ein typisches Verhalten und Handlungsstrategien prognostizieren), so versucht man aus der Bewegung des Objekts auf seine Art zu schließen: Schnell mitbewegte Objekte sind meistens Fahrzeuge, die sich auf der eigenen Fahrbahn befinden. Damit haben diese Objekte eine bestimmte Relevanz, der Umkehrschluss gilt oft nicht, denn stehende Objekte können ebenfalls relevant sein.

Hypothesen bewirken in Situationen, in denen sie die Umwelt nicht ausreichend genau wiedergeben, im allgemeinen Einschränkungen der idealen Funktionalität. Es ist im Einzelnen zu prüfen, ob und in wie weit die jeweilige Fahraufgabe damit erfüllt werden kann und das Systemverhalten für den Fahrer und die Verkehrsteilnehmer erwartungskonform und verständlich bleibt. Komfortfunktionen zeichnen sich dadurch aus, dass sie bezüglich unvollständiger Information unkritischer in ihrem resultierenden Verhalten bleiben: Sie induzieren „per definitionem“ keine derart kritischen Situationen, dass dem Fahrer keine Reaktionsmöglichkeit mehr bliebe. Eine unvollständige oder unzureichende Ausführung der Assistenzfunktion führt deshalb „höchstens“ zu Komforteinbußen für den Fahrer.

Betrachtet man die Grundregel für den Notbremsassistenten, einer Funktion, die der Aktiven Sicherheit zuzuordnen ist, so erkennt man, dass praktisch die gleiche Art der Information gefordert wird. Der Unterschied liegt nur in der Auswirkung unvollständiger oder unsicherer Information: Da ohnehin eine kritische Situation vorliegt (die Assistenzfunktion ist für Not-

bremssituationen gedacht, in der der Fahrer keine Aktionsmöglichkeit mehr hat), bleibt die Kritikalität der Situation mindestens erhalten, wenn die Funktion ausbleibt, eine falsche Ausführung der Funktion kann den kritischen Zustand ggf. noch verstärken. Eine unvollständige Ausführung ist in ihrer Auswirkung möglicherweise gar nicht vorhersehbar, sie kann die Situation entschärfen, aber auch verschlimmern. Hinzu kommt, dass der Fahrer ja eine bestimmte Erwartung bezüglich der Funktion aufgebaut hat und deshalb meist weniger reaktionsbereit ist als ohne diese Funktion.

Daher fordern diese Systeme i.a. wesentlich präzisere und verlässlichere Information [6], der Ersatz von realen Messungen durch zeitweise schwach zutreffende Hypothesen ist dann nicht zulässig. Qualitätsmaße, die die Verlässlichkeit der Information beschreiben, müssen wesentlicher Bestandteil der Eingangsgrößen für aktive Sicherheitssysteme sein, aber auch Komfortsysteme profitieren davon. Diese Maße sollten die zu erwartende Genauigkeit der physikalischen Werte beinhalten, sowie Messfehler, Messrauschen, Ausfallraten, Fehldetektionsraten, zeitlicher Bezug, Phasenverschiebung z.B. durch Filterung oder Laufzeiten usw. bis hin zu Maßen für die Sicherheit der Situationserkennung, damit die Funktionen ihre Aktionen entsprechend anpassen können.

In den letzten Jahren wurden viele Ideen für mögliche Assistenzfunktionen geboren [5],[9]. Abb. 1 zeigt eine qualitative Einordnung solcher Systeme bezüglich Komfort und Sicherheit. Dabei ist die Zuordnung oft nur sehr unscharf zu treffen. Systeme wie ACC oder Lane Keeping Support können durchaus Elemente der aktiven Sicherheit beinhalten je nach Ausprägung der Funktion, die auch durch zunehmenden Entwicklungsfortschritt bedingt sein wird.

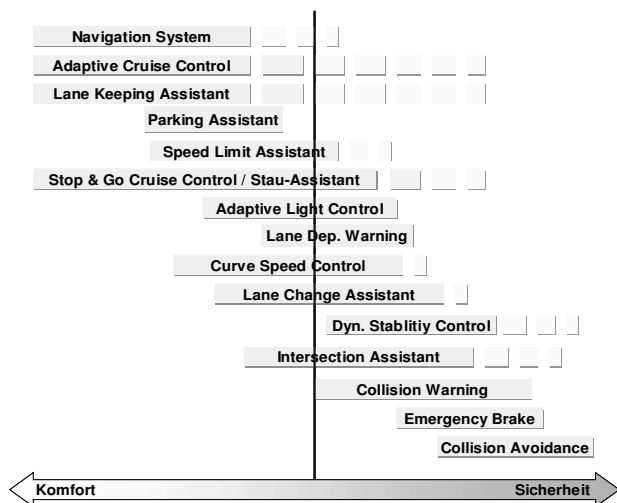


Abb. 1: Einordnung von Assistenzfunktionen bez. Komfort und Sicherheit

Viele dieser Systeme benutzen identische Information, der Unterschied zwischen Komfort- und Sicher-

heitssystemen besteht wie erwähnt hauptsächlich in Signal-Qualität und -Umfang. Analysiert man den Informationsbedarf systematisch anhand ihrer Aktions-schemen, so lässt sich dieser klassifizieren nach Information über [4]

