



# Kapitel 1

## Einleitung

*Mobilität* und *Individualverkehr* sind Schlagwörter der heutigen Gesellschaft, welche den Stellenwert des Fahrzeuges implizit repräsentieren. Aus dem verknüpfenden Wortspiel *Individuelle Mobilität* ist direkt eine Beschreibung für das Automobil erhältlich. Nur dieses Fortbewegungsmittel bietet die Entscheidungsfreiheit in Bezug auf Zeitpunkt, Zielort und Teilnehmer der Reise, welche der Spontanität des Menschen entgegenkommt. Dadurch ist es natürlich nur allzu verständlich, dass die Anzahl der Fahrzeuge in Deutschland weiterhin wächst. So erhöhte sich laut Statistik [KB10a] des Kraftfahrt-Bundesamtes der Bestand von Personenkraftwagen im Jahr 2009 um 1.0 Prozent auf 41.7 Millionen Fahrzeuge. Dies impliziert natürlich auch eine wachsende Verkehrsdichte.

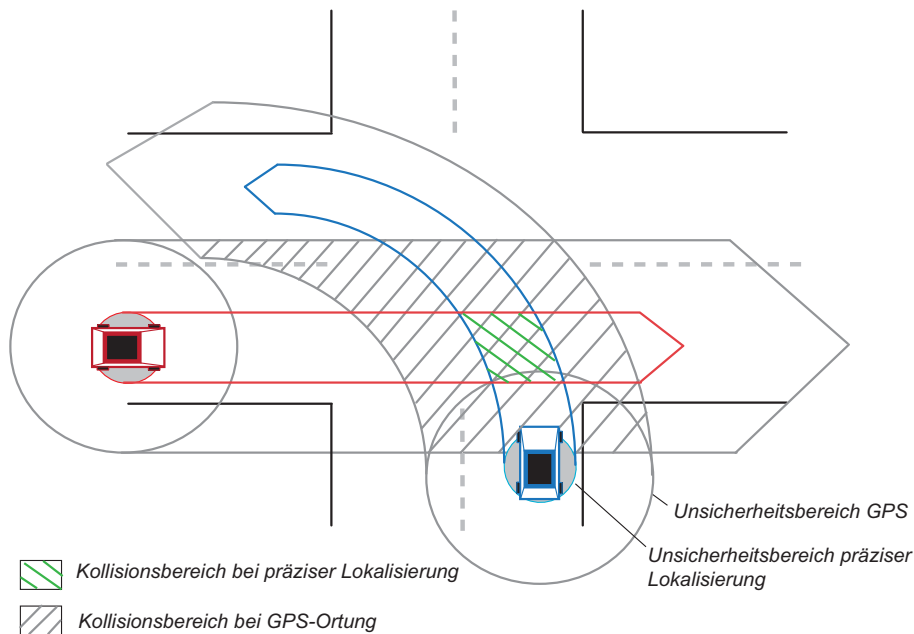
Die Unfallhäufigkeit weist ebenfalls eine steigende Tendenz auf, wobei die Anzahl von Personenschäden und Unfalltoden rückläufig sind, siehe [KB10b]. Damit zeigen die präventiven Maßnahmen der Automobilhersteller in Form von Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen Wirkung. Das Vermeiden von Unfällen und das Reduzieren der Unfallfolgen stehen im Fokus technischer Entwicklungen und Forschungsaktivitäten. Mit zunehmender Komplexität des Verkehrsgeschehens steigen die Ansprüche an die Umfeldwahrnehmung und Situationsinterpretation. Diese Anforderungen haben auch Automobilhersteller und Zuliefererfirmen erkannt und reagieren mit der Gründung eines gemeinsamen Konsortiums, dem CAR 2 CAR Communication Consortium, kurz C2C-CC [CC10]. Schwerpunkt dieses Zusammenschlusses ist die Standardisierung der fahrzeugübergreifenden Kommunikation, welche zur Regulierung des Verkehrsflusses und zur Unfallvermeidung eingesetzt werden soll.

