

# Erfassung ausgedehnter Objekte durch ein Automobil-Radar

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Florian Fölster  
aus Hamburg

2006

- 
1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.h.c. Hermann Rohling
  2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jan Luiken ter Haseborg

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Dezember 2006

Veröffentlicht auf dem Dokumentenserver der TUHH mit der URN:  
urn:nbn:de:gbv:830-opus-3240

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. An dieser Stelle gilt mein Dank allen, die das Entstehen der folgenden Seiten direkt oder indirekt erst ermöglicht haben.

Besonders möchte ich mich in diesem Zusammenhang bei Herrn Prof. Dr. Hermann Rohling für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit bedanken. Seine stete Bereitschaft zur Diskussion und die Förderung von Publikationen und Projekten haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Luiken ter Haseborg danke ich für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr. Ernst Brinkmeyer danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss.

Eine große Bedeutung hatte auch die stets gute Stimmung zwischen den Kollegen des Instituts. Dies bezieht sich ausdrücklich nicht nur auf die wissenschaftlichen, sondern ebenso auf die technischen Mitarbeiter sowie die 'guten Seelen' aus dem Sekretariat. Eine besondere Erwähnung sollen an dieser Stelle die Kollegen der Radargruppe finden, die neben der freundschaftlichen Atmosphäre auch immer wertvolle inhaltliche Anregungen lieferten.

Weiterhin danke ich vor allem jenen, die das letzte Jahr selber viel um die Ohren hatten und somit nicht unter meinem Mangel an Zeit leiden mussten. Ohne die Unterstützung meiner Eltern wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

Hamburg, im Dezember 2006

Florian Fölster

---

*'Erst die Theorie entscheidet darüber, was man  
beobachten kann.'*

*A.Einstein in [Hei87]*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Messung geometrischer und kinematischer Eigenschaften</b>	<b>7</b>
2.1	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	7
2.2	Genauigkeit und Auflösung . . . . .	8
2.3	Messung der Entfernung . . . . .	9
2.3.1	Geometrische Betrachtungen zur Entfernung . . . . .	10
2.3.2	Pulsradar . . . . .	11
2.3.3	Dauerstrichradar . . . . .	13
2.4	Messung der radialen Geschwindigkeit . . . . .	18
2.4.1	Geometrische Betrachtungen zur radialen Geschwindigkeit	19
2.4.2	Dauerstrichradar mit konstanter Frequenz . . . . .	20
2.5	Gleichzeitige Messung von Entfernung und Geschwindigkeit .	23
2.5.1	Pulsdopplerradar . . . . .	23
2.5.2	Dauerstrichradar . . . . .	26
2.6	Messung des Azimuts . . . . .	36
2.6.1	Geometrische Betrachtungen zum Winkel . . . . .	36
2.6.2	Trilateration . . . . .	37
2.6.3	Monopuls-Verfahren . . . . .	41
2.7	Gegenüberstellung verwendeter Sensoren . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Objekte des Straßenverkehrs und deren Eigenschaften</b>	<b>47</b>
3.1	Definition ausgedehnter Objekte . . . . .	47
3.1.1	Zusammenhang zwischen Auflösung und Ausdehnung .	47
3.2	Typisierung der betrachteten Objekte . . . . .	50
3.3	Lange Ziele . . . . .	54
3.3.1	Messung der radialen Ausdehnung . . . . .	54
3.3.2	Beobachtung eines langen Zieles . . . . .	55
3.3.3	Geometrische und kinematische Eigenschaften . . . . .	57
3.4	Kinematisch ausgedehnte Ziele . . . . .	58
3.4.1	Messung der kinematischen Ausdehnung . . . . .	59
3.4.2	Beobachtung eines kinematisch ausgedehnten Zieles . .	60

3.4.3	Geometrische und kinematische Eigenschaften . . . . .	62
3.5	Doppelt ausgedehnte Ziele . . . . .	63
3.5.1	Gleichzeitige Messung mehrerer Ausdehnungen . . . . .	64
3.5.2	Beobachtung eines Flächenzieles . . . . .	64
3.5.3	Geometrische und kinematische Eigenschaften . . . . .	69
3.6	Messung einer Ausdehnung im Winkel . . . . .	69
3.6.1	Überlagerung im Winkel . . . . .	70
3.7	Berücksichtigung der Verkehrssituation . . . . .	73
3.8	Zusammenhänge zwischen Modellbildung und Objekterkennung	78
<b>4</b>	<b>Radarnetzwerk für geometrisch ausgedehnte Ziele</b>	<b>81</b>
4.1	Überblick über die Signalverarbeitungskette . . . . .	81
4.2	Segmentierung von Objekten . . . . .	83
4.2.1	Auflösung von Mehrdeutigkeiten . . . . .	84
4.2.2	Strategien zur Signalverarbeitung im Radarnetzwerk .	86
4.3	Datenzuordnung im Radarnetzwerk . . . . .	89
4.3.1	Positionsbestimmung dicht platzierter Punktziele . . .	93
4.3.2	Evaluation des Bottom-up-Verfahrens . . . . .	96
4.4	Positionsbestimmung langer Ziele . . . . .	102
4.4.1	Berücksichtigung der radialen Ausdehnung . . . . .	105
4.4.2	Schätzung der Objektlänge im Sensornetzwerk . . . . .	107
4.4.3	Objektlängenschätzung mit einer LFMSK-Signalform .	118
4.4.4	Einflüsse des Systementwurfes auf die Längenmessung	120
4.4.5	Trilateration bei langen Zielen . . . . .	122
<b>5</b>	<b>Geschwindigkeitsbestimmung bei kinematischer Ausdehnung</b>	<b>125</b>
5.1	Aufgabe der Zielverfolgung . . . . .	126
5.2	Kinematische Ausdehnung durch Bewegungsmuster . . . . .	130
5.2.1	Tracking der makroskopischen Fußgängerbewegung . .	131
5.2.2	Tracking der mikroskopischen Fußgängerbewegung . .	134
5.2.3	Nutzen komplexer Bewegungsmuster . . . . .	137
5.3	Kinematische Ausdehnung unterschiedlicher Sujets . . . . .	138
5.3.1	Analytische Betrachtung der kinematischen Ausdehnung	139
5.3.2	Redundanz zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten . . . .	146
5.4	Geschwindigkeitsbestimmung quer bewegter Fahrzeuge . . . . .	148
5.5	Bestimmung der Eigengeschwindigkeit . . . . .	156
5.6	Ansatz für ein Kriterium zur Objekterkennung . . . . .	159
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>161</b>

# 1 Einleitung

Seit etwa 10 Jahren werden verstärkt Radarsensoren als Basis für Fahrerassistenzsysteme im Automobilbereich untersucht [RPL94, Sto98]. In diesem Zusammenhang sind vielfältige mögliche Anwendungen vorgestellt, untersucht und in jüngster Zeit auch umgesetzt worden. Die automatische Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control (ACC)) für Kraftfahrzeuge auf Autobahnen ist als erste Anwendung von Radarsensoren im Fahrzeug seit 2004 als Zubehör in Wagen der Oberklasse etabliert, so ADR<sup>®</sup> bei Volkswagen oder DISTRONIC<sup>®</sup> bei Mercedes-Benz. Das Ziel dieser Anwendung ist die gleichzeitige Regelung der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug auf Basis einer gegebenen Wunschgeschwindigkeit über einen moderaten Eingriff in Motorsteuerung und Bremse [Men99]. Aus Sicht der Radarsensorik muss daher im Wesentlichen nur ein einziges Objekt betrachtet werden, nämlich das direkt vorausfahrende Fahrzeug, sofern ein solches vorhanden ist. Für eine zuverlässige Ausführung der gewünschten Funktion muss bestimmt werden, ob sich ein Fahrzeug in der eigenen Spur befindet und wenn ja, welchen Abstand es hat. Eventuell kann zur Unterstützung der Funktion auch noch die relative Geschwindigkeit dieses Fahrzeuges mit erfasst werden. Eine visuelle Darstellung der vom Radar gemessenen Rohdaten ist für den Anwender nicht erforderlich, da die Verarbeitung der Daten automatisch und ohne Mitwirkung des Fahrers erfolgt. Lediglich die aktuelle Entfernung zum vorausfahrenden Fahrzeug kann als Hinweis angezeigt werden (vgl. Abb. 1.1).

Neben dieser ersten radarbasierten Anwendung werden zurzeit auch andere Systeme untersucht, die zum Teil sehr viel strengere Forderungen an die Radarsensorik stellen. Eine mögliche Erweiterung des ACC-Systems ist die Integration einer Stop&Go-Funktion, die ein Abbremsen bis zum völligen Stillstand sowie ein selbsttätiges Anfahren des Fahrzeuges gewährleisten soll. Zusätzlich ist eine Übertragung der Systemfunktionalität von der Autobahn in den normalen Stadtverkehr angedacht. Zum jetzigen Zeitpunkt profitieren die Systeme noch von den starren Randbedingungen des Autobahnverkehrs. So sind die möglichen Ziele und ihre Fahrbewegungen stark eingeschränkt, wodurch die Signalverarbeitung sehr vereinfacht wird.



Abbildung 1.1: Anzeige einer ACC-Funktion in einem Kraftfahrzeug

Angedacht sind aber auch gänzlich neue Anwendungen wie Assistenten zum sensorgestützten automatischen Einparken [WPMM04] oder vorbeugende Maßnahmen zur Reduzierung des Schadens bei unvermeidlichen Unfällen [ADA05, MOTD05]. Eine Gemeinsamkeit aller neuen Anwendungen ist die zusätzliche Notwendigkeit einer Sensorik zur Überwachung des Nahbereiches. Während typische ACC-Systeme einen im Winkel stark eingeschränkten Bereich in einer Entfernung von etwa 10 m bis 200 m direkt vor dem Fahrzeug überwachen, muss jetzt die Lücke bis zum Fahrzeug selbst gefüllt werden. Damit ist eine Sensorik nötig, welche die direkte Umgebung des Fahrzeuges bis zu einer Entfernung von etwa 50 m überwacht. Je nach angestrebter Anwendung ist die Überwachung eines bestimmten Winkelbereichs oder auch die Berücksichtigung der gesamten Umgebung notwendig. In Abbildung 1.2 sind die entsprechenden Beobachtungsbereiche exemplarisch dargestellt.

Die klassischen Anwendungen verlangen eine klare Zieldetektion und eine genaue Schätzung der Zielkoordinaten. Eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Ziele und ihres charakteristischen Verhaltens ist nicht gefordert. Mit der Erweiterung des überwachten Bereiches und der Einführung von Anwendungen für den normalen Stadtverkehr kommt es jedoch auch zu einer drastischen Änderung der Randbedingungen für die Sensorik. Während auf der Autobahn im Wesentlichen andere Fahrzeuge in größeren Entfernungen erfasst werden müssen, taucht jetzt eine Vielzahl möglicher Ziele im Erfassungsbereich der Sensoren auf. Zusätzlich ist die zu erwartende Bewegung der Ziele nicht mehr durch breite Fahrbahnen mit großen Kurvenradien vorbestimmt. Im Stadtverkehr können sich die Verkehrsteilnehmer in nahezu beliebigen Richtungen bewegen und eine große Anzahl von Manövern durchführen. Mit den

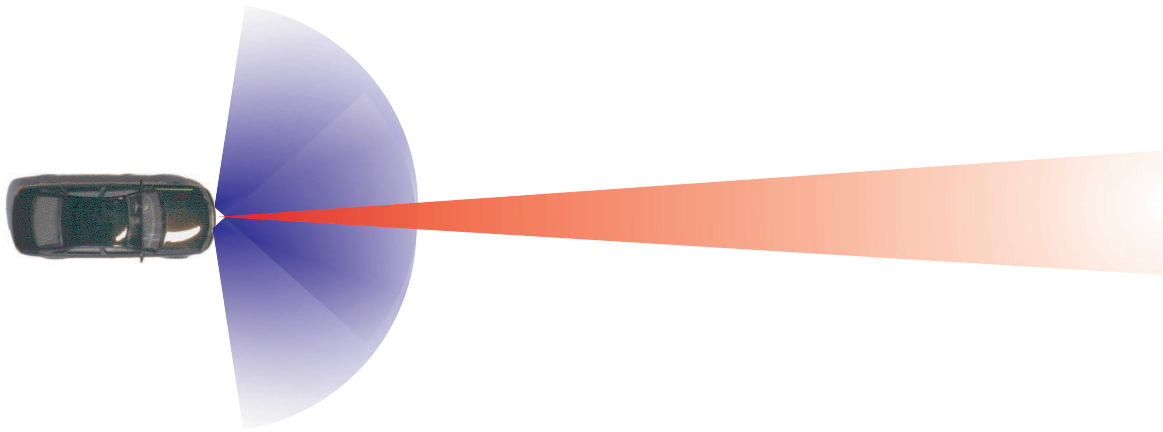


Abbildung 1.2: Relevante Gebiete für Fernbereichs- (rot) und Nahbereichssensorik (blau) zur Überwachung des Frontbereiches

geringeren Entfernungen zwischen den Zielen und den Sensoren verringert sich auch die Zeit, bis eine Bewertung der Situation, basierend auf den Ergebnissen der Sensormessung, abgegeben werden muss.

Neben den Änderungen an der Vielfalt des Bewegungsverhaltens entsteht jedoch auch die Notwendigkeit, auftretende Ziele differenzierter zu beschreiben. So müssen Anwendungen für den Stadtverkehr zum Beispiel auch auf Fußgänger reagieren können. Ebenso haben die physikalischen Abmessungen der Ziele einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der Situation, wenn diese in der gleichen Größenordnung liegen wie das Auflösungsvermögen der verwendeten Sensoren. Mit den zusätzlich zu erfassenden Eigenschaften der Ziele und den geringeren Abständen zwischen den Zielen kommt der Zieltrennung eine deutlich größere Bedeutung zu. Dabei spielt eine messtechnisch zu erfassende Ausdehnung der beobachteten Objekte eine wichtige Rolle. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Eigenschaften der Ziele nicht länger vernachlässigt werden dürfen, sondern bereits beim spezifischen Entwurf der Signalverarbeitung zu berücksichtigen sind.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, Messverfahren und Algorithmen zur Radarsignalverarbeitung im Automobilbereich unter besonderer Berücksichtigung einzelner Typen von Verkehrsteilnehmern und charakteristischen Verkehrssituationen vorzustellen, weiter zu entwickeln und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Betrachtung typischer Verkehrsteilnehmer in Anwendungen für den Nahbereich. Dabei wird auf bestehende Radarsensoren für Anwendungen in Kraftfahrzeugen zurückgegriffen und deren Messdaten auf charakteristische Informationen hin untersucht.

Bisherige Strategien in der Signalverarbeitung gehen vielfach aus verschiedenen Gründen vom Modell des Punktzieles aus. Die Grenzen dieser Vereinfachung werden aufgezeigt und die Folgen für die Signalverarbeitung sowie die Darstellung mit dem Ziel untersucht, eine genauere Beschreibung der vorliegenden Situationen zu entwickeln, um der Vielfalt der Verkehrssituationen besser gerecht zu werden.

Die Grenzen der Arbeit liegen dabei in den Charakteristiken und Limitierungen der verfügbaren Sensoren. Da die existierenden Sensoren jedoch bereits deutlich die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Verkehrsteilnehmer und Situationen erfassen, ist eine Weiterentwicklung der Sensoren zwar an einzelnen Stellen wünschenswert, die untersuchte Fragestellung aber bereits zum jetzigen Zeitpunkt notwendig, um die Leistungsfähigkeit der Signalverarbeitung zu erhöhen und zuverlässige Anwendungen zu ermöglichen. Auf sinnvolle Erweiterungen der Möglichkeiten der Sensoren, die aus den Betrachtungen folgen, wird dann an gegebener Stelle kurz eingegangen. Die Darstellung der Sachverhalte unterteilt sich in vier wesentliche Abschnitte.

Das zweite Kapitel stellt nötige Grundlagen der Radarmesstechnik für den Bereich des Automobilradars vor. Hierzu werden typische Verfahren zur Messung von Entfernungen, Geschwindigkeiten und Winkeln vorgestellt. Eine besondere Bedeutung hat für die Radarmessung dabei neben der Genauigkeit die messtechnische Größe der *Auflösung*. Die Betrachtung dieser Größe ist notwendig, um eine Aussage über die praktische Relevanz der weiteren Untersuchungen treffen zu können.

Das dritte Kapitel leitet aus den physikalischen *Abmessungen* eines Objektes und der messtechnischen Größe der Auflösung die Größe der *Ausdehnung* ab. Diese wird verwendet, um die von den Objekten gewonnenen Messwerte systematisch beschreiben und analysieren zu können, sowie ein Verfahren zur Zuordnung der einzelnen Objekte zu unterschiedlichen Modellen zu entwickeln. Die gebräuchliche Modellierung der Objekte über Punktziele wird dafür als Basis einer erweiterten Charakterisierung anhand der Ausdehnung genommen. Die Unterteilung der einzelnen Typen orientiert sich an den durch die betrachtete Radarsensorik gegebenen Randbedingungen. Neben den Begriffen Objekt und Ziel zur Beschreibung der vom Radar detektierten Gegenstände muss in diesem Zusammenhang auch der Begriff *Sujet* eingeführt werden, um die Notwendigkeit der Betrachtung von Verkehrssituationen hervorzuheben, in der ein Objekt vermessen wird.

Das vierte Kapitel stellt zunächst die klassische auf der Punktzielhypothese aufbauende Signalverarbeitungskette vor. Anschließend wird die Auswirkung der messtechnischen Erkenntnisse über geometrisch ausgedehnte Ziele auf

---

die Signalverarbeitung beleuchtet. Dieses Kapitel zeigt exemplarisch für ein Radarnetzwerk, welche Konsequenzen sich aus der Punktzielhypothese für nicht punktförmige Ziele innerhalb der Positionsbestimmung und der Interpretation einer Straßenverkehrssituation ergeben und wie sich die Signalverarbeitung an die gemessene Ausdehnung der Objekte anpassen lässt. Grundlage vieler Betrachtungen ist die Erkenntnis, dass im beschriebenen Anwendungsgebiet vielfach eine große Anzahl von Zielen auf relativ kleiner Fläche zu finden sind, und der Datenzuordnung damit eine entscheidende Bedeutung zukommt. Für das Beispiel der Trilateration im Radarnetzwerk wird ein Verfahren zur optimalen Datenzuordnung entwickelt.

Das fünfte Kapitel zeigt, dass die messbare Ausdehnung von Objekten neben neuen Fragestellungen auch ein großes Potential für die Auswertung der gemessenen Daten bietet. So lassen sich bei entsprechender Signalauswertung aus dem Wissen über ausgedehnte Ziele Informationen aus den Messdaten gewinnen, die bei Verwendung einer Punktzielhypothese nicht verfügbar wären. Exemplarisch hierfür werden Ziele mit kinematischer Ausdehnung betrachtet, die von einem Einzelsensor vermessen werden. An dieser Stelle kommt der systematischen Trennung von Objekten und Verkehrssituationen eine besondere Bedeutung zu. Die dargestellten Beispiele beziehen sich zum einen auf eine an das spezielle Echosignal von Fußgängern angepasste Signalverarbeitung und zum anderen auf ein Verfahren zur Bestimmung der lateralen Geschwindigkeit von Fahrzeugen. Im Gegensatz zu herkömmliche Verfahren zur Bestimmung der lateralen Geschwindigkeit wird hierbei das Objekt nicht über der Zeit betrachtet, sondern die Geschwindigkeit aus den speziellen Eigenschaften des ausgedehnten Objektes gewonnen.

Abschließend gibt Kapitel 6 eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und einen Ausblick auf weiterführende Frage- und Aufgabenstellungen.



## 2 Messung geometrischer und kinematischer Eigenschaften

### 2.1 Geschichtlicher Rückblick

Die Entwicklung der Radartechnik begann vor etwa 100 Jahren mit den Arbeiten von CHRISTIAN HÜLSMEYER. Er beschäftigte sich mit der Fragestellung, wie die Schifffahrt sicherer zu machen sei und besonders bei schlechter Sicht Unfälle vermieden werden können. Die Anwendungsgebiete für Radar haben sich bis heute demnach nicht wesentlich geändert. Im April 1904 erschien seine erste Patentschrift [Hül04a], und schon im November veröffentlichte er eine erste Erweiterung [Hül04b]. Abbildung 2.1 zeigt die beschreibende Zeichnung aus der Patentschrift.

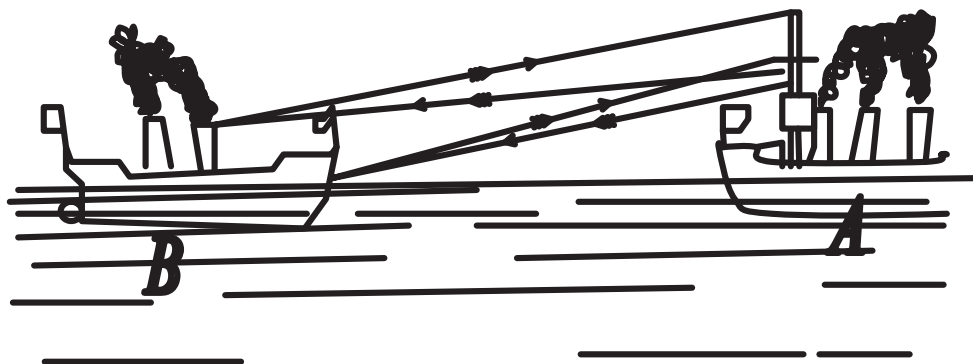


Abbildung 2.1: Zeichnung aus dem Patent Nr.165546 von 1904 zur Erkennung von Gegenständen

Mit seinem Telemobiloskop genannten Messgerät gelang HÜLSMEYER damit die praktische Nutzung der von MAXWELL und HERTZ gewonnenen Erkenntnisse. Interessant sind dabei die relativ kurzen zeitlichen Abstände der Weiterentwicklungen. Im Jahre 1873 entwickelte MAXWELL seine theoretische Abhandlung über die elektromagnetischen Wellen [Hun91] und schon 1886 gelang HERTZ der experimentelle Nachweis der von MAXWELL vorausgesagten Wellen. 1895 demonstrierte der Italiener MARCONI die erste drahtlose

Kommunikation und baute daraufhin 1901 die erste transatlantische Funkstrecke auf [Cla98]. Zu diesem Zeitpunkt waren die Reflexionseigenschaften an Metallen längst bekannt. HÜLSMEYER erkannte allerdings als Erster die damit verbundenen Möglichkeiten. Bis seine Ideen praktisch in größerem Maßstab genutzt wurden, sollten jedoch noch etwa 25 Jahre vergehen. Heutzutage ist die Radartechnik aus der Luftraumüberwachung sowie der Schifffahrt nicht mehr wegzudenken. Mit der beginnenden Nutzung im Bereich der Automobilindustrie finden leistungsfähige Radarsensoren erstmalig eine Nutzung mit hohen Stückzahlen.

Während viele Radarsysteme auf Sportschiffen dem Nutzer lediglich eine grafische Darstellung der empfangenen Daten geben, erfordert der Einsatz im Automobil eine automatische Auswertung der Signale, die bisher in der Regel dem geschulten Betrachter des Bildes überlassen wurde. Sollen automatisch Reaktionen auf Basis der mit dem Radar gewonnenen Informationen ausgelöst werden, so ist eine weitergehende Signalverarbeitung der empfangenen Signale notwendig. Die Analyse der Rohdaten muss dafür vom Menschen auf die Maschine übertragen werden. Bei den Anwendungen für Radarsensoren in Kraftfahrzeugen erfolgt letztendlich keine Visualisierung der Radarmessung.

Im Folgenden wird geklärt, welche Informationen mit einem Radar über ein Ziel gewonnen werden können und welche Techniken dabei verwendet werden. Implizit wird dabei von Sensoren ausgegangen, die auch in der Automobilindustrie eingesetzt werden können.

## 2.2 Genauigkeit und Auflösung

Um die Ergebnisse einer Messung bewerten zu können, sind neben der Kenntnis der gemessenen Maßzahl und ihrer Einheit auch einige charakteristische Größen des Messmittels von Bedeutung. Im Wesentlichen sind dies die Größen Messgenauigkeit und Auflösung des betrachteten Sensors. Diese geben Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Messung und ermöglichen eine Beurteilung des gewonnenen Messwertes.

Die Genauigkeit einer Messung beschreibt, wie gut der ermittelte Wert mit dem wahren Wert übereinstimmt. Ist der zu erwartende Fehler klein, so wird von einer hohen Messgenauigkeit gesprochen und umgekehrt. Häufig wird zur Beschreibung der Genauigkeit einer Messung die Standardabweichung  $\sigma$  des Messfehlers angegeben, wenn von einer Fehlernormalverteilung ausgegangen werden kann. Laut [A<sup>+</sup>85] ist der Begriff Genauigkeit nicht in Standards definiert. Auf Grundlage einer angenommenen Normalverteilung des Fehlers

wird in [BSMM97] das Genauigkeitsmaß  $h$  eingeführt, welches jedoch keine breite Verwendung findet.

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (2.1)$$

Neben der Genauigkeit ist für die Anwendungen der Radartechnik die Fähigkeit des Sensors wichtig, unterschiedliche Reflexionszentren trennen zu können. Diese Fähigkeit wird als Auflösung bezeichnet. Für die Anwendung einer Entfernungsmessung bedeutet dies die Angabe des Abstandes, den zwei Ziele mindestens haben müssen, damit der Sensor sie auch als zwei Ziele detektiert und nicht als eins.

*Begriff 1 (Auflösung):* Die Auflösung ist die kleinste Differenz, bei der zwei Messwerte vom Radarsensor noch getrennt werden können.

Da nur im Zusammenhang mit einer bestimmten Messgröße von einer Auflösung gesprochen werden kann, sind im Rahmen dieser Arbeit die Entfernungsauflösung  $\Delta r$ , die Geschwindigkeitsauflösung  $\Delta v$ , die Winkelauflösung  $\Delta\alpha$  und die Frequenzauflösung  $\Delta f$  zu unterscheiden. Wird bei einer Messung gleichzeitig die Entfernung  $r$  und die Geschwindigkeit  $v$  ermittelt und hat der Sensor die Entfernungsauflösung  $\Delta r$  und die Geschwindigkeitsauflösung  $\Delta v$ , so kann von einer Auflösungszelle  $\Delta r \times \Delta v$  gesprochen werden.

Ein Messwert besteht immer aus dem Produkt einer Maßzahl und ihrer Maßeinheit. Die in dieser Arbeit verwendeten Einheiten beziehen sich dabei auf das SI-Einheitensystem (franz. Le Système international d'unités). Entsprechend wird für Geschwindigkeiten die Einheit *Meter pro Sekunde* (m/s) verwendet. Die im Straßenverkehr übliche Angabe in *Kilometer pro Stunde* (km/h) kann über  $1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h}$  beziehungsweise  $1 \text{ km/h} \approx 0.3 \text{ m/s}$  umgerechnet werden.

## 2.3 Messung der Entfernung

Die wichtigste Größe, die mit einem Radar bestimmt werden kann, ist die Entfernung  $r$  zwischen Sensor und Objekt. Da häufig auch der Zielwinkel  $\alpha$  bestimmt wird, erfolgt die Angabe der mit einem Radar gemessenen Positionen in aller Regel in Polarkoordinaten.

### 2.3.1 Geometrische Betrachtungen zur Entfernung

Wird von einer geringen Abmessung der Gegenstände ausgegangen, so lässt sich die Position in der Ebene sehr leicht über einen Ortsvektor  $\vec{o}$  in kartesischen oder aber in Polarkoordinaten festlegen. Entsprechend werden die über Ortsvektoren beschriebenen Objekte auch als Punktziel bezeichnet (vgl. Abb. 2.2).

$$\vec{o} = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \hat{=} \begin{bmatrix} r_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad x_o = r_o \cdot \cos(\alpha_o) \quad \text{und} \quad y_o = r_o \cdot \sin(\alpha_o) \quad (2.2)$$

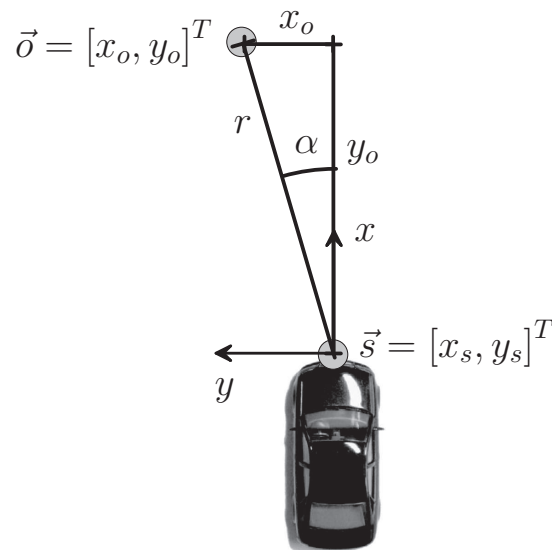


Abbildung 2.2: Geometrische Zusammenhänge zwischen der Lage des Objektes und der Position eines möglichen Sensors

Liegt zusätzlich eine Bewegung des Gegenstandes vor, so ändert sich die Lage des Gegenstandes in Abhängigkeit der Zeit. Im Falle einer gleichförmigen Bewegung mit der Geschwindigkeit  $\vec{v} = [v_x, v_y]^T$  ergibt sich für die Lage des Gegenstandes folgender Zusammenhang:

$$\vec{o}(t) = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \cdot t \quad . \quad (2.3)$$

Bei nicht gleichförmigen Bewegungen ist der entsprechende Verlauf der Beschleunigung mit zu berücksichtigen. Wird ein Punktziel von einem Sensor an der Position  $\vec{s} = [x_s, y_s]^T$  vermessen, so kann die Position des Objektes auch

relativ zu diesem Ort angegeben werden. Die relative Entfernung zwischen Sensor und Objekt beträgt dann

$$r = |\vec{o} - \vec{s}| = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2} \quad . \quad (2.4)$$

Die geometrischen Zusammenhänge sowie das verwendete Koordinatensystem sind in Abbildung 2.2 nochmals grafisch verdeutlicht und orientieren sich an der Norm für *Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten* [DIN94].

Je nach verwendetem Funktionsprinzip der eingesetzten Sensoren stehen verschiedene Verfahren zur Entfernungsmessung zur Verfügung. Grundlage aller Entfernungsmessungen ist jedoch die Laufzeit des Signals vom Sensor zum Objekt und wieder zurück. Die gesuchte Entfernung  $r$  ergibt sich dann aus der Laufzeit  $\tau$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  zu

$$r = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad . \quad (2.5)$$

### 2.3.2 Pulsradar

Bei einem Pulsradar [Lud98, Klo02] sendet der Sensor kurze Pulse der Länge  $T_P$  im zeitlichen Abstand von  $T_R$  aus. Der zeitliche Abstand zwischen den gesendeten Pulsen wird häufig auch über die sogenannte Pulswiederholfrequenz  $\text{PRF} = 1/T_R$  (engl. pulse repetition frequency) angegeben. Die Laufzeit  $\tau$  lässt sich als Zeit ermitteln, die zwischen Aussenden und Empfangen des Pulses vergeht. Abbildung 2.3 verdeutlicht die Zusammenhänge.

Gemäß der räumlichen Ausbreitung der Radarwellen und den Reflexionseigenschaften des Objektes ist die empfangene Leistung geringer als die ausgesendete. Dieser Zusammenhang wird über die Radargleichung

$$P_e = \frac{G \cdot \sigma \cdot A}{(4\pi)^2 \cdot r^4} \cdot P_s \quad (2.6)$$

beschrieben [Ung94]. Im Falle einer reinen Freiraumausbreitung sinkt die empfangene Leistung  $P_e$  proportional zu  $1/r^4$  mit steigender Entfernung zwischen Ziel und Sensor. Eine weitere wichtige Einflussgröße im Hinblick auf die empfangene Leistung ist der Radarrückstreuquerschnitt  $\sigma$  (engl. radar cross section (RCS)) des Zieles. Diese Größe ergibt sich aus der Geometrie und dem Material eines Zieles und wirkt sich entscheidend auf die Detektierbarkeit von Objekten aus. So lassen sich zum Beispiel Autos im Vergleich zu Fußgängern auch noch in größeren Entfernungen erfassen. Der Rückstreuquerschnitt von

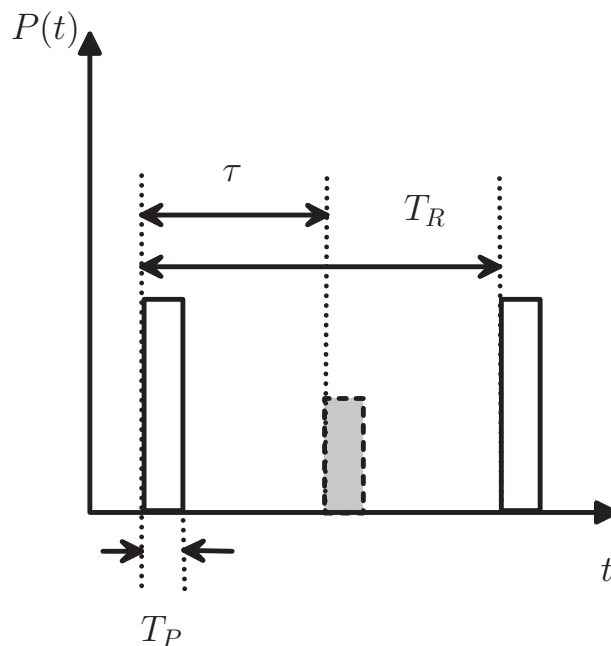


Abbildung 2.3: Sende- (weiß) und Empfangssignal (grau) beim Pulsradar

Fahrzeugen liegt im Mittel um etwa 20 dB höher als der von Personen, das Mitführen eines Fahrrades steigert den RCS hingegen um etwa 3 dB [LRR02]. Die beiden weiteren Größen beschreiben die Eigenschaften von Sender und Empfänger. So ist  $G$  der Gewinn der Sendeantenne und  $A$  die Wirkfläche der Empfangsantenne. Für eine Antenne stehen Wirkfläche und Gewinn über die Wellenlänge  $\lambda$  in einem festen Zusammenhang.

$$A = G \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.7)$$

### Entfernungsauflösung und Eindeutigkeit

Bedingt durch die Breite  $T_P$  eines gesendeten Pulses ist die Entfernungsauflösung des Pulsradars beschränkt. Zwei Ziele in unterschiedlichen Entfernungen lassen sich nur dann zuverlässig trennen, wenn die empfangenen Echosignale sich nicht gegenseitig überlagern. Die Entfernungsauflösung  $\Delta r$  ergibt sich demnach zu

$$\Delta r = \frac{c \cdot T_P}{2} \quad (2.8)$$

Da die Breite des Pulses direkt reziprok mit der nötigen Bandbreite  $B$  des Signals in Verbindung steht [Fli91], hat die aufgrund von Vorgaben der Regulierungsbehörden praktisch zur Verfügung stehende Bandbreite einen ent-

scheidenden Einfluss auf die mögliche Entfernungsauflösung des eingesetzten Sensors [RSD04]. Für Anwendungen der Radartechnik im Automobil stehen im Wesentlichen zwei Frequenzbänder zur Verfügung [Bun03, Bun04, Bun05], ein 200 MHz breites Band bei 24 GHz, in dem heute viele Systeme arbeiten [Men04], und ein 4 GHz breites Frequenzband von 77 – 81 GHz. Die Entwicklung hin zu kostengünstigen Hochfrequenzbauteilen für das 77 GHz-Band läuft zurzeit. Während zur automatischen Abstandsregelung schon seit längerem Sensoren im 77 GHz-Band existieren [Men99], gibt es bisher nur sehr wenige Systeme für den Nahbereich in diesem Frequenzband [RHLS02, FRL05].

Im Gegensatz zur Pulsbreite, die die Entfernungsauflösung des Sensors beeinflusst, hat die Pulswiederholrate einen Einfluss auf die Eindeutigkeit der Entfernungsmessung. Ist die Laufzeit des Radarsignals größer als die Zeit zwischen zwei ausgesendeten Pulsen, erscheint das Ziel in einer zu geringen Entfernung. Die maximal eindeutig messbare Entfernung  $r_{max}$  liegt damit bei

$$r_{max} = \frac{c \cdot T_R}{2} \quad . \quad (2.9)$$

### 2.3.3 Dauerstrichradar

Neben Radarsensoren mit einem pulsformigen Sendesignal sind auch Sensoren im Einsatz, die ein kontinuierliches Signal senden, sogenannte Dauerstrichradarsensoren (engl. continuous wave (CW)). Je nach Art der Anwendung sind dabei unterschiedliche Ausprägungen des tatsächlich verwendeten Sendesignals möglich. Üblich sind jedoch Verfahren mit einer zeitabhängig linear modulierten Sendefrequenz  $f_s$  (engl. linear frequency modulated continuous wave (LFMCW)).

$$f_s(t) = f_0 + \Lambda \frac{f_{Hub}}{T_{Chirp}} \cdot t \quad t \in [0, T_{Chirp}) \quad \Lambda = \pm 1 \quad (2.10)$$

Charakteristisch für das Sendesignal sind dann neben der Trägerfrequenz  $f_0$ , der Frequenzhub  $f_{hub}$  sowie die zeitliche Dauer  $T_{Chirp}$  einer solchen Sequenz [KPDA60, Sto92, Mei01, Lüb05]. Eine Sequenz mit steigender Sendefrequenz ( $\Lambda = 1$ ) wird auch als *Upchirp* und eine Sequenz mit fallender Sendefrequenz ( $\Lambda = -1$ ) als *Downchirp* bezeichnet. Denkbar ist dabei auch der Sonderfall, dass die Frequenzänderung  $f_{Hub} = 0$  beträgt, also ein unmoduliertes Signal gesendet wird. Abbildung 2.4 zeigt den Signalverlauf schematisch für  $f_0 = 0$ .

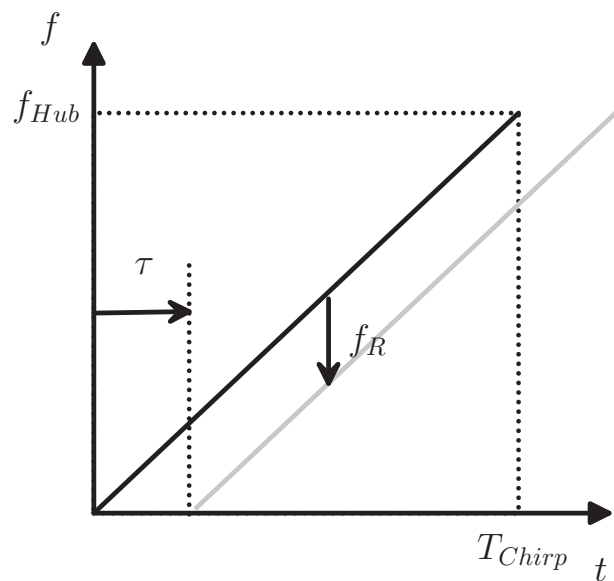


Abbildung 2.4: Sende- (schwarz) und Empfangssignal (grau) beim linear frequenzmodulierten Dauerstrichradar

Da die Dauer eines Chirps deutlich länger gewählt wird, als die Laufzeit des Signals zwischen Sender und Ziel, kann die Laufzeit nicht direkt ausgewertet werden. An die Stelle einer Laufzeitauswertung tritt eine Auswertung der Differenzfrequenz  $f_R$  zwischen der empfangenen

$$f_e(t) = f_s(t - \tau) \quad (2.11)$$

und der momentan gesendeten Frequenz  $f_s(t)$ . Dazu wird das aktuell empfangene Signal, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, mit der momentanen Sendefrequenz in das Basisband abgemischt.

Mathematisch betrachtet entspricht der Abmischvorgang der Multiplikation zweier Schwingungen, aus welcher sich die Überlagerung zweier Schwingungen ergibt. Die entstehenden Schwingungen weisen dabei zum einen die Differenz und zum anderen die Summe der Frequenzen beider Eingangssignale auf.

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.12)$$

Die unerwünschte hochfrequente Schwingung mit etwa doppelter Sendefrequenz wird mit dem auf den Mischer folgenden Tiefpassfilter (TP) herausgefiltert. Bei Verwendung eines zweikanaligen Quadraturdemodulators lässt sich das Empfangssignal über sein äquivalentes komplexwertiges Tiefpasssignal beschreiben, das im Gegensatz zum reelwertigen Tiefpasssignal auch eine Analyse des

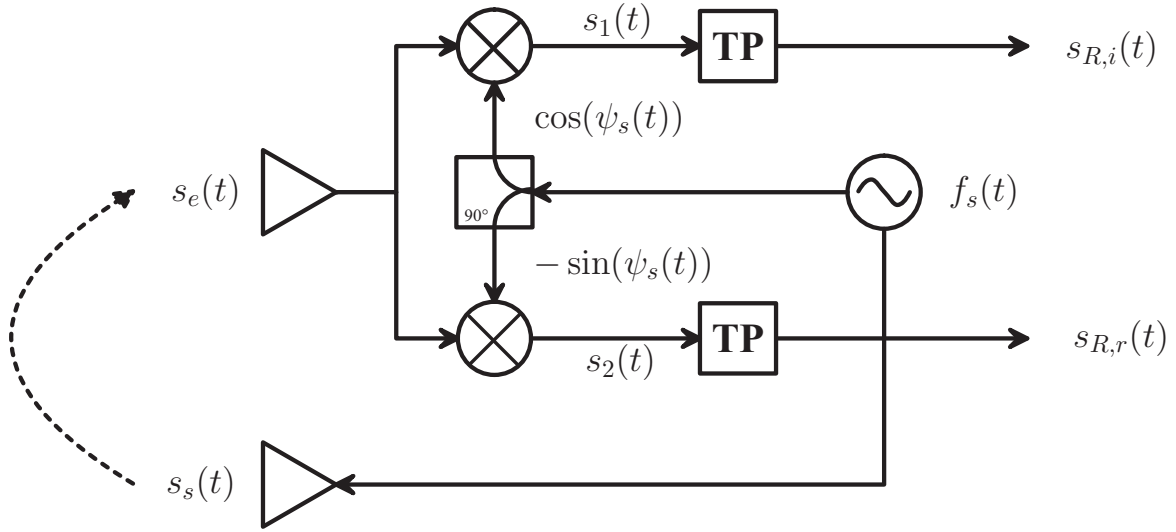


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Quadraturempfängers für ein LFM CW-Radar

Vorzeichens der Frequenz zulässt, da keine Spiegelfrequenzen auftreten.

$$s_R(t) = s_{R,r}(t) + j \cdot s_{R,i}(t) = A \cdot e^{j2\pi f_R t} \quad (2.13)$$

Die aus einer Spektralanalyse von  $s_R(t)$  gewonnene Differenzfrequenz  $f_R$  ist wiederum proportional zur Laufzeit  $\tau$  und damit zur Entfernung  $r$  zwischen Sender und Ziel.

$$f_R = f_e(t) - f_s(t) \quad (2.14)$$

$$= f_s(t - \tau) - f_s(t) \quad (2.15)$$

$$= -\Lambda \frac{f_{Hub}}{T_{Chirp}} \cdot \tau \quad (2.16)$$

$$= -\Lambda \frac{2 \cdot f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r \quad (2.17)$$

Die auftretenden Frequenzen, die in den nachfolgenden Schritten weiterverarbeitet werden müssen, sind dabei klein im Vergleich zur verwendeten Signalbandbreite. Hieraus ergibt sich auch der Hauptvorteil einer derartigen Sendesignalform. Sie stellt relativ geringe Anforderungen an die Schaltungstechnik in den Sensoren und die nachfolgende digitale Verarbeitungstechnik. Die Verstärker profitieren nebenbei von der konstanten Einhüllenden des Sendesignals.

### Beispiel: Vermessung eines Punktzieles

Mit den typischen Werten für einen Downchirp von  $f_{Hub} = 200$  MHz und  $T_{Chirp} = 31$  ms ergibt sich für ein angenommenes Ziel in  $r = 16$  m Entfernung eine Differenzfrequenz von  $f_R = 688$  Hz. Abbildung 2.6 zeigt das zugehörige Spektrum des Empfangssignals bei Betrachtung eines stationären punktförmigen Zieles in 16 m Entfernung. Die erkennbare Ausdehnung des Signals über verschiedene Frequenzkomponenten liegt an der verwendeten Fensterfunktion vor Berechnung der Frequenzschätzung [Mah05, Lüb05].

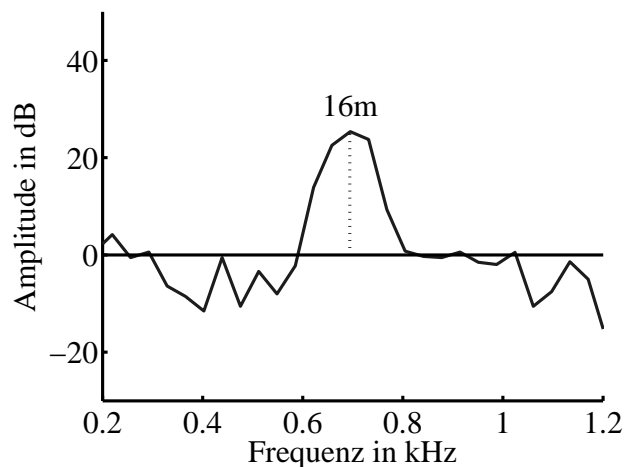


Abbildung 2.6: Spektrum des Empfangssignals bei der Messung eines stationären punktförmigen Zieles in 16 m Entfernung

### Entfernungsauflösung und Eindeutigkeit

Die Entfernungsauflösung  $\Delta r$  eines LFM CW-Radarsystems ist über die mögliche Frequenzauflösung  $\Delta f$  der Auswertung gegeben.

$$\Delta r = \frac{c}{2 f_{Hub}} \cdot \Delta f \cdot T_{Chirp} \quad (2.18)$$

Erfolgt die Auswertung der gemessenen Differenzfrequenzen über eine *Diskrete Fourier Transformation* (DFT) bzw. ihre effiziente Realisierung als *Fast Fourier Transformation* (FFT) mit  $N$  Abtastwerten pro Chirp, ergibt sich die erzielbare Frequenzauflösung  $\Delta f_{FFT}$  [OS99] zu

$$\Delta f_{FFT} = \frac{f_a}{N} = \frac{1}{T_{Chirp}} \quad . \quad (2.19)$$

Aus den  $N$  zeitlichen Abtastwerten ergeben sich entsprechend auch  $N$  spektrale Schätzwerte (sogenannte Frequenz Bins). Unter Berücksichtigung der Beziehung für die Abtastfrequenz  $f_a$  in Bezug auf die Chirplänge  $T_{Chirp} = N/f_a$  ergibt die Kombination von (2.18) und (2.19)

$$\Delta r = \frac{c}{2} \frac{1}{f_{Hub}} \quad . \quad (2.20)$$

Die Entfernungsauflösung ist damit nur abhängig von dem verwendeten Frequenzhub  $f_{Hub}$  bzw. der Signalbandbreite [Men99]. Entsprechend zum Pulsradar beschränkt wieder die praktisch zur Verfügung stehende Bandbreite die erzielbare Entfernungsauflösung.

Die maximal eindeutig erfassbare Entfernung des LFMCW-Radarsystems ist abhängig von der maximalen Frequenz  $f_{max}$ , die noch eindeutig erfasst werden kann und damit von der Abtastfrequenz des eingesetzten analog-digital Wandlers (A/D-Wandler). Laut Gleichung (2.14) gilt dann für die maximal eindeutig erfassbare Entfernung  $r_{R,max}$

$$r_{max} = \frac{c \cdot T_{Chirp}}{2 \cdot f_{hub}} \cdot f_{max} \quad . \quad (2.21)$$

Bei Festlegung der genutzten Abtastfrequenz und der damit verbundenen Festlegung auf eindeutige Entfernungsbereiche sind jedoch auch die Auswirkungen der Geschwindigkeit des Zieles zu beachten.

### Beispiel: Messung der Entfernung eines Autos

In Abbildung 2.7 ist beispielhaft das Spektrum des Empfangssignals bei der Vermessung eines Autos angegeben. Aufgrund der Entfernungsauflösung des verwendeten Sensors von etwa  $\Delta r = 75$  cm, bedingt durch den verwendeten Frequenzhub von  $f_{Hub} = 200$  MHz, stellt sich das Auto als in der Entfernung ausgedehntes Ziel dar. Deutlich erkennbar sind zwei detektierte Reflexionszentren. Die dem Sensor zugewandte Front des Fahrzeuges befindet sich in einer Entfernung von  $r_1 = 12.7$  m und ein zweites Zentrum kann in einer Entfernung von  $r_2 = 17$  m ausgemacht werden. Auffällig ist ferner die deutlich stärkere Empfangsleistung von der Front des vermessenen Fahrzeuges im Vergleich zu den weiter entfernt liegenden Reflexionszentren.

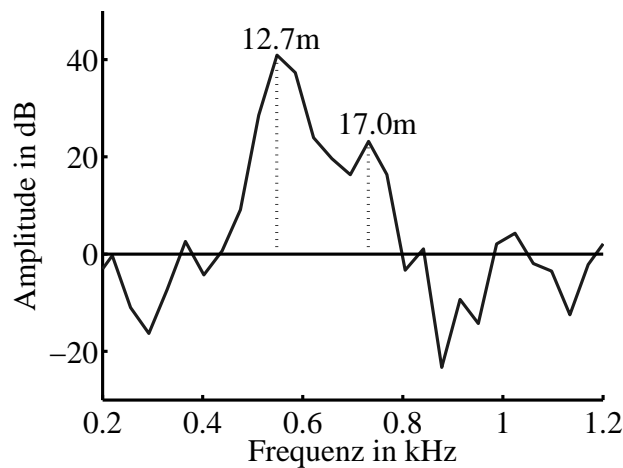


Abbildung 2.7: Spektrum des Empfangssignals bei der Messung eines in 13m Entfernung stehenden Autos

## 2.4 Messung der radialen Geschwindigkeit

Bewegt sich das betrachtete Objekt während der Messung, so kommt es aufgrund des sogenannten DOPPLER-Effektes zu einer Frequenzverschiebung der am Objekt wahrgenommenen Wellen. Im Gegensatz zum akustischen DOPPLER-Effekt spielt es bei der Betrachtung von elektromagnetischen Wellen keine Rolle, ob sich Sender und/oder Empfänger bewegen. Die resultierende Frequenzverschiebung ist dabei einzig abhängig von der relativen Geschwindigkeit  $v$  zwischen Sender und Objekt. Obwohl sich auch CHRISTIAN DOPPLER in seiner Abhandlung, die später zur Namensgebung des DOPPLER-Effektes führen sollte [Dop42], schon auf das Licht der Sterne bezog, waren seine Schlussfolgerungen lediglich für die von ihm gewählten Beispiele aus der Akustik gültig [BEF<sup>+</sup>88]. Die eigentliche Verallgemeinerung auf elektromagnetische Wellen beruht auf den Erkenntnissen der von EINSTEIN entwickelten speziellen Relativitätstheorie unter der Annahme, dass für elektromagnetische Wellen kein Übertragungsmedium existiert. Für den relativistischen DOPPLER-Effekt gilt entsprechend für ein Objekt, das sich vom Sender entfernt, der folgende Zusammenhang [Ein05]:

$$f_e = f_0 \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \quad . \quad (2.22)$$

Dabei bezeichnet  $f_0$  die Frequenz des Senders und  $f_e$  die wahrgenommene Frequenz am Objekt. Da sich die Objekte jedoch mit einer im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit  $c$  sehr niedrigen Geschwindigkeit  $v$  bewegen ( $v \ll c$ ),

kann eine Näherung angesetzt werden [HMS97].

$$f_e \approx f_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (2.23)$$

Nach der Reflexion am Objekt läuft die Welle wieder zum Radargerät zurück und erfährt entsprechend auf dem Rückweg ein weiteres Mal die gleiche Verschiebung der Frequenz, da in diesem Fall das Objekt selbst als Sendequelle angesehen werden kann. Die absolute Frequenzänderung  $f_D$  zwischen empfangener und ausgesendeter Frequenz beträgt dann

$$f_D = -2 \frac{f_0}{c} \cdot v \quad (2.24)$$

$$= -2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.25)$$

Die Richtung der Geschwindigkeit  $v$  wird entsprechend des verwendeten Koordinatensystems (vgl. [DIN94]) positiv für sich entfernende Objekte angesetzt. Für sich entfernende Objekte wird folglich eine Verringerung der Frequenz wahrgenommen.

### 2.4.1 Geometrische Betrachtungen zur radialen Geschwindigkeit

Wird ein Punktziel mit den Koordinaten  $\vec{o} = [x_o, y_o]^T$  von einem Sensor am Ort  $\vec{s} = [x_s, y_s]^T$  betrachtet, so wirkt sich der DOPPLER-Effektes nur auf die radiale Komponente der relativen Geschwindigkeit des Objektes  $\vec{v} = [v_x, v_y]^T$  aus. Diese relative radiale Geschwindigkeit kann über den Zusammenhang

$$v = |\vec{v}| \cdot \cos(\phi) \quad (2.26)$$

$$= \frac{x_o - x_s}{r_o} \cdot v_x + \frac{y_o - y_s}{r_o} \cdot v_y \quad (2.27)$$

$$= v_x \cdot \cos(\alpha) + v_y \cdot \sin(\alpha) \quad (2.28)$$

angegeben werden. Dabei bezeichnet der Winkel  $\phi$  den zwischen Beobachtungs- und Bewegungsrichtung eingeschlossenen Winkel und der Winkel  $\alpha$  den Zielwinkel bei einer Beschreibung der Objektposition in Polarkoordinaten. Die Angabe der Geschwindigkeit in der Ebene erfolgt dabei ohne Einschränkung der Allgemeinheit in kartesischen Koordinaten. Abbildung 2.8 fasst die wesentlichen Vektoren und Projektionen noch einmal grafisch zusammen.