- *Objekte* (relative Position und Bewegung, Aufenthaltsort, Art, Absicht)
- *Fahrbahn* (Geometrie, Zustand, Art, Verkehrsregelung, Sichtweite)
- *Fahrzeug/Ego* (Zustand, Bewegung, Ort, Leistung, Grenzen)
- *Fahrer* (Zustand, Absicht, Leistung, Grenzen)

Diese so formulierte „High Level“ Information besitzt die Art einer Fahrersicht. Sie wird über eine entsprechende Datenverarbeitung und -interpretation aus der von den Sensoren gelieferten der „Low Level“ Information gewonnen. In Abb. 2 ist der Informationsbedarf für unterschiedliche Assistenzfunktionen schematisch dargestellt. Die einzelnen Informationsarten sind natürlich in der Praxis noch sehr viel weiter detailliert.

System		Längs		Quer	Parken	Sicherheit							
		ACC	Stop&Go	Lanespeed	TLC	HeadingControl	Spurwechselass.	Parklücken-Info	Einpark-Assistent	Abstandswarnung	Abstandsbezog. BA	Akt. Bremsenprüf	Kreuzungsassistent
Ego	Zustand	○	○					△	○	○	○	○	○
	Bewegung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Objekte	vorn fern	○	○						○	○	○	○	○
	vorn nah		□				△		□	□	□	□	□
	hinten						○				○		
	seitlich						○	○	□				
	Geschwindigkeit	○	○				○		○	○	○	○	○
	Querposition	○	□				○		○	○	○	○	○
	Größe		□						△	○	□		
	Ort	○	□				○		□	□	○	○	○
	Art		△						△			○	△
	Absicht		△	△					△			○	○
Straße	Verkehrszeichen			○				△				□	
	Fahrspur		△	△		○	□	○		△	△	□	○
	Markierungen					○	○						○
	Typ		△	△	○		△	△					
	Parklücke						○	□					
Fahrer	Kreuzung					△	△	△					○
	Zustand					△	△	△	△		○	○	△
	Absicht	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abb. 2: Informationsbedarf unterschiedlicher Assistenzfunktionen, □: hohe Anforderung, ○: normale Anforderung, △: optional

3 Multi-Sensorsysteme

3.1 Sensorprinzipien

Information einer solchen Komplexität ist i.a. nicht mit einem einzigen Sensorsystem zu erhalten. Diverse Sensorprinzipien sind erforderlich um die vielfältigen

gen Objekt-Eigenschaften simultan und mit der geforderten Präzision und Verlässlichkeit zu ermitteln. Mögliche Beiträge heute bekannter Sensorsysteme und Informationsquellen zur Bildung der Fahrumgebungshypothese sind in Abb. 3 dargestellt. Sie werden im folgenden kurz charakterisiert.

Information		Sensoren											
		Fz. Sensoren	Radar fern	Radar nah	Mehrstrahl-Laser	Laser-Scanner	Ultraschall	Video-Objekte	Video-Spur	Video-Verkehrsz.	Navl-Datenbasis	Sonst. Ext. Com.	
Ego	Zustand	●											
	Bewegung	●											
Objekte	vorn fern		●	●	●			△				△	
	vorn nah			■	■	■		△	●				
	hinten		●	●	●			△	●				
	seitlich			●	●	■			△				
	Geschwindigkeit	●	■	■	△	△			△			△	
	Querposition		△	●	■	■			■				
	Größe				●	■			■				
	Ort								■		△	△	
	Art								△			△	
	Absicht											●	
Straße	Verkehrszeichen									■	●		
	Fahrspur								■	△			
	Markierungen								●	△			
	Typ								△	■			
	Parklücke						●						
	Kreuzung									■	●		
Fahrer	Zustand	△											
	Absicht	△											

Abb. 3: Beiträge verschiedener Sensorsysteme und Informationsquellen, □: hochwertig, ○: ausreichend, △: gering

Mehrkeulige Mikrowellenradare für den Fernbereich bis 150-200m werden üblicherweise in einem Frequenzbereich um 77 GHz betrieben. Sie sind in der Lage, in einem schmalen Winkelbereich bis zu ±10° Abstand und radiale Differenzgeschwindigkeit von Objekten relativ präzise zu messen, die Winkelposition ist prinzipbedingt deutlich ungenauer. Je nach Auflösungs- und Trennvermögen können mehrere Ziele gleichzeitig erfasst werden. Die Objekte werden als Punktbewegungen eines Reflexionszentrums repräsentiert. Die Objektausdehnung ist i.a. nicht erhältlich, was eine weitere Unsicherheit gerade in der Querpositionierung darstellt. Für den Nahbereich bis ca. 40m sind in Kürze hochgenaue, weitwinklige Radare verfügbar. Sie nutzen ein 5 GHz breites Frequenzband um 24 GHz, das sich derzeit im Zulassungsprozess befindet. Unschlagbarer Vorteil der Radartechnik ist ihre weitgehende Unabhängigkeit von schlechten Wetterbedingungen.