Die Voraussetzung für eine solche Interaktion ist dabei eine präzise Fahrzeuglokalisierung. Nur mit einem genauen örtlichen Bezug kann eine aussagekräftige Gefahrenabschätzung realisiert

werden. Diese Anforderung kann nicht der Fahrzeugverbund selbst, sondern jedes einzelne Fahrzeug für sich lösen. Die GPS-Technologie kann dabei dem hohen Genauigkeitsanspruch im Bezug auf Position und Ausrichtung des Automobils nicht gerecht werden. Auch für den Hoffnungsträger, das europäische Satellitennavigationssystem Galileo [ESA10], welches voraussichtlich 2014 den offiziellen Betrieb aufnehmen wird, steht eine Verfälschung des Signals zur Diskussion. So wird der angebotene offene Dienst eine geringere Positionsgenauigkeit aufweisen als der kommerzielle. Die Integration zusätzlicher Empfänger, das Erheben von Lizenzgebühren auf deren Nutzung und die wagen Aussagen über die Genauigkeit von Galileo führen zur Notwendigkeit der konkreten Analyse des lokalen, fahrzeugspezifischen Umfeldes zur Generierung präziser Positionsaussagen. Die Fahrzeugkommunikation kann dabei jedoch im Umkehrschluss mit dem Austausch detaillierter Umgebungskarten in Bezug auf ein globales Koordinatensystem unterstützen bzw. die Basis schaffen.

Die Ziele Unfallvermeidung, Reduzierung der Risiken und letztendlich das autonome Fahren lassen sich immer wieder auf eine Kernproblematik zurückführen, nämlich die Frage: Wo genau befindet sich das Fahrzeug?

## 1.1 Motivation und Zielstellung



**Abbildung 1.1:** Identifikation von Gefahrenstellen im Kreuzungsbereich

In Abbildung 1.1 ist eine typische Kreuzungssituation mit zwei Verkehrsteilnehmern dargestellt. Aufgrund der Ungenauigkeit der GPS-Ortung erstreckt sich der Kollisionsbereich zwischen beiden Fahrzeugen fast über die gesamte Kreuzung. Eine präzise Lokalisierung würde hingegen die konkrete Bestimmung des Gefährdungsschwerpunktes erlauben. Während bei der Fahrzeugnavigation ein kleiner Maßstab für die Darstellung der Karte und der Position ausreichend ist, erfordern Anwendungen wie die Kollisionsvermeidung eine mikroskopische Betrachtung und damit das lupenhafte Vergrößern des Materials. Damit steigt auch der Anspruch an den Detaillierungsgrad und an die Genauigkeit der Karte. Die präzise Fahrzeuglokalisierung begründet sich auf der Umfelderkennung mittels Sensoren. Dabei wird eine möglichst flächendeckende bzw. lückenlose Beschreibung der Fahrzeugumgebung angestrebt. Diese Zielsetzung kann durch zwei Vorgehensweisen realisiert werden:

1. Erhöhung der Sensorausstattung im Fahrzeug
2. Verbesserung der Erkennung bzw. Sensitivität eines Sensors

Da die Integration von Zusatzsensorik mit einem Kostenfaktor und der Frage nach Verbauraum und minimaler Gehäusegröße einhergeht, wird der zweitgenannte Ansatz von Automobilherstellern wie der AUDI AG bevorzugt. Ein in das Fahrzeug integrierter Sensor sollte ein möglichst breites Spektrum an Funktionalität abdecken und verschiedene Applikationen bedienen. Durch diese spezifischen Anforderungen wird die Sensorentwicklung maßgeblich mit vorangetrieben. So liefert beispielsweise eine Kamera mittlerweile nicht mehr nur ein Videobild als Einparkunterstützung, sondern erfüllt als zentrales Element des Spurhaltesystems eine zusätzliche komplexe Aufgabe. Wie in Abbildung 1.2 umgesetzt, bildet die Kamera eine Szene aus der Umgebung ab, um wiederum mit den erfassten Informationen eine Interaktion mit der Welt zu ermöglichen. Diese Darstellung unterstreicht den Einsatzschwerpunkt des optischen Sensors insbesondere im Bereich der Umfelderkennung. So verbirgt sich hinter der *Bildverarbeitung* beispielsweise die klassische 2D-Analyse unter Verwendung lokaler Operatoren und bildet damit das Werkzeug für das *Bildverstehen*. Mit Hilfe des „Verstehens“ wird wiederum der Schritt vom 2D-Abbild zur Szenenbeschreibung vollzogen und damit die Rekonstruktion des 3D-Raumes fokussiert. Diese optische Wahrnehmung der Umgebung wird insbesondere im Rahmen von Forschungen über die Künstlichen Intelligenz als *Maschinelles Sehen* untersucht. Zusätzlich wird das Potenzial der Kamera durch Untersuchungen im Bereich der Robotik untermauert, bei denen bildbasierte Ansätze zur Lokalisierung und Kartierung unter anderem in [DM98] und [Dav03] vorgestellt wurden.