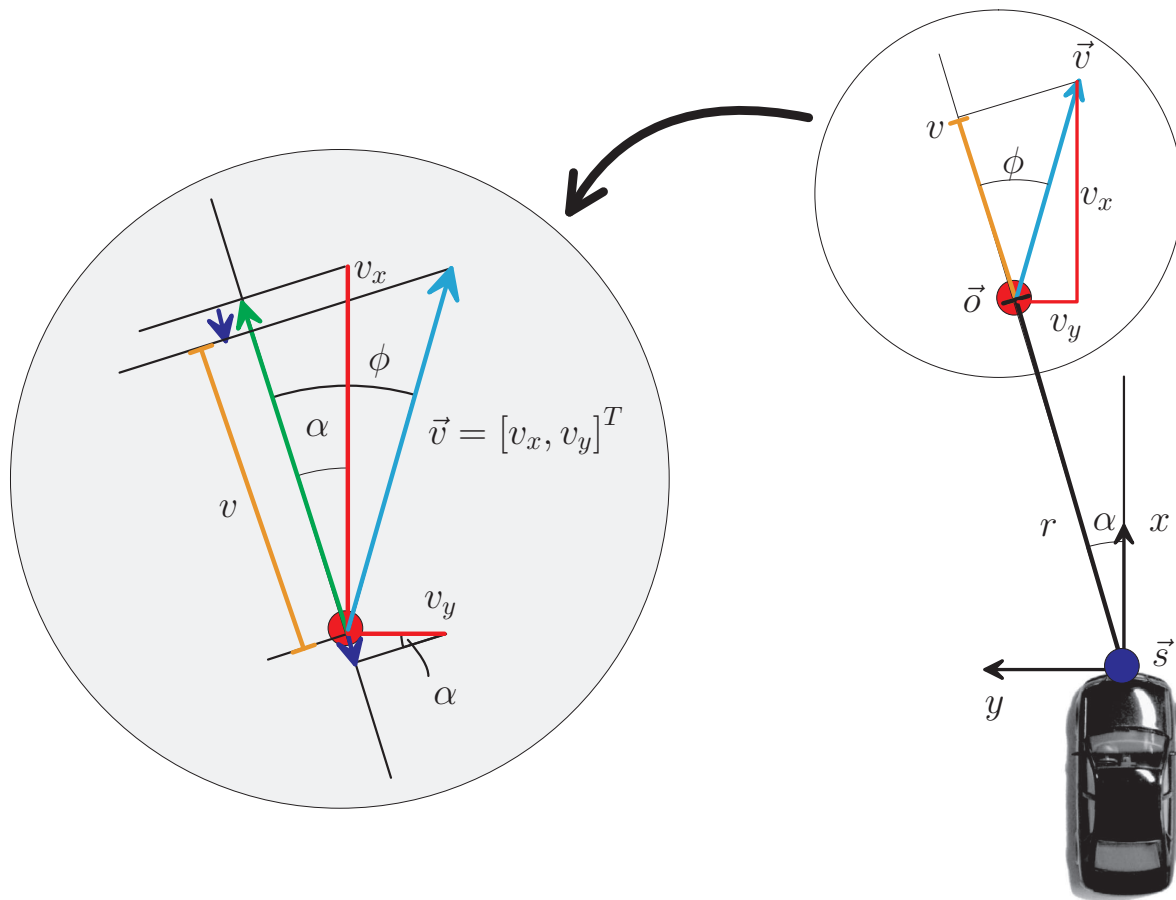


Abbildung 2.8: Geometrische Zusammenhänge zwischen der Lage des Objektes und der gemessenen radialen Komponente der relativen Geschwindigkeit

## 2.4.2 Dauerstrichradar mit konstanter Frequenz

Wird ein Dauerstrichradar mit konstanter Sendefrequenz  $f_0$  eingesetzt, so kann die, durch den DOPPLER-Effekt bei bewegten Zielen hervorgerufene, Frequenzverschiebung direkt aus der Differenzfrequenz zwischen Empfangs- und Sendesignal bestimmt werden.

$$\begin{aligned} f_D &= f_e - f_s \\ &= -2 \frac{f_0}{c} \cdot v \end{aligned} \quad (2.29)$$

Da die gemessene Frequenz  $f_D$  direkt proportional zur Radialgeschwindigkeit ist, lässt sich die Geschwindigkeit des betrachteten Zieles schätzen. Eine Messung der Entfernung des Zieles ist hingegen nicht möglich. Abbildung 2.9 zeigt

die Signalform, die zum Beispiel in Radargeräten zur Geschwindigkeitsüberwachung eingesetzt wird.

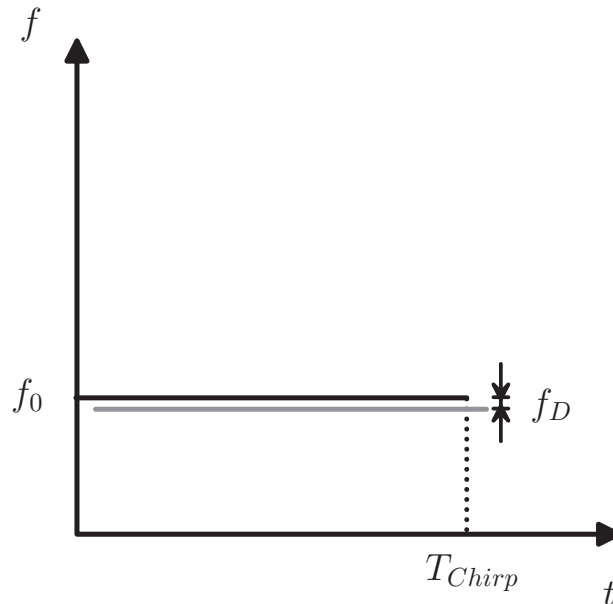


Abbildung 2.9: Sende- (schwarz) und Empfangssignal (grau) beim Dauerstrichradar mit konstanter Sendefrequenz

Bei dieser Art von radarbasierten Geschwindigkeitsmessungen ist allerdings generell zu beachten, dass nur der radiale Anteil  $v$  des tatsächlichen Geschwindigkeitsvektors  $\vec{v}$  erfasst werden kann.

### Geschwindigkeitsauflösung und Eindeutigkeit

Die Geschwindigkeitsauflösung  $\Delta v$  ist abhängig von der möglichen Auflösung  $\Delta f$  der Frequenzmessung.

$$\Delta v = \frac{c}{2f_0} \Delta f \quad (2.30)$$

Mit der Frequenzauflösung der FFT aus Gleichung (2.19) ergibt sich direkt der Zusammenhang zwischen der Messdauer  $T_{Chirp}$  und der erzielbaren Geschwindigkeitsauflösung. Je länger eine Messung andauert, desto besser ist die Auflösung.

$$\Delta v = \frac{c}{2f_0} \frac{1}{T_{Chirp}} \quad (2.31)$$

Die maximal eindeutig messbare Geschwindigkeit hingegen ergibt sich aus der Frequenz, die sich maximal eindeutig durch den verwendeten A/D-Wandler

bestimmen lässt, ohne dass es zu Alias-Effekten kommt. Wird ein Quadraturdemodulator und die Abtastfrequenz  $f_a$  verwendet, ergibt sich die maximal eindeutige Geschwindigkeit zu

$$|v_{max}| = \frac{c}{2f_0} f_a \quad . \quad (2.32)$$

### Beispiel: Dopplerspektrum eines Fußgängers

Wird ein Dauerstrichradar mit der konstanten Sendefrequenz  $f_0 = 24$  GHz und einer Messzeit von  $T_{Chirp} = 31$  ms angenommen, so führt ein Objekt, welches sich mit einer Geschwindigkeit von  $v_1 = 0.9$  m/s vom Sensor wegbewegt, zu einer Dopplerfrequenz von  $f_D = -144$  Hz.

Wenn sich die Reflexionszentren des Objektes mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, so führt dies aufgrund der hohen Geschwindigkeitsauflösung zu einem messbaren Geschwindigkeitsprofil im Echosignal. Für das gewählte Beispiel folgt aus der gegebenen Messzeit eine Geschwindigkeitsauflösung von  $\Delta v = 0.2$  m/s. Abbildung 2.10 zeigt zur Verdeutlichung das Dopplerspektrum eines sich bewegenden Fußgängers, von dem zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten in Höhe von  $v_1 = 1.8$  m/s und  $v_2 = 0.9$  m/s sowie ein stationärer Teil mit  $v_3 = 0$  m/s detektiert werden können.

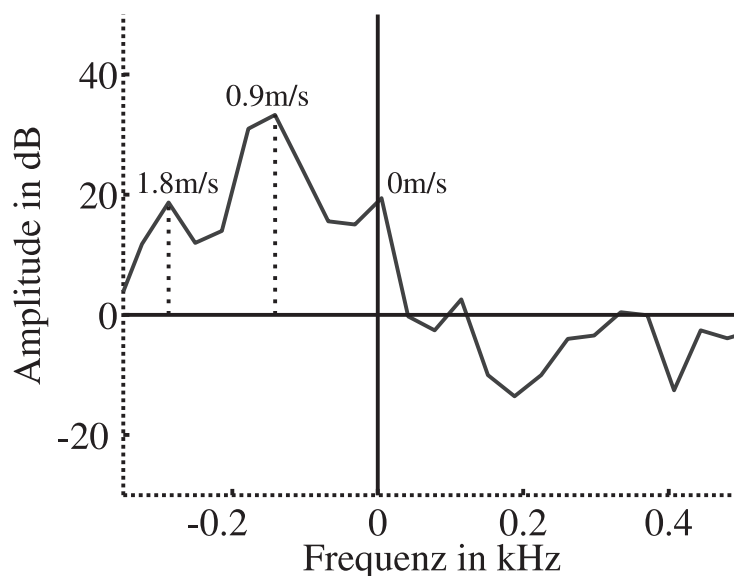


Abbildung 2.10: Dopplerspektrum eines sich bewegenden Fußgängers

## 2.5 Gleichzeitige Messung von Entfernung und Geschwindigkeit

Die bisher vorgestellten Verfahren eignen sich zur Messung von entweder Entfernung oder radialer Geschwindigkeit. Eine Kombination der Messverfahren ermöglicht jedoch auch eine gleichzeitige Messung dieser Größen sowohl bei Puls- als auch bei Dauerstrichsignalformen.

### 2.5.1 Pulsdopplerradar

Werden bei einem Pulsradar für jedes Entfernungstor  $N$  empfangene Werte über der Zeit gespeichert, so kann die Dopplerfrequenz und damit die Geschwindigkeit des Objektes über eine Spektralanalyse ermittelt werden. Diese Analyse wird entsprechend unabhängig für jedes Entfernungstor durchgeführt. Auf diese Weise kann zu jeder gemessenen Zielentfernung auch noch die zugehörige radiale Komponente der Geschwindigkeit bestimmt werden.

Die Geschwindigkeitsauflösung  $\Delta v$  ergibt sich analog zur Darstellung im vorigen Abschnitt bei Verwendung einer FFT über die Messzeit  $T = N \cdot T_R$ , über die die Messwerte für jedes Entfernungstor gespeichert werden.

$$\Delta v = \frac{c}{2f_0} \frac{1}{T} \quad (2.33)$$

Zu beachten ist allerdings, dass eine lange Messzeit eine konstante Bewegung des Zieles während dieser Zeit voraussetzt. Andernfalls wirkt sich die lange Messzeit negativ auf die Schätzung von Position und Geschwindigkeit des Objektes aus. Systembedingt verfügt ein Pulsdopplerradar entsprechend über eine zweidimensionale Auflösungszelle der Größe  $\Delta r \times \Delta v$ .

Neben der Auflösung der Geschwindigkeitsmessung ist für den Entwurf des Systems auch die maximale Geschwindigkeit, die eindeutig bestimmt werden kann, von Interesse. Eine analoge Betrachtung für die maximal eindeutig messbare Entfernung  $r_{max}$  wurde in (2.9) gegeben. Die maximale eindeutige Geschwindigkeit  $v_{max}$  ist ebenfalls abhängig von der verwendeten PRF, also dem Abstand  $T_R$  zwischen den einzelnen gesendeten Pulsen, und ergibt sich aus folgendem Zusammenhang [Roh86]:

$$\begin{aligned} |v_{max}| &= \frac{c}{2f_0} \cdot \frac{1}{T_R} \\ &= \frac{c}{2f_0} \cdot \text{PRF} \quad . \end{aligned} \quad (2.34)$$

Im Gegensatz zu Anwendungen für den Luftfahrtbereich können die Systemparameter für Automobilanwendungen derart gewählt werden, dass sich eine eindeutige Messung von sowohl Entfernung als auch Geschwindigkeit ergibt. Abbildung 2.11 zeigt zur Verdeutlichung den funktionalen Zusammenhang der maximal eindeutigen Geschwindigkeit  $v_{max}$  in Abhängigkeit von der maximal eindeutigen Entfernung  $r_{max}$ .

$$v_{max}(r_{max}) = \frac{c^2}{4f_0} \cdot \frac{1}{r_{max}} \quad (2.35)$$

Das graue Rechteck in der linken unteren Ecke der Abbildung zeigt den für die Automobilradartechnik relevanten Wertebereich von Entfernungen und Geschwindigkeiten.

### Beispiel zur Eindeutigkeit der Messung

Wird ein Pulsdopplerradar mit einer Messzeit von  $T = 70$  ms und einer Sendefrequenz von 24 GHz betrachtet, so beträgt die Geschwindigkeitsauflösung nach Gleichung (2.33)  $\Delta v = 0.09$  m/s. Der zugehörige Unterschied in den Dopplerrfrequenzen liegt dabei nach (2.24) bei  $\Delta f_D = 14.3$  Hz. Werden im Laufe einer Messung  $N = 2048$  Pulse gesendet, ergibt sich eine Pulswiederholrate von PRF = 29 kHz, was einer maximal eindeutigen Entfernung von  $r_{max} = 5$  km und einer maximal eindeutigen Geschwindigkeit von  $v_{max} = 183$  m/s entspricht. In Abbildung 2.11 ist dieser Wert als kleiner Kreis auf der Kurve dargestellt.

### Beispiel: Vermessung eines Fußgängers

Wird eine sich bewegende Person mit Hilfe eines Pulsdopplerradarsensors über einem Zeitraum von 7 s vermessen [RFR06], so ergibt sich exemplarisch das in Abbildung 2.12 dargestellte Messergebnis. Die Person entfernt sich dabei mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $v = 1.4$  m/s in radialer Richtung vom Sensor. Unter Berücksichtigung der Parameter ( $T_P = 500$  ps,  $T = 70$  ms) des verwendeten Sensors entstehen Auflösungszellen der Größe  $7.6$  cm  $\times$   $0.09$  m/s. Der Grauwert in der Darstellung gibt dabei die reflektierte Leistung wieder. Der in der Messung enthaltene zeitliche Bewegungsverlauf kann aufgrund der konstanten Geschwindigkeit indirekt aus der Trajektorie der Messwerte über der Entfernung abgelesen werden. Deutlich erkennbar sind jedoch

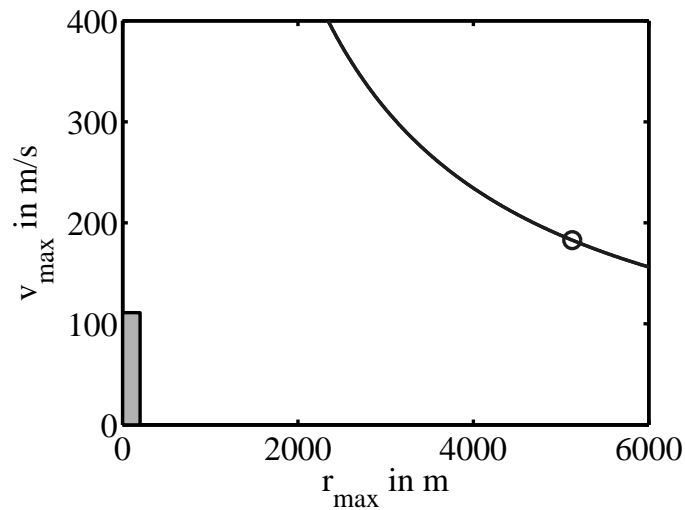


Abbildung 2.11: Darstellung des Zusammenhangs zwischen maximal eindeutiger Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung und der für Automobilradaranwendungen relevante Bereich (grauer Kasten) bei einem Pulsdopplerradar

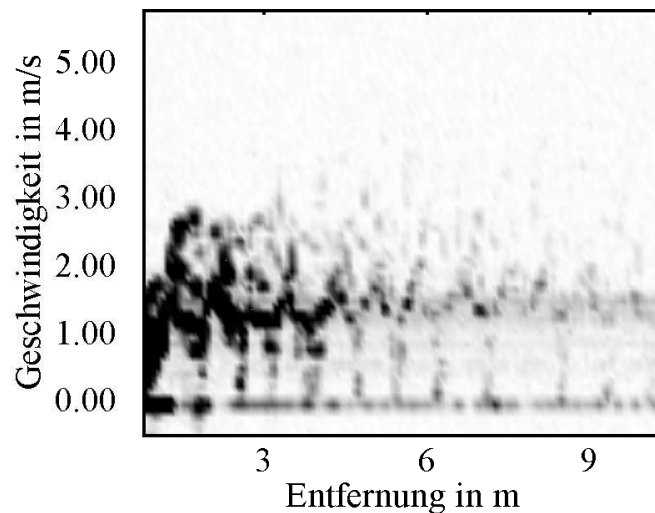


Abbildung 2.12: Darstellung der unterschiedlichen messbaren Geschwindigkeiten eines gehenden Fußgängers, dargestellt in einem zeitlich überlagerten RV-Diagramm

die vielfältigen Geschwindigkeiten, die bei der Beobachtung einer Person gemessen werden können. In einem Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm (RV-Diagramm) erzeugen die Messwerte eine Struktur, die sich mit den theoretischen Betrachtungen in Kapitel 3.4 deckt. So lassen sich neben der mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit auch Messwerte vom Stand- und vom Schwungbein erkennen. Die senkrechten Linien unterschiedlicher Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 0 m/s – 1.5 m/s bei konstanter Entfernung zeigen dabei das Standbein und entsprechend die Schrittlänge. Die entstehenden Muster werden auch als Geschwindigkeits- oder Mikrodoppler-Profile bezeichnet [DG03, NRW03, Che05, CLHW06].

## 2.5.2 Dauerstrichradar

Wird ein Dauerstrichradar eingesetzt, führt der DOPPLER-Effekt bei bewegten Zielen zu einer zusätzlichen geschwindigkeitsabhängigen Komponente in der gemessenen entfernungsabhängigen Differenzfrequenz.

$$\begin{aligned} f_M &= f_R + f_D & (2.36) \\ &= -2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r(t) - 2 \frac{f_s(t)}{c} \cdot v \end{aligned}$$

### Frequenzumtastende Signalform

Ist lediglich die Auswirkung der Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt von Interesse, so kann ein Signal mit konstanter Frequenz ( $f_{hub} = 0$ ) gesendet werden. Die gemessene Differenzfrequenz  $f_M$  ist in diesem Fall direkt proportional zur Geschwindigkeit des Zieles  $v$ . Um dennoch eine Messung der Entfernung vornehmen zu können, kann anstelle einer konstanten Frequenz eine Folge von leicht unterschiedlichen Frequenzen gesendet werden, wie dies in Abbildung 2.13(a) dargestellt ist. Eine derartige Sendesignalfolge wird als frequenzumtastende Radarsignalfolge (engl. frequency shift keying (FSK)) bezeichnet. Der Frequenzversatz  $f_{Shift}$  orientiert sich dabei an der Entfernung  $r_{max}$ , die maximal eindeutig gemessen werden soll und ergibt sich aus folgendem Zusammenhang [Men99]:

$$f_{Shift} = \frac{c}{2 \cdot r_{max}} \quad . \quad (2.37)$$

Für die Auswertung wird das abgetastete Empfangssignal in zwei separate Signalfolgen aufgeteilt, die jeweils nur Signalanteile der nicht verschobenen

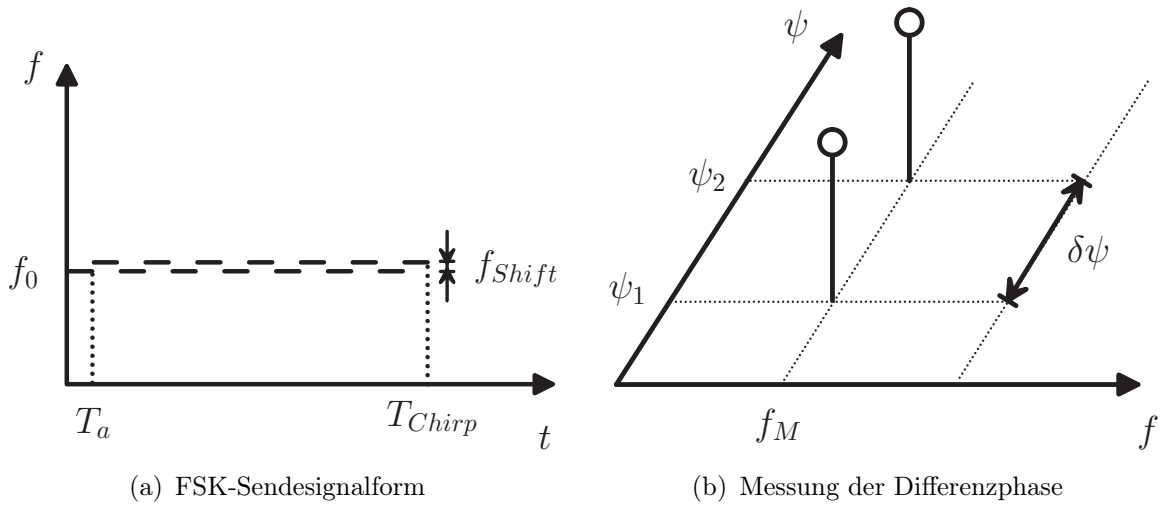


Abbildung 2.13: Messung mit einem FSK-Dauerstrichradar

$s_1(n) = s_e((2n + 1) \cdot T_A)$  bzw. der verschobenen  $s_2(n) = s_e(2n \cdot T_A)$  Trägerfrequenz enthalten. Aufgrund der nur leicht unterschiedlichen Frequenzen kann von einer nahezu gleichen Dopplerverschiebung der beiden Signale ausgegangen werden, die sich jedoch in ihrer Phasenlage unterscheiden (vgl. Abb. 2.13(b)). Die gesuchte Entfernung des Zieles  $r$  ergibt sich aus der Differenz  $\delta\psi$  dieser Phasenlagen [Lüb05].

$$\delta\psi = 2\pi f_{Shift} \cdot \tau \quad (2.38)$$

$$= 4\pi f_{Shift}/c \cdot r$$

$$\Rightarrow r = \frac{c}{4\pi f_{Shift}} \cdot \delta\psi \quad (2.39)$$

Diese Art der Messung verfügt entsprechend über eine Geschwindigkeitsauflösung und eine Entfernungsmessung, nicht jedoch über eine Entfernungsauflösung.

### Linear frequenzmodulierte Signalform

Wird ein Dauerstrichradar mit einer linear frequenzmodulierten Signalform eingesetzt, so ergibt sich nach Gleichung (2.36) eine entfernungs- und geschwindigkeitsabhängige Verschiebung des empfangenen Signals, wie in Abbildung 2.14(a) dargestellt.

Für eine Spektralanalyse zur Bestimmung der sich ergebenden Differenzfrequenz  $f_M$  wird davon ausgegangen, dass diese für die Dauer eines Chirps

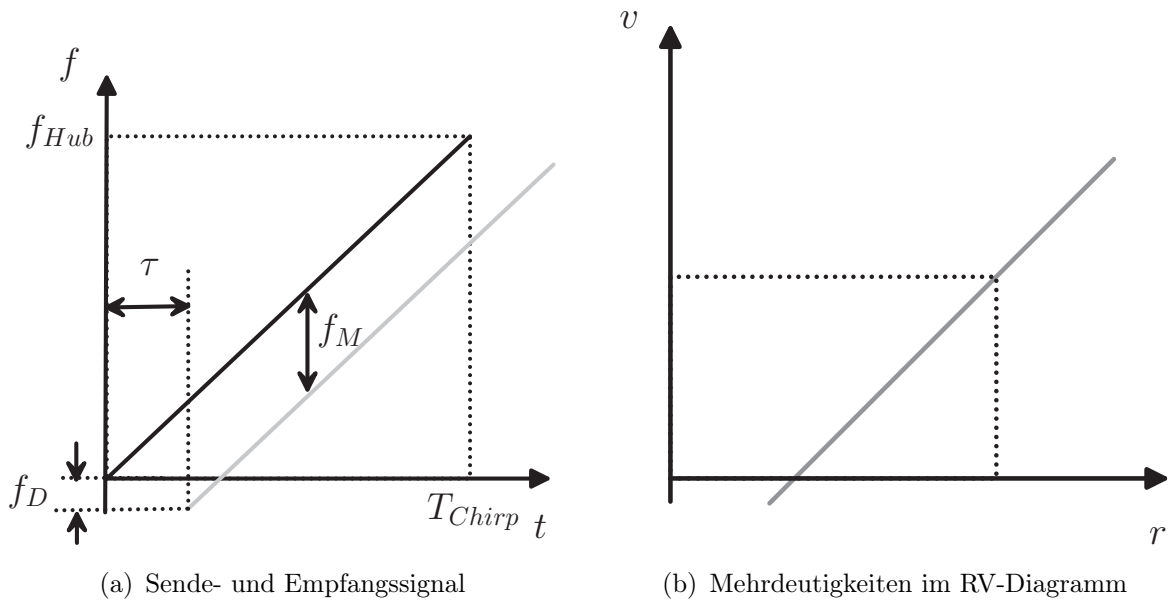


Abbildung 2.14: Sende- (schwarz) und Empfangssignale (grau) eines LFM-Dauerstrichradars (a) und Veranschaulichung der Mehrdeutigkeit der kombinierten Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung

konstant bleibt. In der allgemeinen Beschreibung sind jedoch zwei zeitabhängige Komponenten enthalten. Zum einen ändert sich die Entfernung des bewegten Zieles über der Zeit und damit die entfernungsabhängige Komponente  $f_R(t)$  der Differenzfrequenz, zum anderen ist die gemessene Doppler-Frequenz  $f_D(t)$  abhängig von der momentanen Sendefrequenz und besitzt bei einem Chirpsignal entsprechend eine lineare Zeitabhängigkeit. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird in den folgenden Darstellungen von einem Sendesignal mit ansteigender Frequenz (Upchirp) ausgegangen.

$$f_M(t) = \underbrace{-2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot \mathbf{r}(\mathbf{t})}_{f_R(t)} \underbrace{- 2 \frac{\mathbf{f}_s(\mathbf{t})}{c} \cdot v}_{f_D(t)} \quad (2.40)$$

$$= -2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot (r + \mathbf{v} \cdot \mathbf{t}) - 2 \frac{f_0 + (\mathbf{f}_{Hub} / \mathbf{T}_{Chirp}) \cdot \mathbf{t}}{c} \cdot v \quad (2.41)$$

$$= \underbrace{\left( -2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r - 2 \frac{f_0}{c} \cdot v \right)}_{\text{const.}} - 4 \frac{\mathbf{f}_{Hub} \cdot \mathbf{v}}{c \cdot \mathbf{T}_{Chirp}} \cdot \mathbf{t} \quad (2.42)$$

Die maximale spektrale Aufweitung  $\mathcal{A}_f$  von  $f_M(t)$ , also die Differenz zwischen minimaler und maximaler Differenzfrequenz, ist abhängig von der maximal auftretenden Geschwindigkeit  $v_{max}$  und ergibt sich aus

$$\mathcal{A}_f = |f_M(T_{Chirp}) - f_M(0\text{ s})| \quad (2.43)$$

$$= 4 \cdot \frac{f_{Hub}}{c} \cdot v_{max} \quad . \quad (2.44)$$

Damit sich der Matched-Filter-Empfänger rechenefizient über eine FFT realisieren lässt, darf diese spektrale Aufweitung nur einen sehr kleinen Wert annehmen. Eine Richtgröße hierfür ist die doppelte Frequenzauflösung der FFT.

$$\mathcal{A}_f < 2\Delta f \quad (2.45)$$

Entscheidend für die korrekte Dimensionierung eines LFM CW-Radarsystems ist damit das sich aus Messzeit und Frequenzhub ergebende Zeit-Bandbreite-Produkt in Abhängigkeit der maximal zu erwartenden Geschwindigkeit  $v_{max}$  (vgl. Abb. 2.15(a)).

$$2 \cdot f_{Hub} \cdot T_{Chirp} < \frac{c}{v_{max}} \quad (2.46)$$

Ist diese Ungleichung erfüllt, so ergibt sich bei der Spektralschätzung des Signals  $f_M(t)$  ein Verlust von maximal 1 dB im Vergleich zu einem Signal mit der konstanten mittleren Frequenz  $f_M(T_{Chirp}/2)$ .

Wird als Beispiel eine 24 GHz-Sensorkonfiguration mit  $T_{Chirp} = 19\text{ ms}$  und  $f_{Hub} = 100\text{ MHz}$  angenommen, ergeben sich für ein Ziel in 40 m Entfernung mit einer Geschwindigkeit von  $-80\text{ m/s}$  die in Abbildung 2.15(b) dargestellten Spektralschätzungen und eine spektrale Aufweitung von

$$\mathcal{A}_f = 11.5\text{ kHz} - 11.4\text{ kHz} \quad (2.47)$$

$$= 0.1\text{ kHz} \quad . \quad (2.48)$$

Im Vergleich zu den gestrichelt dargestellten Spektrallinien des Chirpsignals ist als durchgezogene Linie bei einer Frequenz von  $f = 11.45\text{ kHz}$  die Spektralschätzung für ein Sendesignal mit konstanter Sendefrequenz angegeben. Der Leistungsunterschied der beiden Maxima beträgt bei diesem Beispiel genau 1 dB.

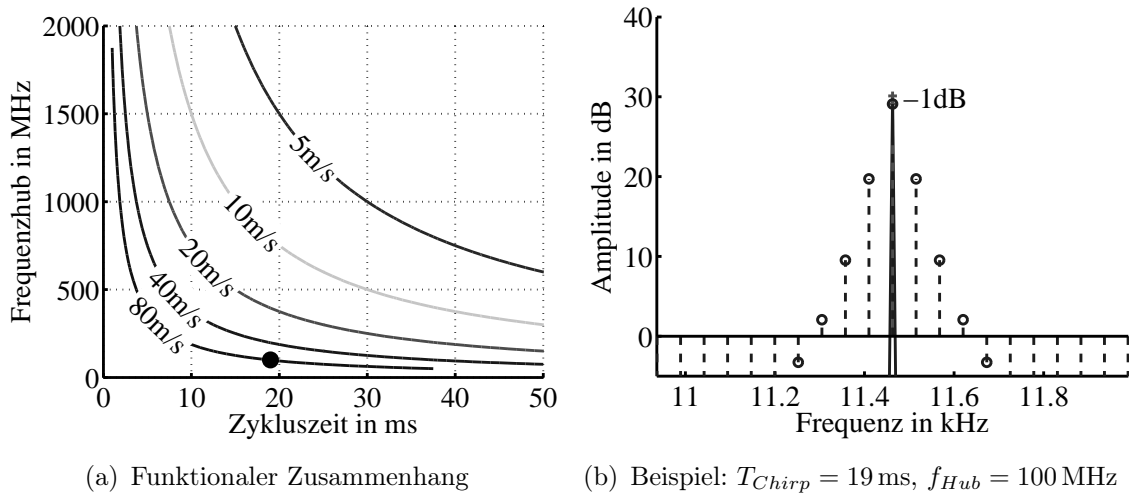


Abbildung 2.15: Angabe der Geschwindigkeiten, bei denen die spektrale Aufweitung kleiner ist als die halbe Frequenzauflösung in Abhängigkeit der Systemparameter  $T_{Chirp}$  und  $f_{Hub}$

Wird von einer korrekt dimensionierten Signalform ausgegangen, so beträgt die im Empfangssignal festgestellte Frequenz näherungsweise

$$\bar{f}_M = f_M(T_{Chirp}/2) \quad (2.49)$$

$$= -2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r - 2 \frac{f_0 + f_{Hub}}{c} \cdot v \quad (2.50)$$

$$\approx -2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r - 2 \frac{f_0}{c} \cdot v \quad (2.51)$$

Der resultierende Wert für die gemessene Differenzfrequenz  $f_M$  ist jetzt mehrdeutig hinsichtlich Entfernung  $r$  und Geschwindigkeit  $v$  des Zieles. Diese Mehrdeutigkeit lässt sich als Gerade in einer RV-Ebene veranschaulichen (vgl. Abb. 2.14(b)). Zur eindeutigen Bestimmung von Entfernung und Geschwindigkeit kann eine Folge von Chirps mit unterschiedlichen Steigungen der Frequenzrampen eingesetzt werden, wie in Abbildung 2.16 dargestellt.

Auf diese Weise entsteht ein lineares Gleichungssystem zur eindeutigen Bestimmung der gesuchten Größen. Jede der gegebenen Gleichungen beschreibt eine Gerade in der RV-Ebene. Die gesuchten Messwerte ergeben sich dann aus dem Schnittpunkt der Geraden bzw. aus der Lösung eines linearen Gleichungssystems.

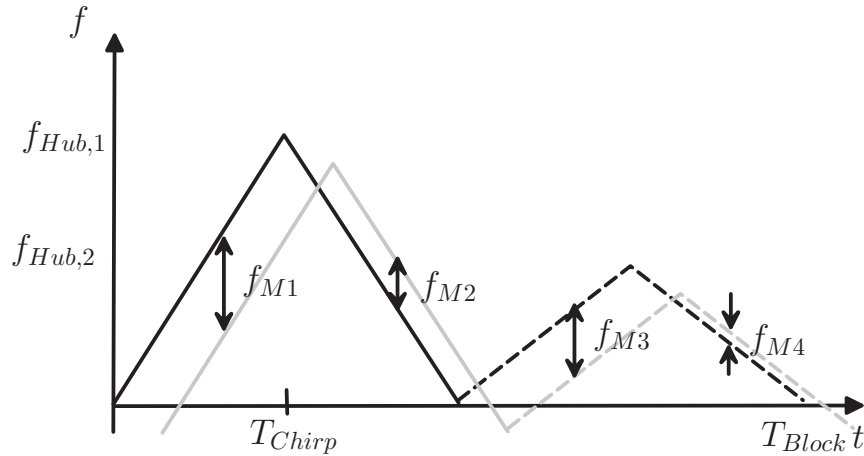


Abbildung 2.16: Sende- (schwarz) und Empfangssignale (grau) eines LFM-Dauerstrichradars mit vier Chirps

$$\vec{f}_M = \mathbf{A} \cdot \vec{m} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} f_{M1} \\ f_{M2} \\ f_{M3} \\ f_{M4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ -a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \\ -a_3 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Dabei gelten für die Einträge in der Matrix die Zusammenhänge

$$a_i = -2 \frac{f_{Hub,i}}{c \cdot T_{Chirp}} \quad (2.54)$$

und

$$b_i = -2 \frac{f_0}{c} \quad (2.55)$$

Theoretisch reicht auch ein System mit zwei Gleichungen zur Bestimmung der beiden gesuchten Größen  $r$  und  $v$  aus. Trotzdem wird häufig eine größere Anzahl von Chirps verwendet, um in Situationen mit mehreren Objekten eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Frequenzen zu ermöglichen. Abbildung 2.17 zeigt dabei schematisch das Vorgehen. Angenommen wird eine Situation mit zwei Zielen und den zugehörigen Messwerten  $\vec{m}_1 = [r_1, v_1]^T$  bzw.  $\vec{m}_2 = [r_2, v_2]^T$ . Besteht die Sendesignalfolge nur aus zwei Chirps, so ergeben sich vier Geraden entsprechend der vier gemessenen Frequenzen (durchgezogene Linien).

Aus den vier Geraden resultieren jedoch auch vier Schnittpunkte. Neben den zwei tatsächlichen Zielen treten zusätzlich noch zwei sogenannte Geisterziele auf. Beim Einsatz von vier Chirps ergeben sich entsprechend acht Messwerte bzw. Geraden in der RV-Ebene mit denen sich die beiden tatsächlichen Ziele identifizieren lassen.

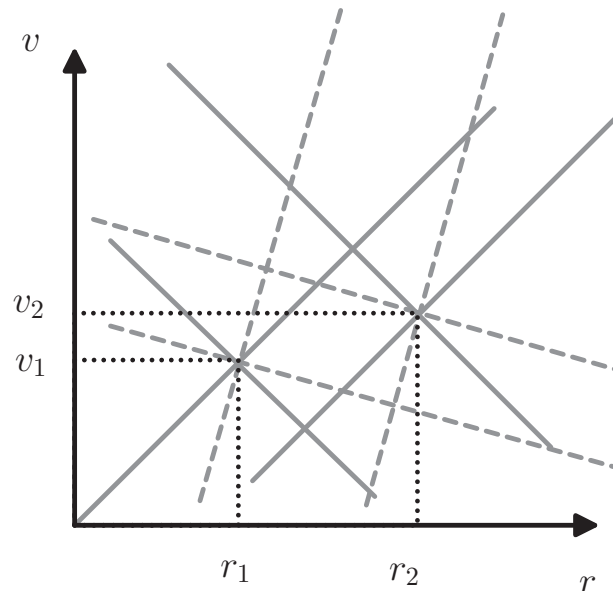


Abbildung 2.17: Auflösung der Mehrdeutigkeiten in Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung bei einer 4-Chirp-LFMCW-Signalform

### Kombination von linear frequenzmodulierten und frequenzumtastenden Signalformen

Anstelle der verschiedenen aufeinander folgenden Chirps ist es auch möglich, zwei Chirps ineinander zu *verweben*. Statt kontinuierliche Rampen zu senden werden zwei Rampen quasi gleichzeitig gesendet, die leicht in der Trägerfrequenz verschoben sind (vgl. Abb. 2.18(a)). Der Frequenzversatz ist dabei kleiner als die Frequenzauflösung des Systems, so dass sich für beide Rampen die gleichen gemessenen Frequenzen ergeben. Zusätzlich lässt sich jedoch noch die Phasendifferenz zwischen den beiden empfangenen Signalen auswerten [MR00, Mei01]. Aufgrund des geringen Frequenzversatzes  $f_{Shift}$  hat das eine Signal eine in Abhängigkeit der Geschwindigkeit verschobene Phase  $\delta\psi$ . Diese Information kann wiederum als Gerade in der RV-Ebene interpretiert werden und so zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten genutzt werden, wie in Abbildung 2.18(b) verdeutlicht ist.

$$\delta\psi \approx -2\pi \left( \frac{2f_{Shift}}{c} \cdot r + \frac{2(f_0 + \Lambda f_{Hub} + f_{Shift})}{f_a \cdot c} \cdot v \right) \quad (2.56)$$

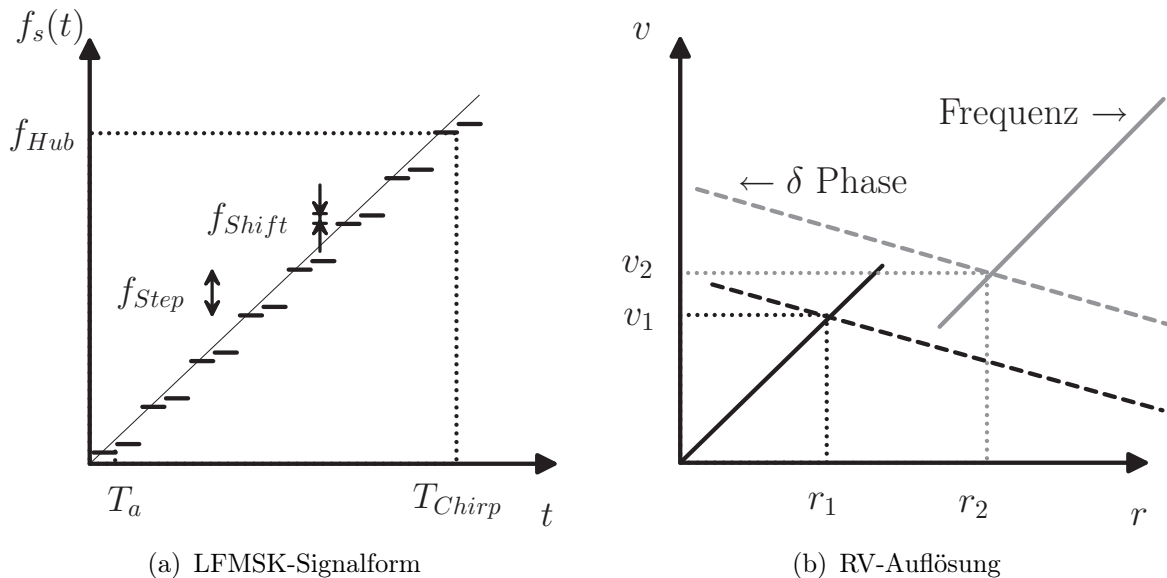


Abbildung 2.18: Signalform eines LFMSK-Dauerstrichradars sowie schematische Darstellung der Auflösung von RV-Mehrdeutigkeiten

Der Wert des Frequenzversatzes  $f_{Shift}$  ist entsprechend der maximal zu erwartenden Zielentfernung sowie Geschwindigkeit analog zur Theorie der frequenzumtastenden Radarsignalform zu wählen. Ein typischer Wert für einen solchen Frequenzversatz liegt bei  $f_{Shift} = 1$  MHz, woraus für stationäre Ziele ein Wert von  $r_{max} = 150$  m resultiert.

Der wesentliche Vorteil in der Phasenauswertung liegt in der gegebenen eindeutigen Zuordnung der gemessenen Phasendifferenz zu einer Frequenz. Auf diese Weise lassen sich Geisterziele sehr wirkungsvoll vermeiden [RFMM04]. Durch die Analogie zur FSK-Signalform, aus der diese verwobene Signalform entwickelt wurde, wird sie auch als LFMSK (engl. linear frequency modulated shift keying) bezeichnet.

### Beispiel: Messung der Geschwindigkeit eines komplexen Objektes

Abbildung 2.19 zeigt das Spektrum des Empfangssignals bei der Vermessung eines gehenden Fußgängers in einer Entfernung von  $r \approx 12$  m. Seine Geschwindigkeit im Moment der Messung beträgt 1 m/s. Aufgrund der hohen Auflösung

der Geschwindigkeitsmessung von  $\Delta v = 0.2 \text{ m/s}$  lassen sich deutlich verschiedene Geschwindigkeiten aus dem Bewegungsverlauf des Fußgängers erkennen. Im Wesentlichen wurden drei einzelne Geschwindigkeiten detektiert. Die aktuelle Geschwindigkeit des Rumpfes von  $v_1 = 0.9 \text{ m/s}$  sowie ein stationärer Teil mit  $v_2 = 0 \text{ m/s}$  und ein schnell bewegter Teil von  $v_3 = 1.8 \text{ m/s}$ . Im Vergleich zu der Abbildung des Dopplerspektrums des Fußgängers in Abbildung 2.10 fällt auf, dass das Spektrum aufgrund der Entfernungsabhängigkeit der Messung um etwa  $500 \text{ Hz}$  verschoben erscheint.

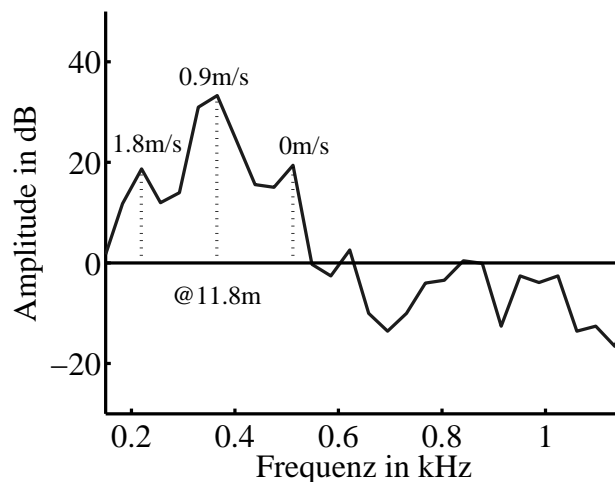


Abbildung 2.19: Spektrum des Empfangssignals bei der Messung einer Person, die sich in der Entfernung  $12 \text{ m}$  mit der mittleren Geschwindigkeit  $1 \text{ m/s}$  bewegt

### Auflösung und Eindeutigkeit

Die Signalauswertung bei einem Dauerstrichradar erfolgt unabhängig von der konkret eingesetzten Signalform (CW, FSK, LFM CW oder LFMSK) immer über eine Spektralanalyse des Empfangssignals mit anschließender Detektion von dominanten Frequenzen. Diese enthalten dann je nach verwendeter Signalform Informationen über die Entfernung und/oder die Geschwindigkeit der beobachteten Ziele in separierter oder überlagerter Form. Bedingt durch die Spektralanalyse verfügt die Messung mit einem Dauerstrichradar nur über eine einzige Auflösung, nämlich eine Frequenzauflösung, aus der alle weiteren Messgrößen abgeleitet werden können. Selbst eine zusätzliche Phasenauswertung bei den FSK- und LFMSK-Signalformen fügt der Messung nur eine zusätzliche Messgröße, nicht jedoch eine zusätzliche Auflösung, hinzu.

Im Gegensatz zum Pulsdopplerradar liegen bei gleichzeitiger Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung nur eindimensionale Auflösungszellen vor. Bei einer FFT-basierten Spektralschätzung ergibt sich die Frequenzauflösung in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz  $f_a$  und der Anzahl der berücksichtigten Werte  $N$  nach Gleichung (2.19) zu

$$\Delta f_{FFT} = \frac{f_a}{N} \quad (2.57)$$

Bedingt durch die spektrale Auswertung ergibt sich der zur Verfügung stehende Eindeutigkeitsbereich aus den auftretenden maximalen Signalfrequenzen ( $f_{M,max}$  und  $f_{M,min}$ ) sowie der maximal eindeutig zu bestimmenden Frequenz über das Abtasttheorem [Fli91, OS99] und damit aus der verwendeten Abtastfrequenz  $f_a$ .

$$(f_{M,max} - f_{M,min}) \stackrel{!}{<} f_a \quad (2.58)$$

$$f_{M,max} = 2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r_{max} + 2 \frac{f_0 + f_{Hub}}{c} \cdot v_{max} \quad (2.59)$$

$$f_{M,min} = 2 \frac{f_{Hub}}{c \cdot T_{Chirp}} \cdot r_{min} + 2 \frac{f_0 + f_{Hub}}{c} \cdot v_{min} \quad (2.60)$$

Die Abtastfrequenz muss entsprechend so gewählt werden, dass es nicht durch Aliaseffekte zu Mehrdeutigkeiten innerhalb der Bestimmung von Entfernung und Geschwindigkeit kommen kann. Abbildung 2.20 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen der benötigten Signalbandbreite und der sich aus der Abtastung ergebenden Periodizität des Spektrums grafisch.

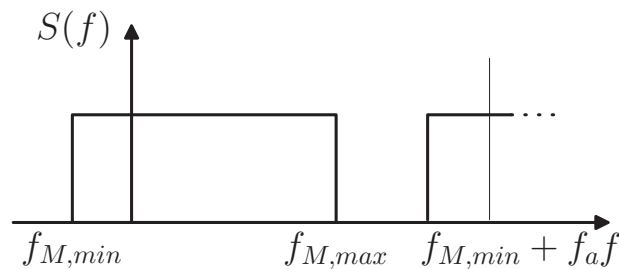


Abbildung 2.20: Verdeutlichung der vorhandenen Signalbandbreite und der sich aus der Abtastung ergebenden Periodizität des Spektrums

Eine Verkoppelung der Eindeutigkeitsbereiche für Entfernung und Geschwindigkeit wie beim Pulsdopplerradar (vgl. Kap. 2.5.1) existiert folglich beim Dauerstrichradar nicht.

## 2.6 Messung des Azimuts

Neben der Messung von Entfernung und Geschwindigkeit zwischen Objekt und Sensor ist auch die Kenntnis des Azimuts, also der Richtung in der sich das Objekt befindet, von Interesse. Im Gegensatz zum Winkel in der Ebene (Azimut) kann auch der Winkel über der Ebene (Elevation) angegeben werden, der jedoch für das betrachtete Anwendungsgebiet keine weitere Bedeutung hat. Damit ein Ziel überhaupt detektiert werden kann, muss es sich in der Sende- und der Empfangskeule des Sensors befinden. Die Breite dieser Keulen, und damit die Richtwirkung der Antenne, ist durch ihre Apertur gegeben [Ung94]. Je breiter eine Antenne ist, desto größer ist ihre Richtwirkung. Die Wahl der zu verwendenden Keulenbreite richtet sich nach der Anwendung. So besitzen ACC-Systeme eine schmale Keule und Sensoren zur Überwachung des Nahbereiches meist eine sehr breite Keule.

Alle zum jetzigen Zeitpunkt in der Automobilradartechnik eingesetzten Sensoren besitzen die Fähigkeit zur Winkelmessung jedoch nicht zur Winkelauflösung.

### 2.6.1 Geometrische Betrachtungen zum Winkel

Eine vollständige Beschreibung der Position eines Objektes relativ zur Position des Sensors in Polarkoordinaten erfordert neben der Angabe der Entfernung  $r$  auch die Angabe des Zielwinkels  $\alpha$  (vgl. Abb. 2.21). Bei bekannter Position in kartesischen Koordinaten ergibt sich dieser Winkel aus

$$\alpha = \arctan \left( \frac{y_o - y_s}{x_o - x_s} \right) \quad . \quad (2.61)$$

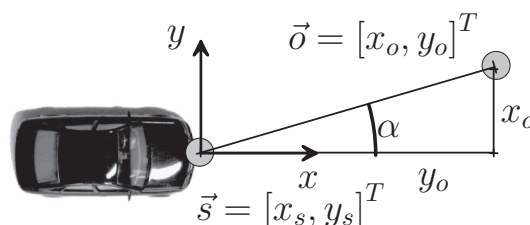


Abbildung 2.21: Geometrische Zusammenhänge zwischen der Lage des Objektes und der Position eines möglichen Sensors

## 2.6.2 Trilateration

Stehen mehrere Sensoren zur Verfügung, welche die Entfernung zum Objekt von unterschiedlichen Positionen aus vermessen, so kann die Bestimmung der tatsächlichen Zielposition in der Ebene über eine Schnittpunktbildung erfolgen [Tor84]. Dieses Verfahren kann entsprechend der Darstellung in Abbildung 2.22 sehr leicht grafisch nachvollzogen werden. Wenn jeder Sensor von seiner Position aus eine Entfernung bestimmt, so ist die Position des Objektes durch einen Kreisbogen bestimmt. Bei Verwendung von vier Sensoren an unterschiedlichen Orten ergeben sich entsprechend vier Kreisbögen und damit die Position des Objektes im resultierenden Schnittpunkt.

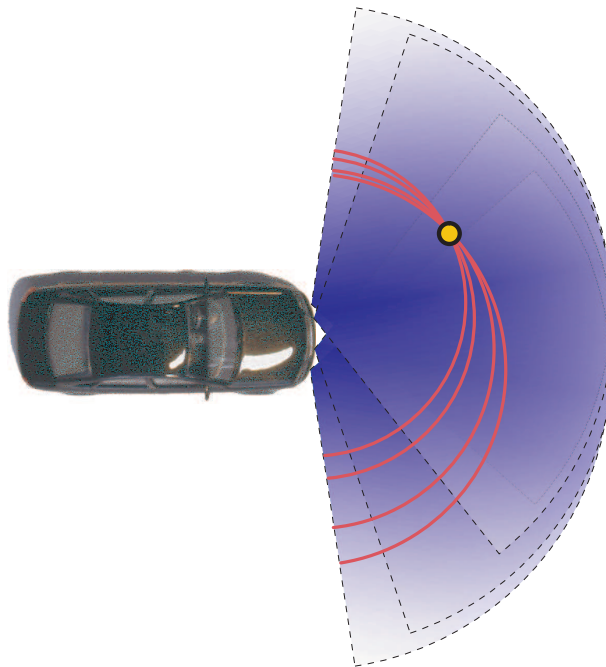


Abbildung 2.22: Darstellung der Winkelmessung über Trilateration, d.h. durch Schnittpunktbildung mehrerer gemessener Radien

Da die Entfernungsmesswerte aber in aller Regeln nicht fehlerfrei sind, ergibt sich bei mehr als zwei Kreisbögen kein eindeutiger Schnittpunkt, sondern vielmehr eine Schnittfläche. Die Größe dieser Schnittfläche ermöglicht eine Schätzung der Güte der Entfernungsmessung und der damit verbundenen Schätzung der Objektposition. Liegen nur Messwerte von zwei Sensoren und damit ein eindeutiger Schnittpunkt vor, so heißt dies nicht, dass kein Messfehler vorliegt, sondern dass keine Aussage über den Fehler getroffen werden kann.

Die Verwendung von mehr als nur zwei Sensoren ist noch aus einem weiteren Grund erforderlich. Befinden sich mehr als nur ein Ziel im Erfassungsbereich

der Sensoren, so können sich neben den tatsächlichen Schnittpunkten an den Positionen der Objekte auch Geisterziele ergeben. Diese wiederum können bei Verwendung von redundanten Messungen identifiziert und entsprechend unterdrückt werden. Das Verfahren hierbei entspricht der im Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Methode zur Unterdrückung von Geisterzielen bei der Bestimmung von Entfernung und Geschwindigkeit mit einem Dauerstrichradar in Mehrzielsituationen. Um bei einer Trilateration eine hohe Genauigkeit zu erreichen, stellt dieses Verfahren sehr hohe Anforderungen an Genauigkeit der Entfernungsmessung im Zentimeterbereich. Praktisch geht diese Forderung einher mit einer hohen Bandbreite der Sensoren. In den zurzeit praktisch eingesetzten Sensoren liegt diese bei  $B = 1$  GHz, was einer Auflösung von  $\Delta r = 15$  cm und der damit einhergehenden hohen Genauigkeit im Zentimeterbereich entspricht. Zum Einsatz können hier sowohl Pulsradare [Klo02] als auch Dauerstrichradare [Lüb05] kommen.