Mehrstrahlige oder scannende Lasersensoren können Abstand und Winkelposition von optischen Reflexionspunkten auf Objekten präzise messen, da die Laserstrahlen sehr abbildungsscharf ausgebildet sind.

Treffen mehrere Strahlen auf ein Objekt, so lässt sich Information über den dem Sensor zugewandten Teil der Objekt-Kontur ermitteln. Mehrzielfähigkeit und Trennschärfe sind gut ausgeprägt. Die Relativgeschwindigkeit ist nicht verfügbar oder höchstens indirekt durch modellgestützte Filterung zu erhalten. Die Sichtweite von Lasersensoren ist z.T. stark witterungsabhängig, was oft als erheblicher Nachteil eingestuft wird.

Video-Bildverarbeitungssysteme arbeiten ebenso im visuellen Bereich. Sie besitzen eine hohe Ortsauflösung und eignen sich besonders für die Detektion von solchen Objekten in der Fahrumgebung, die als visuell erkennbare Strukturierungshilfsmittel für den menschlichen Fahrer geschaffen sind wie z.B. Spur- und Fahrbahnmarkierungen oder Verkehrszeichen, auch Lichtzeichen. Die Zuverlässigkeit der Detektion von Fahrzeugen mittels Bildverarbeitung ist mittlerweile schon weit fortgeschritten. Die Vorteile liegen hauptsächlich in der genauen Vermessung ihrer lateralen Position und Breite oder Ausdehnung - das Prinzip der Videokamera beruht auf der Winkelmessung. Die Fähigkeit zur Bestimmung von Objekt-Entfernungen ist wegen der stark nichtlinearen Perspektiven und der notwendigen Hypothesen wie z.B. der Annahme einer „ebenen Welt“ mit nur sehr unterschiedlicher Präzision möglich. Ungünstige Beleuchtungsverhältnisse, Schatten usw. beeinträchtigen oft die Zuverlässigkeit. Objekt-Geschwindigkeiten sind nur über die Auswertung von Bildfolgen zu erhalten, z.B. durch Vermessung der Bildzeilen vorzugsweise in Kombination mit der perspektivischen Größenänderung von als invariant angenommenen Objekten. Die Video-Bildverarbeitung basierend auf hochdynamischen Kamerasensoren erscheint insgesamt jedoch als das vielversprechendste und vielseitigste Verfahren, denn die Fahrzeugführung in unseren heutigen Fahrumgebungen ist überwiegend auf das menschliche Sehen ausgerichtet und optimiert. Dies wird durch Videosensorik am ehesten abgedeckt.

Datenbasen, wie man sie aus Navigationssystemen kennt, spielen eine immer größere Rolle als Informationsquelle für solche orts- und fahrbahnbezogene Information, die sich sehr langsam verändert wie z.B. die Straßengeometrie, die feste Verkehrsregelung oder sonstige allgemeine Points of Interest.

Die Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug kann als wertvoller Lieferant aktueller verkehrs- und ortsbezogener Information dienen. Aktualitätsprobleme von Datenbasen können damit ebenfalls behoben werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Fahrzeugführung ist die Kenntnis der Absicht der umliegenden Verkehrsteilnehmer. Dies ist eine der am schwierigsten zu erfassenden Größen. Kennt man die Art von Objekten, dann lässt sich in manchen Fällen ihre die Absicht eingrenzen. Beim konventionellen Fahren teilen sich die

Fahrer ihre Absichten durch optische Kommunikationsmittel wie Blinker oder Bremslicht mit. Auch der Blickkontakt zwischen Fahrern oder Fahrer und Fußgängern dient der Verständigung, was lokale Verhaltenshypothesen weiter festigen kann. Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation oder die Erkennung von z.B. Blinker und Bremslicht durch Video-Bildverarbeitung können dabei hilfreich sein. Die flächendeckende Einführung von Fahrzeug-Kommunikation muss jedoch wie jede Infrastrukturmaßnahme als ein langwieriger Prozess angesehen werden. Darauf aufbauende Assistenzfunktionen haben dies in ihrer jeweiligen Ausprägung zu berücksichtigen, da sie nicht damit rechnen können, solche Informationen immer verlässlich zur Verfügung zu haben.

Information über den Bewegungszustand des Fahrzeugs erhält man aus klassischen Fahrzeugsensoren wie Radgeschwindigkeiten, Gierraten- und Beschleunigungssensoren in den verschiedenen Achsen, Lenkwinkel usw. Der Zustand der Antriebs- und Bremssysteme ist mittlerweile gut mit entsprechender Sensorik erfasst. Fahrzeugsensoren wurden bisher den einzelnen Antriebs- und Fahrwerksregelsystemen zugeordnet. Es bietet sich an, auch diese Ressource „Fahrzustandsinformation“ zentral bereitzustellen, um Synergien und Redundanzen gezielt auszunutzen.