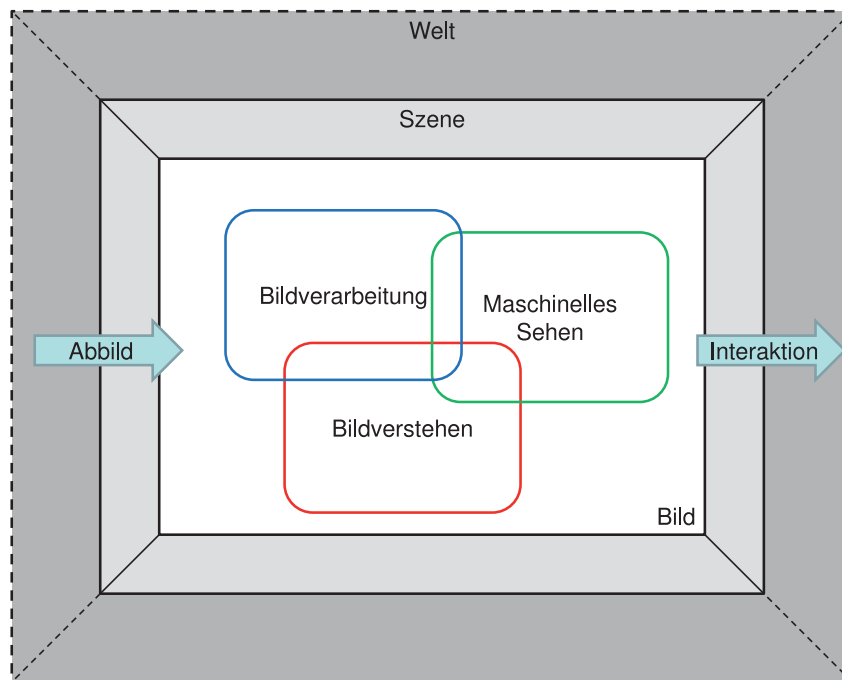


Abbildung 1.2: Gesamtmodell der Umfeldanalyse

Einen Beitrag zur Funktionserweiterung bildgebender Sensorik für den Einsatz im Automobil liefert diese Arbeit. Dabei stehen folgende zu lösende Kernaufgaben im Vordergrund:

- **Präzise Lokalisierung:** Hochgenaue Bestimmung der Pose des Fahrzeuges
- **Kartierung:** Fahrzeugbezogene Ablage von ermittelten Merkmalen in lokale Karten
- **Kartenanalyse:** Abgleich und Ergänzung von globalen Karten, wie Navigationskarten, durch lokale Merkmale

Da sich der Lokalisierungsansatz auf Kartenmerkmale begründet, interagieren die aufgeführten Punkte miteinander, wofür sich in der Fachwelt der abkürzende Begriff **SLAM** – engl. Simultaneous Localization and Mapping – etabliert hat. Mit dem Hauptaugenmerk auf die *urbane Umgebung* wird ein weiterer Schritt zur Situationsanalyse komplexer Bereiche vollzogen. Während Ansätze in der Robotik sich häufig auf ein künstlich geschaffenes Umfeld [AZ95] oder Innenszenen [HDW<sup>+</sup>04] konzentrieren, steht nun die Untersuchung mannigfaltiger Außenszenen im Vordergrund. Den Anforderungen eines Automobilherstellers, Datenbanken kompakt zu halten und nur notwendige Informationen im Hinblick auf die Buslast auszutauschen, wird dabei Rechnung getragen.