Mathematisch entspricht die Trilateration einer nichtlinearen Optimierungsaufgabe [Foy76]. Der Zusammenhang zwischen Zielradien  $r_i$  und den Positionen von Sensor  $\vec{s}_i$  und Ziel  $\vec{o}$  ist über den folgenden nichtlinearen Zusammenhang gegeben. Mit den Definitionen für die Position des betrachteten Zieles

$$\vec{o} = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

und für die Position des  $i$ -ten Sensors

$$\vec{s}_i = \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

folgt aus einfachen geometrischen Zusammenhängen für den Radius

$$r_i = f(\vec{o}) = \sqrt{(x_o - x_{si})^2 + (y_o - y_{si})^2} \quad . \quad (2.64)$$

Werden die Radien  $r_i$  in Abhängigkeit der betrachteten Sensoren  $\vec{s}_i$  in einem Vektor  $\vec{r}$  zusammengefasst, so kann das nichtlineare Gleichungssystem

$$\vec{m} = \vec{r}(\vec{o}) + \vec{e} \quad (2.65)$$

aufgestellt werden. Der Term  $\vec{e}$  berücksichtigt dabei einen bei der Messung auftretenden additiven Fehler. Entsprechend steht  $\vec{m}$  für die tatsächlichen fehlerbehafteten Messwerte  $m_i$  der Radien  $r_i$  der unterschiedlichen Sensoren. Die Aufgabe ist es, bei gegebenen Messwerten  $\vec{m}$  und bekannten Positionen

der Sensoren  $\vec{s}_i$  eine Schätzung  $\hat{\vec{o}}$  der Position des Zieles  $\vec{o}$  zu bestimmen, so dass der mittlere quadratische Fehler  $E_2(\vec{o})$  minimal wird.

$$E_2(\vec{o}) = |\vec{m} - \vec{r}(\vec{o})|^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [m_i - r_i(\vec{o})]^2 \quad (2.66)$$

$$\hat{\vec{o}} = \arg \min E_2(\vec{o}) \quad (2.67)$$

Hierzu wird das Gleichungssystem zunächst in einem Arbeitspunkt  $\vec{o}_k$  nach der TAYLORSchen Reihe linearisiert [BSMM97, S.378]. Dies ergibt das linearisierte Gleichungssystem

$$\delta \vec{m} = \mathbf{J}_k \delta \vec{o}_k + \tilde{\vec{e}} \quad (2.68)$$

mit der JACOBI-Matrix  $\mathbf{J}_k$  der nichtlinearen Funktion  $f(\vec{o})$  an der Stelle  $\vec{o}_k$  und den jeweiligen Einträgen in der Matrix entsprechend den partiellen Ableitungen (vgl. Tab. 2.1)

$$\mathbf{J}_{(i,1)} := \left. \frac{\partial r_i}{\partial x} \right|_{\vec{o}_k} = \left. \frac{(x_o - x_{si})}{\sqrt{(x_o - x_{si})^2 + (y_o - y_{si})^2}} \right|_{\vec{o}_k} \quad (2.69)$$

$$\mathbf{J}_{(i,2)} := \left. \frac{\partial r_i}{\partial y} \right|_{\vec{o}_k} = \left. \frac{(y_o - y_{si})}{\sqrt{(x_o - x_{si})^2 + (y_o - y_{si})^2}} \right|_{\vec{o}_k} \quad (2.70)$$

Unter Annahme einer bekannten Näherungslösung  $\vec{o}_k$  und den sich daraus mit (2.64) ergebenden Radien  $\vec{r}_k$  kann das linearisierte System (2.68) über die Normalengleichungen

$$\delta \hat{\vec{o}}_k = (\mathbf{J}_k^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_k)^{-1} \mathbf{J}_k \mathbf{R}^{-1} \delta \vec{r}_k \quad (2.71)$$

gelöst werden [Lof90, May79]. Die Matrix  $\mathbf{R}$  bezeichnet dabei die Kovarianzmatrix der Radienmessungen und wird zur Gewichtung der einzelnen Messwerte eingesetzt. Die Lösung  $\delta \hat{\vec{o}}_k$  wird zur Korrektur der Näherungslösung  $\vec{o}_k$  herangezogen

$$\vec{o}_{k+1} = \vec{o}_k + \delta \hat{\vec{o}}_k \quad (2.72)$$

und mit der korrigierten Lösung  $\vec{o}_{k+1}$  erneut eine Parameterschätzung vorgenommen. Auf diese Weise ergibt sich ein iteratives Lösungsverfahren (GAUSS-NEWTON-Verfahren), über welches eine Lösung des nichtlinearen Problems (2.65) erreicht werden kann. Als Abbruchkriterium dient eine Fehlerabschätzung der Form

$$\delta \hat{\vec{o}} \leq \varepsilon \quad (2.73)$$

mit einer geeignet zu wählenden Fehlerschwelle  $\varepsilon$ . In praktischen Realisierungen des Algorithmus sollte anstelle der Lösung über die Normalengleichungen eine Singulärwertzerlegung (engl. singular value decomposition (SVD)) verwendet werden, die eine bessere numerische Stabilität gewährleistet [MV93, SK97].

Zur Bestimmung der beiden gesuchten Größen (x- und y-Position) ist die Kenntnis zweier gemessener Radien notwendig. Sofern mehr als zwei Radien zur Verfügung stehen, verbessert sich die Schätzung. Die Kenntnis zweier Radien ist allerdings nicht hinreichend zur Positionsbestimmung. Geometrisch zeigt sich dieser Sachverhalt über zwei Kreise, entsprechend gewählter Radien, die sich in keinem Punkt schneiden. Der Fall beliebig vieler Schnittpunkte, durch zwei deckungsgleiche Kreise, ist nicht möglich, da hierfür die Kreismittelpunkte, d.h. die Sensorpositionen, zusammenfallen müssten. Eine Konvergenz des beschriebenen Algorithmus kann also nicht für jeden Fall vorausgesetzt werden. Somit sollte zusätzlich zur Fehlerschwelle auch noch eine maximale Iterationstiefe festgelegt werden, ab der davon ausgegangen werden kann, dass kein korrektes Ziel zu detektieren ist.

Stehen mehr als nur zwei Sensoren zur Positionsbestimmung zur Verfügung, kann auch eine Aussage über die Genauigkeit der Positionsschätzung getroffen werden. Die Genauigkeit der Schätzung ist dabei unabhängig von den tatsächlichen Messwerten. Vielmehr ergibt sie sich aus der Kovarianzmatrix  $\mathbf{R}$  der Messwerte sowie aus der Anordnung der Sensoren und der Position des Zieles. Aus diesem Grund kann schon während des Systementwurfes festgestellt werden, ob das entwickelte System die Anforderungen hinsichtlich der Schätzvarianzen überhaupt erfüllen kann. Die positionsabhängige Kovarianzmatrix der Positionsschätzung ergibt sich allgemein aus folgendem Zusammenhang:

$$\mathbf{P}(\vec{\sigma}) = (\mathbf{J}^T(\vec{\sigma})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{J}(\vec{\sigma}))^{-1} \quad . \quad (2.74)$$

Analog zum Vorgehen bei der Trilateration existieren ebenso Verfahren bei denen bistatische Radarsysteme [RHLS02], also Systeme bei denen Sender und Empfänger nicht am selben Ort stehen. Ferner kann die aus der Landvermessung bekannte Triangulation mit mehreren Winkel- anstelle von Entfernungsmessungen [Bau98] zur Positionsbestimmung eingesetzt werden. Die einzige Änderung betrifft die zu verwendende Messgleichung sowie die zugehörigen partiellen Ableitungen. Entsprechend kann auch die Messung der radialen Geschwindigkeitskomponente mit in die Ausgleichsrechnung einbezogen werden, um die Komponenten der Geschwindigkeit in x- und y-Richtung zu bestimmen. Tabelle 2.1 stellt die jeweiligen Einträge in der JACOBI-Matrix zusammen.

Größe	$m = f(r, v)$	$\frac{\partial m}{\partial x}$	$\frac{\partial m}{\partial y}$	$\frac{\partial m}{\partial v_x}$	$\frac{\partial m}{\partial v_y}$
Entfernung	$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$	$\frac{\bar{x}}{r} = \cos(\alpha)$	$\frac{\bar{y}}{r} = \sin(\alpha)$	0	0
Geschwindigkeit	$v = \frac{\bar{x}}{r}v_x + \frac{\bar{y}}{r}v_y$	$\bar{y}\frac{v_x\bar{y}-v_y\bar{x}}{r^3}$	$\bar{x}\frac{v_y\bar{x}-v_x\bar{y}}{r^3}$	$\frac{\bar{x}}{r}$	$\frac{\bar{y}}{r}$
Winkel	$\alpha = \arctan(\frac{\bar{y}}{\bar{x}})$	$-\frac{\bar{y}}{r^2} = -\sin(\alpha)/r$	$\frac{\bar{x}}{r^2} = \cos(\alpha)/r$	0	0

Tabelle 2.1: Einträge in der JACOBI-Matrix für eine nichtlineare Ausgleichsrechnung zur Bestimmung von Position und Geschwindigkeit ( $\bar{x} = (x_0 - x_s)$ ,  $\bar{y} = (y_0 - y_s)$ )

### 2.6.3 Monopuls-Verfahren

Im Gegensatz zur Trilateration in einem Sensornetzwerk sind auch Verfahren im Einsatz, die nur einen einzigen Sensor zur Winkelmessung verwenden. Dieser besitzt dann jedoch mehr als nur eine einzige Empfangsantenne. Die gleichzeitig gemessenen Signale der einzelnen Antennen können entweder über die Amplituden (Amplituden-Monopuls) oder Phasen (Phasen-Monopuls) zueinander in Beziehung gebracht werden. Aufgrund dieser zusätzlich gewonnenen Informationen kann auf den Zielwinkel geschlossen werden [Mei01, Wag97, MBM<sup>+</sup>03].

#### Winkelbestimmung nach dem Amplituden-Monopuls

Beim Amplituden-Monopuls wird eine Antenne mit mehreren Keulen leicht unterschiedlicher Strahlrichtung eingesetzt. Dies ist schematisch in Abbildung 2.23 für einen Radarsensor mit zwei Keulen dargestellt.

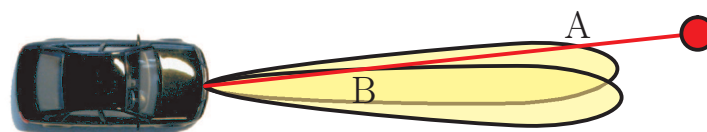


Abbildung 2.23: Darstellung der Winkelmessung bei Verwendung eines Sensors mit zwei Antennenkeulen

Aufgrund der Ausprägung der Antennenkeulen sind die resultierenden Empfangsamplituden  $A$  und  $B$  für ein einzelnes Ziel in beiden Empfangszweigen unterschiedlich, sofern sich das Ziel nicht in der Symmetrieachse der beiden Keulen befindet. Dieser Sachverhalt kann zur Schätzung des Zielwinkels genutzt werden, wenn das Verhältnis von Differenz- und Summenterm ( $\Delta$ ,  $\Sigma$ ),

das sogenannte Fehlersignal  $\varepsilon(\alpha)$

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \quad (2.75)$$

mit den Definitionen

$$\Sigma = A + B \quad (2.76)$$

$$\Delta = A - B \quad (2.77)$$

ausgewertet wird. Durch die Normierung auf den Summenterm kann die Abhängigkeit der Amplituden von der Entfernung und den Reflexionseigenschaften des Zieles kompensiert werden.

### Beispiel zur Winkelbestimmung nach dem Amplituden-Monopuls

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge bei der Winkelbestimmung nach dem Amplituden-Monopuls zeigt Abbildung 2.24(a) die Ergebnisse der Vermessung eines Systems mit drei Antennenkeulen. Wie sich leicht erkennen lässt, sind die Keulen um jeweils  $10^\circ$  im Winkel gegeneinander verschoben. Abbildung 2.24(b) stellt die aus der Messung resultierenden Fehlersignale für die drei unterschiedlichen Antennenpaarungen dar. Deutlich sichtbar sind die Bereiche mit einer linearen Abhängigkeit zwischen dem Fehlersignal  $\varepsilon(\alpha)$  und dem Zielwinkel  $\alpha$ , die zur Bestimmung des Winkels ausgewertet werden können.

Mit der gegebenen Sensorkonfiguration wird ein Ziel unter einem Winkel von  $\alpha = -7^\circ$  betrachtet. Als Entfernung des Zieles zum Radarsensor ist dabei dieselbe Entfernung gewählt worden, in der auch die Keulen vermessen wurden. Entsprechend liegen die gemessenen Amplitudenwerte

$$A_1 = 7, \quad A_2 = 16, \quad A_3 = 2 \quad (2.78)$$

auch direkt auf der in Abbildung 2.24(a) gegebenen Kurve, wie in Abbildung 2.24(c) zu erkennen ist. Mit diesen drei gemessenen Amplitudenwerten ergeben sich entsprechend drei Fehlersignale

$$\varepsilon_{21} = 0.39, \quad \varepsilon_{13} = 0.55, \quad \varepsilon_{23} = 0.77 \quad (2.79)$$

und damit drei Schätzwerte für den Zielwinkel.

$$\alpha_1 = -7.34^\circ, \quad \alpha_2 = -7.44^\circ, \quad \alpha_3 = -7.15^\circ \quad (2.80)$$

Aus dem Mittelwert der drei einzelnen Winkel ergibt sich der Schätzwert für den Winkel von

$$\hat{\alpha} = -7.31^\circ \quad . \quad (2.81)$$

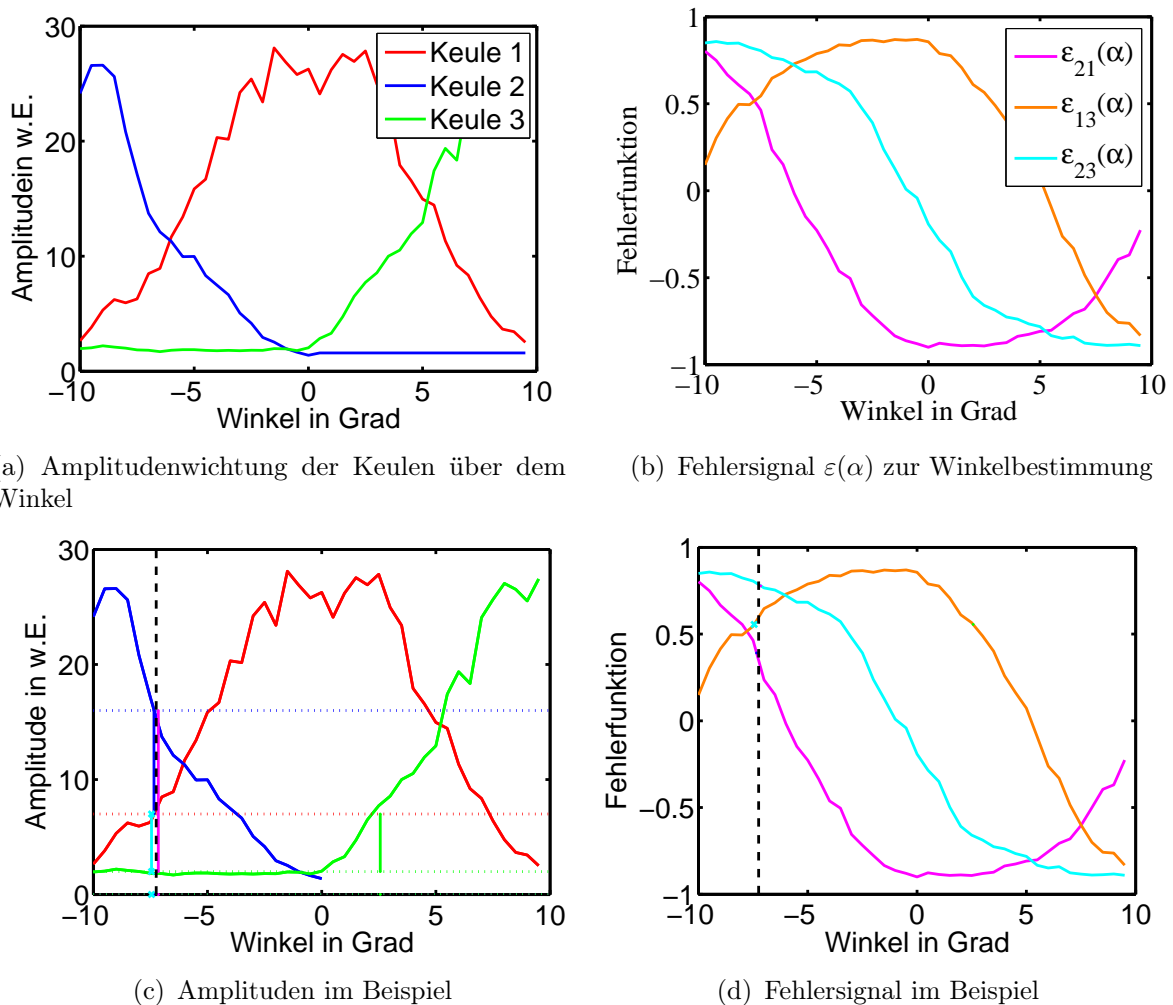


Abbildung 2.24: Beispiel mit einem Ziel bei  $\alpha = -7^\circ$  für die Winkelmessung mit der Amplituden-Monopuls-Technik

## Winkelbestimmung nach dem Phasen-Monopuls

Im Gegensatz zum Amplituden-Monopuls kann auch ein Phasen-Monopuls angewendet werden [Mah05, BBP98, BBP01], der wiederum auf der Auswertung eines Verhältnisses von Differenz- und Summentermen beruht. Hierbei werden jedoch nicht unterschiedliche Antennenkeulen, sondern dicht nebeneinander platzierte Empfangsantennen verwendet ( $d \approx 0.5\lambda$ ). Abbildung 2.25 zeigt die schematischen Zusammenhänge.

Aufgrund der nur leicht unterschiedlichen Weglängen  $r_1$  und  $r_2$  haben die beiden empfangenen Signale  $A$  und  $B$  zwar die gleiche Amplitude, aber eine unterschiedliche Phase. Diese Phasendifferenz  $\psi$  ist dabei neben dem Zielwinkel  $\alpha$  abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Abstand  $d$  der beiden Antennen.

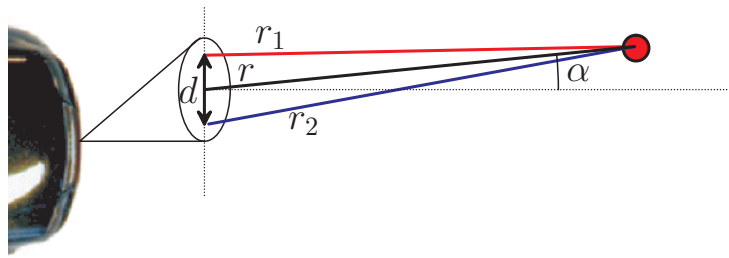


Abbildung 2.25: Darstellung zur Winkelmessung nach dem Phasen-Monopuls-Prinzip

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin \alpha \quad (2.82)$$

Zur messtechnischen Bestimmung der Phasendifferenz kann wiederum ein Quotient aus den beiden komplexen Empfangssignalen  $A$  und  $B$  mit

$$A = B \cdot e^{-j\psi} \quad (2.83)$$

herangezogen werden. Mit der Definition der Summen- und Differenzterme

$$\Sigma = B (1 + e^{-j\psi}) \quad (2.84)$$

$$\Delta = B (1 - e^{-j\psi}) \quad (2.85)$$

ergibt sich die Phasendifferenz aus

$$\frac{|\Delta|}{|\Sigma|} = \tan \left( \frac{\psi}{2} \right) \quad (2.86)$$

Nach der Bestimmung der Differenzphase kann mit (2.82) der Zielwinkel bestimmt werden.

## 2.7 Gegenüberstellung verwendeter Sensoren

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Sensoren verwendet, die alle im Bereich der Automobilradartechnik Anwendung finden oder Entwicklungsmuster für den Automobilbereich darstellen. Da der Fokus der Arbeit auf der Betrachtung der Eigenarten der Objekte und nicht auf denen der Sensoren liegt, erfolgt keine Beschränkung auf einen bestimmten Sensor. Vielmehr werden die einzelnen Sensoren und unterschiedlichen Messverfahren entsprechend

ihrer Eignung betrachtet, um die spezifischen Eigenschaften der Objekte gut wiedergeben zu können. Dabei erweisen sich einzelne Sensoren bzw. Funktionsweisen als besonders geeignet und andere als eher ungeeignet zur Betrachtung ausgedehnter Objekte. Wie die folgenden Ausführungen zeigen, kommt dem Auflösungsvermögen der Sensoren eine entscheidende Bedeutung zu.

Aus der Betrachtung der Messverfahren wird eine enge Verknüpfung der Eigenschaften der Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung über den Sendesignalentwurf deutlich. Die Winkelmessung hingegen ist nahezu unabhängig vom Sendesignal, so dass sich gerade die Monopulsverfahren mit allen Sendesignalformen kombinieren lassen, um eine gewünschte Charakteristik des Radarsensors zu erzielen. Trilaterierende Verfahren zur Winkelschätzung erfordern hingegen generell eine hohe Entfernungsgenauigkeit der eingesetzten Sensoren. In Tabelle 2.2 sind die vorgestellten Verfahren noch einmal aufgelistet und hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Auflösung in den unterschiedlichen Messgrößen gruppiert.

$r$	$v$	$\alpha$	Messverfahren
■			Pulsradar mit hoher Bandbreite
	■		Unmoduliertes Signal mit langer Messzeit
□	■		FSK mit langer Messzeit
■	□		LFMCW mit großem Hub
■	■		Pulsdoppler
		□	Monopuls-Verfahren mit zwei Empfangsantennen
		■	Mechanisch rotierende Antennen, Phased-Array oder el. Beamforming
■		□	Trilateration bei hoher Signalbandbreite

Tabelle 2.2: Zusammenfassung und Charakterisierung der Messverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Messung □ bzw. Auflösung ■



## 3 Objekte des Straßenverkehrs und deren Eigenschaften

### 3.1 Definition ausgedehnter Objekte

Wie aus den grundlegenden Eigenschaften einer Radarmessung folgt, können Sensoren mit einer hohen Auflösung mehr Detailinformationen über ein einziges Ziel gewinnen als Sensoren mit einer niedrigen Auflösung. Der höhere Informationsgehalt lässt sich dann jedoch nicht mehr über ein Punktzielmodell beschreiben. Um jedoch eine konsistente Beschreibung der gewonnenen Zielechos zu gewährleisten, wird daher zunächst der Begriff des ausgedehnten Ziels definiert.

Anschließend kann die zusätzliche Information im Rahmen der Signalverarbeitung genutzt werden, um detailliertere Analysen des Radarechosignals vorzunehmen. Ein Beispiel hierfür ist die Objektgrößenschätzung oder eine radarbasierte Klassifikation von Zielen.

#### 3.1.1 Zusammenhang zwischen Auflösung und Ausdehnung

Unabhängig von den Eigenschaften der Radarmessung besitzt jedes Objekt physikalische Abmessungen  $\mathcal{A}$ , die zum Beispiel über eine Länge und eine Breite beschrieben werden. Diese physikalischen Abmessungen spiegeln sich in den vom Sensor erfassten Entfernungsmesswerten des Objektes wider.

Werden bei einer Entfernungsmessung zwei oder mehr Reflexionszentren detektiert und ist sichergestellt, dass sie von einem Objekt stammen, so kann aus der Differenz der größten und der kleinsten Entfernung eine Aussage über die gemessene Länge bzw. die Ausdehnung  $\mathcal{A}_r$  des Objektes in radialer Richtung gewonnen werden (vgl. Beispiel in Kap. 2.3.3). Objekte sind dabei jegliche Gegenstände bzw. Radarziele, die vom Sensor detektiert werden können, mit all ihren Eigenschaften wie Größe, Typ oder momentaner Geschwindigkeit. Wesentlich für die Schätzung der Ausdehnung ist dabei die Eigenschaft des Radarsensors unterschiedliche Reflexionszentren getrennt wahrnehmen zu

können. Diese Eigenschaft wird über die messtechnische Größe der Auflösung bzw. über die diskrete Größe einer Auflösungszelle des jeweils verwendeten Sensors beschrieben.

*Begriff 2 (Auflösungszelle):* Die Auflösungszelle  $\mathfrak{A}$  eines Sensors beschreibt die Fähigkeit zur Trennung einzelner Reflexionszentren. Die Größe und Dimension der Auflösungszelle folgt aus den messtechnischen Fähigkeiten eines konkreten Sensors und umfasst  $\Delta m_1 = \Delta r$ ,  $\Delta m_2 = \Delta v$  und  $\Delta m_3 = \Delta \alpha$ .

Das Verhältnis zwischen der physikalischen Abmessung  $\mathcal{A}_i$  eines Objektes und der zugehörigen messtechnischen Auflösung  $\Delta m_i$  bestimmt, ob bei einer Messung  $M$  von dem Objekt in einer bestimmten Situation hinsichtlich der betrachteten Messgröße  $m_i$  nur ein einziger Wert ( $\mathcal{A}_i/\Delta m_i < 1$ ) oder aber ein Wertebereich ( $\mathcal{A}_i/\Delta m_i > 1$ ) abgebildet wird. Werden mindestens zwei Messwerte erfasst, so kann die Ausdehnung  $\mathcal{A}_i$  mit einem Sensor gemessen werden.

*Begriff 3 (Ausdehnung):* Unter der (messbaren) Ausdehnung  $\mathcal{A}_i$  eines Objektes bezüglich einer bestimmten Größe  $m_i$  wird die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert dieser Größe verstanden, der von dem verwendeten Sensor für ein Objekt erfasst wird.

$$\mathcal{A}_i = \left| \max_{m \in \mathbb{M}} m_i - \min_{m \in \mathbb{M}} m_i \right| \quad (3.1)$$

Der Begriff der messbaren Ausdehnung eines Objektes ist damit abhängig vom Auflösungsvermögen des Sensors bezüglich einer Messgröße. Sofern die verwendeten Sensoren über eine Entfernungs- und Geschwindigkeitsauflösung verfügen, wird im Folgenden von der radialen Ausdehnung  $\mathcal{A}_r$  und der kinematischen Ausdehnung  $\mathcal{A}_v$  gesprochen. Der Begriff der Ausdehnung wird folglich über eine rein räumliche Ausdehnung hinweg erweitert. Abbildung 3.1 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Abmessung, Auflösungszelle und Ausdehnung abschließend anhand eines Blockschaltbildes. Wie am Beispiel der Zusammenhänge zwischen der radialen Ausdehnung und den physikalischen Abmessungen von Länge und Breite leicht ersichtlich ist, hängt die jeweils gemessene Ausdehnung eines Objektes stark von der Anordnung des Objektes im Vergleich zum Sensor ab.

Wird von der Messung dreier Größen (Entfernung  $r$ , radiale Geschwindigkeit  $v$  und Winkel  $\alpha$ ) ausgegangen, ergibt sich unabhängig von der Ausprägung der konkreten Auflösungszelle generell ein dreidimensionaler Messvektor  $\vec{m}$ .

$$\vec{m} = [r, v, \alpha]^T \quad (3.2)$$

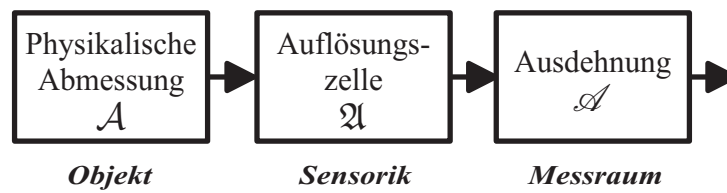


Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen Abmessung, Auflösungszelle und Ausdehnung in Blockschaltbilddarstellung

Liegt für ein Objekt  $\mathcal{O}$  eine messbare Ausdehnung vor, so wird entsprechend nicht nur ein einziger Messvektor  $\vec{m}$ , sondern eine Menge  $\mathbf{M}$  von Messvektoren detektiert.

$$M : \mathcal{O} \longmapsto \{\vec{m} : \vec{m} \in \mathbf{M}\} \quad (3.3)$$

Auch diese Messvektoren bestehen dabei unabhängig von der konkreten Auflösungszelle aus drei Elementen. Die Mächtigkeit der Menge  $|\mathbf{M}|$  hingegen gibt an, wie viele unterschiedliche Reflexionszentren vom Objekt detektiert werden. Eine fehlende Winkelauflösung darf zum Beispiel nicht mit der Tatsache verwechselt werden, dass keine Winkel gemessen werden können. Können einzelne Reflexionszentren anhand *einer* messtechnischen Auflösung getrennt werden, können sich *auch für die übrigen* Größen messbare Ausdehnungen ergeben wie das Beispiel in Abbildung 3.2 zeigt.

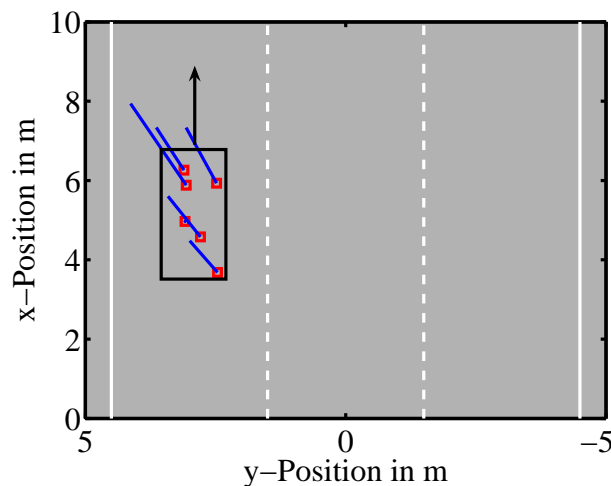


Abbildung 3.2: Mit einem Monopuls-Sensor gemessene Detektionen eines überholenden Fahrzeuges auf der Autobahn (rot: Positionen, blau: gemessene Radialgeschwindigkeit)

Dargestellt sind die von einem überholenden Auto detektierten sechs Messvektoren. Die roten Quadrate geben dabei die kartesischen Koordinaten der

Reflexionszentren an, während die blauen Linien die gemessenen radialen Geschwindigkeiten verdeutlichen. Aufgenommen wurden die Messdaten mit einem Radarsensor, der mit einer FSK-Signalform und einem Monopulsverfahren arbeitet und somit lediglich über eine Geschwindigkeitsauflösung verfügt. Trotz allem unterscheiden sich auch die gemessenen Entfernungen und Winkel, so dass von einer messbaren *sekundären* Ausdehnung in Entfernung und Winkel gesprochen werden kann.

Unabhängig von Messwerten folgt die Größe der Auflösungszelle  $\mathfrak{A}$  eines Sensors aus den spezifischen Werten der Entfernung-, Geschwindigkeits- und Winkelauflösungen.

$$\mathfrak{A} = \Delta r \times \Delta v \times \Delta \alpha \quad (3.4)$$

Entsprechend sind acht generelle Ausprägungen der Auflösungszellen möglich, je nachdem für welche Messgrößen eine Auflösung vorliegt. Die Dimension der Auflösungszelle variiert dabei zwischen null – bei einer Messung ohne jegliche Auflösung – und drei – bei einer Auflösung in allen drei Messgrößen. Tabelle 3.1 stellt die acht Kombinationen und zugehörigen Dimensionen dar. Wie aus den Erläuterungen in Kap. 2 folgt, werden die Entfernung- und Geschwindigkeitsauflösung wesentlich durch den Entwurf der verwendeten Sendesignalform bestimmt, während die Techniken zur Winkelmessung oder -auflösung unabhängig vom verwendeten Sendesignal durch das gewählte Antennendesign bestimmt werden.

## 3.2 Typisierung der betrachteten Objekte

Aktuelle Sensoren für den Einsatz in Kraftfahrzeugen verfügen häufig über eine hohe Entfernung- und/oder Geschwindigkeitsauflösung im Vergleich zu den physikalischen Abmessungen der zu beobachtenden Objekte. Reale Objekte können dementsprechend oft in mehrere Reflexionszentren zerlegt werden und bieten im Radarechosignal ein differenzierteres Bild. Da in der Regel zwar eine Winkelmessung, jedoch keine -auflösung vorhanden ist, liegt der Fokus der Darstellungen auf den ersten vier Ausprägungen der Auflösungszellen der Tabelle 3.1.

In Abhängigkeit der geometrischen und kinematischen Eigenschaften der Messwerte lassen sich die Objekte verschiedenen Ausdehnungstypen zuweisen. Wird ein realistischer Sensor mit einer hohen Entfernung- und Geschwindigkeitsauflösung angenommen, ergeben sich unabhängig vom konkreten Aufbau des Sensors vier unterschiedliche Ausdehnungstypen für die zu beobachtenden

$\dim(\mathcal{A})$	$r$	$v$	$\alpha$	Messung und Auflösung
0D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nur Messung, keine Auflösung
1D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Auflösung in Entfernung sowie Messung von Geschwindigkeit und Winkel
1D	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Auflösung in Geschwindigkeit sowie Messung von Entfernung und Winkel
2D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Auflösung in Entfernung und Geschwindigkeit sowie Messung vom Winkel
1D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Auflösung im Winkel sowie Messung von Entfernung und Geschwindigkeit
2D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Auflösung in Entfernung und Winkel sowie Messung von Geschwindigkeit
2D	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Messung von Entfernung sowie Auflösung in Geschwindigkeit und Winkel
3D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Auflösung in Entfernung, Geschwindigkeit und Winkel

Typische Werte bei Automobil-Radaren:

Messgröße	Zeichen	typische Auflösung	Ausdehnungsrichtung
Entfernung	$\Delta r$	0.1 ... 1 m	Länge
Geschwindigkeit	$\Delta v$	0.01 ... 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Bewegungsverhalten
Winkel	$\Delta \alpha$	keine	Breite

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der möglichen Auflösungszellen in Abhängigkeit des Auflösungsvermögens des Sensors.

Objekte. Den einfachsten Fall stellen Objekte ohne Ausdehnung, sogenannte Punktziele, dar [Bla86, S.3], [Lud98, S.5-2].

*Begriff 4 (Punktziel):* Unter einem Punktziel wird ein Objekt verstanden, bei dem die physikalischen Abmessungen in allen betrachteten Dimensionen kleiner sind als die Auflösungszelle des verwendeten Sensors.

Damit ist die Charakterisierung eines Objektes als Punktziel nicht von der Entfernung zum Sensor, sondern im Wesentlichen von den Sensoreigenschaften abhängig. Liegt die Abmessung unterhalb der Auflösung des verwendeten Sensors, so kann die tatsächliche physikalische Abmessung des Objektes nicht bestimmt werden. Das heißt jedoch nicht, dass das Objekt keine physikalische

Abmessung besitzt. Vielmehr wird das Objekt vom Sensor nur als Punktziel wahrgenommen. In vielen Radaranwendungen ist dieser Sachverhalt gegeben und es kann oder muss von Punktzielen ausgegangen werden. So werden zum Beispiel die in der Luftraumüberwachung vermessenen Flugzeuge, die für sich gesehen physikalisch große Objekte darstellen, im Allgemeinen über Punktziele beschrieben [Roh84, S.8-9].

Im RV-Diagramm stellt sich das Bild von Punktzielen als Punkt dar (vgl. Abb. 3.3(a)).

$$\mathbb{M}_{\text{Punkt}} = \{[r; v]\} \quad (3.5)$$

Ein Beispiel für ein Objekt dieses Typs aus dem Bereich des Automobilradars ist eine am Straßenrand stehende Ampel. Andererseits kann auch ein Auto, welches sich in einer großen Entfernung auf der Autobahn bewegt, als Punktziel erscheinen, wenn nur noch das stärkste Reflexionszentrum detektiert werden kann. In dem einen Fall handelt es sich dabei um ein unbewegtes und im anderen Fall um ein bewegtes Punktziel.

Da jede von einem Sensor gemessene und aufgelöste Dimension ausgedehnt sein kann, ist es sinnvoll von ausgedehnten Zielen zu sprechen:

*Begriff 5 (Ausgedehntes Ziel):* Unter einem ausgedehnten Ziel wird ein Objekt verstanden, bei dem die physikalische Abmessung in mindestens einer Dimension größer ist als die Auflösungszelle des verwendeten Sensors.

Bezogen auf ein RV-Diagramm ist dann neben den Punktzielen ein zweiter Typ von Objekten denkbar, nämlich Objekte mit einer rein geometrischen Ausdehnung (lange Ziele). Das Bild eines langen Zieles ist eine Parallele zur Entfernungsachse, wie in Abbildung 3.3(b) dargestellt. Mathematisch lassen sich lange Ziele über die Teilmenge  $\mathbb{M}_{\text{Lang}}$  der  $R \times V$ -Ebene mit

$$\mathbb{M}_{\text{Lang}} = \{[r_i; v_i] : r_i \in [r_{\min}, r_{\max}] \wedge v_i = \text{const.}\} \quad (3.6)$$

beschreiben. Beispiele für lange Ziele sind Fahrzeuge wie Personenkraftwagen (PKWs) oder Lastkraftwagen (LKWs), die sich in gerader Fahrt vor dem Fahrzeug mit den Sensoren befinden.

*Begriff 6 (Langes Ziel):* Ein Objekt, das bei einer Messung ausschließlich über eine radiale Ausdehnung  $\mathcal{A}_r$  verfügt, wird als *langes Ziel* bezeichnet.

Der dritte Typ von Objekten bildet sich im RV-Diagramm als Parallele zur Geschwindigkeitsachse ab (Abb. 3.3(c)). Diese Objekte werden als kinematisch

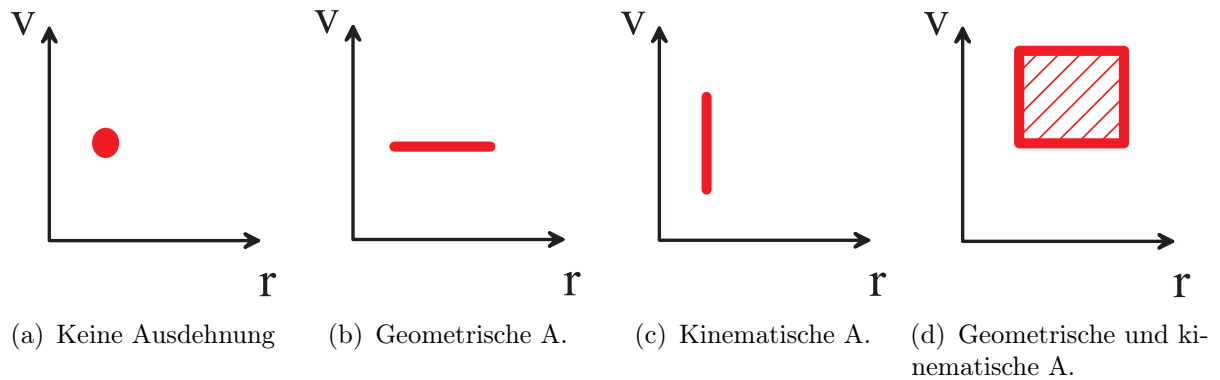


Abbildung 3.3: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Arten einer Ausdehnung der betrachteten Objekte im RV-Diagramm

ausgedehnte Ziele bezeichnet. Sie verfügen im Gegensatz zu langen Zielen über keinerlei Ausdehnung in Entfernung, dafür aber über eine ausgeprägte Ausdehnung der Geschwindigkeit

$$\mathbb{M}_{\text{Kin}} = \{[r_i; v_i] : r_i = \text{const.} \wedge v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]\} \quad . \quad (3.7)$$

Ein Beispiel für ein Objekt dieses Typs ist ein Fußgänger, der sich radial zum Sensor bewegt und mit einem Sensor vermessen wird, dessen Entfernungsauflösung oberhalb der Schrittlänge des Fußgängers liegt.

*Begriff 7 (Kinematisch ausgedehntes Ziel):* Ein Objekt, das bei einer Messung ausschließlich über eine Geschwindigkeitsausdehnung  $\mathcal{A}_v$  verfügt, wird als *kinematisch ausgedehntes Ziel* bezeichnet.

Der vierte Typ von Objekten verfügt schließlich über eine geometrische und kinematische Ausdehnung und lässt sich entsprechend als Fläche im RV-Diagramm darstellen (Abb. 3.3(d)). Entsprechend werden Objekte des vierten Typs auch als doppelt ausgedehntes Ziel bezeichnet. Die in der RV-Ebene beschriebene Teilmenge  $\mathbb{M}_{\text{Doppelt}}$  ergibt sich aus

$$\mathbb{M}_{\text{Doppelt}} = \{[r_i; v_i] : r_i \in [r_{\min}, r_{\max}] \wedge v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]\} \quad . \quad (3.8)$$

Beispiele für Objekte des vierten Typs sind Fahrzeuge, die sich in unmittelbarer Nähe der Sensoren bewegen oder aber eine laterale Bewegungskomponente aufweisen.

*Begriff 8 (Doppelt ausgedehnte Ziele):* Ein Objekt, das bei einer Messung über eine Ausdehnung in genau zwei Messgrößen verfügt, wird als doppelt ausgedehntes Ziel bezeichnet.

In dieser Arbeit wird ein Schwerpunkt auf ausgedehnte Objekte gelegt, deren physikalische Abmessungen hinsichtlich einer Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung größer sind als die Auflösungszelle des eingesetzten Sensors. Die Darstellungen werden dabei häufig aus der Punktzielbeschreibung heraus entwickelt, um den Bezug zu vorangegangenen Arbeiten [Men99, Mei01, Agh01, Klo02, Sch05, Lüb05, Kru06] zum Thema Automobilradar aufrecht zu erhalten.

Nach den theoretischen Definitionen der vorangegangenen Darstellungen werden in den folgenden Abschnitten die Zusammenhänge zwischen realen Objekten des Straßenverkehrs und den entsprechenden Ausdehnungen anhand von analytischen Betrachtungen und messtechnischen Beispielen näher untersucht.

## 3.3 Lange Ziele

Während sich Punktziele über einen Ortsvektor beschreiben lassen (s. Kap. 2), kommen im Straßenverkehr auch Objekte mit ausgeprägter geometrischer Ausdehnung vor. In aller Regel werden dies Fahrzeuge wie PKWs oder LKWs sein. Ein auf der Autobahn vorausfahrendes Fahrzeug in einem Abstand von einigen hundert Metern könnte, für eine Anwendung aufgrund des Verhältnisses von Länge und Entfernung, vielleicht noch hinreichend genau als Punktziel beschrieben werden, bei dichteren Verkehrssituationen stellt eine derartige Beschreibung jedoch schon eine ungeeignete Vereinfachung des Sachverhaltes dar. Zum Beispiel lässt sich die tatsächliche Anzahl der Fahrzeuge und die entsprechend nötige Anzahl an Kanälen zur zeitlichen Zielverfolgung nicht mehr eindeutig bestimmen, wenn von einem einzelnen Objekt Echosignale in unterschiedlichen Entfernungen hervorgerufen werden. Ferner setzt die Definition der Ausdehnung die physikalischen Abmessungen ins Verhältnis zur Auflösung des Sensors, wodurch die Ausdehnung unabhängig von der Entfernung zwischen Sensor und Objekt zu betrachten ist.

### 3.3.1 Messung der radialen Ausdehnung

Werden Objekte mit einer gegebenen Länge  $L$  betrachtet, so kann je nach Auflösung der Entfernungsmessung  $\Delta r$  die Bedingung für die Beschreibung als Punktziel verletzt sein [Bla86, S.98-100]. Ist die Länge des Objektes, oder genauer ihre radiale Abmessung  $\mathcal{A}_r$ , größer als die Entfernungsauflösung

$$\mathcal{A}_r > \Delta r \quad , \quad (3.9)$$

so ist der Sensor theoretisch in der Lage zumindest den vordersten und den hintersten Teil des Objektes aufzulösen, also als zwei unterschiedliche Punkte zu erkennen. Damit ist eine Schätzung der Objektlänge als Vielfaches einer Entfernungsauflösungszelle möglich.

$$\hat{L} \approx \mathcal{A}_r = k \cdot \Delta r \quad k \in \mathbb{N} \quad (3.10)$$

Auf diese Weise ergibt sich für ein derartiges Ziel nicht nur ein einzelner Messwert, sondern eine Menge von Messvektoren jeweils mit unterschiedlichen Messwerten der Entfernung. Aufgrund der geometrischen Eigenschaften des Objektes deckt die Menge der Messwerte ein zusammenhängendes Gebiet in der Entfernung ab.

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 3.4 die gemessenen Entfernungsprofile eines gerade voraus stehenden Autos in 25 m Entfernung für zwei Sensoren mit unterschiedlichen Entfernungsaufösungen dargestellt. Während das Objekt bei der Vermessung mit einer Auflösung von  $\Delta r = 4.5$  m (Abb. 3.4(b)) als Punktziel erscheint, führt die Vermessung mit  $\Delta r = 15$  cm (Abb. 3.4(c)) zu einem detaillierten Entfernungsprofil, aus dem sich eine radiale Ausdehnung des Objektes ermitteln lässt. Unter Entfernungsprofil ist dabei die im Echosignal empfangene entfernungsstorspezifische Leistung zu verstehen. Deutlich fällt auch der Einfluss des Objektes auf die empfangene Leistung auf. Neben einer dominanten Reflexion an der dem Sensor zugewandten Seite des Fahrzeuges bei etwa 25 m sind im Falle der hohen Entfernungsaufösung im rechten Bild zusätzliche Reflexionen im Bereich von bis zu 28 m zu erkennen. Eine Schätzung der radialen Ausdehnung des Objektes liefert den Wert  $\mathcal{A}_r = 22 \cdot 15 \text{ cm} = 3.3 \text{ m}$ .

### 3.3.2 Beobachtung eines langen Zieles

Im Gegensatz zur Darstellung und Beobachtung von Punktzielen ergibt sich bei der Beobachtung von langen Zielen nicht nur ein einzelner Radius  $r$ , sondern eine Anzahl von Radien, die jedoch entsprechend der Definition alle unter dem gleichen Winkel  $\alpha$  und mit der gleichen relativen Geschwindigkeit  $v$  erscheinen. Die unterschiedlichen Radien ergeben sich aus dem beobachteten Radius eines Referenzpunktes  $\vec{o}_R = [x_o, y_o]^T$  und den als bekannt angenommenen Entfernungen  $l_i$ . Abbildung 3.5 veranschaulicht die Zusammenhänge.

$$r_i = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2} + l_i \quad (3.11)$$

$$v_i = v \quad (3.12)$$

$$\alpha_i = \alpha \quad (3.13)$$

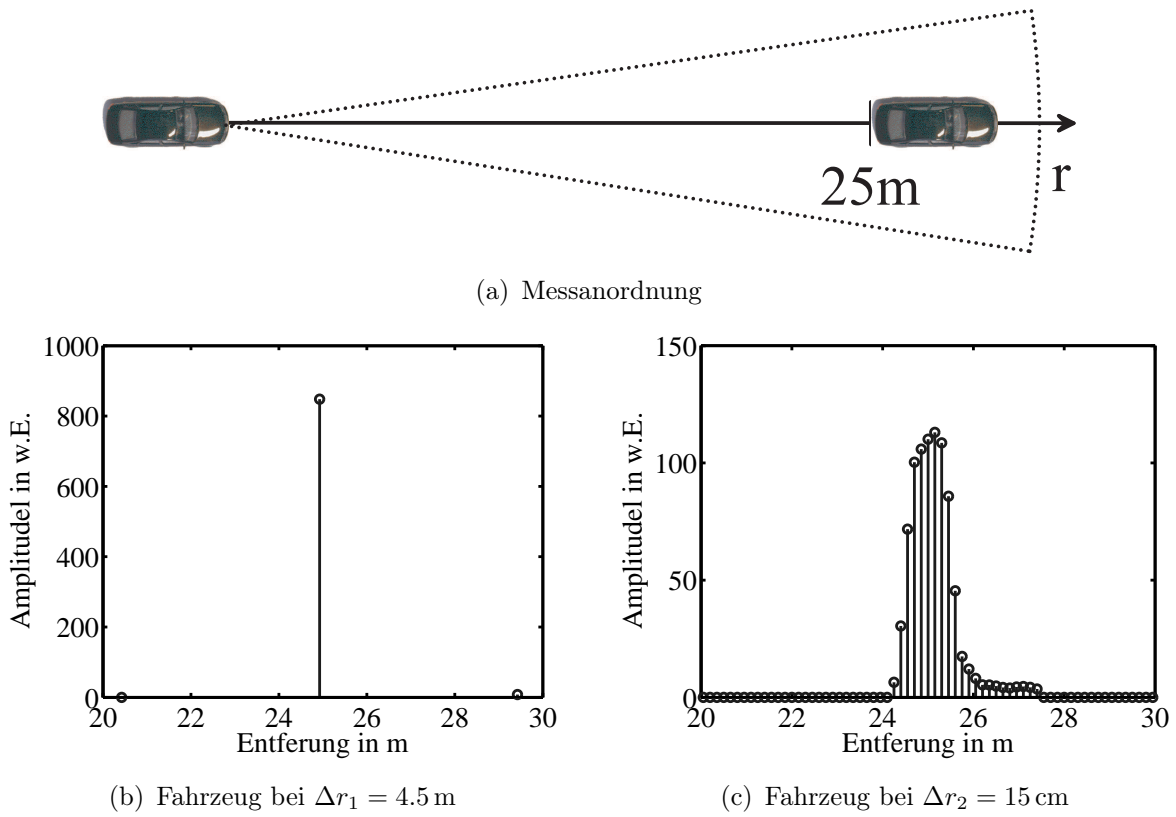


Abbildung 3.4: Darstellung der Entfernungprofile eines Objektes bei Vermessung mit zwei unterschiedlichen Sensoren

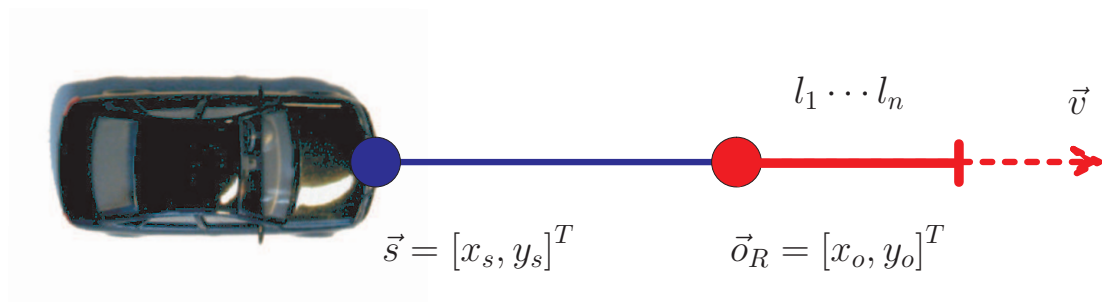


Abbildung 3.5: Geometrische Zusammenhänge zwischen Länge und Bewegung von langen Zielen

Im RV-Diagramm stellen sich die Messwerte von langen Zielen entsprechend als Parallele zur Entfernungsachse dar. Eine analytische Berechnung der Entfernungs- und Geschwindigkeitswerte eines entgegenkommenden Fahrzeuges verdeutlicht diesen Sachverhalt. Angenommen wird ein Objekt, welches sich mit einer Geschwindigkeit von  $50 \text{ km/h} \approx 14 \text{ m/s}$  auf den Sensor zu bewegt und sich zum Zeitpunkt der Messung in einer Entfernung von  $13 \text{ m}$  befindet. Die angenommene Situation und die zugehörigen Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

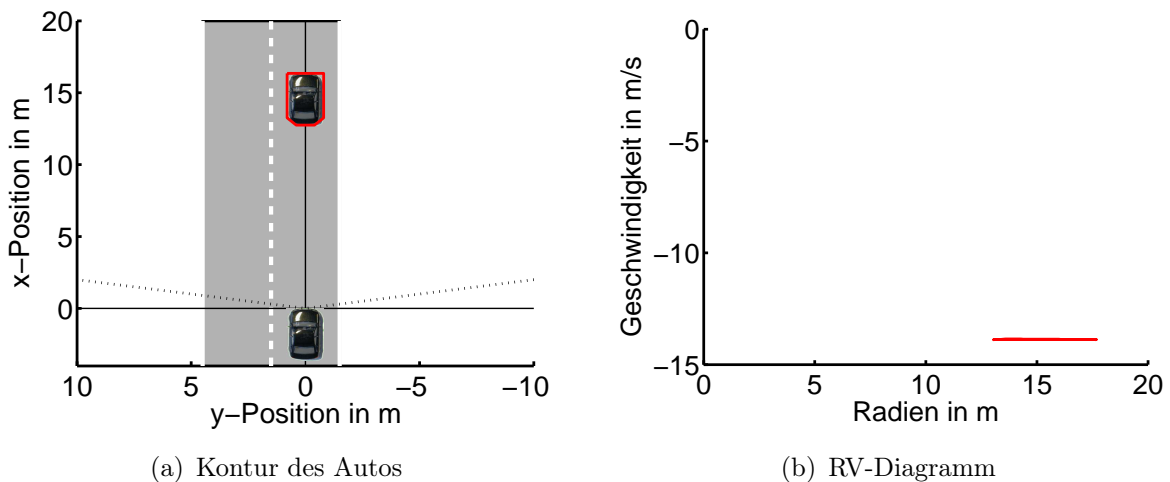


Abbildung 3.6: Auto in der eigenen Spur als Beispiel für ein langes Ziel in  $13 \text{ m}$  Entfernung (links) und Darstellung der Beobachtungen im RV-Diagramm (rechts)

### 3.3.3 Geometrische und kinematische Eigenschaften

Eine entsprechende Charakterisierung der beschriebenen Objekte erfordert somit eine Berücksichtigung ihrer Länge  $L$ , genauer der radialen Ausdehnung  $\mathcal{A}_r$ . Generell wird bei der Beschreibung der Objektlänge davon ausgegangen, dass alle Teile eine feste Position zueinander haben. Ist der Abstand  $l_i$  aller Punkte des Objektes zu einem Referenzpunkt  $\vec{o}_R$  bekannt, so kann die Bewegung des Objektes über die Bewegung des einzelnen Referenzpunktes zuverlässig festgelegt werden.

$$\mathbf{M}_{\text{Lang}}(t) = \left\{ \vec{m}_i(t) : \vec{m}_i(t) = \begin{bmatrix} r_o \\ v_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} l_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.14)$$

Es kommt entsprechend auch während einer Bewegung des Objektes zu keinerlei Änderung der geometrischen oder kinematischen Eigenschaften des Objektes, wie zum Beispiel Verformungen. Wird außerdem angenommen, dass alle Teile des Objektes immer die gleiche gemessene Geschwindigkeit besitzen, so kann das Objekt nach der Definition auf Seite 52 als langes Objekt bezeichnet werden. Diese Voraussetzung ist bei Objekten erfüllt, deren Bewegungsrichtung mit der Richtung der Ausdehnung übereinstimmt, also zum Beispiel in größerer Entfernung gerade vorausfahrende Fahrzeuge, deren Breite mit den Radarsensoren nicht erfasst werden kann.