Information über den Fahrer, speziell seine Absicht, lässt sich aus den Bedienhandlungen (Gas-, Brems-, Lenkradbetätigung, Blinkerhebel, Wunschgeschwindigkeitseingabe, Routenwahl, usw.) gewinnen. Durch gezielte Fahrerbeobachtung wie z.B. Verfolgung der Blickbewegung oder Soll/Ist-Vergleich bei Regeltätigkeiten wie Spurhaltung lässt sich auf den Aufmerksamkeits- und Leistungszustand des Fahrers schließen. Diese Information hat aber oft nur die Qualität von schwachen „Indizien“, da Fahrer sehr schnell ihre Absicht ändern können. Die oft nicht oder nur unzureichend bekannte Fahrerabsicht führt bei Assistenzsystemen sehr häufig zu Diskrepanzen, die als „nicht erwartungskonform“ eingestuft werden.

3.2 Diversitäre Anordnungen

Die geforderte Diversität der Fahrerassistenz-Sensorik hat mehrere Aspekte: Unterschiedliche Assistenzfunktionen wirken in unterschiedlichen Bereichen und Richtungen um das eigene Fahrzeug. Da ein Sensor allein schon wegen seines begrenzten Blickwinkels nur einen Teil abdecken kann, muss man mehrere Sensoren verwenden. So empfiehlt es sich z.B. für die Erweiterung des ACC um die Stop&Go-Funktion zur Abdeckung der nahen Umgebung vor dem Fahrzeug zusätzlich weitwinklige Nahbereichsradare zum ACC-Fernbereichsradar einzusetzen. Diese ergänzen sich einerseits in der Erfassungsgeometrie, zum anderen in den Überlappungsbereichen. Auf Grund der durch Mehrfachmessungen entstehenden Redundanz können sie

auch eine höhere Detektions-Qualität und -Sicherheit und Fehlertoleranz bewirken. In manchen Fällen muss auch gezielt redundante Mehrfachsensorik eingesetzt werden, um die geforderte Detektions-Sicherheit zu erreichen.

Diversität in der Sensoranordnung ist auch erforderlich, wenn unterschiedliche Eigenschaften von Objekten erst durch unterschiedliche Sensor-Prinzipien erfasst werden können oder die geforderte Genauigkeit nur durch gegenseitigen Ausgleich der spezifischen Stärken und Schwächen der Einzelsensoren erreicht werden kann. So ergänzen sich Radar und Video-Bildverarbeitung fast ideal: Die Stärken von Radar liegen in der präzisen Messung von Abstand- und Relativgeschwindigkeit unter fast allen Wetterbedingungen, die Stärken der Video-Bildverarbeitung sind in der hohen Winkelauflösung und der Detektion und Interpretation von Oberflächen wie Straße, Fahrzeuge usw. zu sehen.

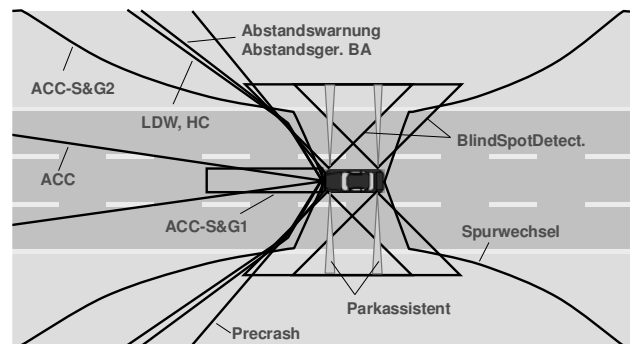


Abb. 4: Geometrische Erfassungsbereiche für Sensoren in Verbindung mit unterschiedlichen Assistenzfunktionen

In Abb. 4 sind geometrischen Sensor-Erfassungsbereiche für mehrere Assistenz-Systeme dargestellt. Dabei muss man bedenken, dass schon allein aus Kostengründen eine derartige Sensorik-Vielfalt unrealistisch erscheint. Vielmehr fordert die effiziente Nutzung von Ressourcen im Fahrzeug die mehrfache Verwendung von Sensor-Informationen für unterschiedliche Assistenzfunktionen, was durch eine entsprechende Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitektur zu gewährleisten ist.

4 Sensor-Datenfusion

Die Sensor-Datenfusion hat die Aufgabe, die diversitären und redundanten Messwerte der Sensoren so miteinander zu verbinden, dass dadurch ein konsistentes Bild der Fahrumgebung entsteht. Da bei einem multisensoriellen Ansatz die Sensoren i.a. keiner Einzel-funktion exklusiv zugeordnet werden können, erfordert dies, dass die „Informationsbeschaffung“ und die Bereitstellung der damit verbundenen Sensor-Systeme von den eigentlichen Funktionen zu trennen ist. Sensorik, Sensordatenverarbeitung und Informations-„Management“ werden daher künftig zu einer eigenständigen

Aufgabe. Die Sensor-Datenfusion bildet hierfür die Integrationsplattform.