## 1.2 Öffentliche Sicht der Thematik

Die Erfassung und Beschreibung der Fahrzeugumgebung tritt immer wieder als zentrales Element verschiedener europa- und deutschlandweiter Förderprojekte auf. Jedes Aktionskonzept setzt eine gründliche Umgebungsanalyse voraus. Selbst das Thema Energieeffizienz geht mit einer vorausschauenden Strategie einher, die wiederum auf einer sensoriiellen Wahrnehmung basiert. So wird in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt [EFA 2014 \[eNo11\]](#) die Vorausschau als Arbeitspunkt behandelt und gleichzeitig die fahrzeugübergreifende Umfelderkennung und deren Austausch untersucht. Bis 2014 soll das Potenzial der kommunikativen Sensorwahrnehmung, Verarbeitung und der daraus resultierenden Aktionskonzepte im Hinblick auf die Energiebilanz ermittelt werden. Die fahrzeugübergreifende Kommunikation und damit der globale Austausch von Sensordaten liegt den Förderprojekten [NOW \[NOW10\]](#), [SAFESPOT \[SAF10\]](#) und der EU Initiative [COMeSafety \[COM10\]](#) zu Grunde. Damit fügt sich die Wahrnehmung eines einzelnen Fahrzeuges zu einem umfassenden Gesamtbild.

## 1.3 Struktur der Arbeit

Da die *Lokalisierung* und *Kartierung* die Kernkomponenten für das Gesamtvorhaben darstellen, stehen aktuelle Konzepte aus dem Automobil- und Robotikbereich im Fokus des Kapitels 2. Die Betrachtungen beziehen sich insbesondere auf die Kamera als Sensor für die Umgebungserfassung. Daraus lassen sich erste Anforderungen formulieren und Erfahrungen für den urbanen Einsatzzweck ableiten. Insbesondere die simultane Kartierung und Lokalisierung ist ein breit gefächertes Themenfeld mit einer Vielfalt an Realisierungsmöglichkeiten. Mit Kapitel 3 wird eine strukturelle Unterteilung des Gesamtvorhabens vorgenommen, Schwerpunkte des Ansatzes eingeordnet und das stufenweise Lösungskonzept eingeführt. Damit ergibt sich ein genereller Überblick über die Herangehensweise und das Vorgehen bei der Realisierung. Den beiden Kernthemen Kartierung und Lokalisierung sind jeweils mit 4 und 5 eigene Kapitel gewidmet. Darin sind neue Ansätze dargelegt, deren Funktionsweise es nachzuweisen gilt. In Kapitel 6 wird mit der Aufführung der Softwarekomponenten zunächst ein Überblick über das programmiertechnische Konzept gegeben. Da für den Funktionsnachweis einzelner Module Aussagen über die Präzision generiert werden, stehen sowohl die Sensorik im Fahrzeug als auch die simulierten Daten im Fokus der Betrachtungen. Dem Kartenmaterial und den Auswahlkriterien



## 1. EINLEITUNG

---

für die Teststrecke sind zusätzlich eigene Abschnitte zugeordnet. Das Kapitel 7 stellt einen umfangreichen Analyseumfang dar. Begonnen bei der Einzelbetrachtung der Module Kartierung und Lokalisierung wird schließlich deren Zusammenspiel im Gesamtsystem untersucht und dokumentiert. Dabei bilden zunächst die simulierten Messwerte die Basis für die Eingangsdaten, um in letzter Instanz auf die realen Sensorwerte überzugehen.