## 3.4 Kinematisch ausgedehnte Ziele

Aus dem Beispiel des Dopplerprofils eines sich in radialer Richtung bewegendem Fußgängers in Abbildung 2.10 ist bereits bekannt, dass sich dieser bei der Messung als kinematisch ausgedehntes Ziel darstellen kann. Dieser Sachverhalt zeigt sich bildlich, wenn die Positionen der verschiedenen Körperteile zu zwei Zeitpunkten während des Bewegungsablaufes betrachtet werden. In Abbildung 3.7 sind zur Veranschaulichung zwei Standbilder aus der Bewegung eines Menschen mit einer zeitlichen Differenz von  $T = 12$  ms sowie die resultierenden Bewegungsvektoren einzelner Körperteile dargestellt.



Abbildung 3.7: Änderung der Position der verschiedenen Körperteile während des Gehens

Der Grund für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten liegt im äußerst komplexen biomotorischen Ablauf bei der Fortbewegung und der damit verbundenen unterschiedlichen Bewegung der einzelnen Körperteile des Menschen [Lut02]. In Abbildung 3.8 ist der Vorgang des Gehens vereinfacht dargestellt.

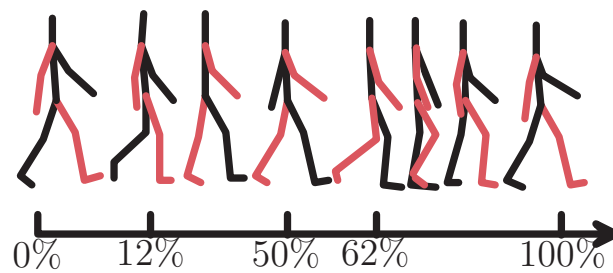


Abbildung 3.8: Motorischer Ablauf der Bewegung eines Menschen beim Gehen

### 3.4.1 Messung der kinematischen Ausdehnung

Wird von den physikalischen Abmessungen eines Objektes gesprochen, bezieht sich dies in der Regel auf die geometrischen Abmessungen in Bezug auf Länge, Breite und Höhe. Der Zusammenhang zwischen Entfernungsmessung und radialer Abmessung hat bereits gezeigt, dass diese Sichtweise an die Gegebenheiten der Radarmessung angepasst werden muss.

Die Definition der gemessenen Ausdehnung setzt die physikalischen Abmessungen ins Verhältnis zum Auflösungsvermögen des Sensors. Eine typische Messgröße des Radarsensors ist auch die radiale Komponente der Geschwindigkeit. Beeinflussen die geometrischen Eigenschaften des Objektes im Wesentlichen die Messgrößen Entfernung und Winkel, so wirken sich die kinematischen Eigenschaften des Objektes auf die gemessene Geschwindigkeit und damit auf die Geschwindigkeitsausdehnung  $\mathcal{A}_v$  aus.

Besteht ein Objekt aus Teilobjekten mit verschiedenen Geschwindigkeiten, wie zum Beispiel ein laufender Fußgänger, kann ein in der Geschwindigkeit ausgedehntes Ziel entstehen. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend hohe Auflösung der Geschwindigkeitsmessung. Wiederum lässt sich eine Ausdehnung als ein Vielfaches der Größe der Auflösungszelle schätzen.

$$\mathcal{A}_v = k \cdot \Delta v \quad k \in \mathbb{N} \quad (3.15)$$

Wird ein Dauerstrich-Radarsensor mit konstanter Sendefrequenz eingesetzt, lässt sich aus den gemessenen Dopplerfrequenzen in Analogie zum Entfernungsprofil auch ein Geschwindigkeitsprofil bestimmen. Abbildung 3.9 zeigt zur Veranschaulichung das Geschwindigkeitsprofil eines sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $\bar{v} = 1 \text{ m/s}$  radial bewegenden Fußgängers. Neben dem globalen Maximum ist eine deutliche Aufweitung des Geschwindigkeitsprofils zu erkennen, dessen Ursache in den schwingenden Beinen des sich bewegenden Fußgängers liegt. Aus den dargestellten Werten lässt sich eine kinematische Ausdehnung von  $\mathcal{A}_v = 10 \cdot 0.2 \text{ m/s} = 2 \text{ m/s}$  ermitteln.

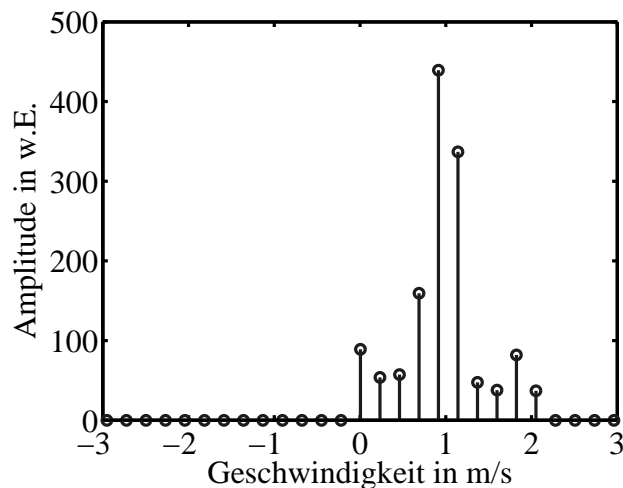


Abbildung 3.9: Geschwindigkeitsprofil eines sich bewegenden Fußgängers bei einer Geschwindigkeitsauflösung von  $\Delta v = 0.2 \text{ m/s}$

### 3.4.2 Beobachtung eines kinematisch ausgedehnten Zieles

Wird ein Fußgänger von einem Sensor vermessen, ergeben sich mehr oder minder starke Oszillationen der Werte von Entfernung und Geschwindigkeit über der Zeit. Das Bewegungsverhalten des Fußgängers kann zum Beispiel je nach Beobachtungswinkel zu sich periodisch wiederholenden Mustern bei den betrachteten Geschwindigkeiten führen. Der Zielwinkel und die Bewegungsrichtung wirken sich aufgrund der geometrischen Zusammenhänge als Parameter auf die beobachteten Größen aus.

Selbst die Bewegung des Rumpfes stellt nur in erster Näherung eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit  $v_{\text{Rumpf}}$  dar. Eine genauere Analyse des menschlichen Bewegungsapparates liefert die additive Überlagerung einer annähernd kosinusförmigen Schwingung der Geschwindigkeit in Laufrichtung während des Gangzyklus. Die Amplitude  $v_{\%}$  der Schwingung kann dabei relativ zur mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v} = L \cdot f_s$  angegeben werden.

$$v_{\text{Rumpf}}(t) = L \cdot f_s \cdot (1 + v_{\%} \cos(2\pi f_s t)) \quad (3.16)$$

Dabei bezeichnet  $L$  die Schrittlänge, den maximalen Abstand zwischen den beiden Füßen beim Gehen, und  $f_s$  die Schrittfrequenz.

Abbildung 3.10 gibt das Ergebnis der Untersuchungen von Lutzenberger [Lut02, S.99] sinngemäß wieder. Dargestellt ist die Geschwindigkeit des sogenannten Thorax-Abdomen-Segementes über der Dauer eines Gangzyklus

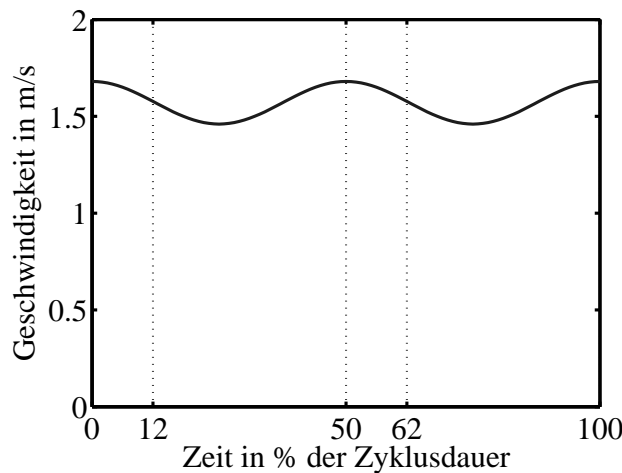


Abbildung 3.10: Geschwindigkeit  $v_{\text{Rumpf}}(t)$  der Progressivbewegung des Thorax-Abdomen Segmentes nach [Lut02]

(Doppelschritt) für eine Normalperson bei einer Kadenz von  $f_s = 120$  /min (Schritte pro Minute) und einer Doppelschrittweite von etwa  $2L = 1.6$  m. Der Spitze-Spitze Wert der Geschwindigkeitsänderung liegt bei über  $0.2$  m/s, was etwa  $v_{\%} = 14\%$  der durchschnittlichen Geschwindigkeit beträgt. Die Periodendauer der Schwingung liegt bei der halben Dauer eines Gangzyklus. Ursache für die Schwingung der Geschwindigkeit liegt in dem optimierten Bewegungsablauf des Menschen.

Wird zusätzlich die Bewegung der Beine über die vereinfachte Beschreibung als Pendel mit kosinusförmiger Schwingung der Geschwindigkeit  $v_{\text{Beine}}(t)$ , wie in Gleichung (3.17) angegeben, beschrieben, ergibt sich eine gute Annäherung der auftretenden Entfernungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeiten. Die Periodendauer der Schwingung von Armen und Beinen ist dabei doppelt so lang wie die Periodendauer der Schwingung des Rumpfes.

$$v_{\text{Beine}}(t) = L \cdot f_s \cdot (1 \pm \cos(\pi f_s t)) \quad (3.17)$$

Abbildung 3.11 zeigt dazu exemplarisch die sich ergebenden Entfernungs- und Geschwindigkeitswerte für einen Fußgänger, der sich mit einer Geschwindigkeit von  $\bar{v} = 1.6$  m/s über einen Zeitraum von  $T = 2$  s vom Beobachter entfernt und entsprechend zwei Doppelschritte ausführt. Aufgetragen sind dabei die Abhängigkeiten von Entfernung bzw. Geschwindigkeit über der Zeit sowie die direkte Gegenüberstellung von Entfernung und Geschwindigkeit für die vorher angenommenen Werte. Grundlage der Berechnungen ist das oben genannte einfache Modell mit kosinusförmiger Schwingung der Geschwindigkeit des Rumpfes (in blau) sowie der beiden Beine (rot und grün).

Die Abbildungen verdeutlichen dabei sehr eindrucksvoll verschiedene Eigenschaften der Bewegung. Während sich anhand von Abbildung 3.11(a) gut die mittlere Bewegung sowie die leichten Schwankungen in den beobachteten Entfernungen ablesen lassen, zeigt Abbildung 3.11(b) die Schwingung der Geschwindigkeit des Rumpfes, welche in der ersten Abbildung nur schwer zu erkennen ist. Ferner lässt sich in der zweiten Abbildung die Ausdehnung der auftretenden Geschwindigkeitskomponenten erkennen. Der Bereich der Geschwindigkeiten erstreckt sich dabei von  $v = 0 \text{ m/s}$  bis hin zur doppelten mittleren Geschwindigkeit  $v = 2 \cdot L \cdot f_s$ . In der dritten Abbildung 3.11(c) lässt sich neben der Rumpfschwingung auch deutlich die Schrittlänge von  $L = 80 \text{ cm}$  erkennen.

Obwohl die maximale geometrische Ausdehnung eines sich radial bewegenden Fußgängers eine Beschreibung als Punktziel ermöglichen könnte, zeigen die auftretenden Geschwindigkeiten, dass das dem Punktziel zugrunde liegende einfache Bewegungsmodell nicht anwendbar ist. Wird das RV-Diagramm der Bewegung in Abbildung 3.11(d) betrachtet, so ist eine Parallele zur Geschwindigkeitsachse zu erkennen. Die dargestellten Werte gelten dabei für die beschriebene Bewegung zum Zeitpunkt  $t = 0.5 \text{ s}$ . Im Vergleich zu den langen Zielen, die eine Ausdehnung in Entfernung, aber keine in Geschwindigkeit besitzen, ergibt sich hier entsprechend eine umgekehrte Abhängigkeit der Ausdehnungen und damit ein kinematisch ausgedehntes Ziel.

#### 3.4.3 Geometrische und kinematische Eigenschaften

Werden die geometrischen und kinematischen Eigenschaften eines Fußgängers analog zur Beschreibung eines langen Zieles relativ zu einem Referenzpunkt  $\vec{o}_R$  des Objektes beschrieben, ergibt sich eine zeitabhängige Änderung der relativen Positionen  $\vec{r}_i(t)$  der übrigen Punkte des Objektes. Für einen Fußgänger würde sich als Referenzpunkt zum Beispiel der Schwerpunkt anbieten, da dieser selbst keiner Verformung unterliegt. Zur einfachen Darstellung sollte ein verwendeter Referenzpunkt nur von der Bewegung des gesamten Objektes und nicht von den Bewegungsmustern des Objektes selbst abhängen. Die wesentlichen Änderungen ergeben sich in der Geschwindigkeit der Arme und Beine des Menschen während der Bewegung [Per03].

$$\mathbb{M}_{\text{Kin}}(t) = \left\{ \vec{m}_i(t) : \vec{m}_i(t) = \begin{bmatrix} r_o \\ v_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} 0 \\ v_i(t) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.18)$$

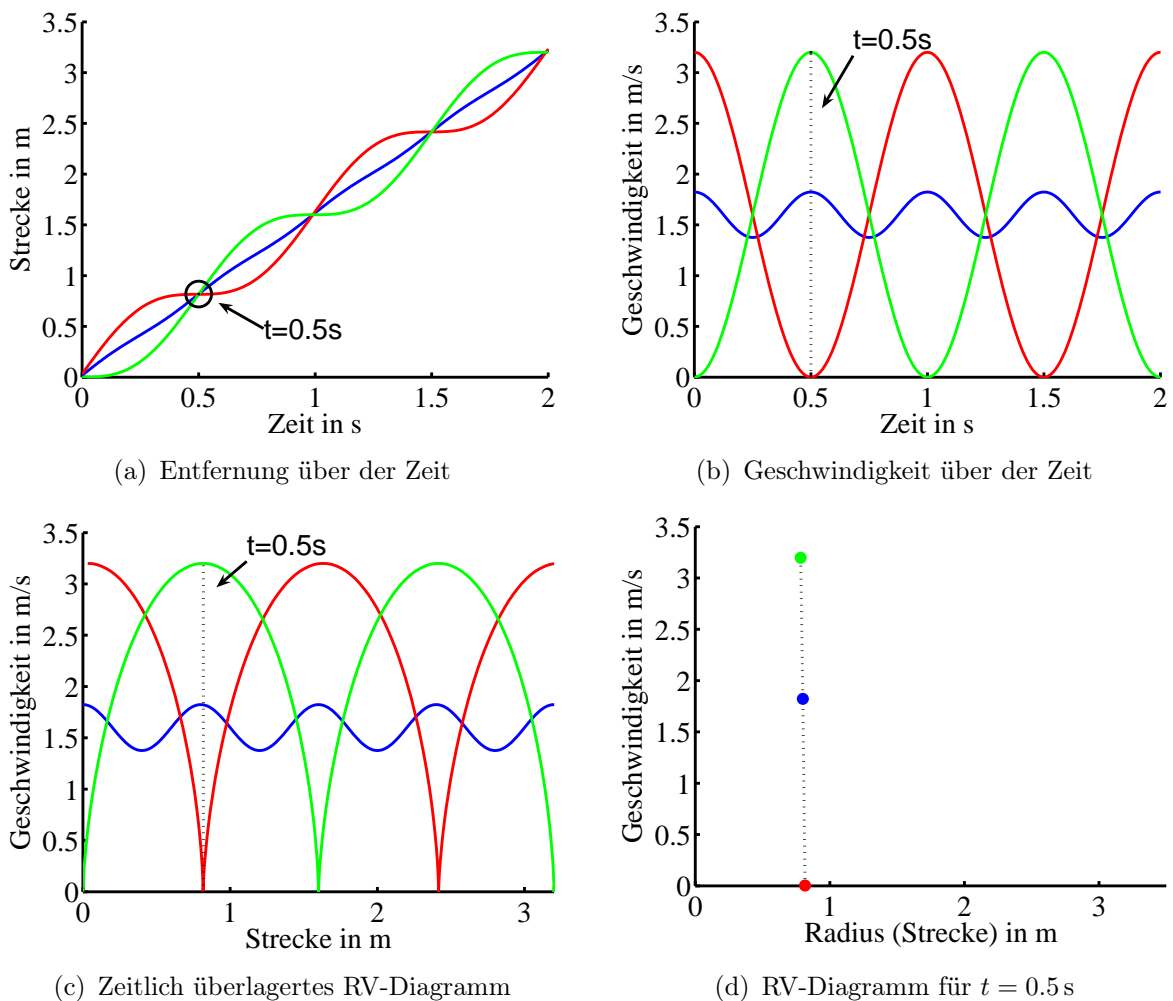


Abbildung 3.11: Abhängigkeiten von Entfernungen und Geschwindigkeiten bei der Bewegung des Rumpfes (blau) und der Beine (rot, grün)

Neben der Änderung der äußeren Form und damit der geometrischen Eigenschaften, haben auch die einzelnen Objektpunkte eine eigene zeitabhängige Geschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit muss nur im Mittel mit der Geschwindigkeit des Referenzpunktes übereinstimmen [Fis01].

### 3.5 Doppelt ausgedehnte Ziele

Werden Fahrzeuge mit einem Sensorsystem für den Nahbereich betrachtet, so liegen die Abmessungen des Objektes in der gleichen Größenordnung wie die Entfernung der Objekte zu den Sensoren. Im Falle dichter Verkehrssituationen im Stadtverkehr wird dieser Sachverhalt besonders deutlich. Die Entfernung

zum benachbarten Fahrzeug kann dabei unter einem Meter liegen, während das Fahrzeug selbst eine Ausdehnung von beispielsweise  $1.7\text{ m} \times 4.6\text{ m}$  hat. Neben der Länge des Fahrzeuges, die bereits in Abschnitt 3.3 betrachtet wurde, spielen auch die Breite des Objektes und die damit verbundenen unterschiedlichen Aspektwinkel, unter denen das Objekt wahrgenommen wird, eine entscheidende Rolle, selbst wenn von Sensoren ohne Winkelauflösung ausgegangen wird.

#### 3.5.1 Gleichzeitige Messung mehrerer Ausdehnungen

Während bei der Bewegung eines Fußgängers im Wesentlichen die kinematische Ausdehnung sichtbar ist, tritt bei der Betrachtung von sich nicht radial bewegenden Fahrzeugen häufig eine gleichzeitig messbare Entfernung- und Geschwindigkeitsausdehnung auf. Die Ursache hierfür ist die vom Beobachtungswinkel  $\alpha$  abhängige Radialgeschwindigkeit  $v$  unterschiedlicher Teile des Objektes.

$$v(\alpha) = v_x \cdot \cos(\alpha) + v_y \cdot \sin(\alpha) \quad (3.19)$$

Zur Verdeutlichung des Sachverhalts sind in Abbildung 3.12 die Messwerte eines Monopuls-Sensors von der Vermessung eines Fahrzeuges dargestellt, welches sich zum Zeitpunkt der Messung in einem Überholvorgang auf der linken Spur befindet. Die gemessenen relativen Geschwindigkeiten liegen dabei im Bereich von  $0.96\text{ m/s}$  bis  $2.3\text{ m/s}$  und die gemessenen Entfernungen im Bereich von  $4.5\text{ m}$  bis  $7\text{ m}$ . Anhand dieser Darstellung ist ersichtlich, dass das vermessene Ziel bei dieser Betrachtungsrichtung sowohl über eine Entfernungsausdehnung als auch über eine Geschwindigkeitsausdehnung verfügt. Eine zusätzliche sekundäre Winkelausdehnung ist trotz fehlender Winkelauflösung erkennbar, da sich die einzelnen detektierten Reflexionszentren in Entfernung und/oder Geschwindigkeit unterscheiden und somit jeweils nur eine Winkelmessung aber keine Winkelauflösung nötig ist.

#### 3.5.2 Beobachtung eines Flächenzieles

Analog zur Betrachtung eines langen Zieles von einem Ort aus können die gleichen Überlegungen auch für ein flächiges Objekt angestellt werden. Für die Darstellung wird eine typische Straßenverkehrssituation mit einem Fahrzeug auf der Nachbarspur angenommen. Als Ausgangspunkt für die Betrachtung des Objektes wird eine vereinfachte Kontur verwendet, um die wesentlichen Sachverhalte zu verdeutlichen. In Abbildung 3.13(a) ist beispielhaft die Kontur

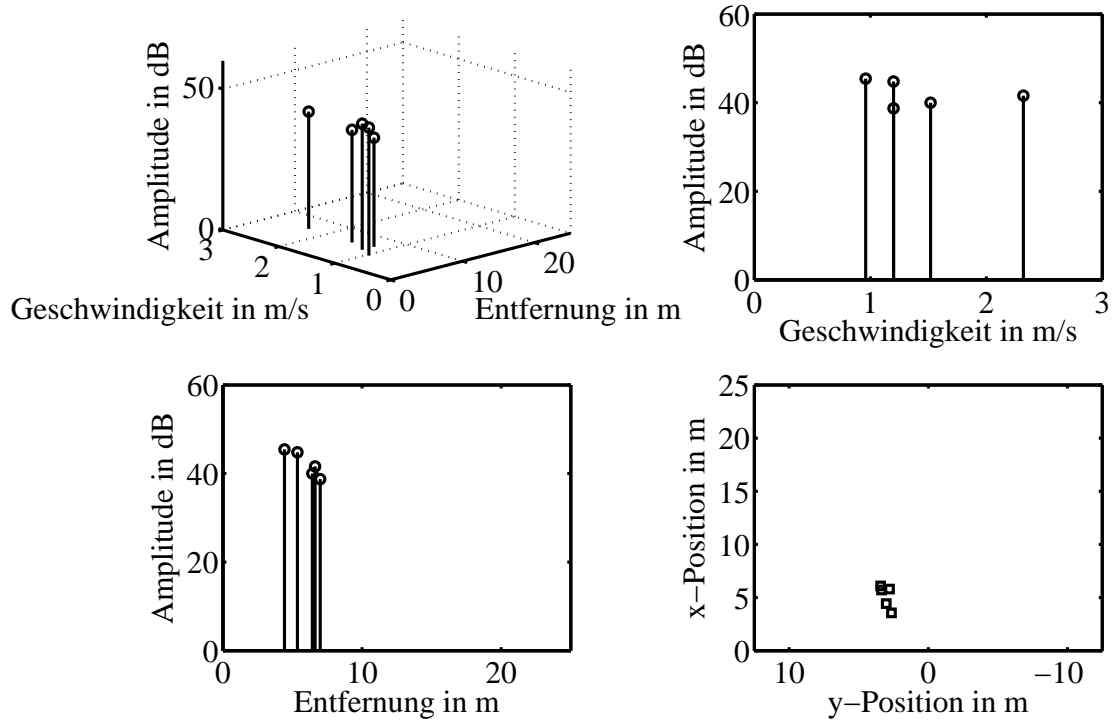


Abbildung 3.12: Doppelt ausgedehntes Profil eines überholenden Fahrzeuges, vermessen mit einem Sensor, der über eine Geschwindigkeitsauflösung von  $\Delta v = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und eine Entfernungsauflösung von  $\Delta r = 1 \text{ m}$  verfügt

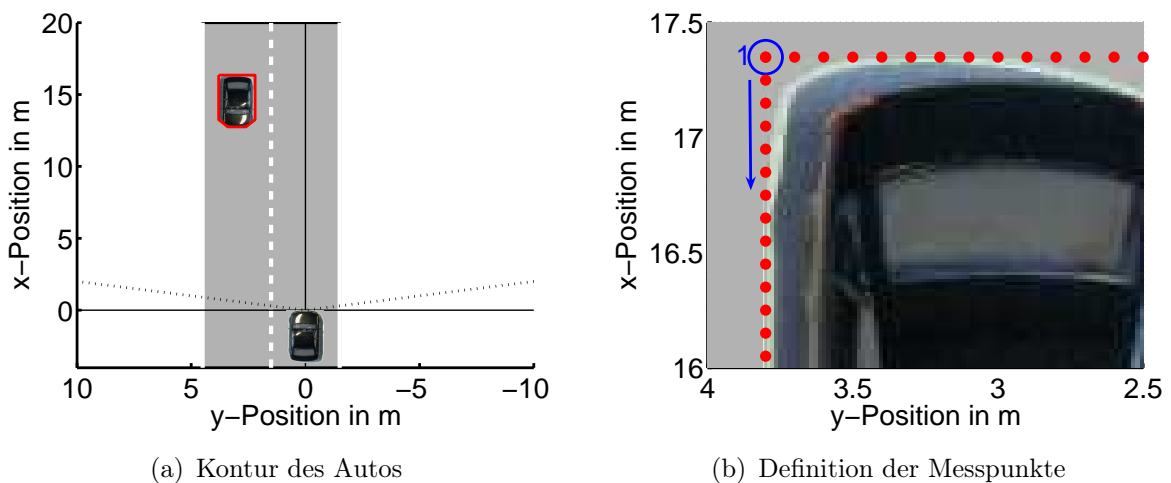


Abbildung 3.13: Kontur eines Autos in 13m Entfernung auf der Nachbarspur (links) und Definition der Messpunkte (rechts)

eines Autos in 13 m Entfernung auf der linken benachbarten Fahrspur dargestellt. Die Länge des Autos wird mit  $L = 4.6$  m und die Breite mit  $B = 1.7$  m angesetzt. Als Referenz für die Position des Autos steht der Mittelpunkt der vorderen Stoßstange. Dieser ist im Vergleich zum Ort des Betrachters um 3 m nach links verschoben.

Für die weiteren Rechnungen werden Punkte im Abstand von 10 cm auf der Kontur angenommen (vgl. Abb. 3.13(b)). Für jeden dieser Punkte lässt sich die Entfernung zum Sensor sowie der radiale Anteil der Geschwindigkeit errechnen. Zu beachten ist dabei, dass jeder Punkt nicht nur eine individuelle Entfernung, sondern aufgrund des Einflusses des Winkels auch eine individuelle radiale Geschwindigkeit hat. Der Wert der radialen Geschwindigkeit ergibt sich aus der Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf den Entfernungsvektor. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird für den Ursprung des Koordinatensystems die Sensorposition angenommen.

In Abbildung 3.14 sind die resultierenden 121 berechneten Entfernungs- und Geschwindigkeitswerte dargestellt. Die Punkte werden entsprechend der Definition in Abbildung 3.13(b) angenommen, wobei sich der Punkt mit der Nummer 1 in der linken hinteren Ecke (blauer Kreis in der der Abbildung) befindet. Die Reihenfolge der übrigen Punkte ergibt sich aus dem mathematisch positiven Umlauf entlang der Kontur. Im linken Teil der Grafik (3.14(a)) sind die Werte für ein stehendes Fahrzeug und im rechten Teil (3.14(b)) für ein Auto dargestellt, das sich mit einer Geschwindigkeit von 14 m/s nähert.

Der Nullpunkt der Ordinate liegt zur einfachen Erfassung der Ausdehnungen jeweils auf dem minimalen Wert. Neben dem Nullpunkt ist der tatsächliche Wert angegeben. Für die Messwerte der Entfernung lässt sich eine Ausdehnung von  $\mathcal{A}_r = 4.8$  m erkennen. Dies spiegelt die tatsächliche Länge des Objektes unter Berücksichtigung der schrägen Betrachtung und der Breite des Autos wieder. Die gemessene Ausdehnung weicht somit in Abhängigkeit vom Winkel von der realen Länge des Autos  $L = 4.6$  m ab. Dieser Wert ist unabhängig von der Geschwindigkeit des Autos. Die Beobachtung eines flächigen Objektes verdeutlicht somit die geometrischen Eigenschaften dieses Objekttyps. Zu beachten ist, dass sich die geometrischen Eigenschaften bei der Beobachtung auch auf die beobachtete Geschwindigkeit auswirken. Während die Charakterisierung eines langen Zieles annimmt, dass sich alle Punkte mit der gleichen beobachteten Geschwindigkeit bewegen, zeigen sich bei der Beobachtung von flächigen Objekten unterschiedliche radiale Anteile der absoluten Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel und den geometrischen Eigenschaften des Objektes. Es handelt sich daher um ein doppelt ausgedehntes Objekt, mit einer messbaren Entfernungs- und Geschwindigkeitsausdehnung.

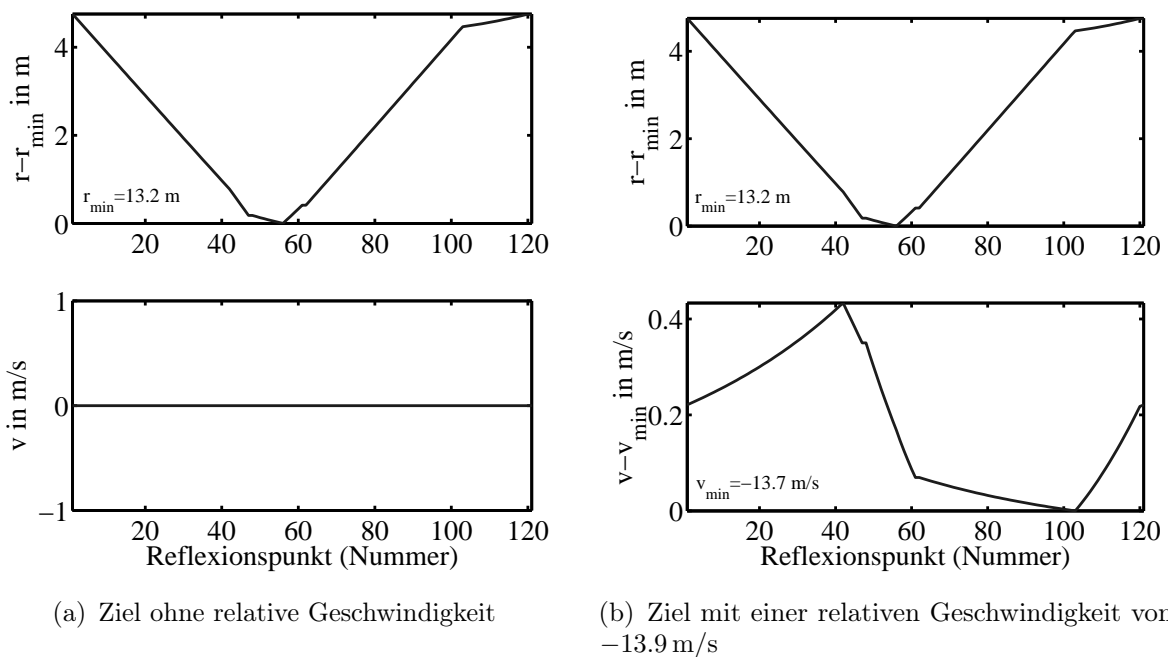


Abbildung 3.14: Gegenüberstellung der geometrischen Messwerte für Punkte auf der Kontur für ein Ziel bei  $x = 13$  m auf der Nachbarspur

Um die Auswirkungen der Objektposition auf die beobachteten Geschwindigkeiten zu verdeutlichen, wird auf den Bezug der einzelnen Werte zur Kontur verzichtet. Auf diese Weise lassen sich die beobachteten Werte für Entfernung und Geschwindigkeit direkt in Relation setzen. Werden die Werte zweier simulierter Fahrten des Fahrzeuges auf der eigenen (Abb. 3.15(a)) und der benachbarten Spur (Abb. 3.15(b)) berechnet, ergibt sich eine deutliche Änderung der beobachteten Geschwindigkeiten des betrachteten flächigen Objektes in Abhängigkeit von der Geometrie der betrachteten Situation. Je nach betrachteter Verkehrssituation kann sich ein flächiges Objekt, hier ein Auto, bei der Messung als langes Ziel und als doppelt ausgedehntes Ziel darstellen.

Analog zur Darstellung in Abbildung 3.6(b) sind in Abbildung 3.15(c) für jede Kontur die Abhängigkeiten von Geschwindigkeit und Entfernung im RV-Diagramm aufgetragen. Die Farben beziehen sich dabei auf die jeweiligen Positionen, an denen sich das Ziel zu unterschiedlichen Zeiten während der Annäherung befindet. Für das Fahrzeug in der eigenen Spur sind die Linien durchgezogen und für das Fahrzeug in der benachbarten Spur gepunktet dargestellt. Aus dieser Grafik lässt sich sofort der starke Einfluss des Winkels auf die Beobachtung der Geschwindigkeit erkennen. Je größer der Azimut ist, desto größer ist die Ausdehnung der Geschwindigkeit. So kann diese für ein

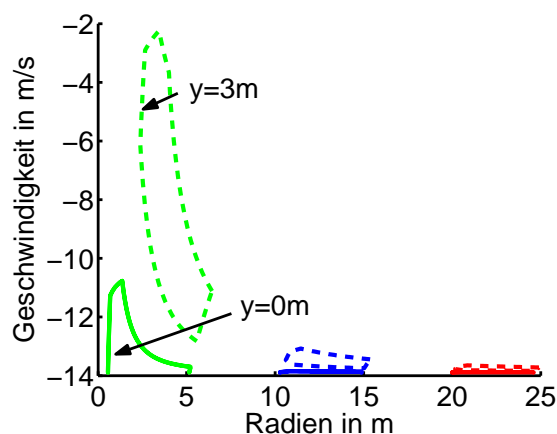
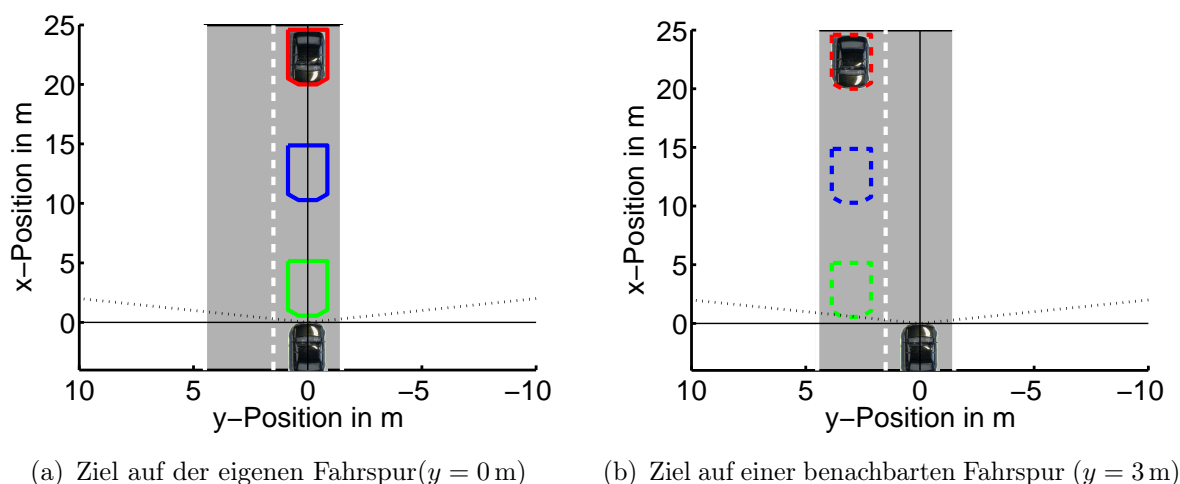


Abbildung 3.15: Relation zwischen Entfernung und Geschwindigkeit bei der Beobachtung eines doppelt ausgedehnten Zieles

normales Fahrzeug, welches sich auf der Nachbarspur direkt neben dem Sensor befindet, leicht Werte bis zu  $\mathcal{A}_v = 10 \text{ m/s}$  annehmen. Für Fahrzeuge in der eigenen Fahrspur bei Entfernungen von über 5 m ist der Einfluss hingegen gering.

Auch wenn für flächige Objekte feste kinematische Eigenschaften, das heißt eine einfache gerade Fahrt vor einem unbewegten Sensor, angenommen werden, ergeben sich bei der Beobachtung der Geschwindigkeit vielfältige Anteile. Treten noch zusätzliche Bewegungen des Objektes oder des betrachtenden Sensors auf, kommt es bei den beobachteten Geschwindigkeiten zu einer Überlagerung verschiedenster Effekte. Diese Überlegungen zeigen deutlich, dass sich flächige Objekte in der Regel als doppelt ausgedehnte Ziele im Sinne der Definition auf Seite 53 darstellen.

### 3.5.3 Geometrische und kinematische Eigenschaften

Eine vollständige Charakterisierung der zu beschreibenden Objekte erfordert folglich eine Berücksichtigung der Abmessungen bzw. eine genaue Bestimmung der Kontur. Für ein etwa rechteckiges Objekt kann diese näherungsweise über seine Länge  $L$  und seine Breite  $B$  festgelegt werden. Dabei kann von einer festen Position der einzelnen Teile des Objektes zueinander ausgegangen werden. Diese Objekte decken somit eine Fläche in der Ebene ab und werden zur Verdeutlichung auch als flächige Objekte bezeichnet. Ist die relative Position aller Punkte  $\vec{r}_i$  des Objektes zu einem Referenzpunkt  $\vec{o}_R$  bekannt, kann die Bewegung eines flächigen Objektes über die Bewegung des einzelnen Referenzpunktes zuverlässig festgelegt werden.

$$\mathbb{M}_{\text{Doppelt}}(t) = \left\{ \vec{m}_i(t) : \vec{m}_i(t) = \begin{bmatrix} r_o \\ v_o \\ \alpha_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} l_i \\ v_i(\alpha) \\ \alpha_i \end{bmatrix} \right\} \quad (3.20)$$

Obwohl die geometrischen Eigenschaften des Objektes während der Bewegung unverändert bleiben, können sich die kinematischen Eigenschaften sehr wohl ändern. So führt ein Fahrzeug während einer Kurvenfahrt eine Drehung in seinem Inertialsystem durch [Kir00]. Entsprechend können unterschiedliche Teile des Objektes unterschiedliche Geschwindigkeiten in der Ebene haben. Unabhängig von diesen Effekten können sich aber aufgrund der Breite des Objektes bei der Beobachtung auch bei gerader Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit unterschiedliche Geschwindigkeiten ergeben, obwohl sich alle Teile mit der gleichen Geschwindigkeit in der Ebene bewegen.

## 3.6 Messung einer Ausdehnung im Winkel

Die Messung einer Winkelausdehnung stellt im Allgemeinen einen Sonderfall dar, da viele der im Automobilbereich eingesetzten Sensoren über keine unabhängige Winkelauflösung verfügen. Wird jedoch ein Sensor angenommen, der Entfernung und Winkel mit einer ausreichend hohen Auflösung  $\Delta r$  und  $\Delta \alpha$  der beiden Messgrößen messen kann, so entstehen zweidimensionale (2D) Auflösungszellen  $\mathfrak{A}_2$  in der Ebene. Abbildung 3.16(a) zeigt schematisch die Situation der Abdeckung der Auflösungszellen durch ein stehendes Auto.

Abbildung 3.16(b) zeigt die Situation für dasselbe Ziel, wenn keine Auflösung der Winkelmessung vorliegt. Damit sind die Auflösungszellen  $\mathfrak{A}_1$  nur eindimensional (1D). Eine fehlende Auflösung der Winkelmessung bedeutet jedoch nicht,

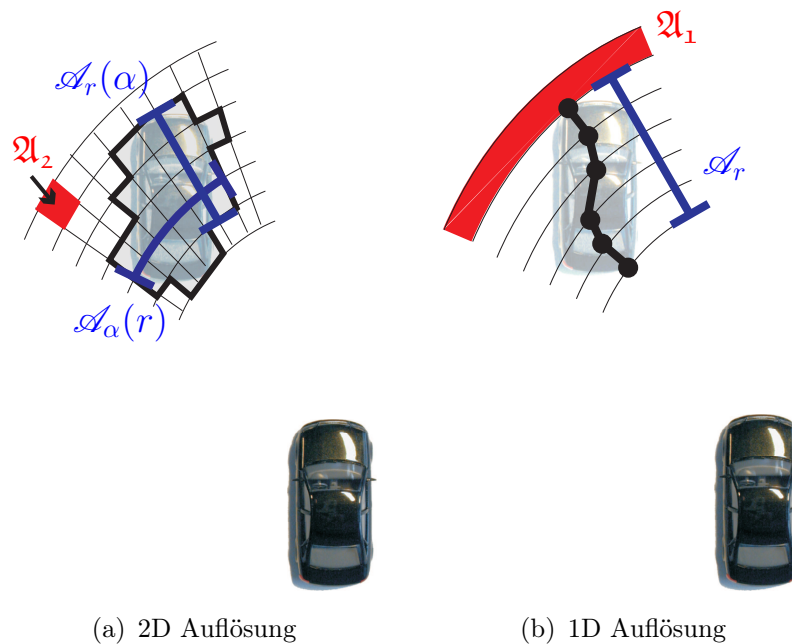


Abbildung 3.16: Darstellungen von Auflösungsformen und den sich daraus ergebenden Beschreibungsformen für ein Auto in der Ebene

dass keine Winkel gemessen werden können. Vielmehr kann jedem isolierten Reflexionszentrum, zum Beispiel über eine Monopuls-Messung, ein Winkel zugeordnet werden (vgl. Kap. 2.6.3). Wie das Beispiel eines quer fahrenden Autos in Abbildung 3.17 zeigt, liefert die Winkelschätzung von in Entfernung und/oder Geschwindigkeit aufgelösten Reflexionszentren sehr brauchbare Resultate, sofern ein dominierendes Reflexionszentrum vorliegt. Eine Bestimmung der Winkelausdehnung ist hier ohne Winkelauflösung möglich.

### 3.6.1 Überlagerung im Winkel

In Abschnitt 2.6.3 wurde ein Verfahren zur Messung des Winkels auf Grundlage von Laufzeit bedingten Phasendifferenzen an zwei dicht platzierten Empfangsantennen (Phasen-Monopuls) vorgestellt. Eine wesentliche Voraussetzung dieses Verfahrens ist die Annahme eines einzelnen (punktförmigen) Zieles innerhalb einer Auflösungszone des Sensors, da sich nur in diesem Fall eine eindeutig auswertbare Phasenmessung ergibt. Liegt mehr als ein Ziel innerhalb der Auflösungszone, so überlagern sich die reflektierten Wellen. Im Sensor wird diese Überlagerung unter der Hypothese eines einzelnen Zieles im Empfangssignal ausgewertet und ein vermeintlicher Zielwinkel bestimmt.

Die Berechnung des mutmaßlichen Zielwinkels folgt dabei den Gleichungen

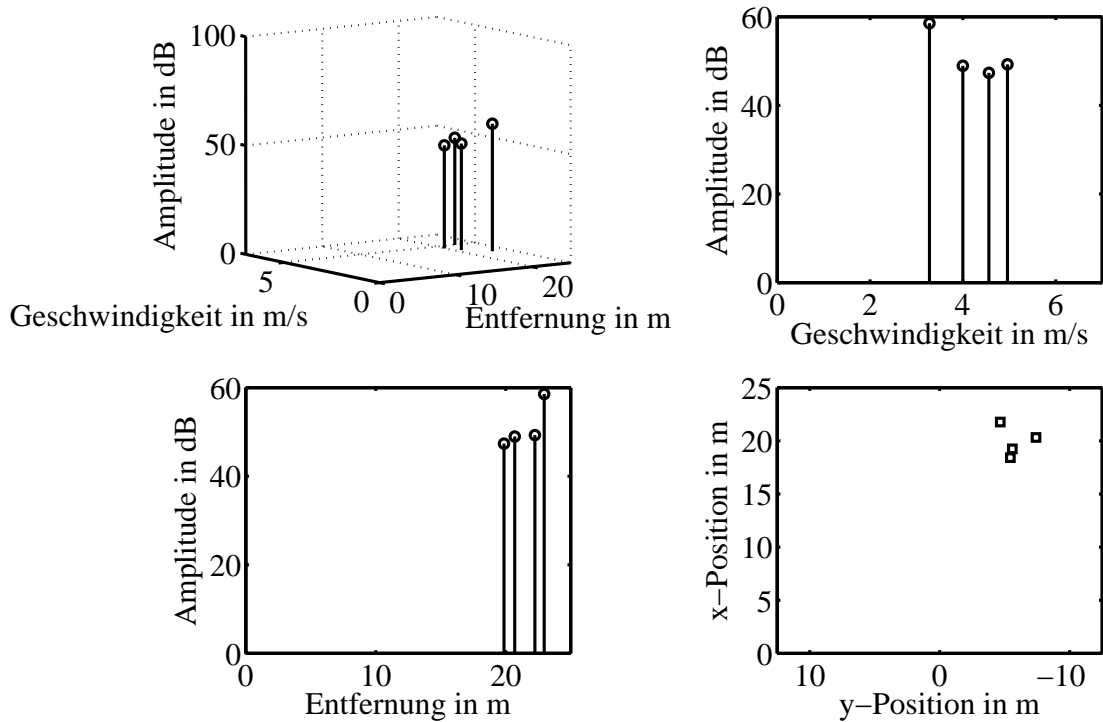


Abbildung 3.17: Doppelt ausgedehntes Profil eines quer fahrenden Fahrzeuges ( $\Delta v = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $\Delta r = 1 \text{ m}$ )

(2.82) bis (2.85) zur Berechnung der Summen- und Differenzterme für ein einziges Reflexionszentrum und lässt sich leicht auf eine beliebige Anzahl von Zielen erweitern.

$$\Sigma_s = \sum_{i=1}^n B_i (1 + e^{-j\psi_i}) \quad (3.21)$$

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n B_i (1 - e^{-j\psi_i}) \quad (3.22)$$

Für die gemessene Phasendifferenz gilt dann gemäß (2.86)

$$\psi_s = 2 \cdot \arctan \left( \frac{|\Delta_s|}{|\Sigma_s|} \right) \quad (3.23)$$

Soll die Überlagerung der reflektierten Wellen und der sich daraus ergebende Zielwinkel berechnet werden, so hat die Stärke der Reflexion an den jeweiligen Objekten einen wesentlichen Einfluss auf den geschätzten Winkel.

Zwei Fälle sind dabei besonders charakteristisch und leicht einzusehen. Zum einen wird, wenn eines der Objekte bedeutend bessere Reflexionseigenschaften als die übrigen besitzt, im Wesentlichen der Winkel dieses Objektes bestimmt. Zum anderen ergibt sich bei zwei gleich stark reflektierenden Objekten eine Winkelschätzung genau in der Mitte der tatsächlichen Positionen. Während im ersten Fall ein Objekt bei der Messung übersehen wird, ergibt sich im zweiten Fall eine gänzlich falsche Einschätzung der tatsächlichen Situation durch die Winkelmessung, sofern die unterschiedlichen Reflexionszentren weit voneinander entfernt liegen. Reflexionseigenschaften

Die Folgen lassen sich anhand eines sehr einfachen Beispiels verdeutlichen. Gegeben sind zwei Ziele  $\vec{o}_1$  und  $\vec{o}_2$  in der gleichen Entfernung zum Sensor, aber an unterschiedlichen Positionen in der Ebene.

$$\vec{o}_1 = [10 \text{ m}, 20^\circ]^T \quad (3.24)$$

$$\vec{o}_2 = [10 \text{ m}, -20^\circ]^T \quad (3.25)$$

Abbildung 3.18 zeigt die sich ergebenden Winkelschätzungen in Abhängigkeit vom Amplitudenverhältnis der beiden empfangenen Reflexionen. Zur Verdeutlichung sind zusätzliche die angenommenen Zielpositionen als kleine Dreiecke eingezeichnet.

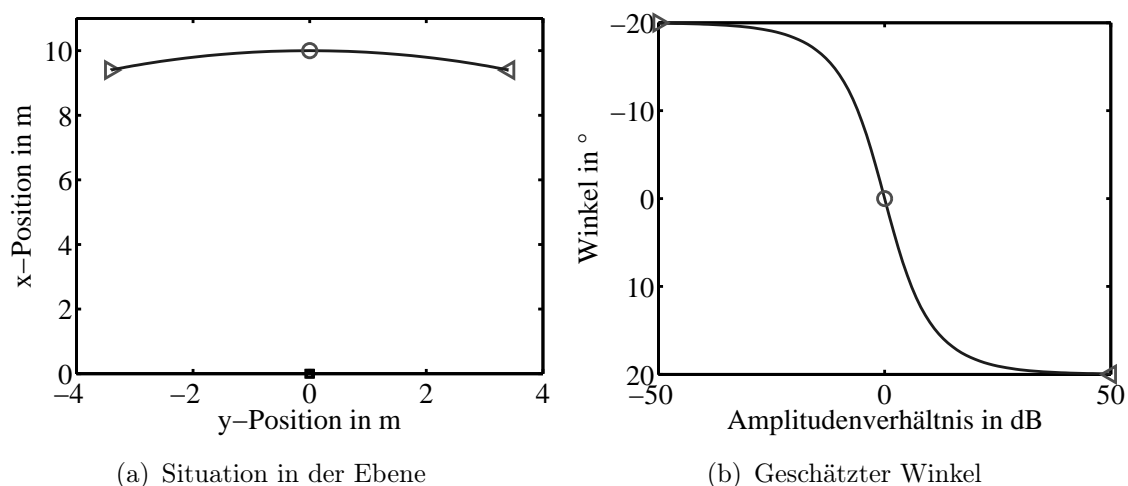


Abbildung 3.18: Darstellung der fehlerhaften Winkelmessung bei einem Phasen-Monopuls einer symmetrischen Anordnung von zwei Zielen in der Ebene in Abhängigkeit vom Amplitudenverhältnis der beiden einzelnen Reflexionen

Bei ausgedehnten Objekten mit einer Anzahl von im Allgemeinen unbekanntem, dicht platzierten einzelnen Reflexionszentren ergibt sich folglich eine objektabhängige Fluktuation der Winkelmessung durch Interferenzeffekte, sofern die einzelnen Zentren nicht aufgelöst werden können. Eine sehr umfassende Einführung in die statistische Beschreibung von ausgedehnten Zielen ist in [OB85] gegeben, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird.

## 3.7 Berücksichtigung der Verkehrssituation

Die vorangegangenen Darstellungen zeigen, welche Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der vermessenen Objekte und den Eigenschaften der Radarmessung bestehen. Dabei wird deutlich, dass auch die Anordnung der Objekte und deren Bewegungsverhalten einen entscheidenden Einfluss auf die von einem Objekt gewonnenen Messdaten hat. Generell werden Radarmessungen in konkreten Verkehrssituationen durchgeführt. Folglich werden nicht nur Objekte vermessen, sondern immer Objekte in bestimmten Situationen. Die Charakterisierung einer Situation kann von der Angabe der Fahrtrichtung des Objektes, über die Angabe eines Straßentyps bis hin zur Spezifizierung komplizierter Szenarien im Stadtverkehr mit mehreren Radarzielen unterschiedlichste Details beinhalten.

*Begriff 9 (Situation):* Die Gesamtheit der Eigenschaften der Umgebung und der Bewegungsarten der Objekte einer vermessenen Szene werden als Verkehrssituation oder kurz Situation  $\mathcal{S}$  bezeichnet.

Abbildung 3.19 greift zur Verdeutlichung nochmals drei unterschiedliche Bilder auf, die sich bei der Vermessung eines vorausfahrenden Fahrzeuges ergeben können. Die Geschwindigkeit des vermessenen Fahrzeuges ist in allen drei Fällen gleich und wird mit  $v_x = -13 \text{ m/s}$ ,  $v_y = 0 \text{ m/s}$  angenommen. Auffällig ist dabei, dass dem Fahrzeug in Abhängigkeit der jeweiligen Verkehrssituation drei unterschiedliche Ausdehnungstypen zugeordnet werden. So erscheint es zum Beispiel als Punktziel (vgl. Abb. 3.19(d)), wenn es in großer Entfernung von den Sensoren mit konstanter Geschwindigkeit fährt (vgl. Abb. 3.19(a)), als langes Ziel (vgl. Abb. 3.19(e)), wenn es sich relativ nah in radialer Richtung bewegt (vgl. Abb. 3.19(b)) und bei einer Fahrt (vgl. Abb. 3.19(c)) mit geringem Abstand auf einer benachbarten Spur in aller Regel als doppelt ausgedehntes Ziel (vgl. Abb. 3.19(f)). Die Zuordnung des Fahrzeuges zu einem bestimmten Ausdehnungstypen stellt folglich keine injektive Abbildung dar.

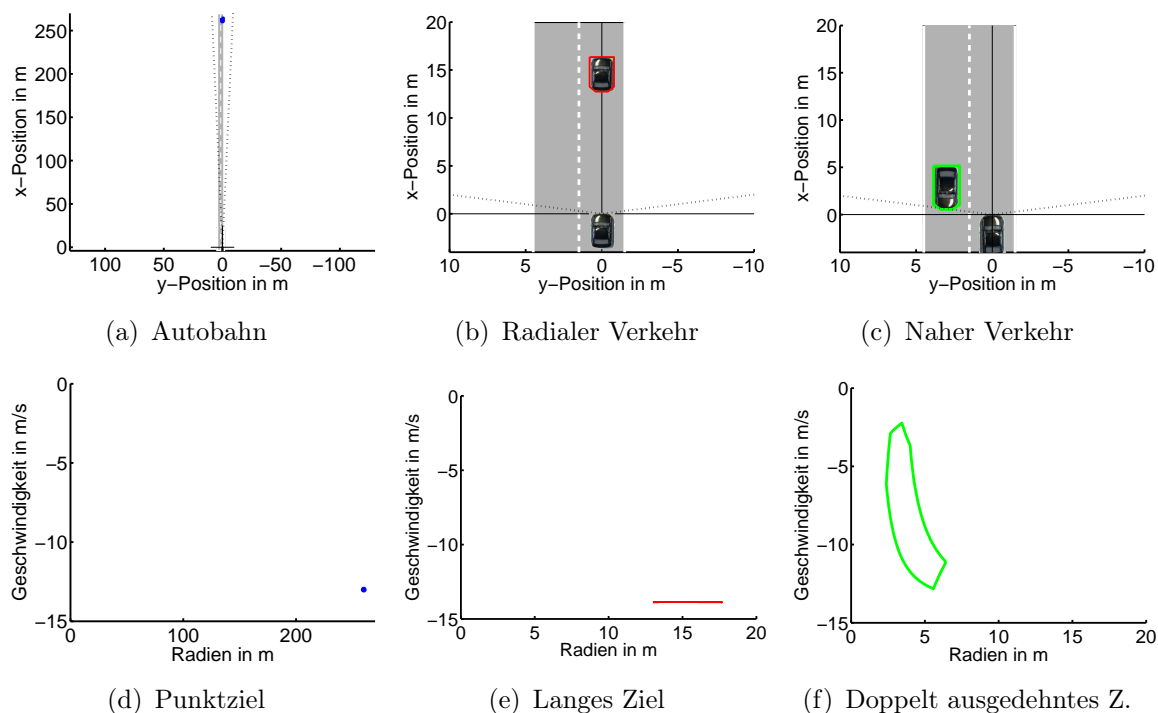


Abbildung 3.19: Beispiele für situationsabhängige Bilder bei der Vermessung eines fahrenden Autos

Das Bewusstsein für diese Verknüpfung von Objekt und Situation soll durch die Einführung des zusätzlichen Begriffes *Sujet* (franz. für Gegenstand, Thema) geschärft werden.