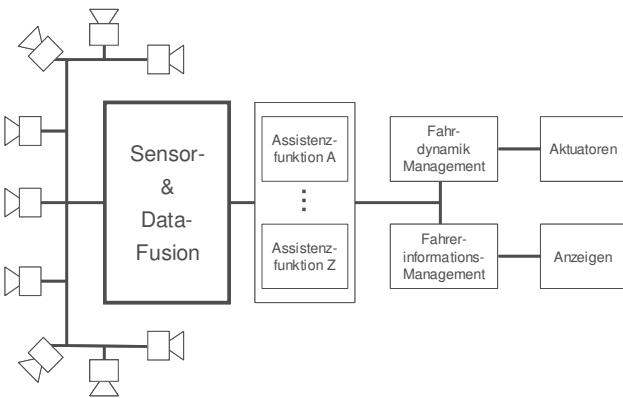


Abb. 5: Sensor-Datenfusion als Integrationsinstanz der Sensoren und Schnittstelle zu den Applikationen

Diese muss so gestaltet sein, dass sie künftigen Anforderungen der Applikationen möglichst flexibel erfüllen kann und insbesondere die angestrebte schrittweise Erhöhung des Umfangs der Assistenzfunktionen unterstützt. Dazu ist eine strenge Modularisierung und Strukturierung erforderlich, die einerseits eine einfache Erweiterung der Fahrumgebungserfassung entsprechend dem technologischen Fortschritt durch neue oder verbesserten Sensoren, Informationsquellen und Auswertelgorithmen ermöglicht und andererseits so weit skalierbar bleibt, dass auch unterschiedliche z.B. durch den Markt geforderte Kombinationen von Assistenzfunktionen dadurch effizient bedient werden können.

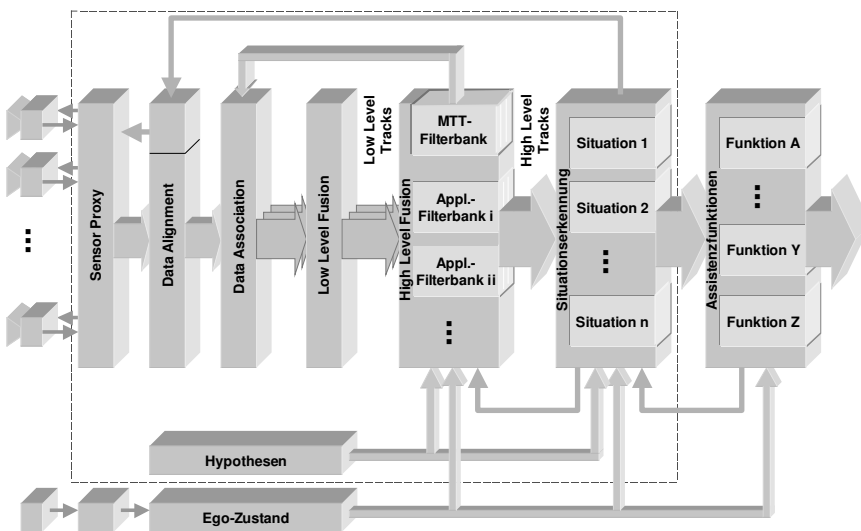


Abb. 6: Modell einer modularen Sensor-Datenfusion

Innerhalb dieser Struktur ist die Sensorinformation schrittweise so aufzubereiten, dass möglichst schnell eine Hardware-Unabhängigkeit erreicht und auf physikalisch normierte Größen übergegangen wird. Die Sicht auf die Fahrumgebung sollte so lange wie möglich applikations-unabhängig erhalten bleiben. Applikationsspezifische Anteile dürfen sich gegenseitig nicht beeinflussen und sollten möglichst nahe bei den

zugehörigen Applikationen angeordnet werden. Machen mehrere Applikationen Gebrauch von den Daten einer Schicht oder müssen sie diese aus Konsistenzgründen verwenden, so sind sie als gemeinsame Ressource anzusehen und müssen als solche verwaltet werden. Ein Grundsatz des Daten-Handlings sollte sein, dass die höheren Schichten soweit wie möglich Zugriff auf aufbereitete Daten aller darunter liegenden Schichten haben, jedoch nicht auf die Sensorik-Hardware selber. Rückwirkungen höherer Schichten auf darunter liegende sind vorzusehen, um Anforderungen im Sinne einer Aufmerksamkeitssteuerung weiterzugeben.

Eine mögliche Struktur einer Sensor-Datenfusion ist in Abb. 6 dargestellt. Sie ist so allgemein gehalten, dass das Ergebnis als ein „virtueller Sensor“ angesehen werden kann. Das kann auch bedeuten, dass ein Sensor am Eingang dieser Struktur schon selbst eine solche Struktur beinhalten könnte. Das heißt, Fusion kann an den verschiedensten Stellen stattfinden, es gibt nicht *den* exklusiven Ort für die Datenfusion. In dieser Interpretation ist auch bei den Begriffen „High-Level“ und „Low-Level“ Information zu differenzieren: Aus der Sicht eines (virtuellen) Sensors sind dessen Ausgangsgrößen immer vom Typ „High Level“, aus der Sicht der Datenfusion sind Eingangsgrößen immer vom Typ „Low Level“, auch wenn sie aus einer noch so komplizierten Datenfusions-Struktur eines vorgeschalteten (virtuellen) Sensors stammen. Daher können Radarsensoren für sich schon Tracker und Datenfusion enthalten oder Bildverarbeitungssysteme können Radarobjekte für die eigene Aufmerksamkeitssteuerung verwenden, nur das Ergebnis muss für die Verwender transparent sein.