## Kapitel 2

# Stand der Technik

Navigationssysteme mit integriertem Lokalisierungsmodul erfreuen sich wachsender Beliebtheit. Während die portablen Nachrüstlösungen entkoppelt vom Bussystem agieren, nutzen integrierte Systeme Zusatzinformationen von zur Verfügung stehender Sensorik im Fahrzeug. Dennoch findet bei den Zweitgenannten nur ein eingeschränkter Informationsaustausch statt, so dass trotz Nutzung zusätzlicher Daten das Navigationssystem eine weitgehend unabhängige Einheit darstellt. Mit einer präzisen Positionsberechnung des Automobils kann diese Isolation durchbrochen werden. Speziell im Bereich der Robotik wurden Ansätze entwickelt, deren Nutzung im Automobil sehr vielversprechend sind.

### 2.1 Positionsschätzung im Automobil

Zunächst soll jedoch die Positionsbestimmung eines Navigationssystems als Basistechnologie im Fahrzeug beleuchtet werden. Diese stützt sich bei eingebetteten Systemen hauptsächlich auf die Module *Koppelortung* – engl. Dead Reckoning – und *Karteneinpassung* – engl. Map Matching –, siehe Abbildung 2.1. Dabei wird zum einen fortlaufend die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Fahrzeuges ermittelt, daraus der zurückgelegte Weg berechnet und zur letzten bekannten Position addiert. Des Weiteren wird der Bezug des Fahrzeuges zum Straßennetz durch Abgleich der ermittelten absoluten Position und der Karte hergestellt. Die Komponente *Hybride Ortung* deutet bereits an, dass nicht nur eine Quelle für die absolute Positionsermittlung genutzt werden kann. Zunehmend verbreiten sich Empfänger, die Korrekturdaten auf Basis von DGPS auswerten können. Nachteilig sei an dieser Stelle erwähnt, dass diese ergänzenden Informationen nicht flächendeckend in Deutschland zur Verfügung stehen.