*Begriff 10 (Sujet):* Für die Anwendung von Radarsensoren im Straßenverkehr beschreibt ein *Sujet*  $\mathcal{O} = [\mathcal{T}, \mathcal{S}]$  ein Objekt bzw. Verkehrsteilnehmer  $\mathcal{T}$  in einer konkreten Verkehrssituationen  $\mathcal{S}$ .

Der Begriff *Sujet* wird folglich nicht synonym mit dem Begriff *Objekt* verwendet und ist in Fällen von Bedeutung, in denen die betrachtete Verkehrssituation einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Vermessung eines Objektes hat.

Soll mit der Messung eine bestimmte Eigenschaft des vermessenen Objektes ermittelt werden, müssen die Einflüsse der Verkehrssituation auf die Radarmessung erkannt und eliminiert werden. Die häufig durchgeführten Vereinfachungen der Situationen unter Versuchsbedingungen lassen diesen Aspekt einer realitätsbezogenen Messung leicht vergessen. Es muss daher deutlich zwischen den Einflüssen der Objekte und den Einflüssen der Situationen auf das Messergebnis unterschieden werden.

### Mathematische Formulierung der Vermessung von Sujets

Mathematisch lässt sich die Radarmessung als Zuordnung eines Sujets zu einem Bild beschreiben. Abbildung 3.20 verdeutlicht dies anhand eines Blockschaltbildes.



Abbildung 3.20: Zuordnung vom Sujet zum Bild

Die Grundmenge der Zuordnung vom Sujet zum Bild ist dabei die Produktmenge  $\mathcal{T} \times \mathcal{S}$ , mit der Menge aller Verkehrsteilnehmerarten  $\mathcal{T}$  und der Menge aller Verkehrssituationen  $\mathcal{S}$ . Beispiele für Objekte bzw. Verkehrsteilnehmer sind Personenkraftwagen und Lastkraftwagen, aber auch Fußgänger, Radfahrer oder auch Teile der Randbebauung (Ampeln, Laternen, Zäune usw.), also jegliche Gegenstände, die vom eingesetzten Sensor detektiert werden können. Die Verkehrsteilnehmer treten jedoch generell im Kontext einer bestimmten Verkehrssituation auf. So kann ein Fahrzeug zum Beispiel stehend am Fahrbahnrand, auf einer Autobahn (BAB) oder während eines Abbiegemanövers auf einer Kreuzung vom Sensor beobachtet werden. Die jeweilige Verkehrssituation beeinflusst dabei die Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers. Sofern die Situation einen messbaren Einfluss auf die gewonnenen Daten hat, darf entsprechend nicht von Objekten, sondern muss von Sujets gesprochen werden.

Bedingt durch den Einsatz eines Radarsensors werden von jedem Sujet in Entfernungen  $r_i$  und Geschwindigkeit  $v_i$  aufgelöste Messwerte gewonnen. In Abhängigkeit der Sensorauflösung können dabei für ein Sujet auch mehrere Messwerte gewonnen werden. Diese lassen sich als Teilmenge  $\mathbb{M}$  der Produktmenge  $R \times V$  mit  $r_i \in R$  und  $v_i \in V$  beschreiben, wobei  $R$  die Menge aller Entfernungswerte und  $V$  die Menge aller Werte der Geschwindigkeit darstellt. Der ganze Zusammenhang kann folglich als Abbildung  $M$  formuliert werden (vgl. Abb. 3.21).

$$M : \mathcal{O} \longmapsto \mathbb{M} \quad \text{mit} \quad \mathcal{O} \in \mathcal{T} \times \mathcal{S} \quad \text{und} \quad \mathbb{M} \subset R \times V \quad (3.26)$$

Neben den Entfernungs- und Geschwindigkeitswerten lässt sich mit Radarsensoren häufig auch der Azimut (Zielwinkel)  $\alpha$  bestimmen, so dass Wertetripel  $[r; v; \alpha]$  gebildet werden können. Da die Messung des Winkels jedoch bei den heute für den Automobilbereich zur Verfügung stehenden Sensoren über keine

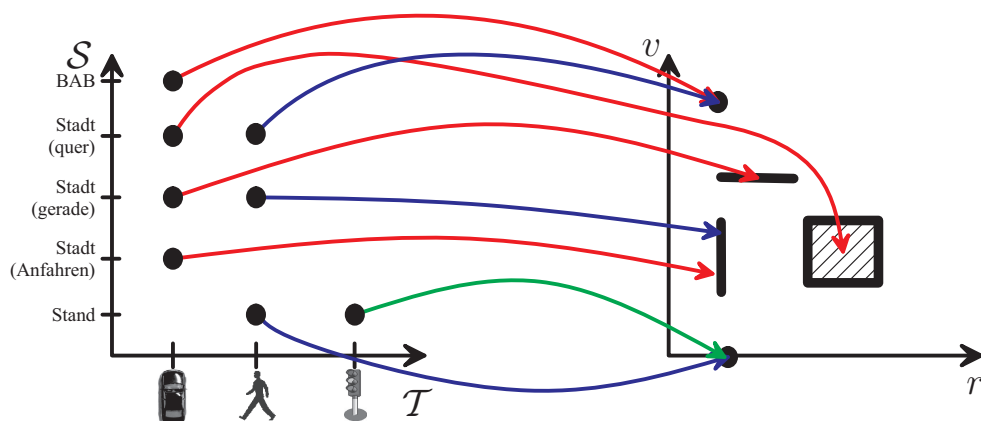


Abbildung 3.21: Darstellung der Zuordnung von Sujets zu den vier Ausdehnungstypen aus Abb. 3.3 in der RV-Ebene

unabhängige Auflösung verfügt, muss der Winkel gesondert betrachtet werden. Sofern in der Zukunft Sensoren mit Winkelauflösung verfügbar sind, lässt sich die Abbildung  $M$  leicht auf einen dreidimensionalen Bildraum  $R \times V \times A$  ausweiten. Dabei steht  $A$  für die Menge aller möglichen Werte des Zielwinkels  $\alpha$ . In dieser Arbeit wird der gemessene Zielwinkel nur zur Beschreibung der Position des Zieles in der Ebene und in seinen Auswirkungen auf die Messung von Entfernung und Geschwindigkeit betrachtet. In der Abbildung wird weiterhin von einem zweidimensionalen Bildraum  $R \times V$  ausgegangen.

Jedem Sujet wird durch das Bild folglich eine Teilmenge  $\mathbb{M}$  zugeordnet, die in der folgenden Signalverarbeitung die gemessenen Informationen über das Sujet enthält und stellvertretend für dieses betrachtet wird. Die Beschreibung über ein Punktbild impliziert entsprechend eine Beschreibung des Sujets über eine einelementige Teilmenge

$$\{[r; v]\} \subset R \times V \quad (3.27)$$

und damit als Punkt.

Komplexe Sujets können vielfach nicht durch die Angabe einer einzigen Entfernung und die Angabe einer einzigen Geschwindigkeit beschrieben werden. Deshalb muss das Punktbild auf Teilmengen mit  $N$  Elementen erweitert werden.

$$\mathbb{M} = \{[r_i; v_i] : r_i \in [r_{min}, r_{max}] \wedge v_i \in [v_{min}, v_{max}]\} \quad i = 1, \dots, N \quad (3.28)$$

Da neben den Sujets selbst auch die eingesetzte Sensorik einen entscheidenden Einfluss auf die beschriebene Abbildung hat, müssen beim Entwurf einer

neuen Anwendung sowohl die Eigenschaften der zu behandelnden Sujets, wie auch die Eigenschaften der Sensorik genau untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird von Radarsensoren mit einer gleichzeitigen Messung von Entfernung, Geschwindigkeit und Winkel ausgegangen, die jedoch nur über eine Entfernung- und Geschwindigkeitsauflösung, aber keine Winkelauflösung, verfügen (vgl. Kap. 2.2). Entsprechend liegt der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen in der Analyse der Sujeteigenschaften. In den vorangegangenen Darstellungen wurden aus den Eigenschaften der Radarmessung bereits unterschiedliche Ausdehnungstypen definiert, ohne dass die Abhängigkeit von der Verkehrssituation explizit betrachtet wurde. Diese durch die Messung gegebenen Ausdehnungstypen können jedoch auch zur modellhaften Beschreibung der vermessenen Sujets durch charakteristische Merkmale verwendet werden. Da sich als Merkmale nur Größen eignen, die aus dem Sensormessergebnis gewonnen werden können, stehen nur die messbaren Entfernung- und Geschwindigkeitsausdehnungen zur Verfügung.

*Begriff 11 (Modell):* Unter einem Modell wird das idealisierte Bild eines Sujets verstanden, welches die Eigenschaften des Objektes mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Sensorik beschreibt.

Im Rahmen der neu gewonnenen Erkenntnisse können die vier Ausdehnungstypen ebenfalls als Bild- oder Modelltypen bezeichnet werden. Über die Modelltypen werden Sujets zusammengefasst, die im Rahmen der beschriebenen Abbildung das gleiche Bild haben.

Eine zuverlässige Auswertung der Messdaten erfordert entsprechend eine Analyse der Einflüsse von Situation und Objekt auf die gemessenen Bilder und die Verwendung von Modellen, die über die einfache Punktzielbeschreibung hinausgehen. Abbildung 3.22 erweitert das aus Abbildung 3.20 bekannte Blockschaltbild entsprechend.

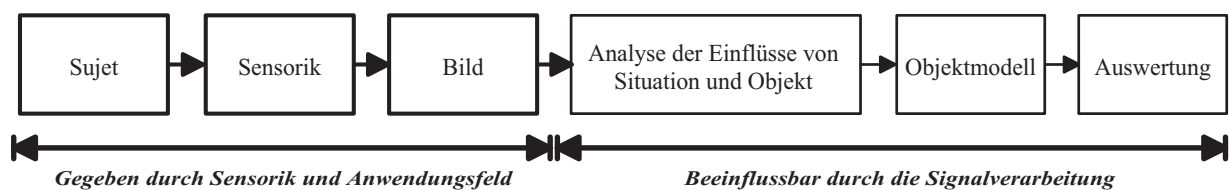


Abbildung 3.22: Auswertung des vom Sujet gemessenen Bildes

Soll aus den gewonnenen Messdaten die zugrunde liegende Verkehrssituation bestimmt werden, so wird von einer Situationsanalyse gesprochen. Ist der Typ

des Objektes gesucht, so wird dies auch als Objekterkennung bezeichnet. Da die Grundlage beider Aufgaben immer die Menge der gewonnenen Messdaten ist, wird deutlich, warum bei einer modellhaften Beschreibung nicht nur das Objekt, sondern auch die Situation berücksichtigt werden muss.

## 3.8 Zusammenhänge zwischen Modellbildung und Objekterkennung

Der Schwerpunkt der vorangegangenen Betrachtung liegt auf der messtechnischen Erfassung der Eigenschaften unterschiedlicher Sujets. Dabei können anhand des Auflösungsvermögens eines Radarsensors vier unterschiedliche Modelltypen für die Sujets aufgestellt werden. Die eingeführten Ausdehnungstypen dienen dabei der modellhaften Beschreibung der Teilmengen im RV-Diagramm, die über einen Radarsensor von Verkehrsteilnehmern in bestimmten Verkehrssituationen abgebildet werden, und damit der Beschreibung gewisser Eigenschaften der vermessenen Sujets. In Abbildung 3.23 sind zur Verdeutlichung die Messwerte und die daraus resultierenden Ausdehnungen für drei Objekte (ein stationäres Objekt, einen Fußgänger und ein Auto) dargestellt. Das stationäre Ziel bildet sich dabei als Punktziel, der Fußgänger als kinematisch ausgedehntes Ziel und das Auto als langes Ziel ab.

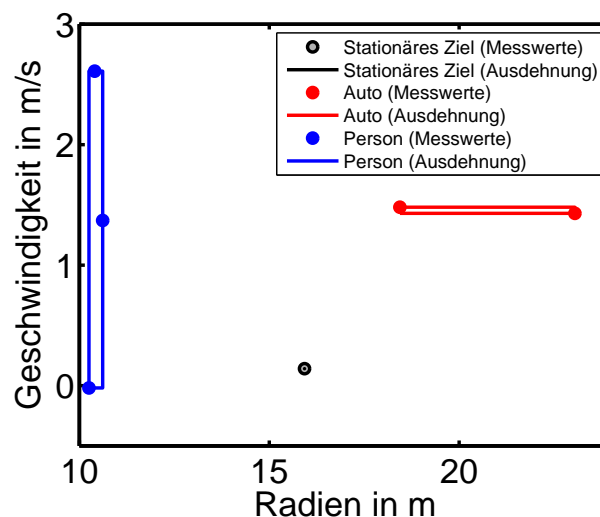


Abbildung 3.23: Gemessene Ausdehnungen einiger Objekte

Viele neuere Anwendungen beschäftigen sich mit der Fragestellung einer Objekterkennung bzw. dem Verfahren einer Klassifikation. Unter Objekterkennung wird dabei die Bestimmung des Typs eines Verkehrsteilnehmers aus

vorhandenen Messwerten verstanden. Mathematisch kann dies im Rahmen der in dieser Arbeit verwendeten Terme über die Zuordnung

$$K : \mathbb{M} \longmapsto \mathcal{T} \quad \text{mit} \quad \mathbb{M} \subset R \times V \quad (3.29)$$

beschrieben werden. Diese ist dabei nicht identisch mit der Umkehrabbildung der bei der Modellbildung in Gleichung (3.26) eingeführten Zuordnung

$$M^{-1} : \mathbb{M} \longmapsto \mathcal{O} \quad \text{mit} \quad \mathbb{M} \subset R \times V \quad \text{und} \quad \mathcal{O} \in \mathcal{T} \times \mathcal{S} \quad . \quad (3.30)$$

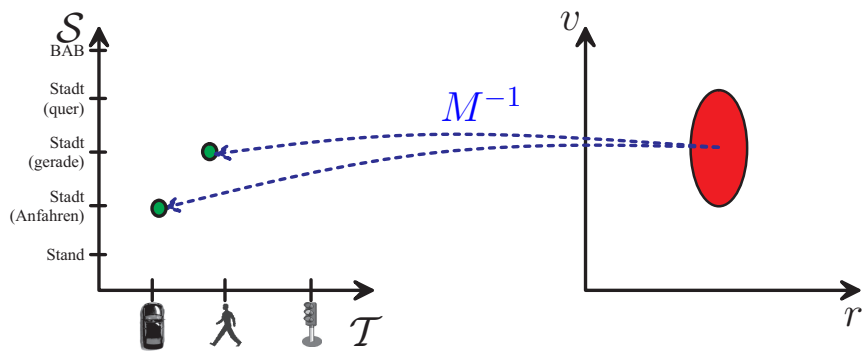
Aufgrund der fehlenden Bijektivität von  $M$  ist diese Umkehrabbildung ohnehin nicht bestimmt, da verschiedene Verkehrsteilnehmer  $\mathcal{T}$  bei gleicher oder unterschiedlicher Verkehrssituation  $\mathcal{S}$  zu den gleichen Bildern  $\mathbb{M}$  führen können. Entsprechend ist ohne Kenntnis der Parameter des Sensors und der zugrunde liegenden Verkehrssituation im Allgemeinen ein Rückschluss anhand dieser einfachen Bilder nicht ohne weiteres möglich. Durch eine Berücksichtigung der Verkehrssituation bei der Objekterkennung können die Mehrdeutigkeiten der Bilder jedoch aufgelöst werden.

$$K_S : (\mathbb{M}, \mathcal{S}) \longmapsto \mathcal{T} \quad \text{mit} \quad \mathbb{M} \subset R \times V \quad \text{und} \quad \mathcal{S} \in \mathcal{S} \quad (3.31)$$

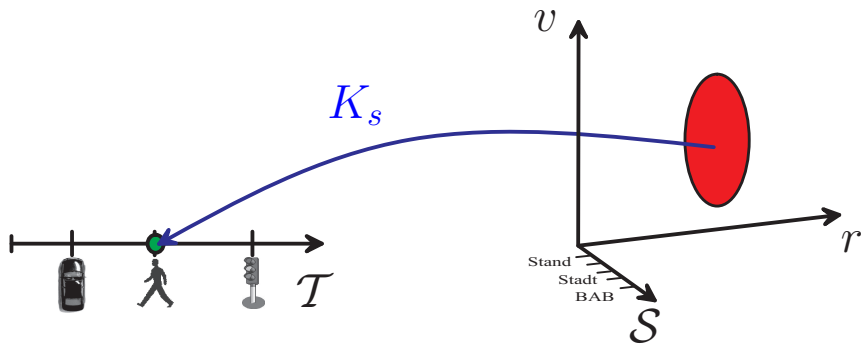
Abbildung 3.24 verdeutlicht die Unterschiede grafisch.

Gerade aktuelle Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen erfordern neben der Schätzung der dynamischen Eigenschaften der vermessenen Verkehrsteilnehmer auch eine Bestimmung des Objekttyps. Für diesen Zweck werden in aktuellen Forschungsprojekten sowohl Kamerasysteme [BBG<sup>+</sup>03] als auch Radarsysteme [RFKA04, FRM05, MRK<sup>+</sup>05, Kru06] oder Laserscanner [FD04] untersucht. In militärischen Applikationen werden radarbasierte Systeme zur Klassifikation von detektierten Objekten seit vielen Jahren untersucht und bewertet [ND02, SS05].

Reicht die Kenntnis der konkreten Verkehrssituation nicht zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten aus, so müssen die eingesetzten Modelle im Rahmen der Fragestellung weiter verfeinert werden. Diese Weiterentwicklung der Modelle kann dabei durch die Charakteristiken der eingesetzten Sensoren begrenzt sein. In diesem Fall ist die Auswahl der Sensoren zu überdenken, um eventuell eine neue Auflösungsgröße, wie zum Beispiel einer Auflösung im Winkel zur Bestimmung der Breite des Objektes, gewinnen zu können. Während die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel auf der Fragestellung einer Modellbildung beruhten, können die gewonnenen Erkenntnisse auch genutzt werden, um die Modelle hinsichtlich der Fragestellung einer Klassifikation weiter zu verfeinern.



(a) Umkehrabbildung  $M^{-1}$



(b) Klassifikation  $K$

Abbildung 3.24: Veranschaulichung der Unterschiede zwischen der Umkehrabbildung  $M^{-1}$  und einer Klassifikation  $K$

## 4 Radarnetzwerk für geometrisch ausgedehnte Ziele

### 4.1 Überblick über die Signalverarbeitungskette

Die bisherigen Darstellungen zeigen, auf welche Weise sich mit einem Radarsensor Entfernungen, Geschwindigkeiten und Winkel eines Objektes messen lassen und welche Bedeutung die zugrunde liegende Situation für die Messung hat. Die Darstellung orientiert sich dabei an einem einzigen Ziel, so dass eine einfache Interpretation der gewonnenen Daten möglich ist. In realen Situationen existiert jedoch häufig eine Vielzahl von Zielen, die von der Signalverarbeitung automatisch verarbeitet werden müssen. Die einzelnen Ziele müssen somit voneinander getrennt werden. Automatische Verarbeitung bedeutet hierbei die Abkehr vom Einsatz eines geschulten Beobachters, der das Radarbild betrachtet, hin zu einer computergestützten Auswertung und Analyse der vom Sensor gewonnenen Rohdaten. So soll der Fahrer nicht mit der Interpretation von Daten belastet werden, vielmehr muss diese Aufgabe vollständig von einem Computer übernommen werden. Als Ergebnis kann dem Fahrer lediglich eine Warnung in kritischen Situationen präsentiert werden, oder es erfolgt ein direkter Eingriff in die Steuerung des Fahrzeuges ohne jegliche Interaktion des Fahrers. Eine derartige Aufgabe stellt sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der zu entwickelnden Systeme. Zum einen muss gewährleistet werden, dass alle tatsächlichen Ziele erkannt werden (hohe Detektionswahrscheinlichkeit), zum anderen dürfen keine Ziele gemeldet werden, die gar nicht existieren (geringe Falschalarmwahrscheinlichkeit).

Um die Verarbeitung der Radarsignale zu automatisieren, müssen die einzelnen Schritte zu einer Kette zusammengefasst und für die parallele Verarbeitung mehrerer Ziele angepasst werden. In Abbildung 4.1 ist die klassische Signalverarbeitungskette von der *physikalischen Umgebungssituation* hin zum *beschreibenden Modell* skizziert. Die jeweiligen durch Blöcke dargestellten Verarbeitungsschritte repräsentieren dabei eine schematische Trennung der einzelnen zu lösenden Aufgaben. Für den Entwicklungsprozess ergeben sich

hier entsprechend Freiheitsgerade für die Realisierung der geforderten Funktionen [FR06c].

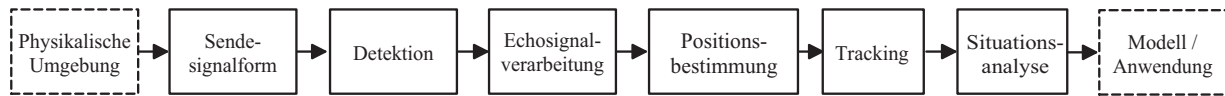


Abbildung 4.1: Übersicht über die Signalverarbeitungskette

Im Einzelnen sind dies der Entwurf der Sensorhardware unter Berücksichtigung der gewählten Sendesignalform, das Design eines Verfahrens zur Unterscheidung zwischen Zielen und Rauschen (Detektion), die Bestimmung von Zielentfernung und Geschwindigkeit in Abhängigkeit der gewählten Signalform, die Bestimmung des Zielwinkels sowie eine zeitliche Verfolgung der Ziele (Tracking) und anschließende Interpretation der gewonnenen Informationen. Verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl der Sendesignalformen und zur Bestimmung des Zielwinkels können Kapitel 2 entnommen werden.

Entwicklung und Optimierung der Signalverarbeitungskette müssen sowohl die Eigenschaften der jeweils verwendeten Sensoren als auch die Eigenschaften der zu beobachtenden Sujets berücksichtigen, um verlässliche Resultate zu erzielen. Die Ausprägungen der geometrischen und kinematischen Ausdehnungen der betrachteten Objekte wirken sich dabei auf unterschiedliche Teile der Signalverarbeitungskette aus, wie in Abbildung 4.2 verdeutlicht wird. Eine geometrische Ausdehnung wirkt sich dabei im Wesentlichen auf die Positionsschätzung aus, während die kinematische Ausdehnung beim Entwurf der Trackingverfahren berücksichtigt werden muss. Entsprechend behandelt dieses Kapitel zunächst die für geometrisch ausgedehnte Objekte relevante Fragestellung einer Positionsschätzung, bevor in Kapitel 5 auf das Tracking von kinematisch ausgedehnten Objekten eingegangen wird.

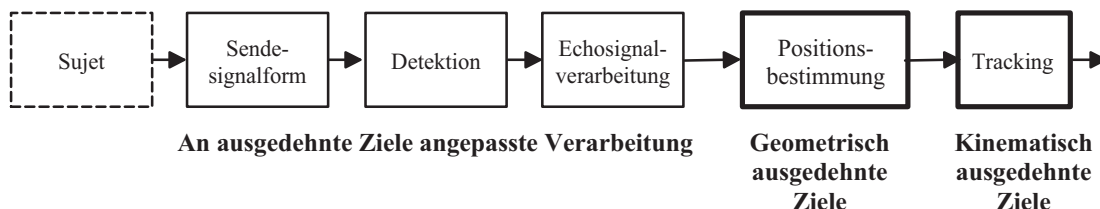


Abbildung 4.2: Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausdehnungen innerhalb der Signalverarbeitungskette

Neben einer korrekten Messung ist dabei der Umgang mit mehreren Objekten bzw. vielfachen Detektionen im Erfassungsbereich der Sensoren eine ganz

wesentliche Fragestellung, die gelöst werden muss. Die Lösung dieser Aufgabe liegt in der Segmentierung der vermessenen Mehrzielsituation in viele unabhängige Einzelobjektsituationen, die getrennt voneinander bearbeitet werden können. Ausgedehnte Objekte führen, per Definition, zu mehreren Detektionen und damit zu einer ähnlichen Fragestellung. Wie die folgenden Untersuchungen zeigen ist die Gruppierung mehrerer von einem einzigen Objekt stammenden Reflexionen und deren gemeinsame Verarbeitung der Interpretation der einzelnen Reflexionen als unabhängige Ziele vorzuziehen.

Aufgrund der Abhängigkeit der Signalverarbeitung von den betrachteten Sujets ist eine geeignete Auswahl der zu verwendenden Messmethoden unablässig. Im Folgenden werden die für geometrisch ausgedehnte Objekte relevanten Fragestellungen aus den bekannten Techniken zur Behandlung von Situationen mit mehreren Punktzielen heraus entwickelt und Ergebnisse für verschiedene Mess- und Signalverarbeitungskonzepte vorgestellt. Da sich eine geometrische Ausdehnung im Wesentlichen auf die Positionsbestimmung auswirkt, orientieren sich die folgenden Darstellungen an einem Sensornetzwerk mit vier unabhängigen Sensoren, die über eine hohe Entfernungsauflösung aber weder über eine Winkelauflösung noch eine Winkelmessung verfügen. Der Zielwinkel wird im Anschluss an die Detektion und Echosignalverarbeitung über eine Trilateration bestimmt.

## 4.2 Segmentierung von Objekten

Um Mehrzielsituationen als solche erkennen zu können, muss der eingesetzte Sensor zunächst eine Auflösung der beobachteten Objekte ermöglichen. Entscheidend hierfür ist eine geeignete Dimensionierung der Auflösungszelle. Da gerade automotiv Radaranwendungen im Stadtverkehr eine Auflösung von vielen dicht platzierten Objekten erfordern, kommt es auch verstärkt zur Erfassung ausgedehnter Objekte (vgl. Abschnitt 2.2).

Eine Trennung zweier Reflexionszentren ist genau dann möglich, wenn ihr Abstand in mindestens einer Messgröße größer ist als die Auflösungszelle des Sensors. Befinden sich die Ziele in zwei unterschiedlichen Entfernungen und besitzt der Sensor eine genügend feine Entfernungsauflösung, so können die Ziele separiert werden wie in Abbildung 4.3(a) dargestellt. Besitzen die Ziele die gleiche Entfernung und den gleichen Winkel, jedoch unterschiedliche Geschwindigkeiten, wie in Abbildung 4.3(b) dargestellt, so lassen sie sich über ihre Geschwindigkeitsdifferenz trennen, sofern eine entsprechende Geschwindigkeitsauflösung gegeben ist. Befinden sich die Ziele in der gleichen Entfernung,

aber an unterschiedlichen Stellen im Raum, so können sie getrennt werden, wenn der Sensor über eine Winkelauflösung verfügt (vgl. Abb. 4.3(c)). Eine Winkelauflösung ist für die im Automobilbereich verwendeten Sensoren jedoch nicht gegeben.

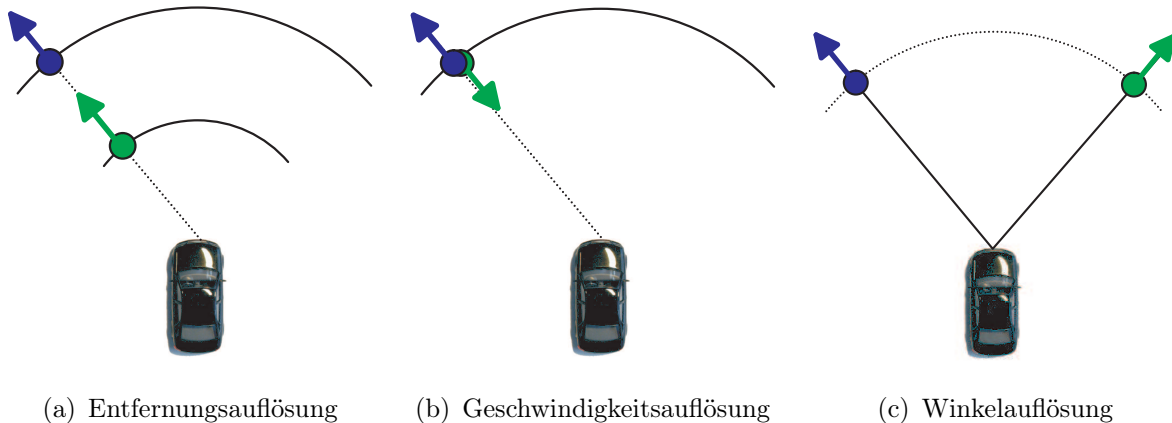


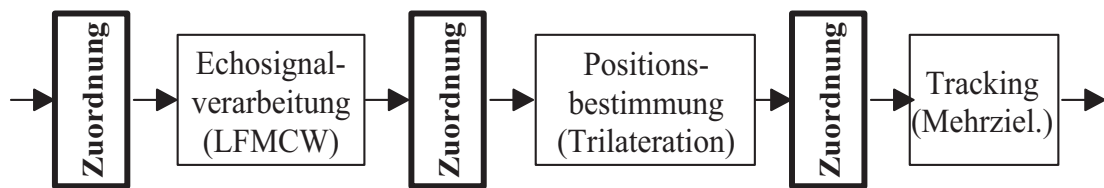
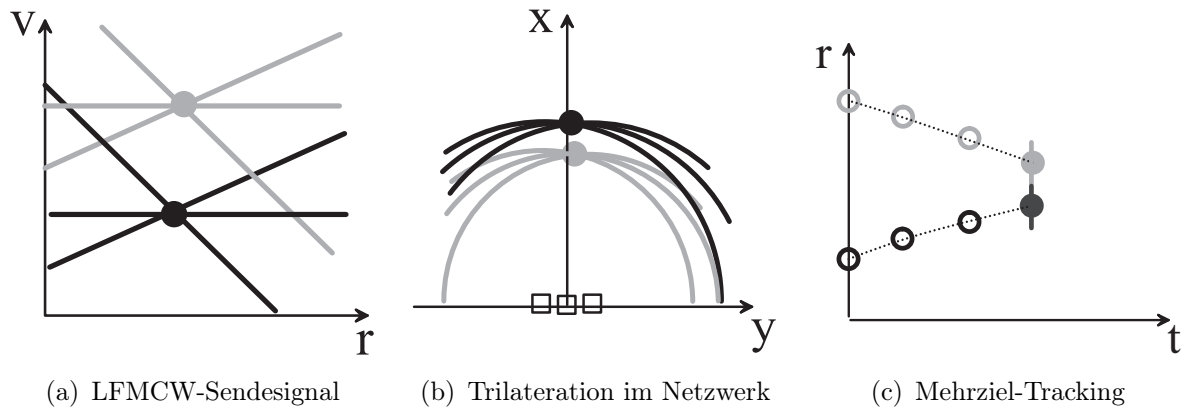
Abbildung 4.3: Methoden der Zieltrennung durch Auflösung

Wie die Ausführungen über die Ausdehnung zeigen, hat das Auflösungsvermögen eines Sensors auch eine Auswirkung auf die Wahrnehmung von ausgedehnten Objekten. Bei hoher Auflösung kann entsprechend ein einziges ausgedehntes Objekt als eine Anzahl von separaten punktförmigen Zielen erscheinen [Sch05].

### 4.2.1 Auflösung von Mehrdeutigkeiten

Eine fehlende Auflösung innerhalb der Messung kann auch als Mehrdeutigkeit interpretiert werden, die durch zusätzliche Messungen aufgelöst werden muss. Diese Mehrdeutigkeiten können dabei an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Signalverarbeitungskette auftreten. Der erste Fall liegt hierbei in der mehrdeutigen Messung von Entfernung und Geschwindigkeit, wie sie bei LFMCW-Sendesignalen auftreten kann (vgl. Abs. 2.5.2). Der zweite Fall tritt bei der Positionsbestimmung mit Sensoren ohne Winkelmessung auf und wird über eine Trilateration (vgl. Abs. 2.6.2) unter Verwendung mehrerer entfernungsmessender Sensoren im Radarnetzwerk aufgelöst. Die Mehrdeutigkeiten lassen sich zur Veranschaulichung über Linien in einem geeigneten Messraum beschreiben wie in Abbildung 4.4(a) für eine LFMCW-Signalförmung und in Abbildung 4.4(b) für die Trilateration dargestellt ist. Die Lösung der Mehrdeutigkeit ergibt sich dann grafisch über den Schnittpunkt der Linien.

Ein dritter Fall von Mehrdeutigkeiten tritt bei der Zielverfolgung mehrerer Objekte während der Zuordnung aktueller Messwerte zu den jeweiligen Zielspuren auf (vgl. Abb. 4.4(c)). Die Auflösung erfolgt hierbei aus der Betrachtung der Trajektorien über der Zeit und einer sich daraus ergebenden Prognose für die erwarteten aktuellen Objektpositionen.



(d) Nötige Zuordnungsschritte innerhalb der Signalverarbeitung

Abbildung 4.4: Zusammenfassung der möglichen Mehrdeutigkeiten (a)-(c) und nötigen Zuordnungsschritte (d) in einem Radarnetzwerk

Da alle Techniken zur Lösung der Mehrdeutigkeiten auf der gemeinsamen Auswertung mehrerer, für sich unbestimmter Messungen beruhen, müssen in Situationen mit mehreren Objekten zunächst die zu einem Ziel gehörenden Messwerte bestimmt werden. Diese Aufgabe wird auch Datenzuordnung oder kurz Zuordnung genannt. In dichten Zielsituationen ist die Güte der Algorithmen zur Zuordnung ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit des Systems, da es bei einer fehlerhaften Zuordnung zur Erzeugung von Geisterzielen kommt. Abbildung 4.4(d) führt hierzu die Zuordnung als separate Verarbeitungsschritte innerhalb der Signalverarbeitungskette ein. Aus der allgemeinen Betrachtung folgen drei unabhängige Zuordnungsschritte, von denen jedoch nicht alle in jedem Systementwurf auftreten müssen. Je mehr separate Zuordnungsschritte notwendig sind, je höher ist das Risiko zu Fehlentscheidungen und damit zur Entstehung von Geisterzielen.

Die Entstehung von Geisterzielen ist dabei zunächst unabhängig von der Frage, ob ein Objekt ausgedehnt ist oder nicht. Es wird sich aber zeigen, dass ausgedehnte Objekte häufiger zu Geisterzielen führen. Das Ziel der Untersuchungen ist es, das Auftreten von objektspezifischen Geisterzielen wirkungsvoll zu unterdrücken.

### 4.2.2 Strategien zur Signalverarbeitung im Radarnetzwerk

Auf Basis der Überlegung, dass, bedingt durch die dichten Zielsituationen beim Automobilradar, jede Zuordnung ein Risiko zur Erzeugung von Geisterzielen mit sich bringt, können auch einige aus der Literatur bekannte Verfahren eingeordnet werden. Dazu wird ein aus vier unabhängigen Sensoren bestehendes Radarnetzwerk, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, betrachtet.

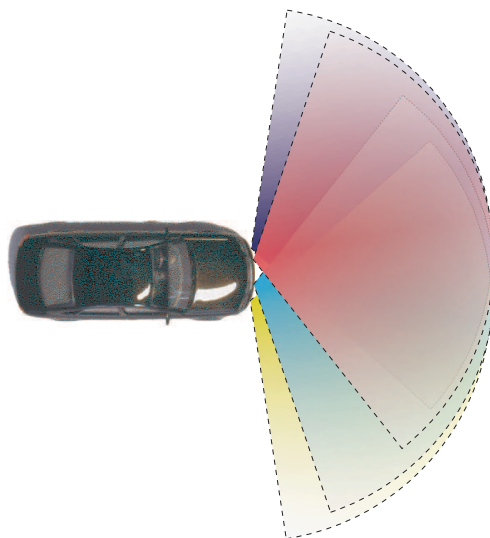
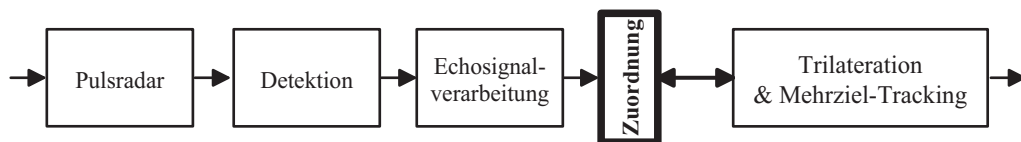


Abbildung 4.5: Systemkonfiguration mit vier unabhängigen Radarsensoren im Netzwerk

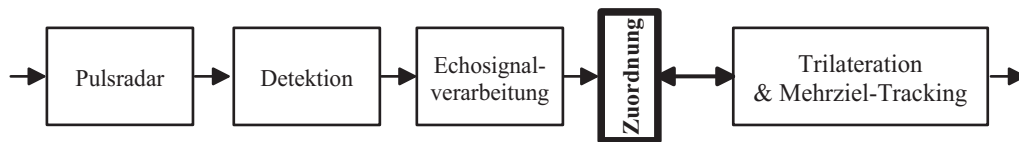
Jeder einzelne Sensor verfügt über eine Entfernungsmessung jedoch keine Möglichkeit zur Winkelmessung. Die Bestimmung der Zielwinkel erfolgt mit der in Abschnitt 2.6.2 beschriebenen Trilateration auf Basis der Messwerte der vier einzelnen Sensoren. Um eine hohe Genauigkeit der Positionsschätzung zu erhalten, wird eine Genauigkeit der Entfernungsmessung von einigen Zentimetern und eine entsprechend hohe Signalbandbreite benötigt. Eine Messung der Entfernung kann dabei sowohl mit einem Pulsradar (vgl. Abs. 2.3.2), als auch mit einem Dauerstrichradar (vgl. Abs. 2.3.3) erfolgen. Ein praktischer

Einsatz des Radarnetzwerkes für Automobilanwendungen erfordert ferner die Fähigkeit, mehrere Ziele über der Zeit verfolgen zu können.

Wird in einem ersten Systementwurf ein Netzwerk aus vier Pulsradarsensoren betrachtet, ergeben sich zwei unabhängige Zuordnungsschritte, wie in Abbildung 4.6(a) dargestellt ist. Die erste Zuordnung resultiert aus der Positionsbestimmung über mehrere Sensoren ohne Winkelmessung und die Zweite wird für die Zielverfolgung in Mehrzielsituationen benötigt.



(a) Systementwurf mit Pulsradarsensoren



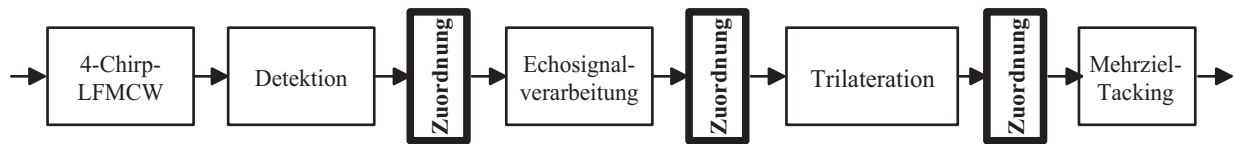
(b) Optimierte Range-to-Track-Zuordnung

Abbildung 4.6: Zuordnungsstrategien zur mehrzielfähigen Zielverfolgung im Netzwerk mit Pulsradarsensoren

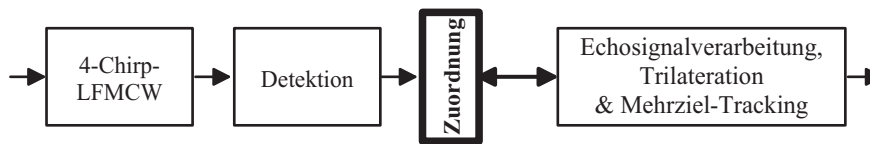
Zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit Geisterziele durch mehrere unabhängige Zuordnungsschritte zu erzeugen, kann ein rückgekoppeltes System eingesetzt werden [FRL05]. Hierbei wird die bestehende Kenntnis über eine geschätzte zu erwartende Zielposition aus dem Tracker genutzt, um die gemessenen Radien direkt dem Tracker zuzuordnen, ohne eine vorherige separate Trilateration ausführen zu müssen [OR02, OR03]. Auf diese Weise kann die Mehrdeutigkeit in der Positionsschätzung bei einer reinen Entfernungsmessung durch zusätzliche Kenntnisse aus vorherigen Messungen aufgelöst werden und es entfällt ein Verarbeitungsschritt. Abbildung 4.6(b) zeigt schematisch den Ablauf der sogenannten *Range-to-Track*-Zuordnung als Blockschaltbild. Werden nicht nur Entfernungen, sondern auch Geschwindigkeiten gemessen, so können diese im Entscheidungsprozess mit berücksichtigt werden (vgl. Abs. 2.6.2). Auf diese Weise entsteht eine *Range-Velocity-to-Track*-Zuordnung [RF05].

In dem von der Europäischen Union (EU) geförderten RADARNET-Projekt [RHLS02, Höß] wurde ein ähnliches Netzwerk unter Verwendung von vier Dauerstrichradaren mit einer 4-Chirp-LFMCW-Signalform zur Messung von Entfernung und Geschwindigkeit (vgl. Abs. 2.5.2) eingesetzt. In Summe enthält

dieser Systementwurf drei unabhängige Mehrdeutigkeiten, die es zu behandeln gilt (vgl. Abb. 4.7(a)). Zu den beiden vom Pulsradarnetzwerk bekannten Mehrdeutigkeiten kommt eine weitere aus der kombinierten Messung von Entfernung und Geschwindigkeit bei der LFM CW-Signalform hinzu.



(a) Systementwurf mit LFM CW-Sensoren



(b) Optimierte Frequency-to-Track-Zuordnung

Abbildung 4.7: Zuordnungsstrategien zur mehrzielfähigen Zielverfolgung im Netzwerk mit Dauerstrichradarsensoren

In Analogie zur oben beschriebenen *Range-to-Track*-Zuordnung können bei der kombinierten Messung von Entfernungen und Geschwindigkeiten über eine LFM CW-Sendesignalform die Ergebnisse des Trackers in die frühen Schritte der Signalverarbeitung rückgekoppelt werden. Da sich aus den erwarteten Zustandsgrößen des Trackers direkt auf Frequenzen im Spektrum des LFM CW-Empfangssignals schließen lässt, können diese direkt dem Track zugeordnet werden. Eine einzelne Auflösung der Mehrdeutigkeiten in Entfernung und Geschwindigkeit ist nicht mehr nötig und entsprechend werden korrelierte Fehler der Schätzung dieser beiden Werte wirkungsvoll vermieden. Die entstehende Zuordnungstechnik wird auch als *Frequency-to-Track* bezeichnet [Lüb05]. Abbildung 4.7(b) zeigt das entsprechende Blockschaltbild der Signalverarbeitung der verbleibenden einzigen nötigen Zuordnung.

Bei den konventionellen Verfahren mit separaten Zuordnungsschritten werden die vorhandenen Mehrdeutigkeiten durch zusätzliche Messungen im System aufgelöst. Radarnetzwerke zur Trilateration verwenden zum Beispiel häufig vier Sensoren. Die LFM CW-Sendesignalformen vereinen meist vier einzelne Chirps, obwohl theoretisch jeweils zwei ausgereicht hätten, um die benötigten Werte zu erhalten. Liegen aufgrund von schlechten Reflexionseigenschaften oder schwierigen Umgebungsbedingungen nicht alle redundanten Werte vor, kann die Zuordnung unter Umständen nicht sicher erfolgen, und die Signalverarbeitung

wird abgebrochen. Alle später folgenden Schritte werden dementsprechend nicht mehr oder mit gegebener Unsicherheit ausgeführt und die trotz allem zur Verfügung stehenden Messwerte sind verloren. Im Falle einer *Frequency-to-Track*-Zuordnung reichen schon einige wenige Frequenzschätzungen zur Fortführung eines Tracks, während bei einer *Range-to-Track*-Zuordnung einige Radian und bei einer direkten Plot-Zuordnung Positionen benötigt werden. Werden die Radian über eine 4-Chirp-LFMCW-Signalform bestimmt, so sind entsprechend sechzehn einzelne gemessene Frequenzen zur Bestimmung von vier Radian für eine einzelne Zielposition nötig und es zeigt sich das Potential, das entsteht, wenn direkt die Frequenzen zugeordnet werden können.

Werden zum Vergleich Verfahren mit einer eindeutigen Winkelmessung, wie zum Beispiel die Monopuls-Techniken, zur Bestimmung der Zielwinkel eingesetzt, entfallen die Mehrdeutigkeiten in der Positionsbestimmung, so dass keine separate Zuordnung nötig ist (vgl. Abb. 4.8) [FR06c]. Sofern Mehrzielsituationen über der Zeit betrachtet werden, ist generell immer eine Zuordnung der Daten von aufeinander folgenden Messzyklen zu den einzelnen Tracks nötig, um eine Verfolgung der Objekte zu ermöglichen.

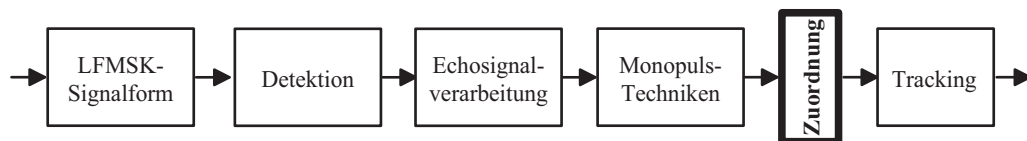


Abbildung 4.8: Zuordnungsstrategien zur mehrzielfähigen Zielverfolgung mit einem winkelmessenden Einzelsensor

## 4.3 Datenzuordnung im Radarnetzwerk

Als erster Teil der Signalverarbeitungskette wird im Folgenden die Positionsbestimmung über eine Trilateration auf ihre Eignung zur Bestimmung der Position von mehreren dicht platzierten Punktzielen hin untersucht (vgl. Abb. 4.9). Hieraus wird anschließend eine Technik zur Positionsbestimmung für geometrisch ausgedehnte Objekte entwickelt. Wenn viele dicht platzierte Reflexionszentren vorliegen, erweist sich die nötige Datenzuordnung als sehr komplexer Schritt. Um die auftretenden Effekte separiert betrachten zu können, wird von einer neuen Situation ohne fundiertes Trackingwissen ausgegangen, so dass die oben beschriebenen rückgekoppelten Systeme nicht verwendet werden können.

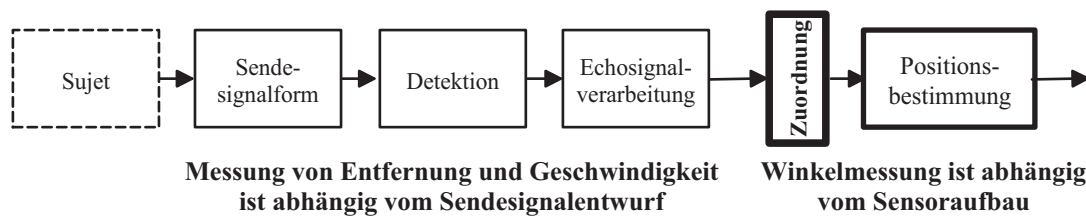


Abbildung 4.9: Ausschnitt aus der Signalverarbeitungskette mit separatem Zuordnungsschritt für eine mehrdeutige Positionsbestimmung

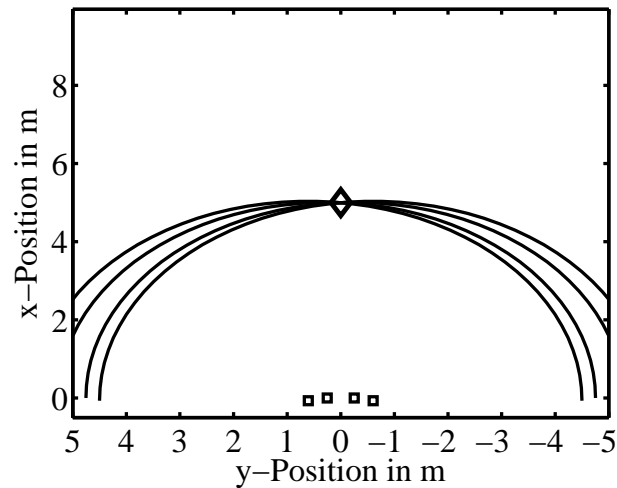
Wird die Trilateration zur Bestimmung von Positionen eingesetzt, so wird eine Anzahl von unabhängigen Sensoren verwendet. Für den Bereich der Radaranwendungen für Kraftfahrzeuge stellt eine Anzahl von vier Sensoren eine gute Wahl hinsichtlich der Anzahl redundanter Messungen sowie des zur Verfügung stehenden Platzes in der Stoßstange eines Fahrzeuges dar. Die Anordnung der Sensoren am Testfahrzeug lässt sich auf dem Foto in Abbildung 4.10 erkennen. Für die weiteren Betrachtungen wird dabei der Koordinatenursprung in der Mitte der vorderen Stoßstange angenommen.



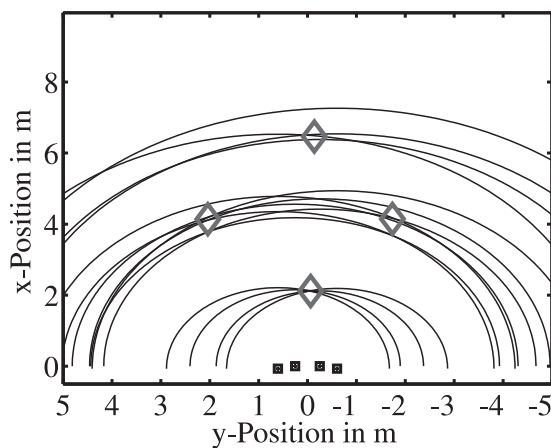
Abbildung 4.10: Testfahrzeug mit einem Sensornetzwerk aus vier Pulssensoren zur Positionsbestimmung über Trilateration

Da die Sensoren über eine hohe Entfernungsauflösung verfügen und in Situationen mit mehreren Zielen die unabhängig voneinander gemessenen Radien an eine zentrale Datenverarbeitungseinheit melden, ist keine eindeutige Zuordnung der einzelnen Messwerte zu den jeweiligen Zielen gegeben. Diese Zuordnung muss zunächst hergestellt werden, damit überhaupt eine Positionsbestimmung erfolgen kann. Nach erfolgter Zuordnung der Radien zu unterschiedlichen Zielen können diese unabhängig voneinander weiterverarbeitet werden. Zur

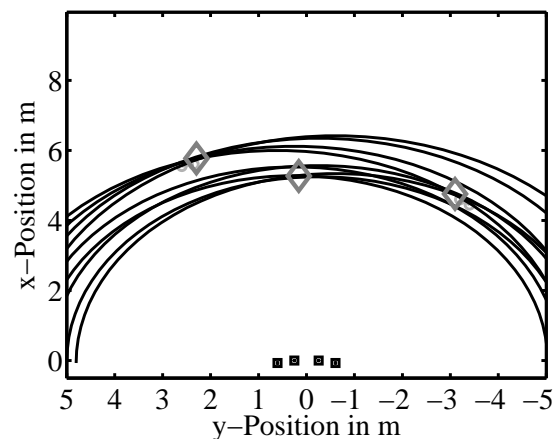
Verdeutlichung der auftretenden Effekte sind in Abbildung 4.11 exemplarisch die realen Messwerte für drei unterschiedliche Situationen dargestellt.



(a) Situation mit einem Ziel



(b) Situation mit vier Zielen



(c) Situation mit drei Zielen

Abbildung 4.11: Messwerte (durchgezogene Linien) für die Positionsbestimmung über Trilateration in drei unterschiedlichen Mehrzielsituationen. Die Zielpositionen sind als Rauten dargestellt.

Für den Fall eines einzigen Objektes (Abb. 4.11(a)) ist die Zuordnung trivial. Alle detektierten Echosignale gehören zum selben Objekt. Im Falle der zweiten Situation mit vier Objekten (Abb. 4.11(b)) ist die Zuordnung schon weniger deutlich. Durch die Anordnung von zwei einzelnen Zielen in 2 m bzw. 6 m Entfernung und zwei Zielen in einer Entfernung von jeweils 4 m, aber mit einem lateralen Abstand von etwa 4 m zueinander, ergibt sich eine nicht eindeutige Zuordnung der Messwerte für die beiden mittleren Ziele. Für die Ziele in

2 m und 6 m Entfernung hingegen lassen sich die Messwerte optisch noch gut zuordnen. Auffällig ist jedoch, dass das hintere Ziel nur von drei Sensoren überhaupt erfasst wurde. Als dritte Situation werden drei Zielen bei annähernd gleicher Entfernung von 6 m zu den Sensoren (Abb. 4.11(c)) betrachtet. Wird die Problematik einer korrekten Datenzuordnung der sehr ähnlichen Messwerte noch deutlicher. Eine einfache Zuweisung über die absolute Größe der Werte zu einem Ziel ist nicht mehr möglich. Kann die Zuordnung nicht fehlerfrei erfolgen, so entstehen Geisterziele, die Positionen von Zielen beschreiben, welche sich aus den Messwerten ablesen lassen, ohne physikalisch vorhanden zu sein. In Abbildung 4.12 sind alle möglichen Zielpositionen dargestellt, die im Rahmen der Trilateration auftreten können. Deutlich erkennbar ist die Entstehung von Geisterzielen in Gegenden mit radial eng benachbarten tatsächlichen Zielen.