Die sensornahe Schicht (Sensor Proxy) übernimmt die Kommunikation mit den Sensoren. Bei manchen Sensorsystemen lassen sich interne Parameter dynamisch von außen vorgeben oder man kann auch die „Aufmerksamkeit“ des Sensors situationsabhängig steuern. Dies wird von dieser Schicht koordiniert weitergegeben, nachdem diese Daten sensorgerecht aufbereitet sind. In der darauffolgenden Schicht (Data Alignment) findet die Anpassung und Normierung der Sensordaten bezüglich Koordinatensysteme, Zeitbasis usw. statt. Hier spätestens ist die Hardware-Unabhängigkeit erreicht.

Ab der nächsten Schicht werden die eigentlichen *Objekte* gebildet. Der Objektbegriff wird dazu etwas weiter gefasst: Unter einem Objekt wird jedes zusammenhängende Set von Attributen bzw. Eigenschaften oder Zustandsgrößen verstanden. Objekte können

Fahrzeuge, Spuren, Markierungen, Verkehrszeichen usw. sein. Gleichartige Objekte werden durch ein identisches Set von Eigenschaften beschrieben, verschiedenartige Objekte unterscheiden sich in den ihnen zugeordneten Eigenschaften. Das Verhalten von Objekten wird durch geeignete Modelle charakterisiert. Die Eigenschaften selber können sich zeitlich verändern, den zeitlichen Zusammenhang des gesamten Objekt-Zustands nennt man „Bahn“ oder „Track“. In der dargestellten Struktur können viele identische und unterschiedliche Objekt-Arten simultan im Sinne eines Multiple Target Tracking (MTT) [1],[2] verarbeitet werden.

Im Data Association Modul verwendet man Modelle, die es erlauben, die i.a. ungeordnet anfallenden Sensordaten den jeweiligen Objekten zuzuordnen. Dies sind oft (verallgemeinerte) geometrische Modelle. Die Zuordnung von Messwerten zu Objekten erfolgt wahrscheinlichkeitsbasiert mittels verallgemeinerter Abstandsmaße. Redundante Messungen auf die gleichen Attribute eines Objekts werden in der Fusionsebene 1 (Low Level Fusion) zusammengefasst (fusioniert), indem sie z.B. fehlergewichtet gemittelt oder entsprechend ihres probabilistischen Zugehörigkeitsmaßes fusioniert werden. Die Low-Level-Fusion gibt die Sicht der Sensoren auf die Objekte unverändert (d.h. ungefiltert) wieder und ist somit applikations-unabhängig.

In der Fusionsebene 2 (High Level Fusion) wird versucht alle weiteren Attribute der Objekte bereitzustellen. Dabei wird bei den Attributen, die direkt als Messwerte vorliegen, eine Fehlerelimination z.B. durch modellgestützte Filterung vorgenommen. Solche Attribute, die nicht gemessen werden können, werden durch entsprechende Filtermodelle geschätzt. Die Eingangsgrößen für diese Modelle sind die den Objekten zugeordneten Daten der Low Level Fusion. Dabei können auch Eingangsgrößen erforderlich sein, die nicht über Sensordaten bekannt sind. Diese Größen müssen dann durch reine Hypothesen künstlich ersetzt werden, ebenso solche Objekt-Attribute, für die keine Schätzung möglich ist. Die Qualität der Schätzungen und die Bedeutung der Hypothesen muss an die Anwendung weitergegeben werden, damit diese dort in ihrer Konsequenz entsprechend berücksichtigt werden können. Hypothesen-generierte Informationen können bei Bedarf durch reale Messwerte ersetzt werden, falls diese später einmal vorliegen.

Man kann nicht davon ausgehen, dass das Ergebnis eines Filtermodells die Anforderungen für alle nachfolgenden Applikationen erfüllt. So können z.B. für ACC stark geglättete Objektbahnen, bei denen nur noch wenig Sensor-Rauschen verblieben ist, optimal sein, eine Kollisionswarnung braucht z.B. diese Signale mit wenig Zeitverzug, die verbleibenden Rauschanteile werden dann bei der Kollisionshypothese berücksichtigt. Daher sieht das Konzept die Möglichkeit

vor, applikationsspezifische Filter zu implementieren. Dabei können oft die gleichen Filtermodelle mit unterschiedlicher Parametrisierung verwendet werden. Ein Set von Filtern (MTT-Filter) ist exklusiv zur Prädiktion der Objektbahnen für die Data-Association im MTT vorzusehen, (was auch als Anforderung einer höheren Schicht an die Datenzuordnung verstanden werden kann). Die Ergebnisse der MTT-Filter eignen sich u.U. auch für die Verwendung bei der Situationsinterpretation und anderen Applikationen, dies ist aber im Einzelfall zu prüfen.