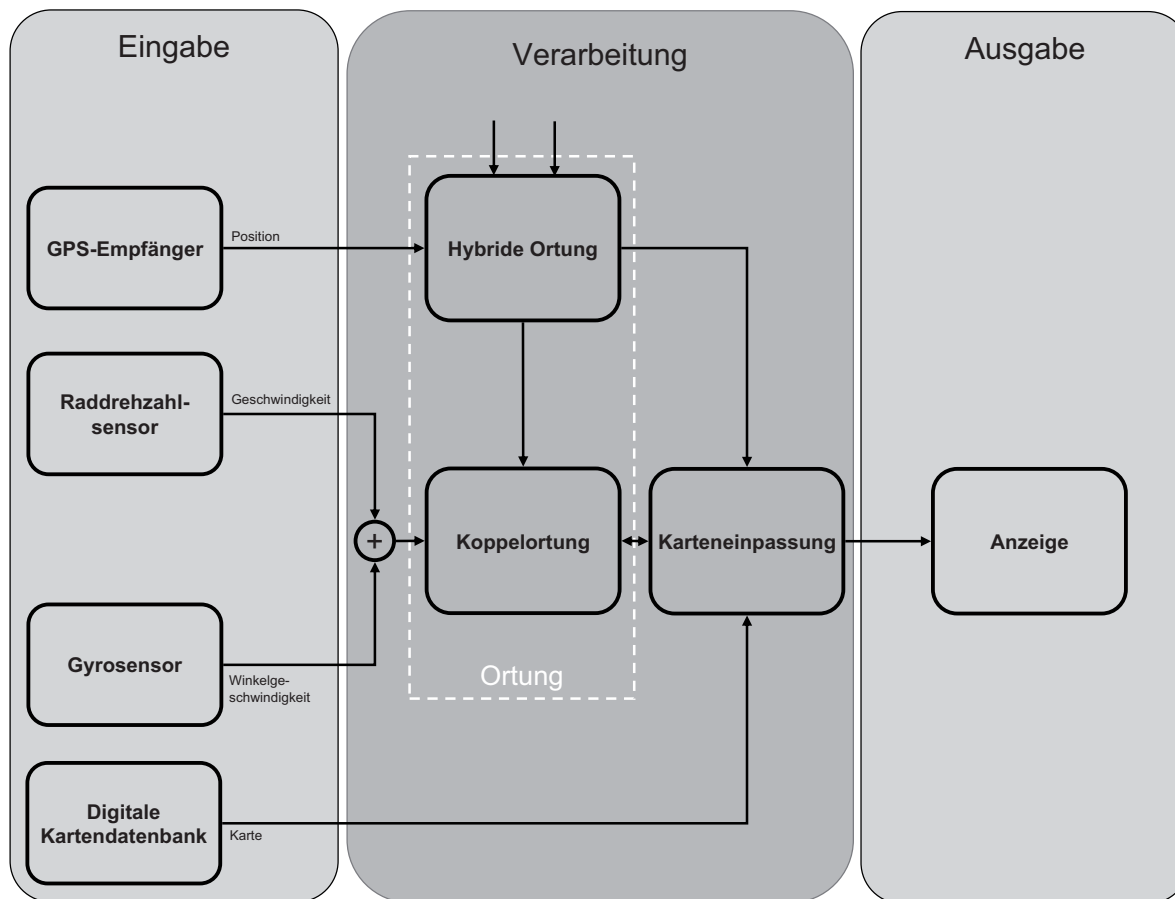


Abbildung 2.1: Positionsbestimmung eines eingebetteten Navigationssystems

### 2.1.1 Koppelortung

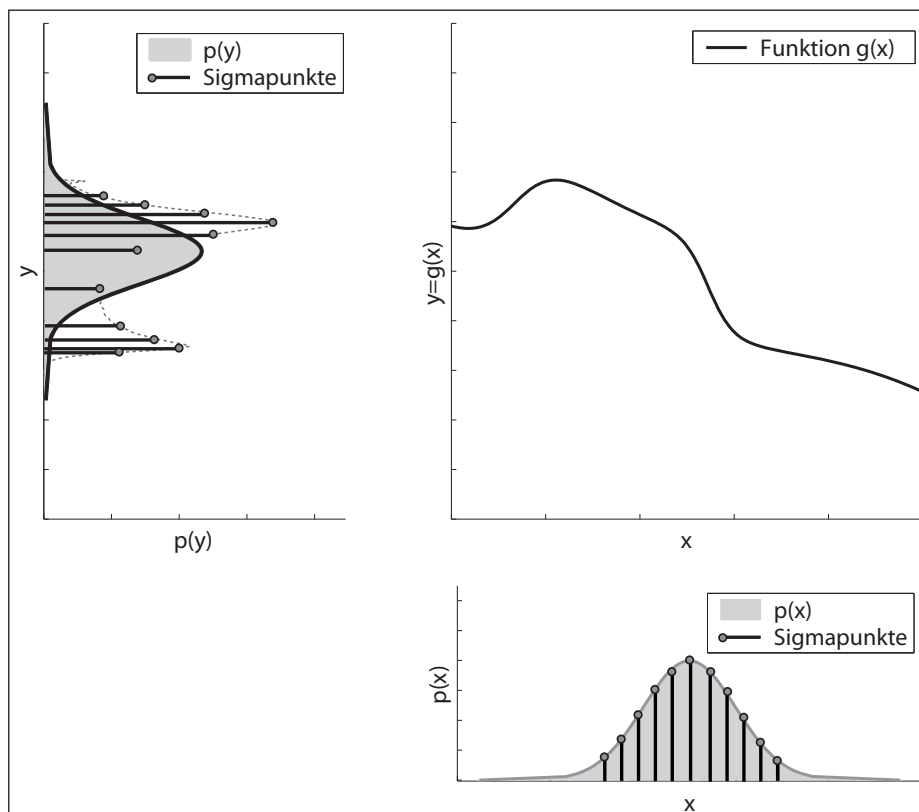
Die Koppelortung [Mat94] als wesentlicher Bestandteil der Navigation bietet die Möglichkeit, unabhängig vom GPS-Signal eine Positionsermittlung fortzuführen. Damit kann die nur im Sekundentakt zur Verfügung stehende GPS-Position kurzfristig bzw. bei temporärem Ausfall im Tunnel längerfristig interpoliert werden. Die systeminternen Gyrosensoren liefern dabei Informationen über die Ausrichtung und Raddrehzahlsensoren über die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, welche sich über den betrachteten Zeitraum in die zurückgelegte Strecke umrechnen lassen. Eine detaillierte Betrachtung der Fahrzeugsensorik befindet sich im Abschnitt 6.3.