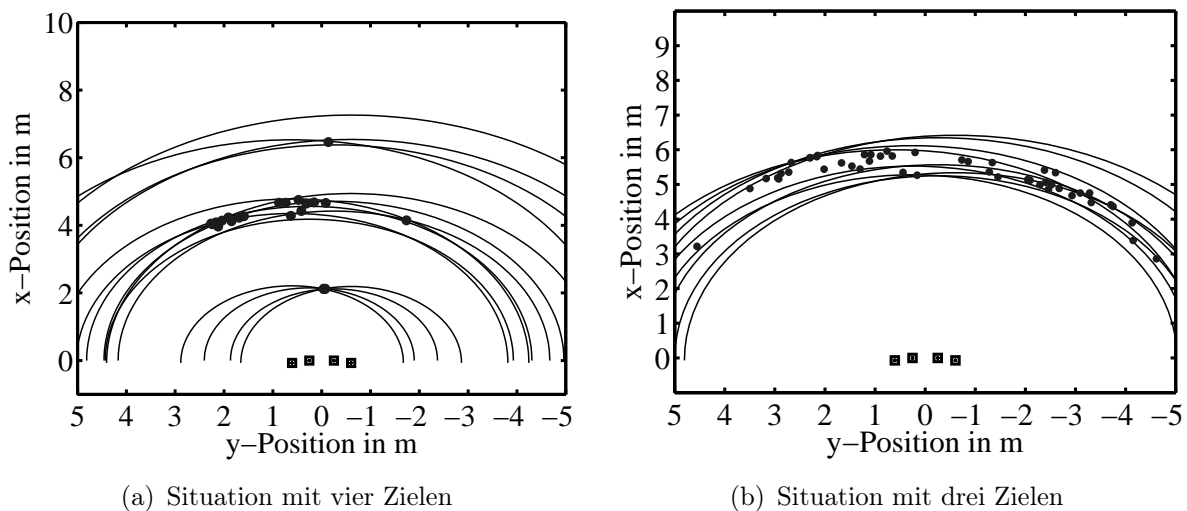


Abbildung 4.12: Mögliche Positionsschätzungen (Punkte) für einen gegebenen Satz von Entfernungsmesswerten (durchgezogene Linien)

Als Ursache für die Entstehung von Geisterzielen bei der Positionsbestimmung durch Trilateration sind zwei Effekte zu unterscheiden. Zum einen können durch eine fehlerhafte Datenzuordnung Messwerte der Trilateration zugeführt werden, die keinen tatsächlichen Schnittpunkt beschreiben, dennoch zu einer Positionsschätzung führen. Zum anderen können sich aus der geometrischen Anordnung der tatsächlichen Ziele echte Schnittpunkte von drei oder gar vier Radien ergeben, die zu einer Positionsschätzung über die Trilateration führen, obwohl kein tatsächliches Ziel vorhanden ist.

Eine wirkungsvolle Verhinderung des Auftretens von Geisterzielen in dichten Mehrzielsituationen erfordert aufwendige Verfahren der Datenzuordnung [FO-

GR04,FR05]. Eine Nähe der Ziele in radialer Richtung ist dabei als kritischer anzusehen als die Nähe in azimuthaler Richtung.

### 4.3.1 Positionsbestimmung dicht platzierter Punktziele

Die vorangegangenen Darstellungen zur Radarsignalverarbeitung haben das hohe Risiko der Erzeugung von Geisterzielen aufgezeigt. Für die Positionsbestimmung über eine Trilateration wurden dabei zwei einzelne Aufgaben identifiziert, die Datenzuordnung und die eigentliche Trilateration.

Um eine Trilateration durchführen zu können, müssen die entsprechenden Messwerte  $m_{ia}$  für alle Sensoren  $i$  aus den jeweiligen Ziellisten  $\mathcal{O}_i$  gefunden werden, die ein einzelnes Ziel beschreiben. Je weniger Ziele detektiert werden, und umso weiter diese auseinander liegen, um so einfacher wird die Datenzuordnung. Jeder Fehler, der bei der Datenzuordnung gemacht wird, wirkt sich negativ auf das Ergebnis der nachfolgenden Trilateration aus. In der Regel entstehen bei fehlerhafter Datenzuordnung Geisterziele. Dieses klassische Vorgehen mit einer klaren Trennung der Arbeitsschritte wird im Folgenden kurz als *Top-down-Verfahren* bezeichnet, da die einzelnen Schritte quasi von oben nach unten systematisch nacheinander abgearbeitet werden.

Wäre die Position  $\vec{o}$  des gesuchten Zieles von vornherein bekannt, ist die Datenzuordnung trivial. Auf Basis dieser Überlegung wird im Folgenden ein Verfahren hergeleitet, das auf Grundlage angenommener Positionen  $\vec{o}$  eine optimale Datenzuordnung durchführt und daraus die tatsächlichen Zielpositionen bestimmt. Die Aufgabe der Datenzuordnung vereinfacht sich dabei auf eine einfache Minimierung und das Entstehen von Geisterzielen durch eine fehlerhafte Kombination von Messwerten wird vermieden. Aufgrund der Umkehrung des Vorgehens – eine Zuordnung auf Basis einer angenommenen Position – wird dieses Verfahren auch als *Bottom-up-Verfahren* bezeichnet [FR05].

Um zunächst jedoch Referenzpunkte zur Positionsbestimmung zu erhalten, wird der Erfassungsbereich der Sensoren mit einer festen Anzahl von Punkten überzogen. Es lässt sich zeigen, dass ein Trilaterationsnetzwerk eine annähernd konstante Genauigkeit von Entfernungs- und Winkelschätzung hat [SFR03]. Aus diesem Grund bietet eine Quantisierung in Polarkoordinaten die beste Anordnung der Punkte in der Ebene. Die praktische Wahl der Abstände  $R_{Step}$  und  $\varphi_{Step}$  zwischen den Gitterpunkten orientiert sich an der Genauigkeit der Entfernungsmessung und der möglichen Genauigkeit der Winkelbestimmung des tatsächlich verwendeten Netzwerkes. Das so entstehende Gitter ist beispielhaft in Abbildung 4.13 dargestellt.

Für jeden einzelnen dieser Gitterpunkte  $\vec{o}$  wird hypothetisch angenommen,

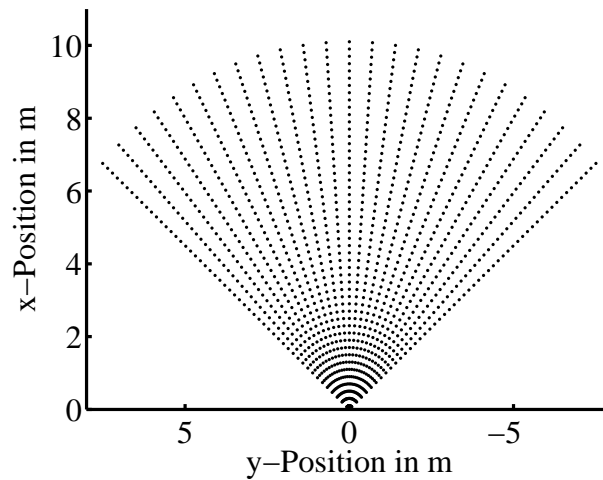


Abbildung 4.13: Gitternetz im Erfassungsbereich der Sensoren aus  $N$  Ringen mit jeweils  $M$  einzelnen Punkten

dass er eine Zielposition beschreibt. Anschließend wird die aufgestellte Hypothese anhand der tatsächlichen Messwerte überprüft. Für eine angenommene Zielposition  $\vec{o}$  ist die optimale Datenzuordnung indirekt durch die Quadratmitteltechnik (engl. minimum mean square estimation (MMSE)) der Trilateration (2.66) bereits gegeben.

$$E_2(\vec{o}) = |\vec{m} - \vec{r}(\vec{o})|^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [m_i - r_i(\vec{o})]^2 \quad (2.66)$$

$$\hat{\vec{o}} = \arg \min E_2(\vec{o})$$

Die einzige Änderung ergibt sich in der Wahl der freien Parameter für die Minimierung von  $\vec{o}$  hin zu  $m_i$ .

$$E_2(\vec{o}) = \min_{m_i \in \mathcal{O}_i} \sum_{i=1}^I [m_i - r_i(\vec{o})]^2 \quad (4.1)$$

$$= \sum_{i=1}^I \underbrace{\left[ \min_{m_i \in \mathcal{O}_i} (m_i - r_i(\vec{o})) \right]^2}_{\text{Zuordnung}} \quad (4.2)$$

Die Mengen  $\mathcal{O}_i = \{m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iK_i}\}$  geben dabei die  $K_i$  gemessenen Entfernungen der jeweiligen Sensoren  $i$  in der betrachteten Mehrzielsituation an.

Entsprechend einfach ergibt sich auch der Übergang von einer Mehr- hin zu einer Einzelsituation mit der entsprechend nicht notwendigen Datenzuordnung.

Im Gegensatz zur komplizierten und fehleranfälligen Datenzuordnung beim *Top-down*-Verfahren mit dem hohen Geisterzielrisiko, konnte die Datenzuordnung auf eine einfache Minimierung zurückgeführt werden, die unabhängig für jeden einzelnen Sensoren erfolgen kann. Der minimale Schätzfehler  $E_2(\vec{o})$  an einem Punkt ist über die Summe der Einzelfehler aus geometrischer Entfernung  $r_i(\vec{o})$  und der am besten passenden gemessenen Entfernung  $m_{i,k}$  gegeben.

$$m_{i,k} = \arg \min_{m_i \in \mathbf{O}_i} (m_i - r_i(\vec{o}))^2 \quad (4.3)$$

Der Fehler  $E_2(\vec{o})$  definiert eine reelle Funktion über dem zweidimensionalen Erfassungsbereich der Sensoren. Die tatsächlichen Positionen der Ziele ergeben sich aus den lokalen Minima dieser Funktion. Um auch Detektionsausfälle berücksichtigen zu können, kann die beschriebene Berechnung des Fehlers auch nur für eine Untermenge, zum Beispiel drei aus vier, der zur Verfügung stehenden Sensoren durchgeführt werden, deren Messwerte den kleinsten Fehler ergeben. Im Vergleich zum klassischen Ablauf der Signalverarbeitung, wie er in Abbildung 4.9 dargestellt ist, fällt auf, dass das neue Verfahren keine strikte Trennung mehr zwischen den beiden Verarbeitungsschritten Datenzuordnung und Trilateration vorsieht (vgl. Abbildung 4.14), sondern zusätzliche Annahmen über die Objekte in die Signalverarbeitung mit einbezogen werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Anzahl der entstehenden Geisterziele wesentlich zu reduzieren.

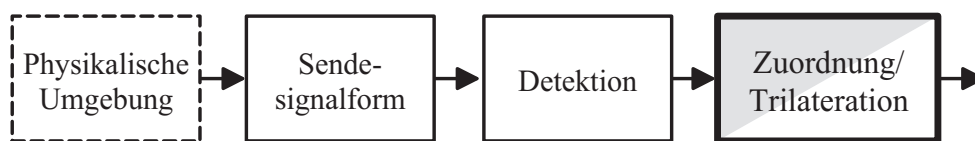


Abbildung 4.14: Ablauf der Signalverarbeitung mit Datenzuordnung und Trilateration

Zur Verdeutlichung des Vorgehens und zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Verfahrens werden im Folgenden zwei Beispiele angegeben. Obwohl das Verfahren für bewegte Ziele entworfen wurde, werden ohne Beschränkung der Allgemeinheit stationäre Situationen angeführt, da sich die Ergebnisse in diesem Fall einfacher interpretieren lassen. Die beiden präsentierten Situationen wurden im vorangegangenen Abschnitt jeweils schon eingeführt, um die Problematik bei der Datenzuordnung zu demonstrieren.

### 4.3.2 Evaluation des Bottom-up-Verfahrens

Zur Verdeutlichung des Leistungspotentials des beschriebenen Verfahrens werden die Messdaten der bereits in Abbildung 4.11 vorgestellten Mehrzielsituationen im Detail ausgewertet.

#### Situation mit drei dicht benachbarten Zielen

In einem ersten Beispiel wird die Anordnung von drei Personen vor den Sensoren betrachtet. Ein Foto der Situation ist in Abbildung 4.15 gegeben. Die drei Personen stehen dabei jeweils in einem Abstand von etwa 6 m zu den Sensoren. Ihre Positionen unterscheiden sich jedoch im Winkel.



Abbildung 4.15: Aufbau der Messsituation mit drei nebeneinander stehenden Personen

Vermessen wurde diese Anordnung mit einem Sensornetzwerk aus vier hochauflösenden Pulssensoren, die in der vorderen Stoßstange des Testfahrzeuges angebracht waren [Klo02]. Die charakteristischen Parameter des Systems sind in der folgenden Aufstellung zusammengefasst, wobei der Entfernungsmessfehler über die Standardabweichung  $\sigma$  beschrieben wird.

$$\begin{aligned}\Delta r &= 0.15 \text{ m} \\ \sigma_r &= 0.03 \text{ m}\end{aligned}\tag{4.4}$$

Die einzelnen Personen können im Rahmen der Messgenauigkeit als Punktziele angenommen werden, entsprechend tritt pro Person und Sensor auch nur maximal eine gemessene Entfernung auf. Bei der Betrachtung der von den einzelnen Sensoren gemessenen Entfernungen

$$O_1 = \{6.07 \text{ m}\} \quad (4.5)$$

$$O_2 = \{5.28 \text{ m}, 5.53 \text{ m}, 6.12 \text{ m}\} \quad (4.6)$$

$$O_3 = \{5.25 \text{ m}, 5.57 \text{ m}, 6.35 \text{ m}\} \quad (4.7)$$

$$O_4 = \{5.41 \text{ m}, 6.49 \text{ m}\} \quad (4.8)$$

fällt auf, dass überhaupt nur zwei Sensoren alle drei unterschiedlichen Ziele detektiert haben (Nr. 2 und 3). Der erste Sensor hat nur ein einziges Ziel und der vierte immerhin zwei unterschiedliche Ziele detektiert. In Abbildung 4.16(a) sind die gemessenen Entfernungen sowie die aus Abbildung 4.12(b) bekannten vielfältigen Geisterziele dargestellt. Die vier kleinen Quadrate im unteren Teil des Bildes symbolisieren die Positionen der in der Stoßstange montierten vier Sensoren.

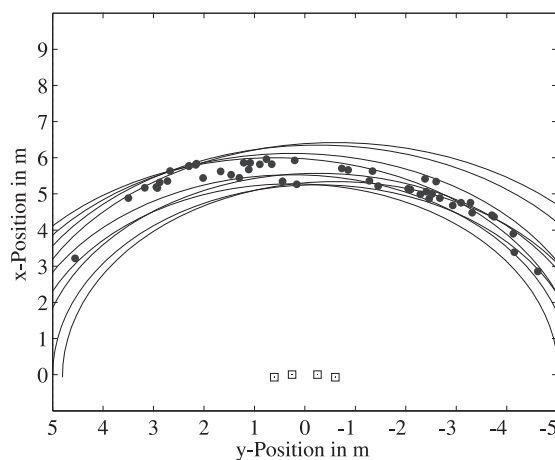
Die Position der links stehenden Person lässt sich noch relativ einfach als Schnittpunkt von vier Kreisbögen erkennen. Die Positionen der beiden übrigen Personen sind hingegen nicht so deutlich zu erkennen, zumal sich jeweils nur maximal drei Kreisbögen schneiden. Eine direkte Zuordnung der gemessenen Entfernungen zu den jeweiligen Personen ist auf jeden Fall nicht möglich. Werden jedoch die Werte der Fehlerfunktion  $E_2(\vec{o})$  nach dem oben beschriebenen Verfahren berechnet, so lassen sie die drei gesuchten Positionen zweifelsfrei anhand der lokalen Minima erkennen. Dazu sind in Abbildung 4.16(b) die Konturlinien der Fehlerfunktion und in Abbildung 4.16(c) die resultierenden geschätzten Positionen abgebildet.

	Person		
	Links	Mitte	Rechts
Sensor 1	<b>6.07 m</b>	-	<b>6.07 m</b>
Sensor 2	6.12 m	5.28 m	-
Sensor 3	6.35 m	5.25 m	5.57 m
Sensor 4	6.49 m	<b>5.41 m</b>	<b>5.41 m</b>
Zuordnung	<b>1332</b>	-111	<b>1-21</b>
x-Position	5.77 m	5.27 m	4.75 m
y-Position	2.30 m	0.16 m	-3.10 m

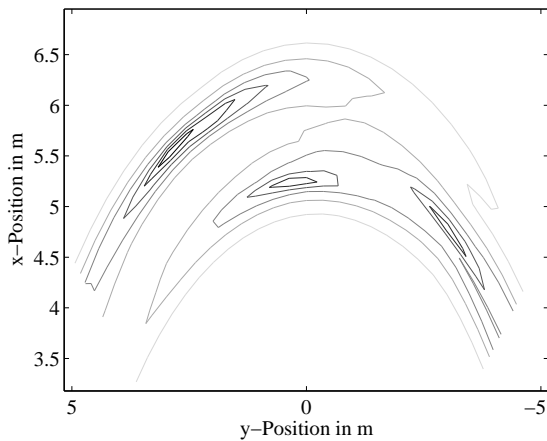
Tabelle 4.1: Datenzuordnung und Ergebnisse der Positionsschätzungen für die Situation mit drei Personen

Tabelle 4.1 stellt schließlich noch die geschätzten Positionen sowie die entsprechenden zugehörigen gemessenen Entfernungen zusammen. In der Zeile

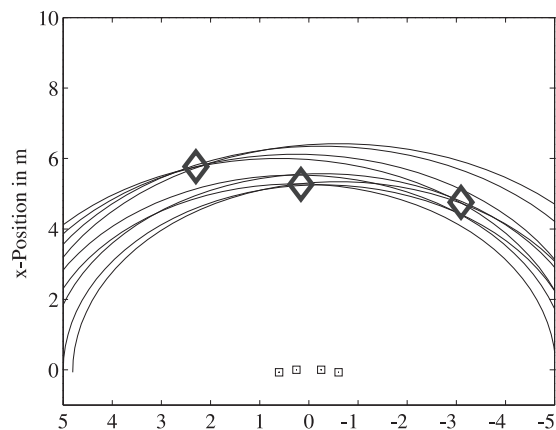
Zuordnung sind zusätzlich die Indizes  $k$  der Einträge in den Ziellisten (4.5) bis (4.8) angegeben. Ein Strich (-) als Eintrag bedeutet, dass von dem jeweiligen Sensor kein passender Messwert gefunden werden konnte. Zu beachten ist dabei, dass die linke Person erwartungsgemäß über einen Schnittpunkt aus vier Kreisbögen beschrieben wird, wohingegen die beiden anderen Positionen jeweils nur durch drei Messwerte bestimmt wurden. Auffällig ist, dass in zwei Fällen ein Messwert jeweils zwei Zielen zugeordnet wurde. Es kann somit nicht von einer bijektiven Datenzuordnung ausgegangen werden.



(a) Radien und theoretische Positionen



(b) Konturlinien der Fehlerfunktion  $E_2(\bar{d})$



(c) Ergebnisse der Positionsschätzung

Abbildung 4.16: Positionsschätzung nach dem *Bottom-up*-Verfahren für die betrachtete Messsituation mit drei stehenden Personen im Erfassungsbereich der Sensoren

### Situation mit vier symmetrisch angeordneten Personen

Als zweites Beispiel wird die Situation mit vier stehenden Personen betrachtet, die in einem Quadrat aufgestellt sind. In den Entfernungen von etwa 2 m und 6 m steht jeweils eine Person mittig vor den Sensoren, wohingegen in einer Entfernung von 4 m zwei Personen symmetrisch an unterschiedlichen Orten stehen. Abbildung 4.17 zeigt eine Skizze der Anordnung. In der Mitte der

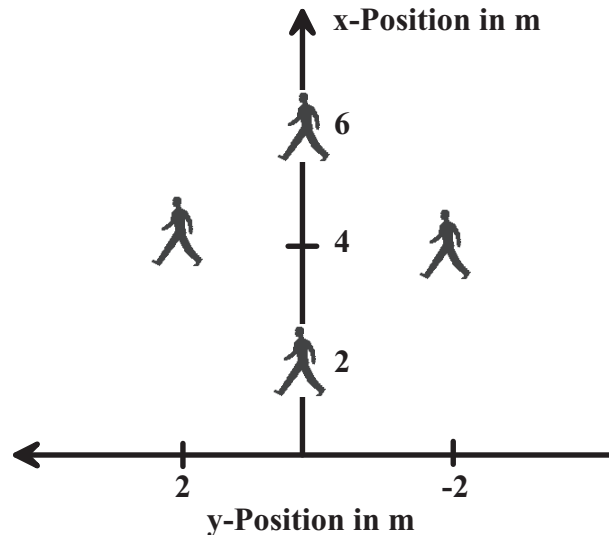


Abbildung 4.17: Aufbau der Messsituation mit vier im Quadrat stehenden Personen

Anordnung befindet sich kein Ziel, da an dieser Position leicht Geisterziele entstehen können (vgl. Abb. 4.18(a)). Deren Entstehung soll entsprechend überprüft und nicht durch ein tatsächliches Ziel verdeckt werden.

Entsprechend der Darstellungen im ersten Beispiel können die Messwerte der einzelnen Sensoren zu einer ersten Analyse herangezogen werden.

$$\mathcal{O}_1 = \{2.28 \text{ m}, 4.42 \text{ m}, 4.85 \text{ m}, 6.60 \text{ m}\} \quad (4.9)$$

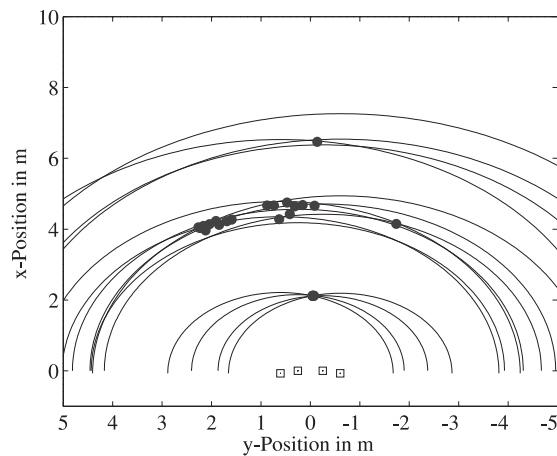
$$\mathcal{O}_2 = \{2.15 \text{ m}, 4.18 \text{ m}, 4.56 \text{ m}\} \quad (4.10)$$

$$\mathcal{O}_3 = \{2.12 \text{ m}, 4.42 \text{ m}, 4.71 \text{ m}, 6.38 \text{ m}\} \quad (4.11)$$

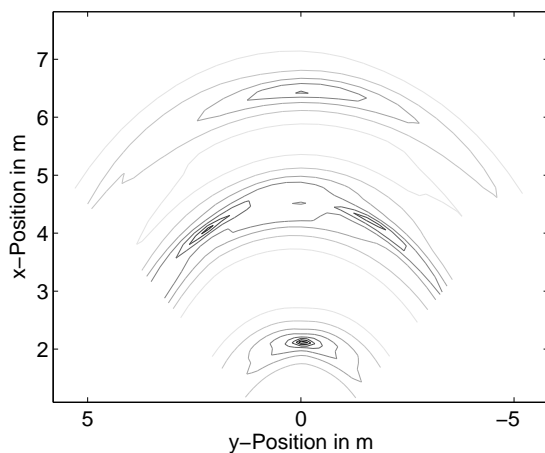
$$\mathcal{O}_4 = \{2.26 \text{ m}, 5.01 \text{ m}, 6.61 \text{ m}, 7.33 \text{ m}\} \quad (4.12)$$

Erneut haben nicht alle Sensoren alle Ziele detektiert, wenngleich die Situation hier nicht ganz so drastisch ausfällt wie im ersten Beispiel. Lediglich ein einziger Sensor hat ein Ziel nicht erkannt. Dafür taucht bei Sensor 4 ein Messwert auf, der als Fehldetektion interpretiert werden muss, da eine zu große Entfernung

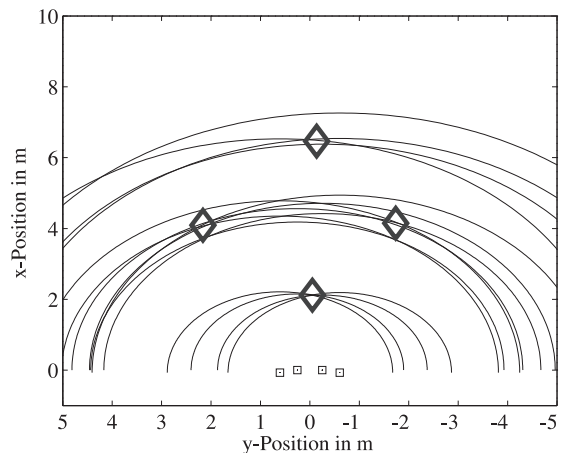
gemessen wurde. Abbildung 4.18 gibt die grafische Darstellung der Ergebnisse und Tabelle 4.2 die Resultate der Positionsschätzung in Zahlen wieder. Auch bei dieser zweiten Situation tritt der Fall einer nicht bijektiven Datenzuordnung auf. Alle Geisterziele konnten wirkungsvoll unterdrückt werden und die Notwendigkeit, auch auf Positionsbestimmungen mit Messwerten von nur drei Sensoren zu vertrauen, wurde ein weiteres Mal bestätigt.



(a) Radien und 24 mögliche Positionen



(b) Konturlinien der Fehlerfunktion  $E_2(\vec{d})$



(c) Ergebnisse der Positionsschätzung

Abbildung 4.18: Positionsschätzung nach dem *Bottom-up*-Verfahren für die betrachtete Messsituation mit vier symmetrisch stehenden Personen im Erfassungsbereich der Sensoren

Um jedoch die Leistungsfähigkeit des entwickelten Algorithmus nicht nur auf Basis von zwei einzelnen Messungen zu beurteilen, wurde die zweite Situation, mit den vier Personen, 100 mal nacheinander mit einer Messrate von 20 ms aufgenommen. Aufgrund der stationären Anordnung sind diese Messungen

	Person			
	Vorne	Links	Rechts	Hinten
Sensor 1	2.28 m	4.42 m	4.85 m	6.60 m
Sensor 2	2.15 m	<b>4.56 m</b>	<b>4.56 m</b>	-
Sensor 3	2.12 m	4.71 m	4.42 m	6.38 m
Sensor 4	2.26 m	5.01 m	-	6.61 m
Zuordnung	1111	<b>2332</b>	<b>332-</b>	4-43
x-Position	2.12 m	4.09 m	4.15 m	6.46 m
y-Position	-0.05 m	2.16 m	-1.74 m	-0.14 m

Tabelle 4.2: Datenzuordnung und Ergebnisse der Positionsschätzungen für die Situation mit vier Personen

direkt miteinander zu vergleichen. Trotz allem treten aber Fluktuationen in den einzelnen Messungen auf, so dass die Ergebnisse nicht vollkommen identisch ausfallen.

Auf Basis dieser Messungen wurden Positionsschätzungen mit dem entwickelten Verfahren vorgenommen und mit der jeweiligen Anzahl der möglichen Geisterziele verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.19 und Tabelle 4.3 dargestellt.

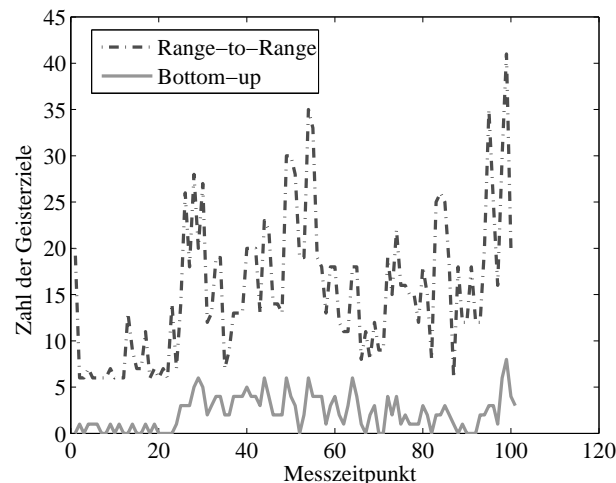


Abbildung 4.19: Anzahl der Geisterziele bei der Betrachtung einer stationären Situation mit vier Personen für verschiedene Zuordnungsverfahren über der Zeit

Abbildung 4.19 zeigt die jeweilige Anzahl der Geisterziele zu den verschiedenen Messzeitpunkten, und in der Tabelle 4.3 ist der zugehörige Median

angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Geisterziele über der Zeit nicht konstant, sondern leichten Schwankungen unterworfen ist. Weiterhin ist die geringe Anzahl der auftretenden Geisterziele bei dem entwickelten *Bottom-up*-Verfahren zu erkennen, während die Anzahl der möglichen Geisterziele die Anzahl der tatsächlichen Ziele bei einer Range-to-Range-Zuordnung um ein Vielfaches übersteigt.

Range-to-Range	Bottom-up
14	2

Tabelle 4.3: Median der Geisterzielanzahl

## 4.4 Positionsbestimmung langer Ziele

Liegt ein Objekt mit einer Entfernungsausdehnung vor, so führt dies zur Detektion von mehreren Entfernungswerten für das einzelne Objekt. Im Falle eines Radarnetzwerkes zur Positionsbestimmung über eine Trilateration gilt dies prinzipiell für alle eingesetzten Sensoren. Diese Situation ähnelt sehr stark dem beschriebenen Sachverhalt mit mehreren einzelnen Zielen im Erfassungsbereich der Sensoren. Zusätzlich ist jedoch zu erwarten, dass die einzelnen gemessenen Entfernungen dicht beieinander liegen, da sie von einem einzigen Objekt stammen. Je höher die Entfernungsauflösung des Sensors ist, desto näher können prinzipiell die einzelnen gemessenen Entfernungen liegen. Da für eine Trilateration Sensoren mit einer hohen Entfernungsauflösung zwingend erforderlich sind, ist entsprechend auch mit einem kleinen Abstand der Messwerte zu rechnen [SFR03, OFR05]. In Abbildung 4.20 ist das Entfernungsprofil eines Autos mit 6 m Abstand zu einem Sensor dargestellt. Neben der ersten Hauptreflexion sind deutlich zweit weitere Reflexionen im Abstand von knapp unter und knapp über einem Meter zu erkennen.

Wird diese Messsituation mit dem kompletten Sensornetzwerk betrachtet, so werden alle Sensoren eine Vielzahl von einzelnen Messwerten liefern. Dabei müssen jedoch nicht alle Sensoren die gleiche Anzahl von Reflexionen detektieren und weiterhin wird meist nicht die komplette Länge des Objektes erfasst werden. In Abbildung 4.21 ist beispielhaft eine grafische Darstellung der gemessenen Radien und der daraus resultierenden Positionsschätzungen gegeben.

Analog zu den Darstellungen bei dicht benachbarten Punktzielen ist auch bei dem geometrisch ausgedehnten Ziel eine große Anzahl von Geisterzielen

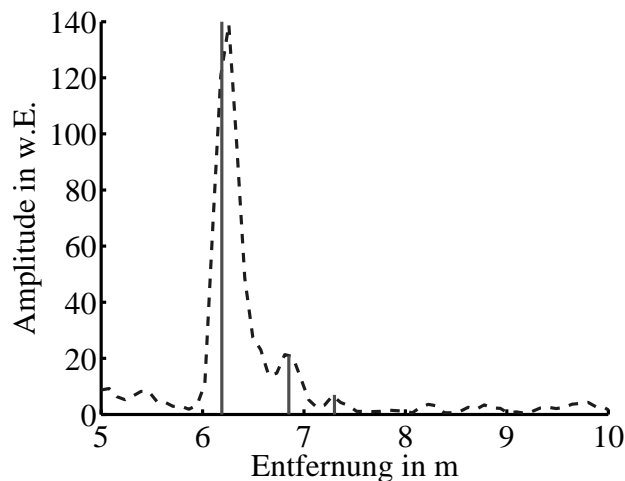


Abbildung 4.20: Entfernungprofil eines Autos in 6 m Entfernung zur Darstellung der mehreren detektierten Reflexionen an einem einzelnen Objekt

zu erkennen (vgl. Abb. 4.21(b)). Auffällig sind dabei besonders die sehr guten Schnittpunkte von jeweils drei Radien in Winkelbereichen weit außerhalb der tatsächlichen Position des Autos (vgl. Abb. 4.21(c)). Eine eindeutige Bestimmung der Position des vermessenen Fahrzeuges ist somit mit dem dargestellten System nicht direkt möglich.

Eine Beschränkung auf exakte Schnittpunkte von genau vier Radien, also die Forderung, dass alle Sensoren den Reflexionspunkt auch sicher erkannt haben müssen, ist nicht praktikabel. Die Ursache hierfür liegt in den Zusammenhängen der Detektionswahrscheinlichkeiten im Radarnetzwerk in Abhängigkeit von der Detektionswahrscheinlichkeit  $P_d$  eines Einzelsensors. Zur Veranschaulichung

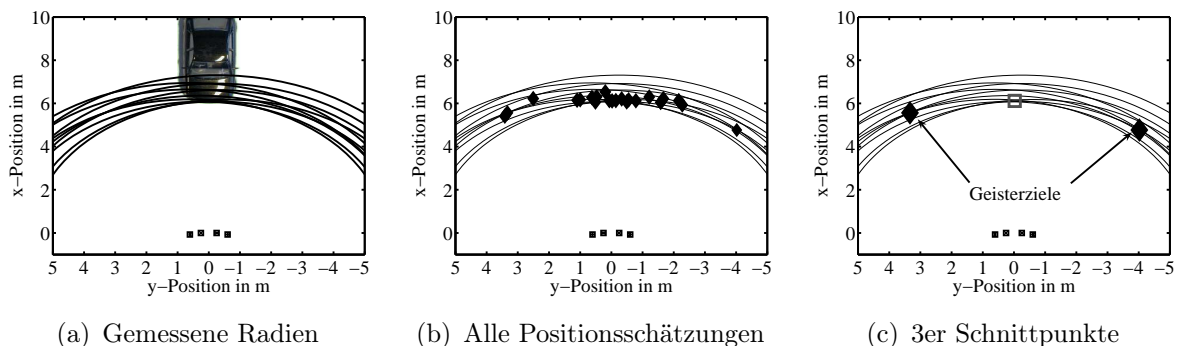


Abbildung 4.21: Positionsbestimmung über Trilateration bei Betrachtung eines in der Entfernung ausgedehnten Zieles

können drei Fälle betrachtet werden, zum einen, dass alle vier Sensoren das Ziel detektieren

$$P_4(P_d) = P_d^4 \quad , \quad (4.13)$$

zum anderen, dass genau drei von vier Sensoren das Ziel erkennen

$$P_3(P_d) = 4 \cdot P_d^3(1 - P_d) \quad (4.14)$$

und schließlich, dass mindestens drei von vier Sensoren ein Ziel detektieren

$$P_3^+(P_d) = P_3(P_d) + P_4(P_d) \quad . \quad (4.15)$$

Abbildung 4.22 zeigt die sich aus den Gleichungen (4.13) bis (4.15) ergebenden Zusammenhänge grafisch.

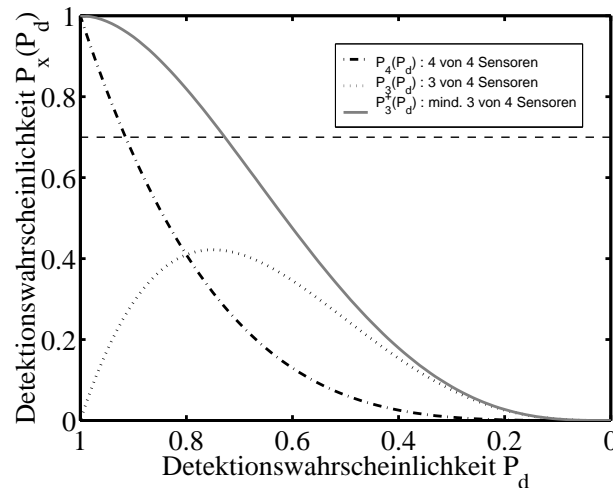


Abbildung 4.22: Detektionswahrscheinlichkeiten eines Schnittpunktes in Abhängigkeit von der Einzelsensor- Detektionswahrscheinlichkeit  $P_d$  und der Anzahl der geforderten beteiligten Sensoren

Deutlich erkennbar ist, dass die Forderung einer vollständigen Detektion im Radar Netzwerk eine Detektionswahrscheinlichkeit der Einzelsensoren von  $P_d > 90\%$  erfordert, um überhaupt eine zuverlässige Zielerkennung zu ermöglichen. Wird zum Beispiel eine Detektionswahrscheinlichkeit im Netzwerk von  $P_4 = 70\%$  gefordert, so ist eine Einzelsensor-Detektionswahrscheinlichkeit von  $P_d = 91.5\%$  notwendig. Für den Fall, dass nur die Detektion des Zieles von mindestens drei aus vier Sensoren gefordert wird, so reicht eine Einzelsensor-Detektionswahrscheinlichkeit von  $P_d = 72.8\%$  aus. Die durch das Netzwerk entstehenden zusätzlichen Anforderungen sind also nicht deutlich höher als die Anforderungen an den einzelnen Sensor.

Haben die Objekte neben einer Entfernungsausdehnung auch eine Breitenausdehnung, so kann es zusätzlich vorkommen, dass die einzelnen Sensoren aufgrund der unterschiedlichen Aspektwinkel verschiedene Reflexionszentren vom Objekt erfassen. In diesem Fall versagt die Technik der Schnittpunktbildung zur Positionsbestimmung vollständig, da ihre Grundannahme verletzt wurde. Zusammenfassend erscheint die Trilaterationstechnik in der dargestellten Form nicht sehr geeignet für die Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Nahbereich.

### 4.4.1 Berücksichtigung der radialen Ausdehnung

Die Darstellungen aus Abschnitt 4.3 zeigen, dass trilaterierende Verfahren in Situationen mit mehreren dicht platzierten Zielen verstärkt zur Erzeugung von Geisterzielen neigen. Je dichter die Ziele dabei angeordnet sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Entstehung. Sofern die Geisterziele auf eine fehlerhafte Zuordnung der Messwerte zurückzuführen sind, lassen sie sich mit entsprechenden Verfahren relativ sicher unterdrücken (vgl. Kap. 4.3.1). Sofern jedoch tatsächlich *gute Schnittpunkte* der gemessenen Radien in der Ebene entstehen, ist eine Unterscheidung der Geisterziele von echten Zielen nahezu unmöglich. In Situationen mit bewegten Zielen bleibt in diesem Fall zunächst nur die Hoffnung, dass sich derart kritische Situationen mit der Zeit selbst auflösen und die Geisterziele nicht zu stabilen Tracks führen.

Werden jedoch ausgedehnte Objekte, wie zum Beispiel ein Fahrzeug, betrachtet, so ist von vielen dicht platzierten Reflexionszentren auszugehen. Da die Ausprägung der einzelnen Reflexionszentren stark abhängig vom Aspektwinkel und zusätzlich stochastischen Veränderungen unterworfen ist, lässt sich ein ausgedehntes Objekt nicht über eine stationäre Gruppierung verschiedener Punktziele beschreiben. Unabhängig von den zeitlichen Änderungen der einzelnen Reflexionszentren, bleibt jedoch ihre dichte Anordnung bestehen. Aus diesem Grund bleibt das hohe Risiko der Entstehung von Geisterzielen. Wenn sich die Geisterziele jedoch nicht zuverlässig von den tatsächlichen detektierten Reflexionszentren unterscheiden lassen, büßt das Radarnetzwerk komplett seine Fähigkeit zur Winkelmessung ein. Anstelle der eindeutigen Positionsschätzungen entsteht vielmehr ein Band von möglichen Reflexionszentren in der Entfernung, in der sich das ausgedehnte Ziel befindet, wie in Abbildung 4.23(a) dargestellt ist.

Abbildung 4.23(b) stellt dabei nicht nur die Ergebnisse einer einzelnen Messung, sondern die Ergebnisse über einen Zeitraum von einer Sekunde dar. In dieser Zeit wurden 50 unabhängige Messungen der Situation durchgeführt,

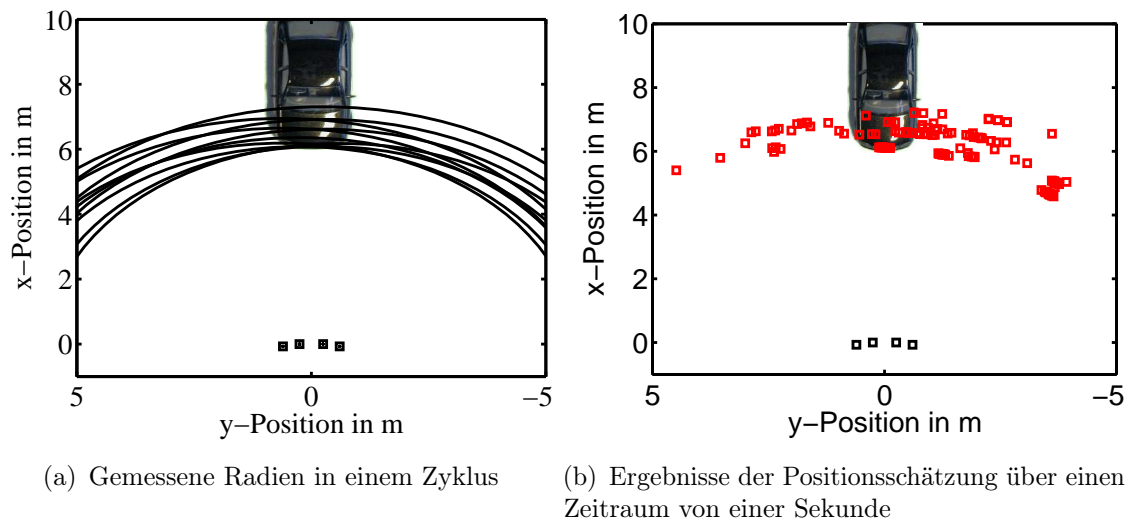


Abbildung 4.23: Ergebnisse der trilaterationsbasierten Positionsschätzung eines Autos

die alle jedoch dieselbe Situation beschreiben, da sich während der Messungen weder das Ziel noch die Sensoren bewegt haben. Durch die zusätzliche Angabe der tatsächlichen Position des vermessenen Autos werden einige der bereits beschriebenen Effekte sichtbar. Zum einen wurde bei jeder Messung unter anderem auch die tatsächliche Position des Autos gefunden, deutlich erkennbar an den Schätzwerten auf der vorderen Stoßstange. Weiterhin ist aber auch sichtbar, dass die vordere Stoßstange kein stationäres Reflexionszentrum darstellt. Aufgrund von Fluktuationen oder Messfehlern ist eine deutliche Schwankung in der Winkelmessung zu erkennen. Es ergibt sich anstelle eines Punktes eine Linie. Ebenso ist eine Vielzahl an Geisterzielen zu erkennen, die das tatsächliche Ziel umgeben.

Bei genauerer Betrachtung der Anordnung der Geisterziele rechts vom Auto in einer Entfernung von etwa 6 m von den Sensoren sind deutlich Häufungspunkte der Geisterziele zu erkennen. Diese würden selbst bei einer zeitlichen Zielverfolgung zu stabilen Tracks führen. Ferner ist erkennbar, dass die vom Radar detektierten Reflexionen am Auto im Wesentlichen von vorderen Teilen des Fahrzeuges hervorgerufen wurden. Bei den hier präsentierten Ergebnissen sind zum Beispiel keine Reflexionen zu erkennen, die von Bereichen hinter dem Motor hervorgerufen wurden. Die Ursache hierfür muss nicht unbedingt in den Reflexionseigenschaften des Autos liegen, sondern kann durch die adaptive Schwellwertberechnung des in der Detektion zum Einsatz kommenden ordered-statistic-constant-false-alarm-rate (OSCFAR)-Verfahrens begründet sein. Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, dass sich die Beschrei-

bung eines geometrisch ausgedehnten Zieles als eine Ansammlung von einzelnen unabhängigen Reflexionszentren, deren Position dann über eine Trilateration geschätzt wird, nicht zur zuverlässigen Beschreibung der tatsächlichen Objekteigenschaften eignet. Vielmehr müssen neue Beschreibungsformen gefunden werden, die einerseits eine Unterdrückung der Geisterziele ermöglichen und andererseits eine Beschreibung der tatsächlichen Eigenschaften des betrachteten Zieles gewährleisten. Als Lösungsansatz bietet sich die Beschreibung über ein Hauptreflexionszentrum und eine Ausdehnung in radialer Richtung, also über ein langes Ziel (vgl. Abs. 3.3), an. Die Schätzung der Ausdehnung in radialer Richtung entspricht bei langen Zielen einer Schätzung der Objektlänge.

Abbildung 4.24 zeigt exemplarisch die Auswirkungen unterschiedlicher Formen der Beschreibung. Der linke Teil zeigt die Situation unter der Annahme von Punktzielen. Dazu werden für jeden der drei dargestellten Sensoren drei unabhängige Reflexionen angenommen. An der Front des vermessenen Fahrzeuges stimmen diese Reflexionspunkte im Wesentlichen überein, während die übrigen Reflexionszentren nur für jeweils einen Sensor gültig sind. Im rechten Teil der Abbildung sind dieselben Reflexionszentren unter der Hypothese eines langen Zieles interpretiert dargestellt. Auffällig ist neben den eingetragenen Objektlängen auch die Verringerung der Zielmeldungen auf eine pro Sensor.

### 4.4.2 Schätzung der Objektlänge im Sensornetzwerk

Soll die Objektlänge anhand der vom Radarsensor gemessenen Daten bestimmt werden, so sind prinzipiell zwei verschiedene Vorgehensweisen denkbar. Abbildung 4.25 stellt die beiden unterschiedlichen Verfahren gegenüber. Das erste Verfahren geht von ausgeprägten Reflexionszentren am Objekt aus, die zunächst wie unabhängige Punktziele detektiert werden. Im Anschluss an die Echosignalverarbeitung wird eine gesonderte Logik eingesetzt, welche alle zu einem Objekt gehörenden Reflexionszentren zu einer Gruppe zusammenfasst (engl. Cluster). Diese Gruppen von Reflexionszentren können zum Beispiel beim Tracking wie ein einziges Ziel behandelt werden. Auf diese Weise lassen sich sowohl der Rechenaufwand beim Tracking als auch die Qualität der Tracks deutlich steigern. Ein derartiges Verfahren erfordert nur eine relativ geringe Änderung der Strategien zur Signalverarbeitung, wenn auch ausgedehnte Objekte erfasst werden sollen. Nachteilig ist jedoch, dass die tatsächliche Länge der Objekte nur sehr unzureichend geschätzt wird [Sch05]. In aller Regel fällt die geschätzte Länge deutlich kleiner als die tatsächliche Länge aus. Ursachen für diesen Sachverhalt ergeben sich aus einer genaueren Betrachtung der Detektion. Anstelle des Begriffes Länge muss genau genommen immer von einer radialen



(a) Ansammlung von Punktzielen

(b) Beschreibung über die Objektlänge

Abbildung 4.24: Schematische Darstellung der Detektionen von drei Sensoren (rotes, oranges und grünes Dreieck) bei der Annahme von unabhängigen Punktzielen (links) und nach der zusätzlichen Schätzung einer Objektlänge (rechts)

Ausdehnung gesprochen werden. Da sich die folgenden Betrachtungen jedoch auf Sujets beschränken, die über lange Ziele beschrieben werden, können die beiden Begriffe synonym verwendet werden.

Ist eine genauere Schätzung der Objektlänge von Interesse, bietet es sich an, die Längenschätzung gleich mit der Detektion zu kombinieren (vgl. Abbildung 4.25(b)). Auf diese Weise kann die Punktzielannahme schon bei der Detektion aufgehoben werden. Werden Objektlänge und Detektion kombiniert, lässt sich das Objekt in aller Regel über einen Referenzpunkt und eine Ausdehnung beschreiben. Als Referenzpunkt bietet sich hierbei zum Beispiel der dichteste Punkt oder aber der Punkt mit den besten Reflexionseigenschaften an. Da die Schätzung der Objektlänge jedoch immer mit einem Fehler behaftet ist, empfiehlt sich die Verwendung des zweiten Referenzpunktes. Aufgrund des höheren Signal-zu-Rausch-Abstand (engl. signal-to-noise ratio (SNR)) ist von einer zuverlässigeren und genaueren Detektion des Punktes mit den besten Reflexionseigenschaften auszugehen.

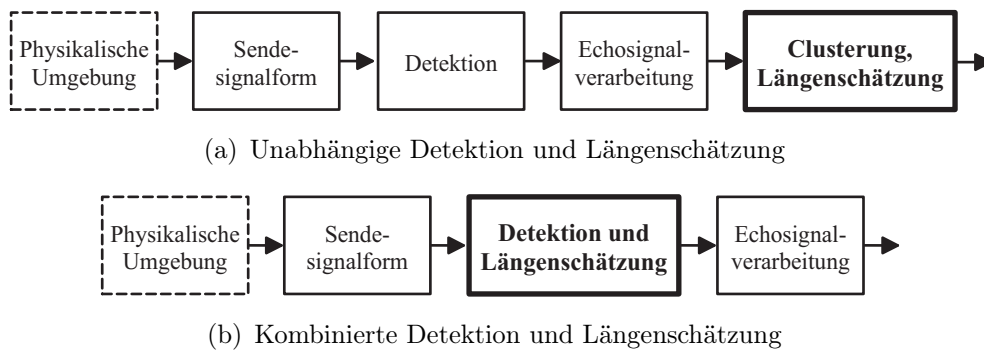


Abbildung 4.25: Mögliche Signalverarbeitungsketten bei der Schätzung von Objektängen

### Drei-Schwellen Längenschätzung bei einer LFM CW-Signalform

Im Folgenden wird ein kombiniertes Verfahren zur Detektion von Objekten und der Schätzung ihrer radialen Ausdehnung vorgestellt. Die präsentierten Messergebnisse sind mit einem hochauflösenden LFM CW-Radarnetzwerk aufgenommen worden. Zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten zwischen Entfernung und Geschwindigkeit wird im Folgenden eine Signalform mit einem Up- und einem folgenden Downchirp betrachtet. Da die Geschwindigkeitsauflösung der betrachteten Signalform nur relativ gering gewählt wurde, können die Effekte einer Aufweitung des Spektrums durch die Geschwindigkeitsmessung aus verschiedenen Aspektwinkeln vernachlässigt werden, so dass von einem langen Objekt ausgegangen wird. Die Schätzung der Objektlänge beruht somit auf einer Auswertung der Aufweitung des Spektrums des Empfangssignals durch die geometrische Ausdehnung des beobachteten Objektes.

Die gewonnenen Erkenntnisse können direkt auch auf die Messung mit einem Pulsradar übertragen werden, wenn anstelle des Spektrums des Empfangssignals das aufgenommene Entfernungsprofil betrachtet wird. Abbildung 4.26 zeigt dazu exemplarisch ein gemessenes Spektrum des Empfangssignals bei der Betrachtung eines vorausfahrenden Fahrzeuges auf einer Landstraße.

Die durchgezogene Linie stellt dabei das Ergebnis der spektralen Schätzung dar. Die gepunktete Linie gibt die Schätzung des Rauschpegels durch eine OSCFAR mit wanderndem Beobachtungsfenster wieder [Roh83, RM96]. Basierend auf der Schätzung des Rauschens ist die Detektionsschwelle als gestrichelte Linie angegeben. Deutlich erkennbar ist die starke Reflexion von der Rückwand des beobachteten Fahrzeuges im Vergleich zur relativ clutterfreien Umgebung. Ferner sind noch weitere, aber deutlich geringer ausfallende Reflexionen von weiter vorn liegenden Teilen des Fahrzeuges zu erkennen, dass

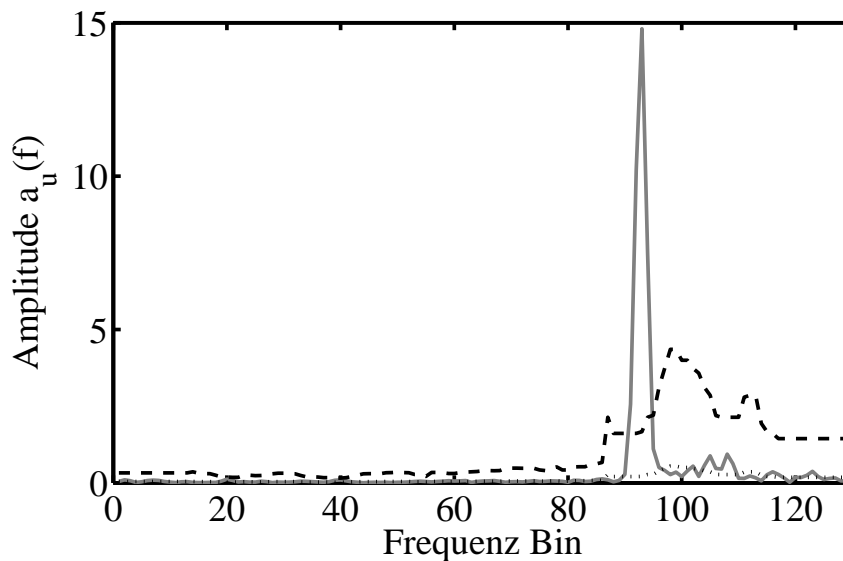


Abbildung 4.26: Darstellung des Spektrums eines Empfangssignals (durchgezogene Linie) eines LFM CW-Radarsensors bei der Betrachtung eines Fahrzeuges auf einer Landstraße sowie die zugehörige Rauschschätzung (gepunktet) und eine resultierende Detektionsschwelle (gestrichelt)

heißt, Teilen mit einer größeren Entfernung. Diese Teile liegen zwar unter der gewählten Detektionsschwelle, aber oberhalb der Rauschschätzung. Auffällig ist auch das charakteristische ansteigende Verhalten der Rauschschätzung im Bereich hinter dem starken Reflektor, welches zu einer Maskierung von nachfolgenden Reflexionen führen kann. Durch eine geeignete Wahl der Parameter der Rauschschätzung ließe sich der dargestellte Effekt jedoch verringern, wenn die Detektion von Anfang an auf dicht benachbarte Reflektoren ausgelegt wird. An dieser Stelle kann der Effekt jedoch ausgenutzt werden, um die der ersten und stärksten Reflexion bei Fahrzeugen nachfolgenden weiteren Reflexionen gezielt zu unterdrücken. Auf diese Weise stellt sich das ausgedehnte Ziel nicht als eine Vielzahl von unabhängigen Zielen dar. Sollen jedoch alle Reflexionszentren unabhängig voneinander detektiert werden, so wird das gezeigte Verhalten immer zu einer künstlichen Verkürzung der Objekte führen. Die Aufgabe besteht entsprechend der Modellvorstellung zum einen aus der Detektion des dominanten Reflexionszentrums und zum anderen aus der Zuordnung sich aus der Objektlänge ergebender zusätzlicher Reflexionen, die mit deutlich geringeren Signalamplituden auftreten werden. Entsprechend der gewählten Messgröße, hier der Entfernung, ist das Ziel in seiner Gesamtheit zu erfassen und nicht nur vereinfacht durch einen Punkt zu beschreiben. Wird der

spektrale Bereich, der dem Ziel zugeordnet wird, zu groß gewählt, so fällt die Längenschätzung zu lang aus, und wird der Bereich zu klein gewählt, fällt die Schätzung entsprechend zu kurz aus. Aus diesen Betrachtungen ist ersichtlich, dass nicht nur die Reflexionseigenschaften des betrachteten Zieles die Qualität einer Längenschätzung beeinflussen, sondern auch die Zielumgebung. Jegliche Störungen durch reale oder auch sogenannte Clutter-Ziele können einen Einfluss auf die Qualität der Zielmeldung haben. Aus diesem Grund hängt auch die Breite der Antennenkeule unmittelbar mit der Qualität der Schätzungen zusammen.