Standard-Technik für modellgestützte dynamische Filterung ist das Kalman-Filter. Es ist bei nichtlinearen Dynamiken und nichtlinearen Messmodellen einsetzbar und kann mit der durch Messausfälle bedingten variablen Anzahl von Eingangsgrößen sowie asynchron anfallenden Messwerten relativ unkompliziert umgehen. Der Vorteil liegt in der konsequent wahrscheinkeitsbasierten Verarbeitung der Messdaten mit a priori bekannten oder auch dynamisch veränderlichen Fehlermaßen. Qualitätsmaße für die Filter- und Schätzergebnisse werden dabei automatisch mitgeliefert. In die dynamischen Filter können zusätzlich kinematische Modelle integriert werden, um weitere abgeleitete Größen zu berechnen und zentral bereitzustellen wie z.B. Absolut-/Relativgeschwindigkeit von Objekten, Objekt-Gieraten, geometrische Objektbahnen usw.

Die momentanen Konstellationen zwischen gleichartigen und/oder verschiedenartigen Objekten und dem eigenen Fahrzeug (Ego) stellen *Situationen* dar. Situationen sind aus der Sicht der Funktionen relevant, diese führen situationsabhängig entsprechende Aktionen durch. Anhand von Situationsmodellen versucht man die Konstellationen der Objekte zu interpretieren und entsprechende Situationswahrscheinlichkeiten abzuleiten. Da die unterschiedlichen Assistenzfunktionen koordiniert im Sinne der gesamten Fahraufgabe agieren müssen, ist erforderlich, dass diese Funktionen auf der gleichen Situationsbasis und Situationsinterpretation aufsetzen. Daher ist die Situationserkennung und -interpretation eine Aufgabe, die ebenfalls zentral bereitzustellen ist.

Im Rahmen des gesamten Datenfusionsprozesses ist oft so viel modellbasiertes Wissen und Redundanz vorhanden, dass es sich anbietet, in diese Struktur neben der Bildung von Qualitätsmaßen auch die Überwachung von Sensorfehlern mit zu integrieren. Das Prinzip der Sensorfehlerüberwachung beruht darauf, dass die erwarteten Messwerte eines Sensors durch diversitäre Modelle geschätzt werden. Durch Bewertung der Sensorwerte zusammen mit den prädierten Schätzungen lässt sich entscheiden, ob nur stochastische Messfehler oder gar Sensorfehler bzw. Sensor-Ausfälle vorliegen. Es lassen sich daraus dann Degradationsmechanismen sowohl für die Datenfusion als auch für die Assistenzfunktionen ableiten, was gerade für sicher-

heitsrelevante Funktionen ein wichtiger Aspekt darstellt.

5 System-Integration

Sensor-Datenfusion ist eine überwiegend softwaretechnische Aufgabe. Sie erfordert je nach Ausprägung zwar eine nicht zu unterschätzende Rechnerleistung, aber keine besonders komplizierten Rechnerstrukturen. Es ist daher besser, auf Standard-Rechner zurückzugreifen und mehr Augenmerk auf ein zukunftsfähiges Software-Engineering zu legen. Es ist eine modulare Grundstruktur zu erstellen mit gut definierten Softwareschnittstellen, die es erlaubt, die wachsenden Anforderungen der Applikationen zu berücksichtigen und auch einzelne Softwaremodule von dritter Seite sicher zu integrieren. Da die Sensor-Datenfusion eigentlich „nur“ eine Dienstleistungsaufgabe für die Assistenzsysteme wahrnimmt, ist das Anforderungsmanagement gut zu organisieren.

Das Datenaufkommen zwischen den einzelnen Modulen der Datenfusion kann einen beträchtlichen Umfang annehmen. Die Algorithmik der Datenfusion ist abwechselnd parallel-sequentiell. Die Verarbeitung der Tracks ist sicherlich parallelisierbar, in bestimmten Ebenen müssen die Daten aber immer wieder zusammengeführt (fusioniert) werden. Es macht daher wenig Sinn, die Verarbeitung auf mehrere Rechner in einem Netzwerk zu verteilen, da einerseits die Buslasten unvermeidbar hoch wären und andererseits die Laufzeiten für die Verarbeitung in den einzelnen Schritten auf unterschiedlichen Rechnern die Rechtzeitigkeit der Daten nicht garantieren würden. Es empfiehlt sich daher, ausreichend leistungsfähige, skalierbare Rechner einzusetzen, die sich an unterschiedliche Funktionsumfänge in den Fahrzeugen effizient anpassen lassen.