Funktional begründet sich die Koppelortung auf Datenfusionsalgorithmen, bei denen stochastische Filter Anwendung finden, siehe [KHW88] und [Wen07]. Als klassischer Vertreter ist dabei das *Kalman-Filter* zu nennen, welches ein normalverteiltes Rauschen der System- bzw. Messwerte und ein Vorhersagemodell für den Zustand voraussetzt. Dieses Verfolgen der Ausrichtung



und Position eines Fahrzeuges – mit dem Begriff Pose zusammengefasst – wird auch als *Tracking* bezeichnet.

Eine Herausforderung der Filtermethode liegt in der Beschreibung einer realitätsnahen Fahrzeugbewegung, die sich im Systemmodell ausdrückt, wie [SRW08] zeigt. Der Einsatz von nicht-linearen Modellen erfordert Erweiterungen im Ursprungs-Algorithmus. Während das Extended-Kalman-Filter **EKF** dieses Problem durch einen Linearisierungsschritt mittels Taylorreihenentwicklung erster Ordnung umgeht. So approximiert das Unscented-Kalman-Filter **UKF** [JU97] die Gaußverteilung  $p(x)$  mit wenigen, aber aussagekräftigen Sigmapunkten und unterwirft diese anschließend der nichtlinearen Transformation  $g(x)$ . Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Aus den resultierenden Sigmapunkten (links oben) wird anschließend der Mittelwert und die Varianz ermittelt. Damit ist wiederum eine normalverteilte Ausgangssituation  $p(y)$  für einen etwaigen Folgeschritt hergestellt. Laut Wan et al. [WM01] ist bei stark nichtlinearen



**Abbildung 2.2:** Repräsentation der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion durch aussagekräftige Sigmapunkte (in Anlehnung an [TFBD00])

Prozessen das Unscented-Kalman-Filter deutlich zu bevorzugen. Für die Herleitung der Berechnungsvorschrift sei auf den Abschnitt 3.2.2 verwiesen.



Die Art und Weise wie die Datenfusion [HL97] erfolgt und welche Informationen [Col90] kombiniert werden, stehen immer wieder im Fokus aktueller Untersuchungen. Hervorzuheben sei an dieser Stelle, dass bei einer präzisen Ausgangspose des Fahrzeuges vorübergehend auf Trackingmethoden gesetzt werden kann. Bei der näheren Betrachtung der Ortungseinheit im Navigationssystem wird deutlich, dass nicht nur die absolute Lokalisierung mittels GPS, sondern auch die relative Bestimmung der Fahrzeuglage zum Gesamtergebnis beitragen.

### 2.1.2 Karteneinpassung

Für die Navigationsanwendung liefert der sich an die Koppelortung anschließende Vergleich mit dem Straßennetz die notwendige Genauigkeit. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich ein Fahrzeug typischerweise auf der Straße befindet. Die sensoruell ermittelte Position wird bei der Karteneinpassung immer auf ein in der Nähe befindliches Straßensegment gezogen, vgl. [BK96], [DTA+96], [DVP09]. Als Grundlage dient die Datenbank eines Navigationssystems, welche eine approximierende Repräsentation des Straßennetzes als Liniensegmente beinhaltet. Dass die Entwicklung von Algorithmen für die Karteneinpassung mit dem Ziel der weiteren Präzisierung längst nicht abgeschlossen ist, zeigen die Untersuchungen von [NAD08], [TMT08], [XY10].