Um eine möglichst hohe Güte der Längenschätzung und damit der Erweiterung vom Punktziel-Modell hin zu einer Modellbeschreibung auf Basis langer Objekte erreichen zu können, folgt die Signalverarbeitung einem 3-Schwellen-Modell. In jedem der drei Schritte wird das Zielecho stärker vom Rauschen getrennt. Hierbei wird angenommen, dass sich das stärkste Reflexionszentrum des Objektes am Anfang befindet. Dies heißt im Bereich mit der geringsten Entfernung zwischen Ziel und Radarsensor. Für Fahrzeuge trifft diese Annahme zu.

Die erste Schwelle dient der reinen Detektion des Zieles und folgt den bekannten Verfahren zur Detektion von Punktzielen. Alle weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen nur, wenn eine sichere Detektion des Zieles in beiden Chirps der Sendesignalfolge vorliegt und dienen der eigentlichen Längenschätzung.

In Abbildung 4.26 ist bereits beispielhaft das Spektrum des Empfangssignals  $a_u(f)$  eines Upchirps abgebildet, das Spektrum  $a_d(f)$  des Downchirp ergibt sich entsprechend. Ferner sind die mit einer OSCFAR gewonnene Schätzung des Rauschlevels  $S_{OSCFAR}(f)$  und die zugehörige Detektionsschwelle mit angegeben. Alle Bereiche im Spektrum, die oberhalb der gestrichelt dargestellten Schwelle liegen, werden als Ziel-Detektionen herangezogen (vgl. Gleichung (4.16)). Für die weitere Signalverarbeitung ist hierbei besonders die Position des Maximums  $f_{\text{peak}}$  im detektierten Bereich von Interesse, da es einen ersten Punkt in der Beschreibung des Zieles ausmacht.

$$\mathbb{D} = \{f : a(f) > k \cdot S_{OSCFAR}(f)\} \quad (4.16)$$

$$f_{\text{peak}} = \arg \max_{f \in \mathbb{D}} a(f) \quad (4.17)$$

Die eigentliche Beschreibung des langen Zieles beruht im Folgenden auf der Darstellung bzw. Berechnung von drei Entfernungen. Zum einen wird die Entfernung  $r_{\text{peak}}$  zwischen Sensor und dem stärksten Reflexionspunkt herangezogen (s.o.) und zum anderen die Punkte mit der kleinsten  $r_{\text{min}}$  bzw.

größten Entfernung  $r_{\max}$ , welche dem Ziel noch zugeordnet werden können. Die Ziellänge ergibt sich dann aus der Differenz zwischen kleinster und größter Entfernung. Die zusätzliche Auswertung des maximalen Reflexionszentrums dient der rudimentären Beschreibung der Form des Entfernungsprofils sowie zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Zieles.

$$\vec{r} = [r_{\min}, r_{\text{peak}}, r_{\max}] \quad \text{mit} \quad r_{\min} < r_{\text{peak}} < r_{\max} \quad (4.18)$$

$$\hat{L} = r_{\max} - r_{\min} \quad (4.19)$$

Zu beachten ist allerdings, dass zum jetzigen Zeitpunkt der Signalverarbeitung noch keine Entfernungen, sondern lediglich Frequenzen detektiert wurden, und zwar unabhängig für Up- und Downchirp. Im Falle einer Verarbeitung nach dem Punktziel-Modell müssten jetzt lediglich aus den Frequenzen von Up- und Downchirp noch die entsprechenden Ziele nach Entfernung und Geschwindigkeit bestimmt werden (vgl. Abs. 2.5.2). Für die Schätzung der Länge muss der Bereich mit spektraler Zielleistung jedoch noch weiter untersucht werden. Dazu wird zu jedem Maximum noch eine Umgebung in die weitere Betrachtung mit einbezogen.

$$\mathbb{U} = [f_{\text{peak}} - F/2, f_{\text{peak}} + F/2] \quad (4.20)$$

Um störende Einflüsse von Clutter und Zielen, die sich vor dem betrachteten Objekt befinden zu unterdrücken, werden in einem zweiten Schritt alle Signalanteile, die von kleineren Entfernungen herrühren und sich unterhalb des geschätzten Rauschlevels befinden unterdrückt. Die Spiegelung im Spektrum durch das Vorzeichen des Frequenzhubes muss dabei entsprechend berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist schließlich in Abbildung 4.27 dargestellt.

$$b(f) := \begin{cases} 0 & : a(f) < S_{\text{OSCFAR}}(f) \wedge f < f_{\text{peak}} \\ a(f) & : \text{sonst} \end{cases} \quad (4.21)$$

Die spektrale Linie mit maximaler Amplitude wird dabei im Zentrum  $f' = 0$  dargestellt, da im Folgenden nur die relative Lage der vorderen und hinteren Grenzen von Interesse sind. Zusätzlich kann auf diese Weise der unterschiedliche Dopplereinfluss der Ziel-Geschwindigkeit auf die Lage der Signalleistung im Spektrum vernachlässigt werden.

$$f' := f - f_{\text{peak}} \quad f \in \mathbb{U} \quad (4.22)$$

Aufgrund des typischen Profils des Spektrums ist eine Vernachlässigung von signifikanten Informationen über das Ziel bei diesem Vorgehen nicht zu

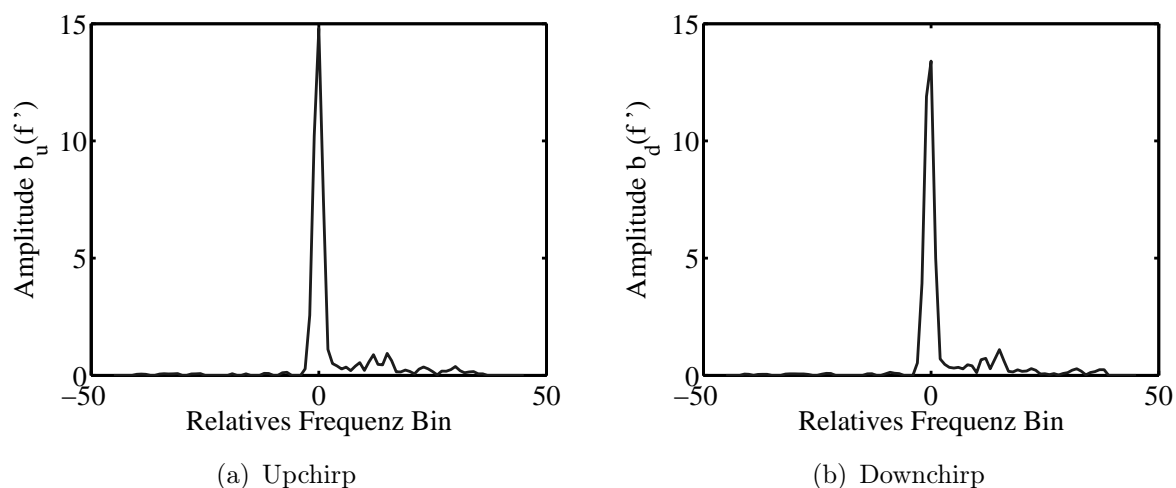


Abbildung 4.27: Ausschnitt aus dem Spektrum des Empfangssignals  $b_{u,d}(f')$  nach Unterdrückung der Rausch-Anteile am Anfang des Frequenzbereiches

erwarten. Eine starre Unterdrückung von Signalanteilen mit im Vergleich zum Maximum größeren Frequenzen würde hingegen zu einem Verlust von Information führen. Die Ursache hierfür ist die auftretende dominante Reflexion. Für eine sichere Erkennung der Länge muss also ein Verfahren verwendet werden, das die Unterschiede zwischen Nutzsignal und Rauschen stärker hervorhebt. Hierfür werden im Folgenden die Informationen aus den beiden Chirps kombiniert und gemeinsam betrachtet.

Um jedoch die Signalleistungen aus den beiden Sendesignalfolgen kombinieren zu können, muss erst eine Auflösung der Mehrdeutigkeiten aus Entfernung und Geschwindigkeit im Radarempfangssignal vorgenommen werden. Hierzu wird die von Punktzielen bekannte klassische LFM CW-Technik verwendet. Grundlage für die Schätzung der Zustandsgrößen des Zieles  $[r_{\text{peak}}, v_{\text{peak}}]$  sind hierbei nur die Frequenzen mit maximaler spektraler Leistung im Upchirp  $f_{u,\text{peak}}$  bzw. im Downchirp  $f_{d,\text{peak}}$ .

$$\text{LFMCW} : [f_{u,\text{peak}}, f_{d,\text{peak}}] \rightarrow [r_{\text{peak}}, v_{\text{peak}}] \quad (4.23)$$

Hiermit stehen über das detektierte Ziel eine klassische Punktziel-Beschreibung des stärksten Reflexionspunktes in Entfernung und radialer Geschwindigkeit sowie zwei Ausschnitte aus den Empfangsspektren von Up- und Downchirp zur Verfügung. Aufgrund der Einschränkung auf lange Ziele ist ferner eine einheitlichen Geschwindigkeit  $v = v_{\text{peak}}$  für alle Reflexionspunkte gegeben.

Nachdem die spektralen Bereiche von Up- und Downchirp einander zugeordnet wurden und eine erste Beschreibung über den Zustandsvektor des Zieles vorliegt, kann im letzten Schritt endgültig seine Länge bestimmt werden.

Um den Signal-zu-Rausch-Abstand zu erhöhen, werden in einem nächsten Schritt die spektralen Leistungen der Up- und Downchirp Signale aufsummiert.

$$c(f') := b_u(f') + b_d(f') \quad (4.24)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.28(a) dargestellt. Da sich die Reflexionszentren des Zieles aber nicht gleichmäßig verteilen, kommt es häufig zu mehr oder minder starken Einbrüchen oder Fluktuationen im Spektrum an Stellen, an denen kein starker Reflexionspunkt abgebildet wird. Damit dies nicht zu einem *Durchreißen* des Zieles führt, wird der ausgedehnte Charakter des Zieles durch eine fortlaufende Integration der Signalleistung über einen kurzen Bereich stärker hervorgehoben. Im beschriebenen Fall erfolgt eine Integration über  $2I + 1 = 7$  benachbarte Frequenz-Bins. Der erhaltene Wert wird dann symbolisch der mittleren Zelle im Intervall zugewiesen (vgl. Abbildung 4.28(b)). Durch dieses Vorgehen ist die auszuwertende Form weniger anfällig gegenüber der tatsächlichen Anordnung der Reflexionspunkte.

$$d(f') := \int_{-I}^{+I} c(f' - \tilde{f}) d\tilde{f} \quad (4.25)$$

Anhand einer neuen Schwelle  $S$  zur Beschreibung der mittleren Rauschleistung im betrachteten Intervall kann jetzt das größte zusammenhängende Gebiet um  $f' = 0$  bestimmt werden, welches über dieser Schwelle liegt. Die Frequenzen  $f'_{min}$  und  $f'_{max}$  beschreiben die Grenzen dieses Gebietes. In Abbildung 4.28(b) sind diese Punkte durch Pfeile hervorgehoben.

$$\mathbb{T} = \{f' : d(f') > S, \forall f'_{min} \leq f' \leq f'_{max}\} \quad (4.26)$$

$$f'_{min} < 0, \quad f'_{max} > 0$$

mit

$$S = \frac{I}{F} \int_{f \in \mathbb{U}} S_{u, \text{OSCFAR}}(f) + S_{d, \text{OSCFAR}}(f) df \quad (4.27)$$

Im Grunde genommen ist die Länge des Zieles durch den Abstand der beiden Schnittfrequenzen, im Beispiel  $f'_{min} = -6$  und  $f'_{max} = 20$ , unter Berücksichtigung der Entfernungsauflösung  $\Delta r$  des Radarsensors beschrieben.

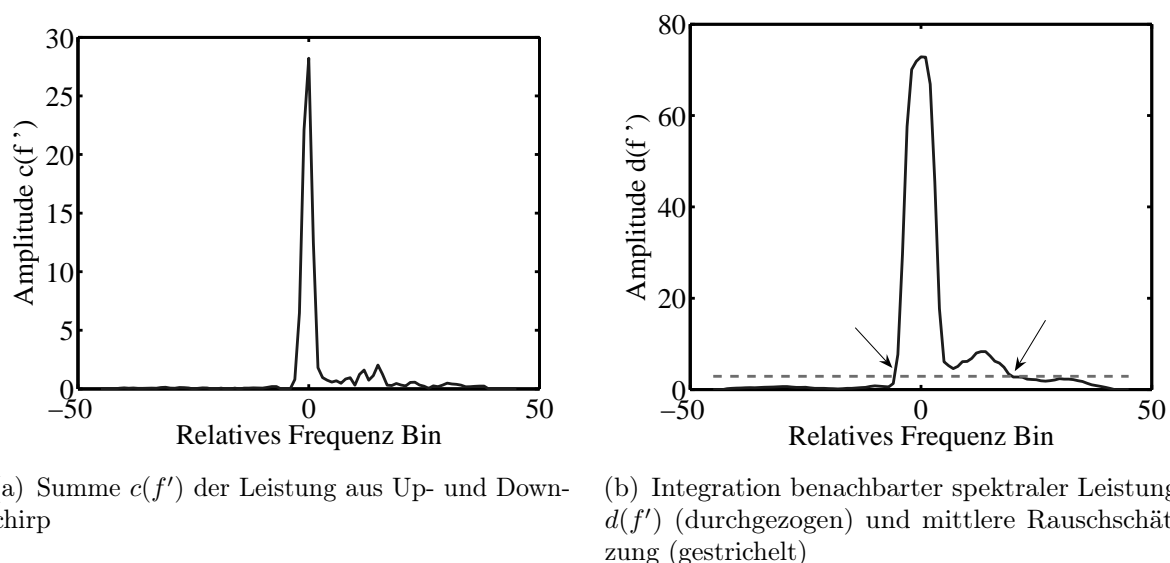


Abbildung 4.28: Minderung des Einflusses des Rauschens durch Integration

Die Integration der Signalform führt jedoch zu einer Verbreiterung, die vor der eigentlichen Berechnung der Länge noch kompensiert ( $K_I$ ) werden muss. Ferner sollte der verbreiternde Einfluss der für die spektrale Schätzung verwendeten Fensterfunktion kompensiert werden ( $K_F$ ). Nach erfolgter Kompensation lassen sich die absolute Länge  $\hat{L}$  des Zieles sowie die Entfernungen zwischen vorderem bzw. hinterem Ende zum dominanten Reflexionspunkt ermitteln. Dabei ist darauf zu achten, dass im Falle kurzer Ziele durch die Kompensation keine negative Länge entsteht.

$$r_{\min} = r_{\text{peak}} - [\Delta r \cdot (f_{\min} + (K_I + K_F))] \quad (4.28)$$

$$r_{\max} = r_{\text{peak}} + [\Delta r \cdot (f_{\max} - (K_I + K_F))] \quad (4.29)$$

$$\delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad (4.30)$$

$$\hat{L} = r_{\max} - r_{\min} \quad (4.31)$$

### Evaluation der Längenschätzung in einer Messfahrt

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten das prinzipielle Vorgehen zur Längenschätzung beschrieben wurde, werden hier die Ergebnisse einer ganzen Messfahrt dargestellt. In diesem Fall ist nicht mehr die Voraussetzung einer reinen Einzelsituation gegeben. Vielmehr wird eine Fahrt über einen Zeitraum von etwa 8 s mit insgesamt über 400 Zielmeldungen betrachtet. Dabei ist stets ein Kleintransporter mit einer Länge von etwa 5 m im Erfassungsbereich des Radarsensors und entfernt sich während der Messung um etwa 20 m.

In Abbildung 4.29(a) sind die Ergebnisse der Längenschätzung dargestellt. Es ist eine zuverlässige Detektion des vorausfahrenden Fahrzeuges im Definitionsbereich des Sensors zu erkennen. Zusätzlich lassen sich Ziele am Fahrbahnrand ausmachen, die zwischenzeitlich in den Erfassungsbereich des Sensors fallen und sich als Ziele mit geringer Länge darstellen. Die Schätzung der Länge verhält sich weitgehend unabhängig von der Entfernung zum Ziel. Wird der Median der Längenschätzung über der Zeit als Schätzung der tatsächlichen Länge herangezogen, ergibt sich ein Wert von

$$\bar{L}_{\text{Van}} = 5.1 \text{ m} \quad . \quad (4.32)$$

In einer zweiten Darstellung in Abbildung 4.29(b) wurden die vorderen und hinteren Anteile der Länge in Kombination mit der Schätzung der Entfernung des jeweils stärksten Reflexionspunktes aufgetragen. Auf diese Weise entsteht eine Repräsentation, die den tatsächlichen Verlauf der Messfahrt deutlicher veranschaulicht. Neben dem beobachteten Fahrzeug sind auch deutlich zwei stationäre Ziele am Straßenrand zu erkennen, an denen das Messfahrzeug während der Messung vorbeigefahren ist.

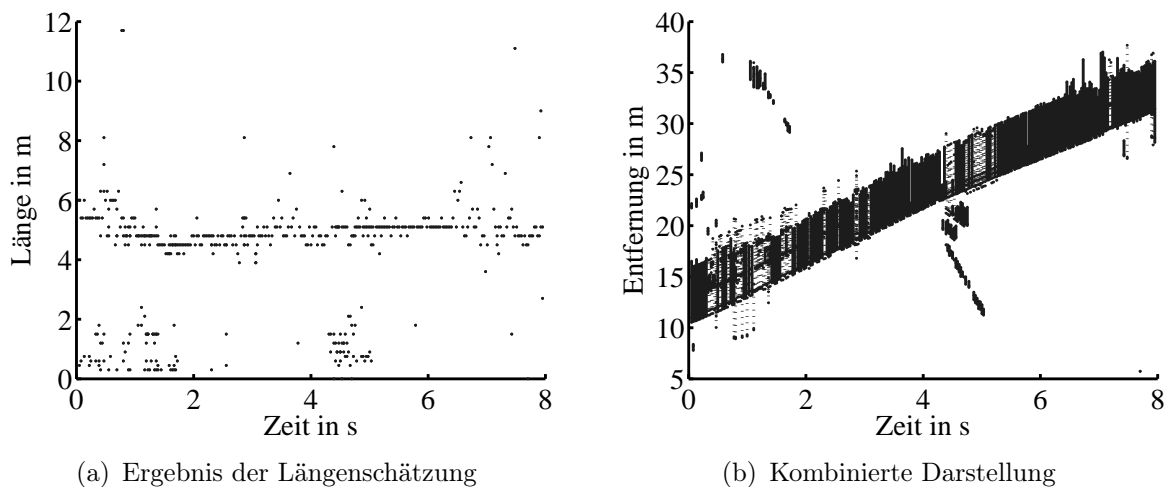


Abbildung 4.29: Messung von Länge und Entfernung eines Kleinlasters über der Zeit

### Vergleichsmessung mit einem Corner-Reflektor

Als Vergleich zu den eben gezeigten Ergebnissen für ein langes Ziel werden im Folgenden die Ergebnisse einer Messfahrt mit einem Corner-Reflektor als Ziel

dargestellt. Der betrachtete Sensor ist derselbe wie in den vorangegangenen Messungen.

Entsprechend der vorherigen Darstellungen wird in Abbildung 4.30(a) die Schätzung der Länge des Corner-Reflektors separat dargestellt. Wieder ist eine zuverlässige Detektion über den gesamten Messbereich zu erkennen, wobei der Reflektor erst nach etwa 6.5 s in den Erfassungsbereich des Sensors kommt. Die Schätzung der Länge fällt erwartungsgemäß deutlich geringer aus und eine Granularität in der Längenschätzung, bedingt durch die Entfernungsauflösung von  $\Delta r = 0.3$  m, ist zu erkennen. Der Median der Längenschätzung beträgt

$$\bar{L}_{\text{Corner}} = 0.3 \text{ m} \quad (4.33)$$

und entspricht damit auch den Erwartungen an eine korrekte Schätzung der Objektlänge. Abbildung 4.30(b) zeigt wiederum die Entfernung zum über der Zeit mit angehefteten Längenvektor.

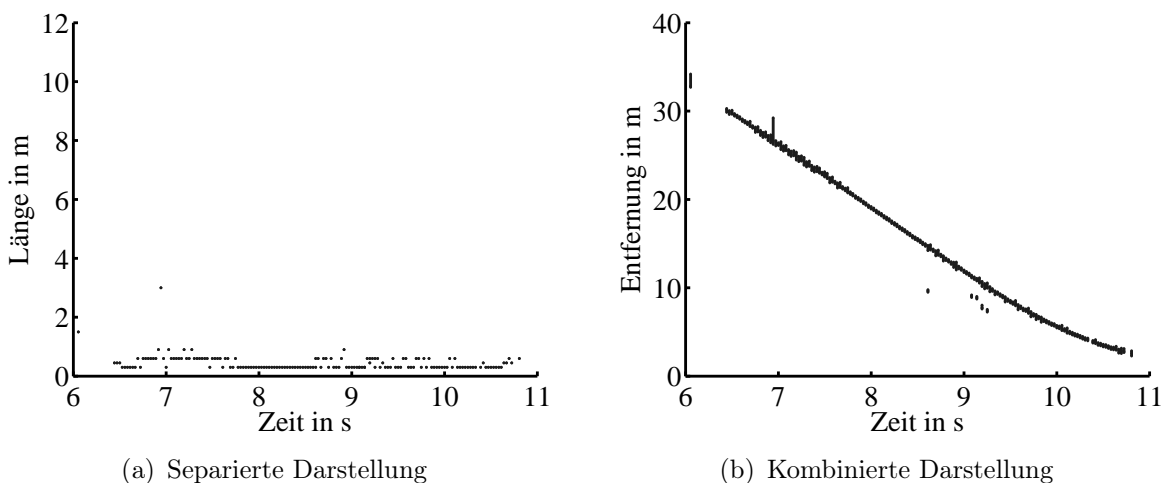


Abbildung 4.30: Messung von Länge und Entfernung eines Corner-Reflektors über der Zeit

In Abbildung 4.31 sind zwei Beispiele für die resultierenden zentrierten Zielspektren gegeben, welche die Grundlage zur Längenschätzung bilden. Dargestellt sind dabei das Signal eines Kleinlasters und das eines Corner-Reflektors in einer Entfernung von jeweils  $r = 25$  m. Auffallend ist neben der geringeren empfangenen Leistung beim Corner-Reflektor im Wesentlichen die nicht symmetrische Form der vom Kleintransporter gewonnenen Signatur.

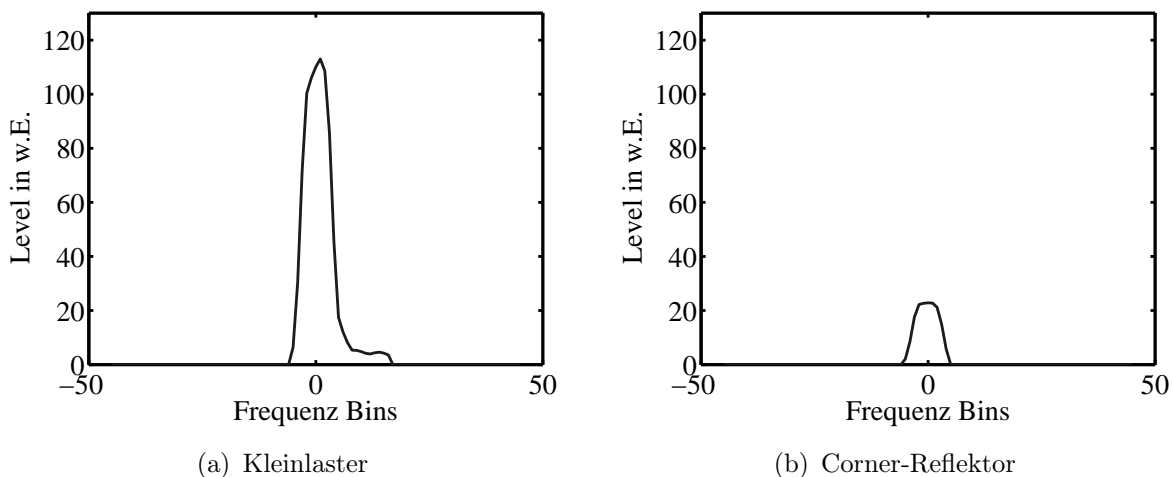


Abbildung 4.31: Beispiele der vom Rauschen befreiten zentrierten Spektren für einen Kleinlaster und einen Corner-Reflektor

### 4.4.3 Objektlängenschätzung mit einer LFMSK-Signalform

In der Darstellung des letzten Abschnitts wurde eine LFMCW-Signalform betrachtet und aus der Breite  $\delta f$  des Peaks im Spektrum auf die Länge des Zieles geschlossen, wie dies schematisch in Abbildung 4.32 dargestellt ist. Dieses Verfahren führt nur dann zu sinnvollen Ergebnissen, wenn von langen Zielen ausgegangen wird, das Ziel also keine messbare Ausdehnung der Geschwindigkeit aufweist. Diese Einschränkung auf bestimmte Sujets ist nötig, da aufgrund der Mehrdeutigkeiten zwischen Entfernung und Geschwindigkeit im Spektrum des Empfangssignals zu einem LFMCW-Sengesignal für die Berechnung der Objektlänge angenommen werden muss, dass sich alle Teile mit der gleichen Geschwindigkeit  $\bar{v}$  bewegen.

Wird das beschriebene Verfahren auf beliebige Sujets angewendet, ist die Längenschätzung fehlerhaft. Das vorgestellte Verfahren kann somit nur eingesetzt werden, wenn entweder sichergestellt ist, dass alle betrachteten Objekte eine geeignete Geschwindigkeitsverteilung aufweisen oder die Auflösung der Geschwindigkeitsmessung des verwendeten Systems derart gering ist, dass unterschiedliche Geschwindigkeiten nicht messbar sind.

Sendesignalformen mit mehreren Chirps und einer damit gegebenen Redundanz eignen sich in Mehrzielsituationen nur theoretisch zur Lösung der Mehrdeutigkeit in der Längenschätzung. Sinnvoller erscheint die Verwendung einer LFMSK-Signalform zur Messung, da in diesem Fall anhand der zusätzlich

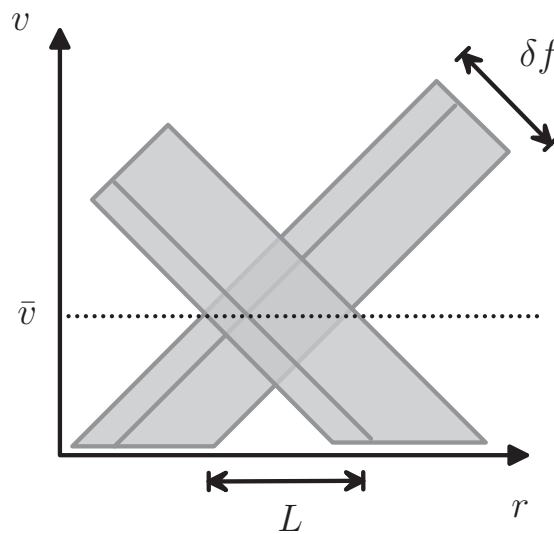


Abbildung 4.32: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen radialer Ausdehnung  $L$  und Breite des spektralen Bereiches  $\delta f$  mit Signalleistung

gemessenen Differenzphasen eine eindeutige Auflösung der Mehrdeutigkeit zwischen Entfernung und Geschwindigkeit möglich ist. Gerade wenn eine Bestimmung der radialen Ausdehnung des Objektes gewünscht wird, hat die Differenzphase  $\delta\psi$  eine interessante Eigenschaft. Wenn sichergestellt ist, dass in allen vom Objekt abgedeckten Auflösungszellen der Entfernungsmessung genügend Energie reflektiert wird, ergibt sich in diesem Bereich ein linearer Verlauf der Differenzphase über der Entfernung, dessen Steigung nur von den Parametern des Sendesignals abhängig ist (vgl. Gleichung (2.56)).

$$\delta\psi(r) = 2\pi \frac{2f_{Shift}}{c} \cdot r + \text{const.} \quad (4.34)$$

Dieser lineare Verlauf der Phase kann genutzt werden, um die im Betragsspektrum erfolgte Längenschätzung zu validieren. Würde die spektrale Aufweitung ihre Ursache in einer Ausdehnung der Geschwindigkeit haben, so würde sich entsprechend ein anderer Verlauf der Phase ergeben. Das skizzierte Verfahren beschreibt eine Schätzung der Länge im RV-Diagramm, nicht im Betragsspektrum, und ist folglich auf unterschiedliche Sujets anwendbar. Die Abbildungen 4.33(a) und 4.33(b) zeigen die Zusammenhänge für Betrag und Differenzphase exemplarisch am Beispiel eines Autos in etwa 10 m Entfernung vor dem Sensor. Die Auflösungszelle der Entfernungsmessung beträgt dabei 80 cm, um eine gleichmäßige Verteilung der reflektierten Leistung zu erhalten.

Aufgrund der kleinen Entfernung zwischen Sensor und beobachtetem Fahrzeug lässt sich neben dem Nutzsignal auch noch eine Doppelreflexion erkennen und als solche identifizieren.

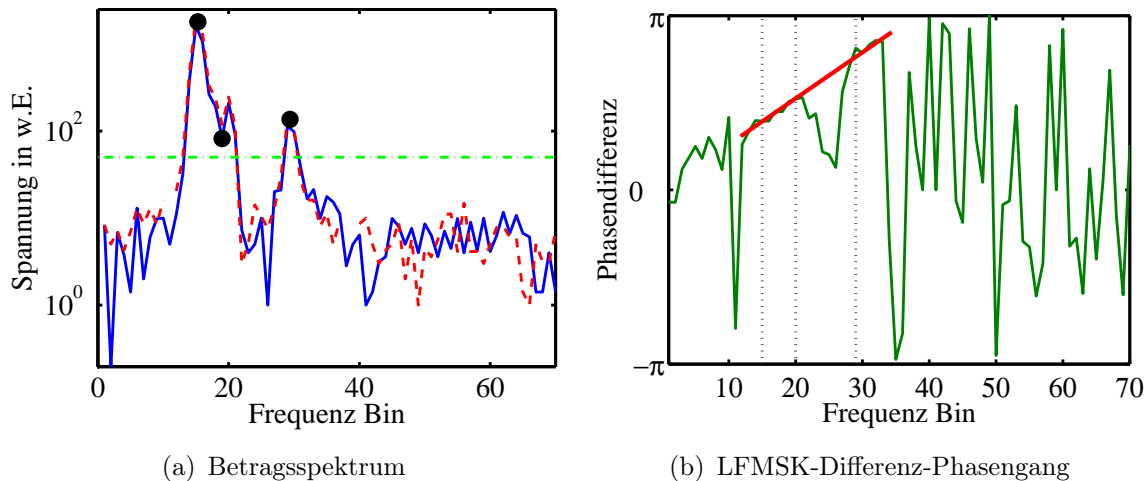


Abbildung 4.33: Längenschätzung bei einer LFMSK-Signalform über das Spektrum und die zusätzlich zur Verfügung stehende Information im Differenz-Phasengang

### 4.4.4 Einflüsse des Systementwurfes auf die Längenmessung

Wenn die gemessene Länge eines Objektes betrachtet wird, muss auch wieder die zugrunde liegende Signalverarbeitung berücksichtigt werden. Wie aus den Betrachtungen folgt, können Verfahren innerhalb der Signalverarbeitung, wie zum Beispiel eine während der Kurzzeitspektralanalyse eingesetzte Fensterfunktion, zu einer Vergrößerung der gemessenen Objektausdehnung führen. Je nach eingesetzter Fensterfunktion erfährt ein Signal eine Aufweitung zwischen typisch ein und drei Auflösungszellen [Lüb05].

Im Gegensatz zur Vergrößerung der gemessenen Länge bei kurzen Zielen, lässt sich oft eine Reduzierung der Länge erkennen. Die Ursache hierfür liegt in der Verteilung der Reflexionszentren am Fahrzeug. Während die direkt dem Sensor zugewandte Seite sicherlich einen guten Reflektor darstellt, rühren alle übrigen Reflexionen, anhand derer sich eine Länge schätzen lässt, von kleineren Teilen wie zum Beispiel den Achsen her. Meist kann nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass die Reflexionszentren gleichmäßig über die

ganze Länge des Fahrzeuges verteilt sind, so dass in aller Regel eine deutlich kleinere Länge gemessen werden wird.

In Umgebungen mit großem Clutterpegel oder vielen dicht platzierten Zielen muss zusätzlich noch die Trennung des Nutzsignals von Signalen aus der Umgebung des Objektes erfolgen. Da die von einem Objekt empfangene reflektierte Leistung nach der Radargleichung deutlich mit der Entfernung zwischen Sensor und Objekt abnimmt, das thermische Hintergrundrauschen aber konstant bleibt, wird die von einem Objekt gemessene Länge mit wachsender Entfernung abnehmen, weil sich das Nutzsignal nicht mehr vom Rauschen trennen lässt.

Im Falle eines Sensors ohne Auflösung im Winkel entscheidet die Breite der Sensorkeule über die Anzahl der sich in der Entfernung überlagernden Reflexionen. Dies ist in Abbildung 4.34 verdeutlicht. Während bei von der schmalen Keule (grün) nur das direkt vorausfahrende Fahrzeug erfasst wird, überlagern sich bei den breiteren Keulen die Echosignale der unterschiedlichen Ziele in der Entfernung. So können zum Beispiel bei fehlender Winkel- oder Geschwindigkeitsauflösung die beiden dargestellten Fahrzeuge untrennbar zu einem einzigen verschmelzen. Entsprechend ist auch bei ausschließlicher Längenschätzung eine reine Entfernungsauflösung in der Regel nicht hinreichend.

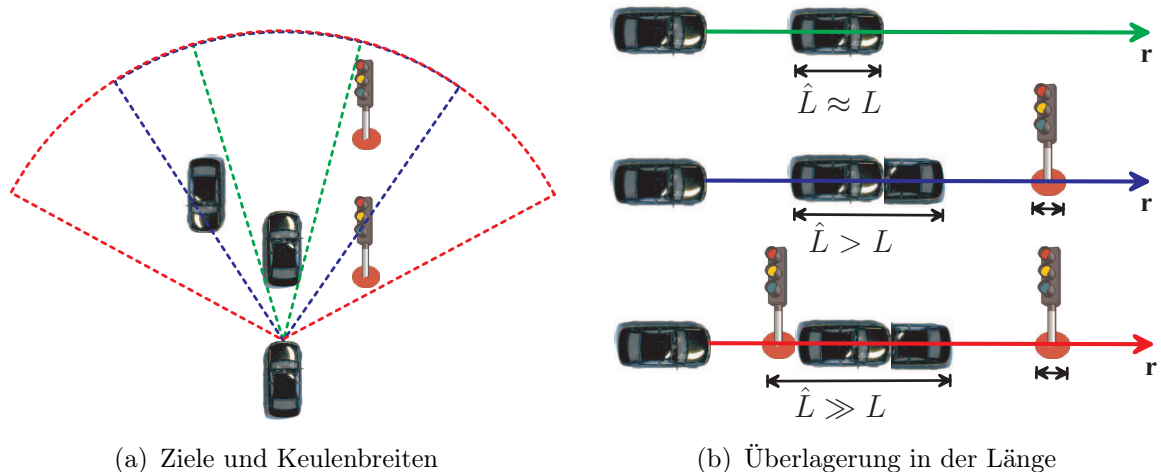


Abbildung 4.34: Darstellung der in der Entfernung überlagerten Objekte in Abhängigkeit von der Breite der Sensorkeule und die daraus resultierenden Objektängen

Generell kann bei langen Zielen zwischen stehenden und sich bewegenden Zielen unterschieden werden. Gerade in realistischen Situationen im Stadtverkehr mit vielen stationären Zielen am Straßenrand stellt die Information über die Geschwindigkeit ein wichtiges Kriterium zur Trennung der Ziele dar. So

ermöglicht die Geschwindigkeit eine Entscheidung darüber, welche Teile zu einem Objekt gehören und welche von anderen Objekten herrühren. Generell ist die Aufgabe der Zieltrennung eine wesentliche Voraussetzung für eine zuverlässige Interpretation der gewonnenen Daten. Jede durch eine zusätzliche Auflösung des Sensors gegebene Dimension erleichtert die Trennung der Ziele dabei deutlich.

### 4.4.5 Trilateration bei langen Zielen

Entsprechend der schematischen Darstellung in Abbildung 4.24(b) kann die erreichte Längenschätzung der Objekte genutzt werden, um die Positionsbestimmung über die Trilateration deutlich zu vereinfachen. Nach erfolgter Längenschätzung stellt sich ein radial ausgedehntes Objekt in jedem Sensor nicht mehr durch eine Anzahl von unabhängigen gemessenen Radien, sondern als einzelner gemessener Radius mit einer zusätzlichen Längenschätzung dar. Bei den beschreibenden Radien handelt es sich dabei entsprechend der Darstellungen in Abschnitt 4.4.2 sinnvollerweise um den Punkt der stärksten Reflexion am beobachteten Objekt. Durch die gewonnene Unterdrückung der vielen zusätzlichen dicht benachbarten Messwerte ist das Risiko zur Erzeugung von Geisterzielen nicht mehr gegeben. Vielmehr lässt sich der Ort der stärksten Reflexion sicher bestimmen. Zusätzlich kann aus den einzelnen geschätzten Längen eine Längenschätzung des betrachteten Objektes gewonnen werden. Wird diese Schätzung an den per Trilateration bestimmten Ort des Objektes angetragen, ergibt sich eine gute Beschreibung des tatsächlich betrachteten Objektes. Da die Messung der Länge in radialer Richtung erfolgt, ist die Richtung, in welche die Länge zeigt, zunächst nicht eindeutig bestimmt. Die kann jedoch leicht über das Tracking und damit den zweidimensionalen Bewegungsvektor des Objektes ermittelt werden.

#### **Beispiel: Positionsbestimmung eines Kleintransporters**

Auf Seite 115 wurden bereits Ergebnisse einer Längenschätzung für einen Einzelsensor vorgestellt. In Abbildung 4.29 sind dazu die gemessenen Entfernungen und Objektängen bei der Beobachtung eines Kleintransporters auf einer Landstraße wiedergegeben. Werden die gewonnenen Messungen von Entfernung und Länge von allen Sensoren eines Netzwerkes zu einem Zeitpunkt kombiniert (Abb. 4.35(a)), ergibt sich die in Abbildung 4.35(b) dargestellte zweidimensionale Schätzung von Ort und Länge des betrachteten Objektes. Dazu wurde anhand der jeweils stärksten Reflexionen eine Schätzung der

Position über eine Trilateration durchgeführt. Dieser Ort ist in der Abbildung durch ein kleines Quadrat dargestellt. Zusätzlich sind an diesem Punkt die gemessenen Längen jeweils in der Messrichtung des Sensors eingetragen.

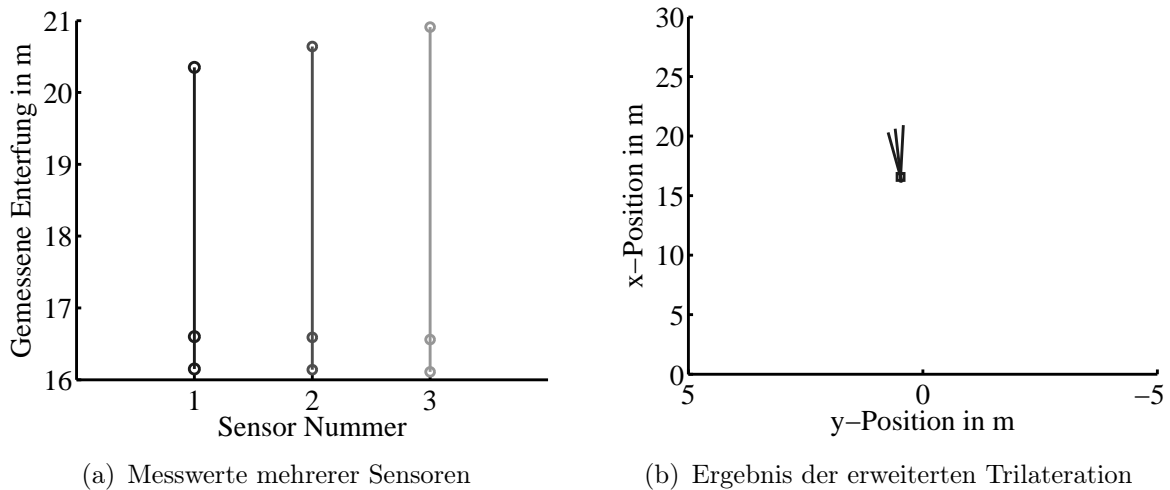


Abbildung 4.35: Positionsbestimmung von räumlich ausgedehnten Objekten über Trilateration mit zusätzlicher Schätzung der Objektlänge

Im Vergleich zu den einführenden Darstellungen zur Trilateration für Punktziele fällt deutlich auf, dass sich anstelle der Punktwolke (vgl. Abb. 4.21(b)) ein deutlich besser zu interpretierendes Bild ergibt und obendrein eine zusätzliche Information, die Länge des Objektes, zur Verfügung steht. Die wesentliche Änderung in der Signalverarbeitung hat dabei nicht in der Trilateration stattgefunden, sondern in der Aufhebung der Punktzielhypothese während der Detektion der Ziele. Da in frühen Schritten der Signalverarbeitung ein Objektmodell verwendet wurde, welches umfassender als das einfache Punktzielmodell ist, stehen den folgenden Schritten der Signalverarbeitung mehr Informationen über das betrachtete Objekt zur Verfügung, die sich gewinnbringend nutzen lassen.

Der Preis für die Änderungen liegt in einem erhöhten Rechenaufwand während der Verarbeitung und einer größeren Menge an Informationen, die gespeichert und berücksichtigt werden müssen. Während die Systeme in den Anfängen der Radaranwendungen für Kraftfahrzeuge von einer schnellen Reduktion der zu verarbeitenden Daten geprägt waren, erlaubt die aktuell zur Verfügung stehende Rechenleistung eine Anpassung der Signalverarbeitung an die betrachteten Objekte und fordert nicht mehr eine Reduktion der Objekte auf eine Beschreibung, die sich einfach verarbeiten lässt.



## 5 Geschwindigkeitsbestimmung bei kinematischer Ausdehnung

Nach den Untersuchungen der Auswirkungen einer geometrischen Ausdehnung auf eine Positionsschätzung behandelt dieses Kapitel die Auswirkungen der Geschwindigkeitsausdehnung auf das Objekttracking am Beispiel sich bewegnender Fußgänger und quer bewegter Fahrzeuge. Die Untersuchungen gehen dabei von Sujets aus, die sich als kinematisch ausgedehnte Ziele darstellen. Zunächst wird jedoch auf die Theorie der Objektverfolgung eingegangen, wie sie in der Radartechnik üblicherweise eingesetzt wird, bevor dann die durch die Ausdehnung gegebenen Besonderheiten abgeleitet werden. Im Anschluss daran wird gezeigt, welche zusätzlichen Informationen sich über ein Objekt gewinnen lassen, wenn von der Punktzielhypothese abgewichen wird.



Abbildung 5.1: Übersicht über die Signalverarbeitungskette

Die Aufgabe des Tracking-Blocks der in Abbildung 5.1 wiedergegebenen Signalverarbeitungskette liegt in einer Schätzung der zukünftigen Positionen aller Ziele und der Rauschunterdrückung. Dafür müssen neben den Positionen auch die Geschwindigkeiten der Objekte und deren Richtungen möglichst genau bekannt sein. Kann von einem Bewegungsmodell ausgegangen werden, lässt sich die wahrscheinlichste Bahn der Objekte vorhersagen. Um all diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen die gewonnenen Messwerte der Objekte zu aufeinander folgenden Zeitpunkten gesammelt, von den Messwerten der anderen Objekte abgegrenzt und als Einheit betrachtet werden. Für die Umsetzung der eigentlichen Anwendung spielt das Tracking eine entsprechend zentrale Rolle.

Bedingt durch die Erkenntnisse über die Schwierigkeiten einer trilaterationsbasierten Positionsschätzung von ausgedehnten Objekten wird für die folgenden Betrachtungen auf einen einzelnen Sensor (vgl. Abb. 5.2) mit einer Winkelmessung über Monopuls-Verfahren zurückgegriffen.

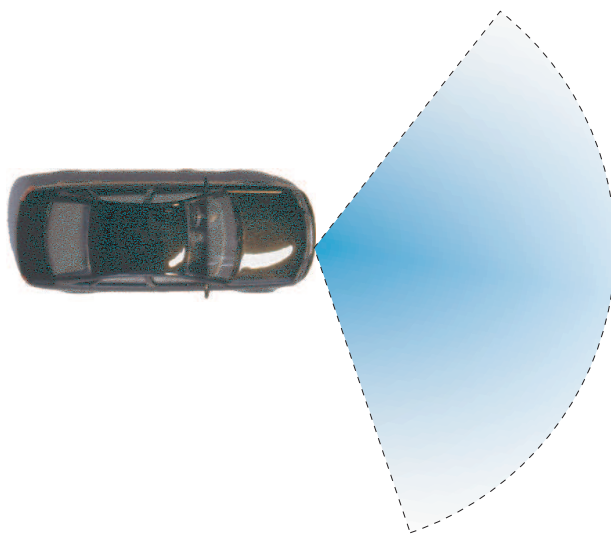


Abbildung 5.2: Systemkonfiguration mit einem einzigen winkelmessenden Radarsensor

## 5.1 Aufgabe der Zielverfolgung

Neben der zeitlichen Bündelung der zusammengehörigen Informationen können über ein Tracking auch zusätzliche Informationen gewonnen werden, die sich unter Umständen nicht direkt messen lassen. Beispiele hierfür sind die Beschleunigung, spezifische Bewegungsmuster oder die Geschwindigkeit der Objekte, wenn keine Auswertung der Dopplerfrequenz zur Verfügung steht. Grundlage einer zeitlichen Verfolgung der Objekte ist in aller Regel ein Bewegungsmodell mit konstanter Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Die folgenden Darstellungen gehen von einem Modell mit konstanter Geschwindigkeit aus.

$$x(t) = x_0 + \dot{x} \cdot t \quad (5.1)$$

Werden die dynamischen Größen in einem Zustandsvektor  $\vec{x}$  gespeichert und das Objekt zu diskreten Zeitpunkten  $k$  betrachtet, so lässt sich der Bewegungsfortschritt über eine Multiplikation mit der Systemmatrix  $\Phi$  beschreiben.

$$\vec{x}_{k+1|k} = \Phi \cdot \vec{x}_k + \vec{p} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix}_{k+1|k} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} p_r \\ p_v \end{bmatrix}_k \quad (5.3)$$

Abweichungen vom Modell der konstanten Geschwindigkeit können dabei durch einen mittelwertfreien normalverteilten Rauschterm  $\vec{p}$  mit Kovarianzmatrix  $\mathbf{Q} = \text{Cov}(\vec{p})$  berücksichtigt werden. Die Unsicherheit der Schätzung wird

dann durch die Kovarianzmatrix  $\mathbf{P} = \text{Cov}(\vec{x})$  beschrieben.

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{\Phi} \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{Q} \quad (5.4)$$

Mit jeder weiteren Vorhersage nimmt also die Unsicherheit aufgrund der unbekanntem tatsächlichen Beschleunigung weiter zu.

Wird zusätzlich noch die Beschleunigung  $a$  als mittelwertfreier normalverteilter Rauschprozess mit Varianz  $\sigma_a^2$  angenommen, ergibt sich die Kovarianzmatrix zu

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{bmatrix} \sigma_a^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}T^4 & \frac{1}{2}T^3 \\ \frac{1}{2}T^3 & T^2 \end{bmatrix} \sigma_a^2 \quad . \quad (5.5)$$

Im Gegensatz zum Zustandsvektor  $\vec{x}$  kann ein zweiter Vektor  $\vec{m}$  eingeführt werden, welcher die zur Verfügung stehenden Messwerte der Objektzustände zusammenfasst. Die Messmatrix  $\mathbf{H}$  beschreibt dabei den Zusammenhang zwischen Zuständen und Messwerten. Der bei jeder Messung auftretende Fehler wird analog über einen mittelwertfreien Rauschterm  $\vec{n}$  mit Kovarianzmatrix  $\mathbf{R}$  modelliert. In Gleichung (5.6) ist exemplarisch der Zusammenhang angegeben, wenn für das in (5.2) beschriebene System Messwerte für beide Zustandsgrößen vorliegen.

$$\vec{m}_{k+1} = \mathbf{H} \cdot \vec{x}_{k+1} + \vec{n}_{k+1} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ v \end{bmatrix}_{k+1} + \begin{bmatrix} n_r \\ n_v \end{bmatrix}_k \quad (5.7)$$

Unter Berücksichtigung der Messung  $\vec{m}_{k+1}$  kann die Abweichung im Vergleich zum über den Bewegungsfortschritt geschätzten Zustandsvektor  $\vec{x}_{k+1|k}$  ermittelt

$$\vec{e}_{k+1} = \vec{m}_{k+1} - \mathbf{H} \cdot \vec{x}_{k+1|k} \quad (5.8)$$

und aus der Kenntnis der Zustandsschätzung  $\vec{x}_{k+1|k}$  und dem beobachteten Messfehler  $\vec{e}_{k+1}$  eine korrigierte Schätzung  $\vec{x}_{k+1|k+1}$  für den Zustandsvektor bestimmt werden.

$$\vec{x}_{k+1|k+1} = \vec{x}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \cdot \vec{e}_{k+1} \quad (5.9)$$

Die Matrix  $\mathbf{K}_{k+1}$  bestimmt dabei den Einfluss der Messung auf die Korrektur des Schätzwertes. Im Fall der in der Radartechnik gebräuchlichen KALMAN-Filterung [Kal60] ergibt sich diese Matrix aus

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{H}^T \left[ \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right]^{-1} \quad . \quad (5.10)$$

Die Gültigkeit der oben angesprochenen Beschreibung der System- und Messfehler mit den jeweiligen Beschreibungen über mittelwertfreie normalverteilte Rauschterme mit den Kovarianzmatrixen  $\mathbf{Q}$  und  $\mathbf{R}$  wird dabei in der Theorie zum KALMAN-Filter als Voraussetzung angenommen. In diesem Fall ergibt sich die Genauigkeit nach der Schätzung unter Berücksichtigung der aktuellen Messwerte zu

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{H}] \mathbf{P}_{k+1|k} \quad . \quad (5.11)$$

Die Matrix  $\mathbf{I}$  steht dabei für die Einheitsmatrix. Eine Berücksichtigung der Messwerte verbessert die Genauigkeit der Schätzung und kompensiert damit die Reduktion der Genauigkeit aus (5.4).

Lassen sich die Zusammenhänge nicht durch lineare Funktionen beschreiben, treten anstelle der Matrizen  $\Phi$  bzw.  $\mathbf{H}$  nichtlineare Funktionen  $s(\vec{x})$  bzw.  $h(\vec{x})$ . Die analytische Berechnung folgt der Theorie des erweiterten KALMAN-Filters (engl. extended Kalman filter) [Bro98].

Das angenommene Bewegungsmodell kann einerseits herangezogen werden, um unbekannte Zustandsgrößen zu schätzen oder eine Vorhersage über künftige Objektpositionen zu treffen, andererseits kann die Vorhersage benutzt werden, um neue Messungen einer bereits existierenden Spur zuzuordnen und damit neue Schätzwerte bereitzustellen. Ist eine Schätzung der Zustände zum Messzeitpunkt und deren Genauigkeit bekannt, so kann diese Information genutzt werden, um zu überprüfen, welche Messwerte wahrscheinlich zur bestehenden Spur gehören und welche von neu in Erscheinung getretenen Objekten stammen müssen. Für derartige Zuordnungsaufgaben sind in der Literatur vielfältige Verfahren beschrieben [Fit82, Bro98, BP99, LK01a, LK01b, DHD03, OR03, MJK03, Lüb05], die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der betrachteten Systeme und deren Anwendungsgebiete unterscheiden. Es ist offensichtlich, dass sich Ziele einfacher verfolgen lassen, wenn sie weit voneinander entfernt sind, sich langsam bewegen oder sehr häufig und mit hoher Genauigkeit vermessen werden.

## Beispiel

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 5.3 die  $3\sigma$ -Gategröße der Unsicherheit einer Positionsschätzung  $\sigma_{r,k+1|k}$  nach erfolgter Vorhersage für eine eindimensionale zufällig beschleunigte Bewegung ( $\sigma_a = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) in Abhängigkeit der Genauigkeit der Positionsschätzung  $\sigma_{r,k|k}$  und der Zykluszeit  $T$  für zwei unterschiedlich genaue Geschwindigkeitsmessungen nach Gleichung (5.4) angegeben.

$$\sigma_{r,k+1|k}^2 = \mathbf{P}_{k+1|k}(1, 1) \quad (5.12)$$

$$= \sigma_{r,k|k}^2 + 2T\sigma_{rv,k|k} + T^2\sigma_{v,k|k}^2 + \frac{1}{4}T^4\sigma_a^2 \quad (5.13)$$

Der erste Fall (Abb. 5.3(a)) verdeutlicht dabei eine Bewegung in radialer Richtung mit einem typischen Wert für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung von  $\sigma_v = 1 \text{ m/s}$ . In diesem Fall ist erkennbar, dass die im Automobilbereich üblichen Werte der Zykluszeit  $T \in [10 \text{ ms} \dots 100 \text{ ms}]$  keinen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung haben. Der Entwurf der Sensorgenauigkeit sollte sich hierbei entsprechend an der mittleren Entfernung zwischen den einzelnen Zielen orientieren. Gerade in Situationen mit mehreren dicht platzierten Zielen kann es sonst zu dem Effekt kommen, dass sich beim Update einzelne Tracks mit Messwerten unterschiedlicher Ziele mischen.