Wird eine hohe Verfügbarkeit gefordert, sind geeignete Parallelrechner-Strukturen vorzusehen. Für die Überwachung des Datenfusionsprozesses wird man Ersatzmodelle definieren, die es erlauben, mit einfacheren parallelen Rechnern die Fusionsergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen. Zusammen mit der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Sensor-Fehlerüberwachung kann man damit eine verhältnismäßig zuverlässige und robuste Datenfusion implementieren. In jedem Falle ist jedoch anzustreben, die Assistenzfunktionen per se tolerant gegenüber Fehlfunktionen oder Fehlinformationen der Fahrumgebungserfassung ausulegen, da allein schon die durch physikalische Umstände bedingte eingeschränkte Detektionsleistung der einzelnen Sensoren ein deutliches Unsicherheitspotential aufweist, gegenüber dem die reine Zuverlässigkeit eines Datenfusionsrechners vielleicht sogar das kleinere Problem darstellt.

Bei der Kommunikation zwischen den Sensoren und der Datenfusion ist zu beachten, dass die Entste-

hungszeit von Messwerten dem Fusionsmechanismus immer bekannt sein muss, da bei unkoordinierten Sensoren während eines Verarbeitungsschrittes Messdaten für ein und dasselbe Objekt aus unterschiedlichen Zeiten vorliegen können. Im Falle asynchroner Kommunikation ist daher ein Zeitstempel für die Messungen mit zu übertragen, anhand dessen die Fusion die Daten synchronisieren kann - für die Kalmanfilter eine relativ einfache Prozedur. Verwendet man einen deterministischen Bus wie z.B. Flexray, dann lassen sich synchronisierte Messdaten direkt erzeugen, wenn die Sensoren entsprechend dafür ausgelegt sind.

Der Entwicklungsfortschritt bei den Sensoren erweist sich derzeit als sehr dynamisch. Es ist zu erwarten, dass bald auf ein breites Angebot zurückgegriffen werden kann. Die Sensoren werden aber bis auf weiteres der wesentliche Kostenfaktor bei den Assistenzsystemen darstellen. Aus der Sicht des OEM erreicht man sicherlich das Optimum für die eigenen Produkte, wenn Sensoren unterschiedlicher Hersteller kombinierbar und integrierbar sind. Daher ist gerade hier eine Standardisierung der Schnittstellen eine der vordringlichsten Aufgaben.

Systemintegration unter diesen Umständen braucht eine klare Verantwortlichkeit. Da der OEM in der Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen ein deutliches Innovations- und Differenzierungspotential sieht und die kurzfristige Bereitstellung von Fahrumgebungsinformation für neue Assistenzfunktionen eine der ganz zentralen Aufgaben ist, bietet sich an, dass der OEM zumindest für die nächste Zeit die Integrationsverantwortung übernimmt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verfügbarkeit von Information über Fahrumgebung, Fahrzeug und Fahrer ist Voraussetzung für die künftigen Systeme zur Fahrerassistenz und Aktiven Sicherheit. Dabei stellen letztere einen erhöhten Anspruch an Qualität und Verlässlichkeit der Fahrumgebungshypothese, d.h. die in den nächsten Sekunden zu erwartenden Ereignisse. Die zentrale Bereitstellung dieser Information auf der Basis von Multi-Sensorsystemen wird künftig zu einer eigenständigen Aufgabe. Es bestehen mittlerweile klare Vorstellungen, wie diese Fahrumgebungs-Information durch Sensor-Datenfusion qualitativ hochwertig erhalten werden kann, Informationsslücken verschiedenster Art werden wegen der begrenzten Sicht der Sensoren aber nach wie vor zurückbleiben. Funktionen und Information sollten daher so aufeinander abgestimmt sein, dass noch eine ausreichende Fehlertoleranz bezüglich der Information erhalten bleibt - insbesondere auch, was die Wirkung der Systeme auf den Fahrer und seine Erwartungen betrifft.

Literatur

- [1] BAR-SHALOM, Y.: *Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Applications*. Artech House, Norwood MA, 1990.
- [2] BLACKMAN, S., POPOLI, R.: *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, Norwood MA, 1999.
- [3] DARMS, M., WINNER, H.: *Fusion von Umfelddaten für Fahrerassistenzsysteme*. 2. FAS-Workshop, Leinsweiler 2003.
- [4] NAAB, K.: *ACC in Ballungsräumen*. 7. Aachener Kolloquium für Fahrzeug und Motorentechnik. Aachen, 5.-7. Oktober 1998, S. 551-566.
- [5] NAAB, K.: *Automatisierung der Fahrzeugführung im Straßenverkehr*. *Automatisierungstechnik* (at) 5/00.
- [6] RANDLER, M., WILHELM, U., LUCAS, B.: *Anforderungen von Komfort- und Sicherheitsfunktionen an die Umwelthypothese der Umfeldsensorik*. 2. FAS-Workshop, Leinsweiler 2003.
- [7] REICHART, G.: *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Nr. 7*, Düsseldorf 2001.
- [8] SCHWARZ, A., SCHIELE, P., NAAB, K.: *Enabling Technologies and Architecture Requirements for Realization of Advanced Driver Assistance Systems*. ITS World Congress, Chicago, Oct. 2002
- [9] WISSELMANN, D., GRESSER, K., SPANNHEIMER, H., BENGLER, K., HUESMANN, A.: *ConnectedDrive – ein methodischer Ansatz für die Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme*. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, TU München, Februar 2004.