Maßgeblich hängt das Lokalisierungsergebnis auch von der Genauigkeit des Kartenmaterials ab. Ist beispielsweise eine mehrspurige Straße nur anhand eines Vektors erfasst, dann ergeben sich unmittelbar Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung. Auch fokussiert die Karteneinpassung primär ein besseres Lokalisierungsergebnis in lateraler und weniger in longitudinaler Fahrzeugrichtung. Für Sicherheitsanwendungen steht jedoch die generelle Präzisierung der Fahrzeugposition im Vordergrund. Diese grundsätzliche Verbesserung lässt sich in folgende Vorgehensweisen unterteilen. Während einerseits verschiedene Sensortechnologien und deren Datenfusion [RS07] untersucht werden, steht andererseits die Erweiterung und Präzisierung des Kartenmaterials als Referenz [TMBP10] im Fokus. Ein zusätzliches Problem bei der Verwendung von autarken Datenbanken, wie sie im Fahrzeugnavigationssystem vorzufinden sind, stellt die Aktualität des Materials dar. Die Karten werden nur sporadisch in großen Abständen erneuert, wodurch sich Lokalisierungsfehler auf Basis eines veralteten Datenbestandes ergeben. Eine fortwährende Aktualisierung durch Informationssammlung eines jeden Fahrzeuges würde die Lücke zwischen den Bereitstellungszyklen des Kartenlieferanten schließen und den Detaillierungsgrad des Basismaterials erhöhen.



### 2.1.3 Referenzsystem

Technologisch besteht bereits die Möglichkeit, die Fahrzeugposition im Zentimeterbereich präzise zu bestimmen. Dabei kommen Zweifrequenzempfänger zum Einsatz, die selbst Verbesserungen berechnen und/oder Korrektursignale auf unterschiedlichen Wegen empfangen. Als *Hybrides Modul* in Abbildung 2.1 bereits angedeutet, wird auch beim sogenannten Referenzsystem das GPS als absoluter Positionslieferant um Zusatzinformationen aus verschiedenen Quellen ergänzt. Die Korrektursignale können einerseits per stationärem Satellit oder kostenpflichtig über GSM bereitgestellt werden. Zusätzlich besitzt das Referenzsystem hochpräzise Gyrometer und Beschleunigungssensoren. Im Abschnitt 6.3 des Kapitels 6 wird die Funktionsweise der Fahrzeugsensorik ausführlich erläutert. Ein solches Messsystem kommt als Fahrzeugausstattung aus Kosten- und Platzgründen nicht in Frage. Dennoch wird eine Referenzbox in den Versuchsträger eingemessen und zum Vergleich hinzugezogen.

## 2.2 Kartierung im Automobil

Während das Kartenmaterial im Navigationssystem statisch ist und zyklisch erneuert werden muss, gibt es bereits Anwendungen im Automobilbereich bei denen lokale Karten eine Rolle spielen. So bilden beispielsweise Belegungskarten die Grundlage für automatische Einparksysteme. Dabei vermessen aktuell Ultraschallsensoren die Parklückengröße und bilden die Basis für das Einscheren. Auch Kameras sind in der Lage Umgebungsinformationen für den Einparkvorgang zu liefern. Neben der Generierung einer Rundumsicht vom Fahrzeug mittels Sensorverbund, gibt es bereits Ansätze das Umfeld zu analysieren [SJBK10, FBV<sup>+</sup>04]. Mit dem Verfahren der Rekonstruktion werden Bildmerkmale in die lokalen Karten mit räumlichem Bezug abgelegt. Dabei wird das Bildmaterial im Gegensatz zu Stereokameras sequentiell analysiert und die Bewegung im Bild zur Rückrechnung in den dreidimensionalen Raum genutzt. Diese Karten sind in ihrer Ausdehnung stark begrenzt und die hohe Dichte der Merkmale setzt leistungsfähige Systemressourcen voraus. Mit diesen eingeschränkten lokalen Karten können keine Rückschlüsse auf das Kartenmaterial eines Navigationssystems gezogen werden. Dennoch zeigen diese Anwendungen, dass die Kartierung in Verbindung mit der Bildverarbeitung zunehmend Einzug in die Automotive-Welt hält.