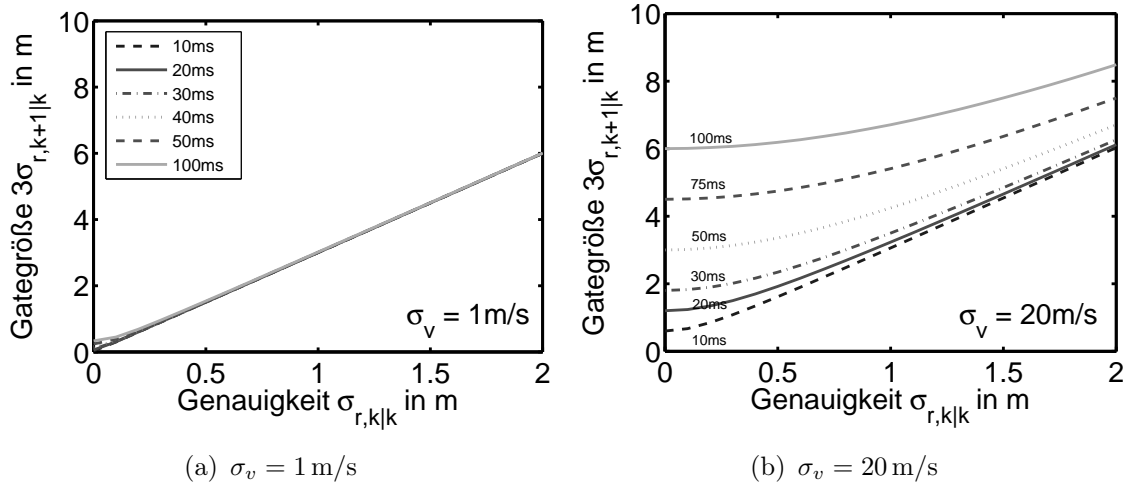


Abbildung 5.3: Darstellung der  $3\sigma_{r,k+1|k}$ -Gategröße der Schätzung des Bewegungsfortschrittes in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Positionsschätzung  $\sigma_{r,k|k}$  und der Zykluszeit  $T$  zwischen den Messungen

Abbildung 5.3(b) hingegen kann als Beispiel einer Bewegung ohne Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden, indem die Geschwindigkeitsmessung mit einer sehr großen Standardabweichung von  $\sigma_v = 20 \text{ m/s}$  modelliert wird. Die fehlende Information über die Geschwindigkeit wirkt sich in diesem Fall bei langen Zykluszeiten  $T$  schon sehr deutlich auf die Genauigkeit der Vorhersage aus, so dass kurze Zykluszeiten zu wählen sind. Da mit Radarsensoren

nur die radiale Komponente der Geschwindigkeit vermessen wird, hat diese Betrachtung zum Beispiel bei im Stadtverkehr auftretenden quer bewegten Zielen eine praktische Relevanz, da deren Geschwindigkeiten nicht gemessen werden. Hinzu kommt noch, dass die Genauigkeit der Positionsbestimmung bei diesen Zielen im Wesentlichen von der Genauigkeit der Winkelmessung abhängt.

Wird eine Genauigkeit der Winkelmessung von  $\sigma_\alpha = 2^\circ$  angenommen, ergibt sich in einer Entfernung von  $r = 20$  m eine Genauigkeit der Positionsbestimmung bei lateraler Bewegungsrichtung von  $\sigma_r = 70$  cm. Diese Darstellungen zeigen wiederum, welchen Einfluss die Situation auf den Systementwurf und die korrekte Auswertung der Messdaten hat. Wenn die Sujets auf Objekte mit einer rein radialen Bewegungsrichtung eingeschränkt werden können, ergeben sich vollständig andere Sachverhalte als für Objekte mit einer Querbewegung. In Abschnitt 5.4 wird aus diesem Grund ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die laterale Komponente einer Objektbewegung ohne Tracking bestimmen lässt.

Neben den oben genannten Systemparametern hat auch das gewählte Bewegungsmodell einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des Trackings. Im Bereich der Automobilradartechnik sind die Sensoren nicht stationär, sondern bewegen sich mit dem Fahrzeug. Auf diese Weise hängt die erfasste Bewegung der Objekte nicht nur von deren Eigenbewegung, sondern auch von der Bewegung des Fahrzeugs mit den Sensoren ab. Besonders deutlich wird dieser Effekt für Sujets, in denen das Sensorfahrzeug eine Kurvenfahrt ausführt. Eine Berücksichtigung der Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges kann entsprechend zu einer deutlichen Verbesserung der Resultate führen [Sch05, FD03, FDEW02, Kir00].

## 5.2 Kinematische Ausdehnung durch Bewegungsmuster

Das dem Tracking zugrunde liegende Bewegungsmodell muss in aller Regel die Bewegung des Objektes in der zweidimensionalen Ebene des Straßenverkehrs beschreiben können. Bevor jedoch in Abschnitt 5.4 am Beispiel von sich lateral bewegenden Objekten auf Besonderheiten der Bewegung in der Ebene eingegangen wird, wird im Folgenden zunächst auf objektspezifische Eigenheiten der Bewegung von Fußgängern eingegangen, die sich bereits in einer eindimensionalen radialen Bewegung zeigen. Dabei wird zwischen der makroskopischen Bewegung  $\bar{v}$ , also der Bewegung des Schwerpunktes, und der mikroskopischen Bewegung  $\tilde{v}$  unterschieden [FRR06]. Unter der mikroskopischen Bewegung

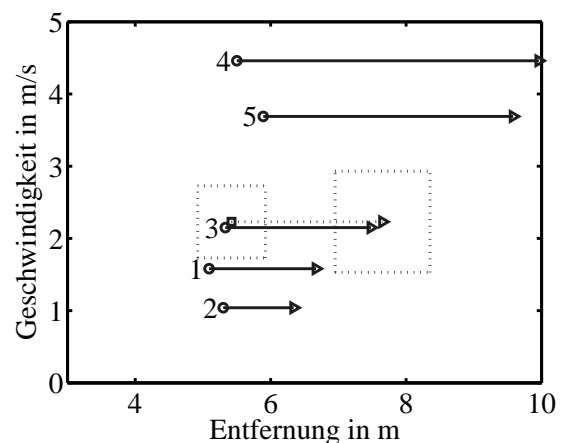
eines Objektes werden dabei die objektspezifischen Bewegungen verstanden, die der makroskopischen Bewegung überlagert sind. Beispiele hierfür sind die Pendelbewegungen der Arme und Beine bei einem Fußgänger.

### 5.2.1 Tracking der makroskopischen Fußgängerbewegung

Bei komplexen Objekten können bereits die Eigenschaften des Objektes selbst aufgrund der vielfältigen Geschwindigkeitskomponenten zu unerwünschten Effekten beim Tracking führen. Das für die Punktzielhypothese vorgestellte Bewegungsmodell geht von gleichförmigen bzw. gleichförmig beschleunigten Bewegungen aus. Auf Fußgänger trifft diese Annahme in soweit zu, dass der Schwerpunkt der Person annähernd einem derartigen Bewegungsmuster folgt, nicht jedoch die Arme und Beine (vgl. Abs. 3.4). Soll die Bewegung in der Ebene verfolgt werden, so macht ein derartiges Modell also durchaus Sinn. Werden auch Reflexionen an Armen und Beinen des Fußgängers empfangen, ergibt sich ein Widerspruch, da die gemessenen Geschwindigkeiten nicht mit den Erwartungen übereinstimmen. Anhand des in Abbildung 5.4 dargestellten Sujets mit einem Fußgänger, der auf einem Parkplatz radial vor dem Auto mit den Sensoren zügig herläuft, lassen sich die wesentlichen Punkte leicht zeigen.



(a) Foto der Messsituation



(b) Messdaten und Prognose

Abbildung 5.4: Abbildung (links) und Messergebnisse (rechts) der Betrachtung eines radial gehenden Fußgängers in einer realistischen Umgebung

Der verwendete Sensor verfügt über eine Entfernungsauflösung von  $\Delta r = 80$  cm und über eine Geschwindigkeitsauflösung von  $\Delta v = 0.17$  m/s. Die

sich bewegende Person führt im Radarechosignal zu fünf unterschiedlichen Zielmeldungen, die im Detail in Tabelle 5.1 dargestellt sind. Die Messwerte unterscheiden sich nicht wesentlich in der gemessenen Entfernung, jedoch deutlich in den gemessenen Geschwindigkeiten. Der Fußgänger selbst befindet sich zum Zeitpunkt der Messung in einer Entfernung von  $r_k = 5.4 \text{ m}$  und bewegt sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $\bar{v}_k = 2.3 \text{ m/s}$  vorwärts.

Wird auf Basis dieser Messungen eine Prognose für die Position abgegeben, ergibt sich eine Entfernung von  $r_{k|k+1} \approx 5.4 \text{ m} + 2.3 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ s} = 7.7 \text{ m}$ . Die Geschwindigkeit wird einen vergleichbaren Wert haben wie vorher  $v_{k|k+1} \approx 2.3 \text{ m/s}$ . In Abbildung 5.4(b) ist die Situation bildlich im RV-Diagramm verdeutlicht. Das kleine Quadrat gibt die Position des Fußgängers zum Zeitpunkt der Messung an. Als gestrichelter Pfeil ist der Bewegungsfortschritt über einen Zeitraum von einer Sekunde unter der Annahme gleichbleibender Geschwindigkeiten angegeben. Das gestrichelte Quadrat veranschaulicht die Unsicherheit in der Messung und der Vorhersage. Über kleine Kreise sind die Messwerte mit dem zu erwartenden Bewegungsfortschritt aufgrund der gemessenen Geschwindigkeiten angegeben.

Messwert	Entfernung	Geschwindigkeit
1	5.1 m	1.6 m/s
2	5.3 m	1.0 m/s
3	5.3 m	2.2 m/s
4	5.5 m	4.5 m/s
5	5.9 m	3.7 m/s

Tabelle 5.1: Messwerte für die gehende Person aus Abbildung 5.4 für einen Sensor mit  $\Delta r = 80 \text{ cm}$  und  $\Delta v = 0.17 \text{ m/s}$

Lediglich der Messwert mit der Nummer drei erfüllt die Prognose, der Track würde also über der Zeit fortgeführt werden. Alle übrigen Messwerte stimmen jedoch schon zum Zeitpunkt der Messung nicht mit der erwarteten Geschwindigkeit des Zieles überein und müssen also entweder verworfen oder aber verwendet werden, um neue Tracks zu initialisieren und erscheinen somit als unabhängige Ziele.

Diese quasi unabhängigen Ziele bewegen sich mit Geschwindigkeiten im Bereich zwischen null und doppelter Rumpfgeschwindigkeit. In aller Regel werden diese Ziele jedoch sehr schnell als Geisterziele interpretiert werden, da bei den folgenden Messungen keine geeigneten Messwerte zur Verfügung stehen, um eine Zielhypothese für ein Trackingmodell mit konstanter Geschwindigkeit

aufrecht zu erhalten. Abbildung 5.5 zeigt schematisch das Ergebnis einer Simulation des Trackings einer sich radial bewegenden Person. Ein Track läuft entsprechend der Erwartungen mit dem Fußgänger. Eine weitere Anzahl von kurzzeitigen fehlerhaften Tracks wird stetig neu erzeugt, ohne sich jedoch zu etablieren.

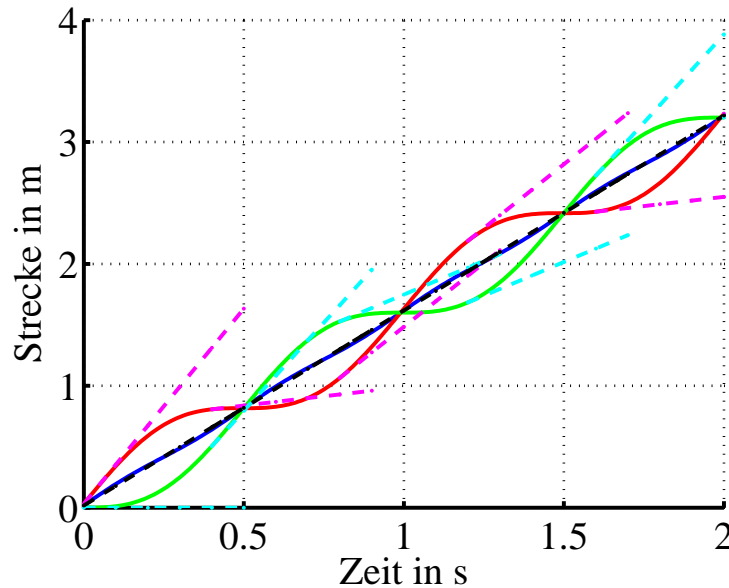


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung möglicher Tracks bei Verfolgung eines gehenden Fußgängers. Die durchgezogenen Linien beschreiben die tatsächliche Bewegung von Beinen (rot, grün) und Rumpf (blau), die gestrichelten Linien sich ergebende Tracks.

Im Gegensatz zu den Betrachtungen über lange Ziele, welche bei der Annahme der Punktzielhypothese leicht zu einer großen Anzahl von Geisterzielen bei der Positionsbestimmung führen können, treten bei sich radial bewegenden Fußgängern durch ihre kinematische Ausdehnung Wechselwirkungen mit dem Bewegungsmodell im Tracker auf. Die verstärkt auftretenden Geistertracks werden nicht zu zeitlich stabilen Trackhypothesen führen, trotzdem steigt die Anzahl der Tracks und der damit Rechenaufwand an. Die Verwendung eines unzureichenden Modells führt somit zu einer Beschreibung als Punktziel und unterdrückt zusätzliche in den Daten enthaltene Informationen über das Ziel, da die von Armen oder Beinen stammenden Echosignale ja tatsächliche Reflexionen und keine Fehldetektionen darstellen.

## 5.2.2 Tracking der mikroskopischen Fußgängerbewegung

Wird ein Fußgänger als Ziel betrachtet, weist dieser durch sein Bewegungsverhalten eine Vielzahl von messbaren Geschwindigkeitskomponenten auf. Soll die Bewegung eines Fußgängers über der Zeit verfolgt werden, ist dies im Wesentlichen die makroskopische Bewegung, also die mit der Zeit zurückgelegte Strecke. Wird im Rahmen des Trackings ein KALMAN-Filter mit einem zugrunde liegenden Punktzielmodell verwendet, wird sich eben diese Bewegung durch ein Tiefpassverhalten des Filters ohne weitere Schwierigkeiten herausfiltern lassen. Die auftretende Schwingung der gemessenen Geschwindigkeit des Rumpfes (vgl. Abs. 3.4.2) wird sich als Messfehler darstellen. Zusätzlich gemessene Geschwindigkeiten von Armen und Beinen werden im Rahmen der Trackvalidierung als Fehlmessungen interpretiert und unterdrückt, da sie zu keinen über der Zeit stabilen Zielmeldungen führen. Wird also eine entsprechend große Unsicherheit in der Geschwindigkeitsmessung angenommen und bei der Schätzung der tatsächlichen makroskopischen Geschwindigkeit die über der Zeit feststellbare Positionsänderung berücksichtigt, lassen sich auch Fußgänger mit Hilfe der herkömmlichen Verfahren gut verfolgen. Abbildung 5.6 zeigt hierzu exemplarisch in Entfernung und Geschwindigkeit hoch aufgelöste Messdaten von der Bewegung eines Fußgängers in Kombination mit der schematischen Darstellung eines Punktziel-Tracking Ergebnisses.

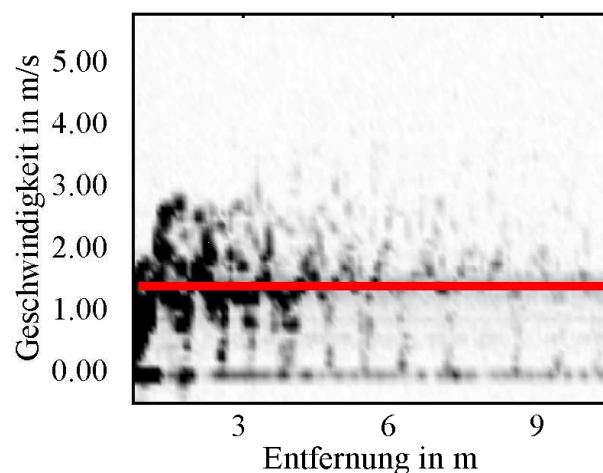


Abbildung 5.6: Tracking der Bewegung eines Fußgängers im RV-Diagramm mit einem Punktzielmodell (rote Linie)

An der durchgezogenen Linie ist eine zuverlässige Verfolgung des Rumpfes

mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $\bar{v} = 1.4 \text{ m/s}$  zu erkennen. Die Reflexionen von Armen und Beinen hingegen zeigen keine stabilen Trackbildungen.

Neben dieser Betrachtung der makroskopischen Bewegung des Fußgängers ist in den Messdaten eine Fluktuation der gemessenen Geschwindigkeiten des Rumpfes zu erkennen. Aus dem Vergleich der Theorie über die Bewegung des Menschen und den mit dem Radar gewonnenen Messdaten kann ein Modell zur Beschreibung der Bewegung eines Fußgängers entwickelt werden, welches die für die Radarmessung wesentlichen Punkte abdeckt. So ist aus der Bewegungstheorie in Abschnitt 3.4 bekannt, dass auch der Rumpf eines sich bewegenden Fußgängers keine konstante Geschwindigkeit hat, sondern seine Geschwindigkeit, die mit der Schrittfrequenz um die mittlere Fortbewegungsgeschwindigkeit schwingt. Die größte Amplitude verzeichnet diese Schwingung dabei nach [GN03] im Bereich des Steißbeines und liegt im Bereich zwischen 10% und 20% der mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit.

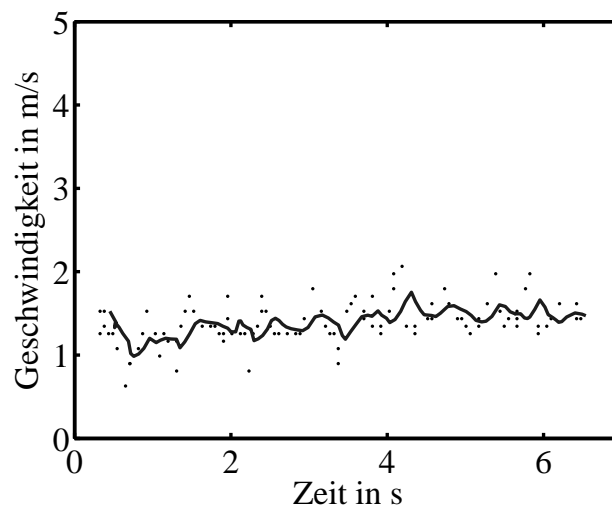


Abbildung 5.7: Tracking der Bewegung eines Fußgängers über der Zeit (durchgezogene Linie) und Messwerte (Punkte)

Abbildung 5.7 zeigt neben dem Trackingergebnis auch die zugrunde liegenden Zieldetektionen des Rumpfes als graue Punkte. Diese lassen noch deutlicher als das Trackingergebnis erkennen, dass keine konstante Geschwindigkeit des Objektes vorliegt. Zusätzlich zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit des Fußgängers beim Tracking können die dem Ziel über der Zeit zugeordneten Messwerte jedoch auch genutzt werden, um die mikroskopische Bewegung zu ermitteln [FRR06]. Für das Sujet eines sich radial bewegenden Fußgängers kann so die Schrittfrequenz  $f_{\text{Schritt}}$  der beobachteten Person geschätzt werden. Dazu müssen neben den gefilterten Werten auch die zugeordneten Rohdaten

über der Zeit gespeichert und nach einer Eliminierung der makroskopischen Bewegungsanteile einer Frequenzschätzung zugeführt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.8 gegeben.

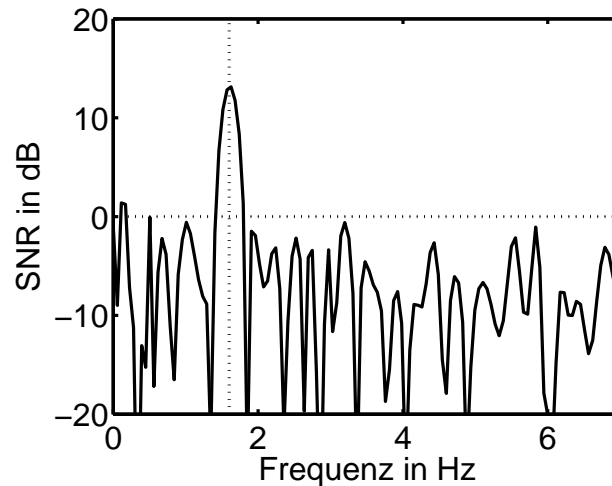


Abbildung 5.8: Schätzung der Schrittfrequenz eines Fußgängers

Deutlich zu erkennen ist hierbei die gesuchte Schrittfrequenz, für die sich ein Wert von  $f_{\text{Schritt}} = 1.6 \text{ Hz}$  mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von etwa 13 dB ergibt. Aus der Schrittfrequenz und der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  lässt sich in einer weiteren Rechnung dann eine Schätzung der Schrittlänge  $L_{\text{Schritt}}$  bestimmen.

$$L_{\text{Schritt}} = \frac{\bar{v}}{f_{\text{Schritt}}} \quad (5.14)$$

$$= \frac{1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.6 \text{ Hz}} = 87.5 \text{ cm} \quad (5.15)$$

Anhand der geschätzten Schrittlänge lässt sich leicht eine Plausibilitätskontrolle für die Schätzung durchführen. Der im Beispiel ermittelte Wert von knapp unter 90 cm stellt in diesem Zusammenhang einen realistischen Wert für die betrachtete Person dar.

Der Zustandsvektor  $\vec{x}$  mit den über das Ziel zur Verfügung stehenden Informationen kann entsprechend um zwei Größen zur Beschreibung der mikroskopischen Bewegung erweitert werden.

$$\vec{x} = [r, v, f_{\text{Schritt}}, L_{\text{Schritt}}]^T \quad (5.16)$$

Wenn eine sichere Detektion der Beine gegeben ist, kann auch die aktuelle Phase der Schrittschwingung mitgeführt werden, um so die Vorhersage der

zu erwartenden gemessenen Geschwindigkeiten weiter zu präzisieren. Eine derartige Beschreibung erweist sich jedoch nur in idealisierten Umgebungen als praktikabel.

Für die Signalverarbeitungskette bedeutet die zusätzliche Schätzung der objektspezifischen Größen neben dem Einfügen eines weiteren Verarbeitungsschrittes eine Abkehr von der zunehmenden Datenreduktion von links nach rechts. Abbildung 5.9 zeigt die sich ergebende neue Struktur. Am Ende der Kette wurde der neue Verarbeitungsblock hinzugefügt, da die Information erst nach einer gewissen Beobachtungszeit und entsprechend nach dem Tracking zur Verfügung steht. Zusätzlich werden jedoch auch Detailinformationen benötigt, die nach dem klassischen Verfahren bei dem Tracking bereits verworfen werden würden. Entsprechend steigt auch der Speicherbedarf, da Rohdaten über einen gewissen Zeitraum für folgende Verarbeitungsschritte gehalten werden müssen.

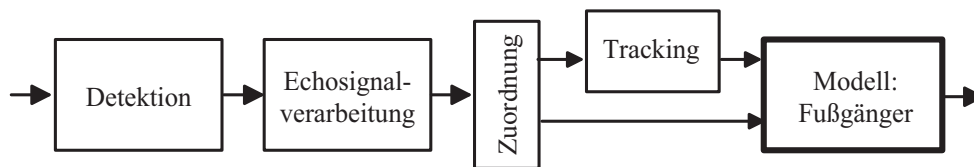


Abbildung 5.9: Signalverarbeitungskette zur Bestimmung der Schrittfrequenz von Fußgängern

### 5.2.3 Nutzen komplexer Bewegungsmuster

Neben der reinen Bestimmung der Entfernungsausdehnung, zum Beispiel um eine Schätzung der Länge vorzunehmen, können auch detaillierte Strukturen innerhalb der Ausdehnung mit dem Ziel ausgewertet werden, um weitere Informationen über das Objekt zu gewinnen, die zum Beispiel innerhalb einer Objekterkennung genutzt werden können. In militärischen Anwendungen werden zum Beispiel die Entfernungsprofile der detektierten Ziele analysiert, um daraus eine Aussage über den Typ eines Flugzeuges ableiten zu können. Hierzu müssen die entsprechenden Entfernungsprofile aller in Frage kommenden Objekte unter allen möglichen Beobachtungswinkeln bekannt und im Rahmen der Messung erkennbar sein [ND02]. Derartige Verfahren sind für das Einsatzgebiet der Automobilradartechnik wenig aussichtsreich, da die Vielfalt der Sujets deutlich höher ist und sich diese in aller Regel innerhalb des Empfangssignals gegenseitig und mit der Randbebauung überlagern.

Mindestens genauso aussagekräftig sind die mikroskopischen Bewegungsprofile der Sujets, die sich bei einer Betrachtung der Messwerte über der Zeit bestimmen lassen. Notwendig ist hierfür allerdings eine hohe Auflösung und Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung. Um dies gewährleisten zu können, sollten eindeutige Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden. Die bisher im RV-Diagramm beschriebenen Modelle müssen dann um die Dimension der Zeit ergänzt werden. Abbildung 5.10 zeigt eine derartige Modellerweiterung für nur kinematisch ausgedehnte Ziele und das beschriebene Beispiel eines sich radial bewegenden Fußgängers, wenn neben der Ausdehnung auch zeitliche Strukturen analysiert werden können. Hierbei ist zu beachten, dass nicht die Messdaten eines beliebigen Fußgängers beschrieben werden, sondern die Bewegungsrichtung explizit mit in die Betrachtungen einbezogen werden muss (vgl. Abs. 3.7).

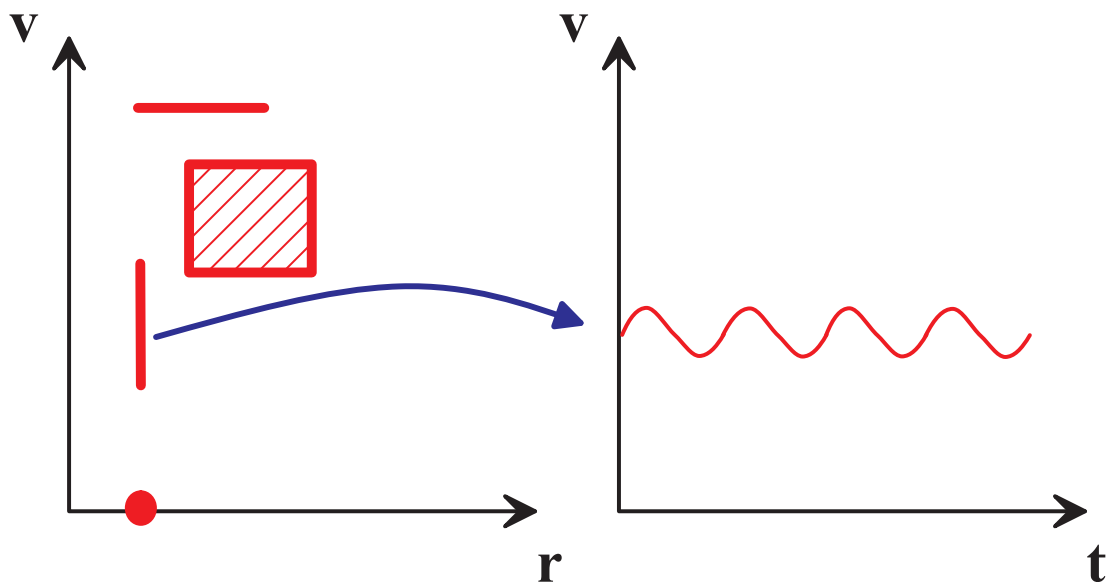


Abbildung 5.10: Erweitertes Modell zur Beschreibung der von einem bewegten Fußgänger gewonnenen Messwerte

### 5.3 Kinematische Ausdehnung unterschiedlicher Sujets

Neben einer kinematischen Ausdehnung durch objektspezifische Bewegungsmuster kann es auch zu einer messbaren kinematischen Ausdehnung kommen, wenn sich alle Teile des Objektes mit der gleichen Geschwindigkeit durch die

Ebene bewegen. In diesem Fall ist die gemessene Ausdehnung abhängig von der Situation in der das Objekt betrachtet wird und den speziellen Eigenschaften des eingesetzten Radarsensors.

### 5.3.1 Analytische Betrachtung der kinematischen Ausdehnung

Die Erläuterungen zur Betrachtung von doppelt ausgedehnten Zielen in Abschnitt 3.5.2 haben bereits gezeigt, dass auch ein Objekt, bei dem sich alle Teile mit der gleichen fahrbahnbezogenen Geschwindigkeit bewegen, bei der Messung durch ein Radar eine deutliche Ausdehnung der gemessenen Geschwindigkeiten hervorrufen können. Ursache hierfür ist die Messung der *radialen* Geschwindigkeitskomponente durch den Radarsensor. Es wird also nicht die tatsächliche Geschwindigkeit des Objektes in der Ebene gemessen, sondern lediglich eine radiale Komponente. Diese gemessene Komponente ist dabei abhängig vom Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  des Objektes und der Richtung  $\alpha$ , aus welcher das Objekt betrachtet wird. Der in Gleichung (2.26) zur Bestimmung der radialen Geschwindigkeit angegebene Zusammenhang kann auch im Bezug auf die Beobachtungsrichtung ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned} v &= \frac{x_o - x_s}{r} \cdot v_x + \frac{y_o - y_s}{r} \cdot v_y \\ &= v_x \cdot \cos(\alpha_o) + v_y \cdot \sin(\alpha_o) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Es besteht also keine Abhängigkeit zwischen der absoluten Position des Reflexionspunktes und der gemessenen radialen Geschwindigkeit, da lediglich der Zielwinkel, aber nicht die Entfernung in die Berechnung mit eingeht. Werden von einem Objekt mehrere Reflexionen an unterschiedlichen Punkten, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, detektiert, ergibt sich für jede einzelne Reflexion eine andere gemessene Geschwindigkeit, sofern die Reflexionszentren in unterschiedlichen Richtungen  $\alpha_i$  erscheinen.

Über die vom Sensor detektierten Zielwinkel ergibt sich eine wahrgenommene Winkelausdehnung  $\mathcal{A}_\alpha$  des Objektes, die abhängig von der geometrischen Ausdehnung des Objektes und jetzt auch von der absoluten Position des Objektes ist. Diese Winkelausdehnung des Objektes bestimmt über (5.17) die gemessene Geschwindigkeitsausdehnung  $\mathcal{A}_v$  des doppelt ausgedehnten Zieles.

$$\mathcal{A}_v(x, y) = v_{\max}(x, y) - v_{\min}(x, y) \quad (5.18)$$

So kann ein Sujet an unterschiedlichen Positionen in der Ebene mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsausdehnungen erscheinen. Ist das Sujet zum Beispiel

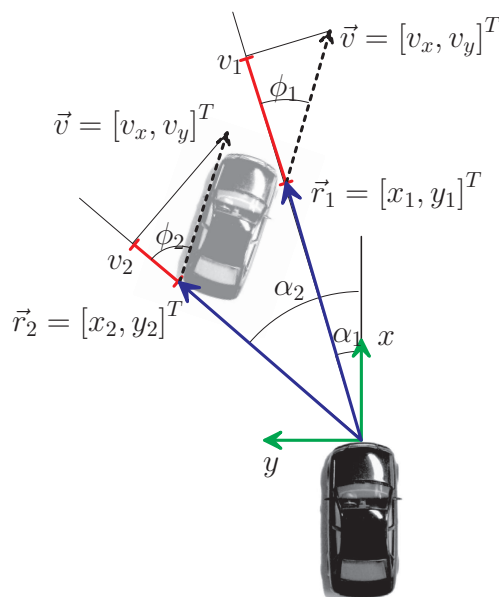


Abbildung 5.11: Geometrische Zusammenhänge zwischen Ausdehnung und Geschwindigkeit des Objektes und der gemessenen radialen Komponente der Geschwindigkeit

ein Auto auf der Autobahn in einer großen Entfernung vor dem Fahrzeug mit den Sensoren, so erscheint es trotz seiner tatsächlichen Breite ohne Ausdehnung im Winkel ( $\mathcal{A}_\alpha < 1^\circ$ ) und entsprechend auch ohne Ausdehnung in der Geschwindigkeit. Dies ist der Spezialfall der langen Objekte. Ganz anders sieht die Situation im Stadtverkehr aus, wenn die Abstände bedeutend geringer sind und sich die Fahrzeuge quer bewegen können, so dass sich, vom Sensor aus betrachtet, die Größen Länge und Breite vertauschen. Abbildung 5.12 zeigt die Situationen schematisch.

Für eine genaue Schätzung der zu erwartenden Winkel- und Geschwindigkeitsausdehnungen lassen sich die Auswirkungen der Position des Objektes in der Ebene rechnerisch bestimmen. Dazu wird als Ziel ein Fahrzeug der Länge  $L = 4\text{ m}$  und einer Breite von  $B = 2\text{ m}$  betrachtet und an unterschiedlichen Positionen platziert und für jeden Punkt  $(x, y)$  in der Ebene die Winkelausdehnung  $\mathcal{A}_\alpha(x, y)$  als Differenz zwischen dem maximalen  $\alpha_{\max}$  und minimalen Zielwinkel  $\alpha_{\min}$

$$\mathcal{A}_\alpha(x, y) = \alpha_{\max}(x, y) - \alpha_{\min}(x, y) \quad (5.19)$$

bestimmt. Der Sensor befindet sich dabei jeweils im Ursprung des Koordinatensystems. Zur Verdeutlichung der sich überlagernden Abhängigkeiten von

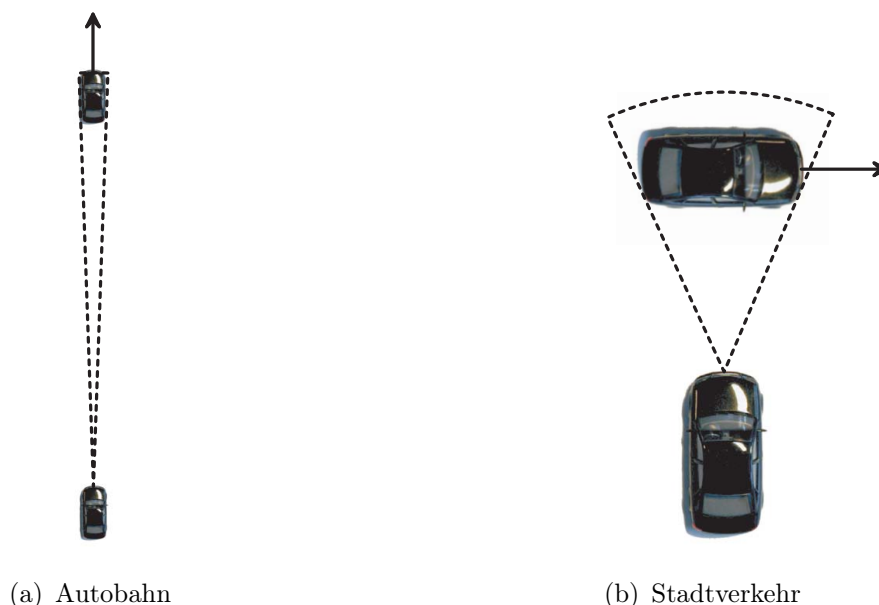


Abbildung 5.12: Darstellungen der wahrgenommenen Ausdehnung im Winkel in Abhängigkeit der Geometrien in unterschiedlichen Verkehrssituationen

Breite und Länge des Objektes werden diese zunächst separat betrachtet. In den Abbildungen 5.13(a) bis 5.13(c) sind schematische Zeichnungen der simulierten Zusammenhänge angegeben. So wird in der ersten Simulation von einem Ziel ohne radiale Ausdehnung ausgegangen. Der zweite Sonderfall geht von einem langen Ziel ohne Breite aus und im dritten Fall hat das Ziel sowohl eine Länge als auch eine Breite. Die Position des Ziel bezieht sich dabei auf die Mitte der dem Sensor zugewandten Seite, für ein gerade vorausfahrendes Fahrzeug also auf die Mitte der hinteren Stoßstange.

Die Ergebnisse der Simulationen stellen in Abbildung 5.14(a) bis 5.14(c) die jeweiligen Winkelausdehnungen in Grad über der Ebene dar. Der Zahlenwert ist über den Grauwert codiert. Zur besseren Lesbarkeit der Diagramme sind jedoch zusätzlich Linien gleicher Winkelausdehnung eingezeichnet und beschriftet. Der von den Darstellungen abgedeckte Bereich erstreckt sich dabei über die eigene, sowie die beiden links und rechts benachbarten Fahrspuren und bis in eine Entfernung von maximal 50 m.

Zusammenfassend können einige Ergebnisse festgehalten werden. So nimmt der Einfluss der Abmessungen mit der Entfernung ab und ergibt für das betrachtete Fahrzeug ab einer Entfernung von 40 m eine Winkelausdehnung von unter  $3^\circ$ . Der Effekt der Winkelausdehnung wird also erwartungsgemäß erst

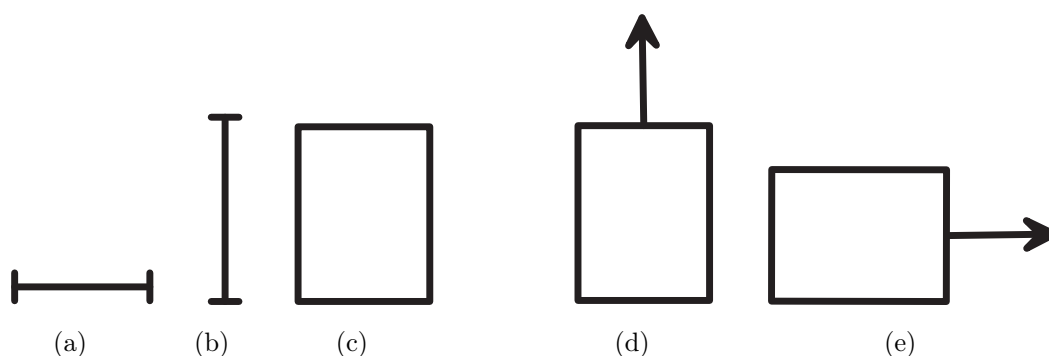


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung der Abbildung 5.14 zugrunde liegenden Anordnungen

im Stadtverkehr relevant. Zusätzlich erweist sich der Einfluss der Breite des Objektes in der Regel als dominant. Die Objektlänge führt erst zu wesentlichen Effekten, wenn sich das vermessene Fahrzeug unmittelbar vor dem Fahrzeug mit den Sensoren auf der benachbarten Fahrspur befindet.

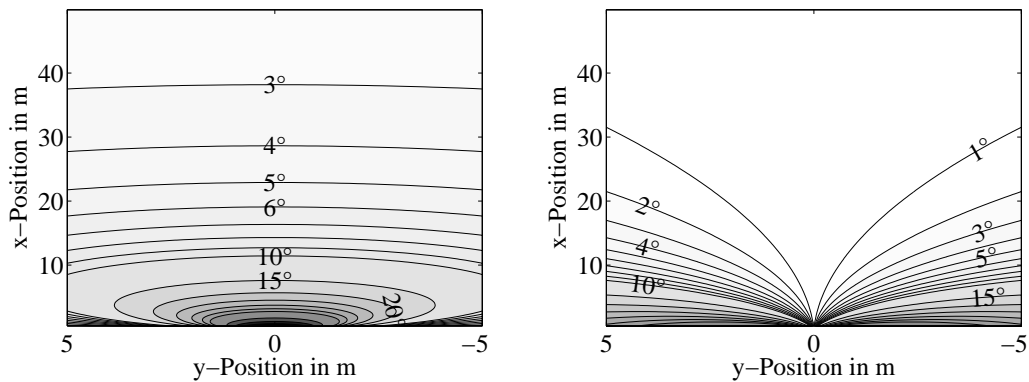
Interessanter als die Ausdehnung im Winkel ist die daraus resultierende Auswirkung auf die gemessenen Geschwindigkeiten und die daraus folgende Ausdehnung dieser Größe. Da die aktuell in der Radartechnik für den Automobilbereich eingesetzten Sensoren über keine Auflösung im Winkel verfügen, sind die beschriebenen Effekte nur dann messbar, wenn sich die einzelnen Reflexionszentren auf Basis der gemessenen Geschwindigkeiten trennen lassen. Für diese so getrennten Ziele lassen sich dann zum Beispiel bei Verwendung von Monopuls-Techniken auch eindeutig die zugehörigen Zielwinkel bestimmen, so dass sich trotz fehlender Auflösung der Winkelmessung eine Bestimmung der Winkelausdehnung durchführen lässt.

Aus dem Zusammenhang zur Bestimmung des gemessenen radialen Anteils der Geschwindigkeit

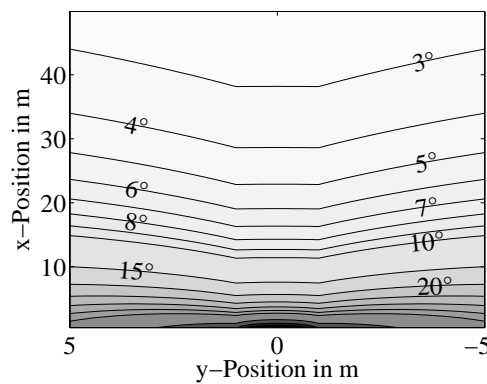
$$\begin{aligned}
 v &= \frac{x_o - x_s}{r} \cdot v_x + \frac{y_o - y_s}{r} \cdot v_y \\
 &= \frac{\langle \vec{r}, \vec{v} \rangle}{|\vec{r}|} = |\vec{v}| \cdot \cos(\phi)
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

ergibt sich, dass der zwischen radialer Richtung und der Richtung des Geschwindigkeitsvektors eingeschlossene Winkel die Größe der gemessenen Geschwindigkeit bestimmt und diese in jedem Fall kleiner oder gleich dem Betrag der tatsächlichen Geschwindigkeit ist. Entsprechend kann für die oben betrachtete Situation mit einem Auto an beliebigen Positionen in der Ebene die

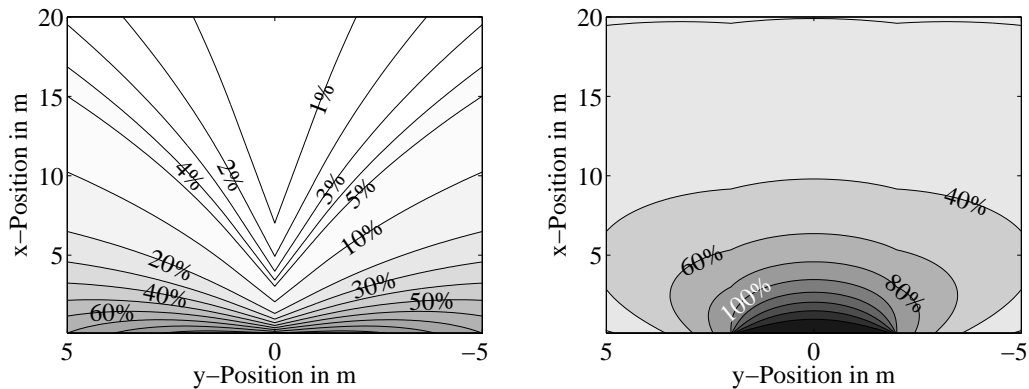
### 5.3 Kinematische Ausdehnung unterschiedlicher Sujets



(a)  $\mathcal{A}_\alpha(x, y|B = 2 \text{ m}, L = 0 \text{ m})$  in Grad hervorgerufen durch die Objektbreite (b)  $\mathcal{A}_\alpha(x, y|B = 0 \text{ m}, L = 4 \text{ m})$  in Grad hervorgerufen durch die Objektlänge



(c)  $\mathcal{A}_\alpha(x, y|B = 2 \text{ m}, L = 4 \text{ m})$  in Grad beim doppelt ausgedehnten Ziel



(d)  $\mathcal{A}_{v, \%}(x, y|\vec{e}_x)$  bei gerader Fahrtrichtung (e)  $\mathcal{A}_{v, \%}(x, y|\vec{e}_y)$  bei Fahrtrichtung quer zum Sensor

Abbildung 5.14: Darstellung des abgedeckten Aspektwinkelbereiches  $\mathcal{A}_\alpha$  (a)-(c) und der relativen Geschwindigkeitsausdehnung  $\mathcal{A}_{v, \%}$  (d)-(e) in Abhängigkeit von der Position eines doppelt ausgedehnten Zieles mit 2 m Breite und 4 m Länge

relative Ausdehnung der Geschwindigkeit  $\mathcal{A}_{v,\%}$  bestimmt werden.

$$\mathcal{A}_{v,\%}(x, y) = \frac{\mathcal{A}_v(x, y)}{|\vec{v}|} \quad (5.21)$$

Aus den theoretisch beliebigen Bewegungsrichtungen des Fahrzeuges werden aus pragmatischen Gründen zwei Richtungen herausgegriffen. Zum einen die gerade Fahrtrichtung parallel zur Sensorachse  $\{\vec{v}\} = \vec{e}_x$  und zum anderen eine Fahrtrichtung senkrecht zur Sensorachse  $\{\vec{v}\} = \vec{e}_y$ . Die Ergebnisse der Rechnungen sind in den Abbildungen 5.14(d) und 5.14(e) dargestellt. Im Falle des quer bewegten Objektes sind die Werte für Länge und Breite des betrachteten Fahrzeuges ausgetauscht worden, so dass die Länge des Objektes von  $L = 4$  m sich weiterhin parallel zur Fahrtrichtung befindet (vgl. Abb. 5.13(d) und 5.13(e)).

Deutlich erkennbar ist, dass sich die Effekte der Geschwindigkeitsausdehnung besonders bei quer bewegten Objekten auswirken. Fährt das Fahrzeug in einer Entfernung von  $r = 7$  m gerade vor dem Sensor, so beträgt die relative Ausdehnung der Geschwindigkeit etwa 1%. Bei gleicher Fahrtrichtung und in der gleichen Entfernung, jedoch auf der benachbarten Fahrspur beträgt die Ausdehnung schon 10%. Ist die Fahrtrichtung jedoch senkrecht zur Sensorachse, so beträgt die Ausdehnung, nahezu unabhängig von der Position in y-Richtung, etwa 50%. Je nach tatsächlicher Geschwindigkeit der Objekte und der vorhandenen Geschwindigkeitsauflösung der Sensoren lassen sich die einzelnen Reflexionszentren also durchaus über eine Geschwindigkeitsmessung trennen, so dass eine zusätzlichen Winkelmessung möglich wird. Werden diese Informationen in der Signalverarbeitung berücksichtigt, ergeben sich weitreichende neue Möglichkeiten.

Grundlage für die folgenden Beispiele ist der Sachverhalt, dass durch die Messung der radialen Komponente  $v$  der Geschwindigkeit und des Azimuts  $\alpha$  in Gleichung (5.17) eine Mehrdeutigkeitsgerade in der  $V_x V_y$ -Ebene über ihre HESSEsche Normalform beschrieben wird. Die Darstellung in der allgemeine Form der Geradengleichung lautet dann entsprechend

$$v_x(v_y)|_{v,\alpha} = \frac{v - v_y \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \quad (5.22)$$

$$= \frac{v}{\cos(\alpha)} - \tan(\alpha) \cdot v_y \quad . \quad (5.23)$$

Abbildung 5.15(a) stellt diese Gerade für das Beispiel eines Zieles an der Position [1 m, 44°] und einer gemessenen Geschwindigkeit von  $v = 1$  m/s dar.

Aus der Mehrdeutigkeit der Geschwindigkeit folgt eine Mehrdeutigkeit der Positionen, die das Ziel zu einem Zeitpunkt  $t_1 = t_0 + T$  annehmen kann. Da die Schätzung dieser zukünftigen Position jedoch für einen Tracker essentiell ist, ist die Messung der radialen Geschwindigkeit nicht hinreichend für eine eindeutige Signalverarbeitung. In Abbildung 5.15(b) ist diese Mehrdeutigkeit der Position für den Zeitpunkt  $t_1 = t_0 + 1$  s als gestrichelte Linie eingetragen. Die Position des Zieles zum Zeitpunkt  $t_0$  der Messung ist als kleines Quadrat und die gemessene radiale Komponente der Geschwindigkeit als Pfeil eingetragen. Die dünne durchgezogene Linie verdeutlicht die Messrichtung. Aus den theoretischen Zusammenhängen ist ersichtlich, dass die Mehrdeutigkeitsgerade für die Position immer senkrecht auf der Messrichtung steht.

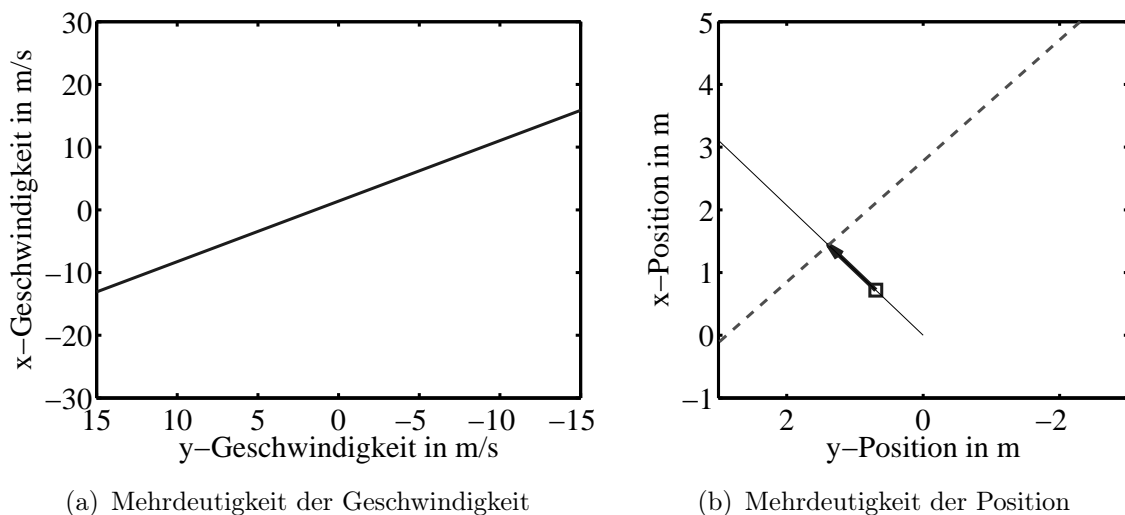


Abbildung 5.15: Mehrdeutigkeitsgeraden für Geschwindigkeit (links) und die Position in dem darauffolgenden Zeitschritt (rechts) durch die Messung des radialen Anteils der Geschwindigkeit (hier  $|v| = 1$  m/s) eines Objektes an der Position  $[1 \text{ m}, 44^\circ]$

Da zur Zielverfolgung in Mehrzielsituationen eine zuverlässige Prognose über die Position des Objektes für den Zeitpunkt der nächsten Messung erforderlich ist, wird beim Tracking häufig eine Hypothese über die zu erwartenden Bewegungsrichtungen angenommen, wie zum Beispiel eine Geradeausfahrt auf der Autobahn. Reicht eine einzelne Hypothese über die Bewegungsrichtung nicht aus, so werden mehrere Hypothesen aufgestellt und über der Zeit verfolgt, bis sich eine der Möglichkeiten als die wahrscheinlichste herausstellt. Diesen Ansatz verfolgen sogenannte *Multi-Hypothesis-Tracking (MHT)* oder *Interacting Multiple Model (IMM)*-Filter [BP99, Opi04a, Opi04b]. Liegen jedoch mehrere

Messungen der radialen Geschwindigkeit aus unterschiedlichen Richtungen für ein Objekt vor, so lässt sich die Mehrdeutigkeit der Geschwindigkeitsmessung auch ohne Tracking zuverlässig auflösen.

### 5.3.2 Redundanz zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten

In Abschnitt 2.5.2 werden Verfahren zur Lösung der RV-Mehrdeutigkeiten bei Verwendung von Dauerstrich-Signalformen vorgestellt. Ein häufig benutztes Vorgehen ist dabei die Verwendung von vier Chirps mit jeweils unterschiedlichen Steigungen. Auf diese Weise lassen sich Geisterziele von tatsächlichen Zielen auf Basis der Anzahl der sich schneidenden Mehrdeutigkeitsgeraden im RV-Diagramm unterscheiden. Werden doppelt ausgedehnte Objekte betrachtet, ergibt sich ein Bild mit vielen dicht benachbarten Reflexionspunkten mit sehr ähnlichen Werten der Entfernung und Geschwindigkeit.

Die Folge ist ein sehr dichtes Netz von Mehrdeutigkeitsgeraden im RV-Diagramm mit der Schwierigkeit, die korrekten Schnittpunkte und damit Messwerte zu identifizieren. Die Qualität der Datenzuordnung ist daher entscheidend für das Ergebnis der Auswertung. Ein Weg, die Zuordnung deutlich zu vereinfachen, besteht in der Annahme, dass alle Reflexionszentren des Objektes die gleiche Geschwindigkeit haben [Lüb05] und damit der Festlegung auf Sujets, die sich als lange Ziele abbilden.

Abbildung 5.16(a) gibt eine schematische Darstellung der beschriebenen Situation. Betrachtet wird dabei ein Objekt mit drei einzelnen Reflexionspunkten  $[r_1, v]$ ,  $[r_2, v]$  und  $[r_3, v]$  (grüne Kreise) und den zugehörigen zwölf gemessenen Frequenzen bei einer 4-Chirp-Signalform. Es wird deutlich, wie die dichte Anordnung der einzelnen Messwerte zu einer Vielzahl von Schnittpunkten führt. Die roten Kreise zeigen dabei einige Schnittpunkte von je drei Frequenzmessungen, die sehr leicht als tatsächliche Messwerte interpretiert werden können. Wird jedoch eine gleiche Geschwindigkeit für alle Reflexionspunkte angenommen, ergibt sich eine weitere Gerade (blaue Linie), welche zu einer einfacheren Interpretation der Situation und damit zur Gewinnung der korrekten Messwerte beiträgt. Auf diese Weise lässt sich die Anzahl der durch die Signalform entstehenden Geisterziele bei Betrachtung ausgedehnter Objekte deutlich verringern. Die Kenntnis der Geschwindigkeit kann dabei entweder aus dem Tracking zurückgekoppelt werden oder sich direkt aus einer zusätzlichen Optimierung ergeben.

Aus den Betrachtungen des vorangegangenen Abschnitts folgt jedoch, dass eine derartige Betrachtung für allgemeine doppelt ausgedehnte Ziele unzulässig ist, da die Voraussetzung der gleichen Geschwindigkeiten nicht zwingend

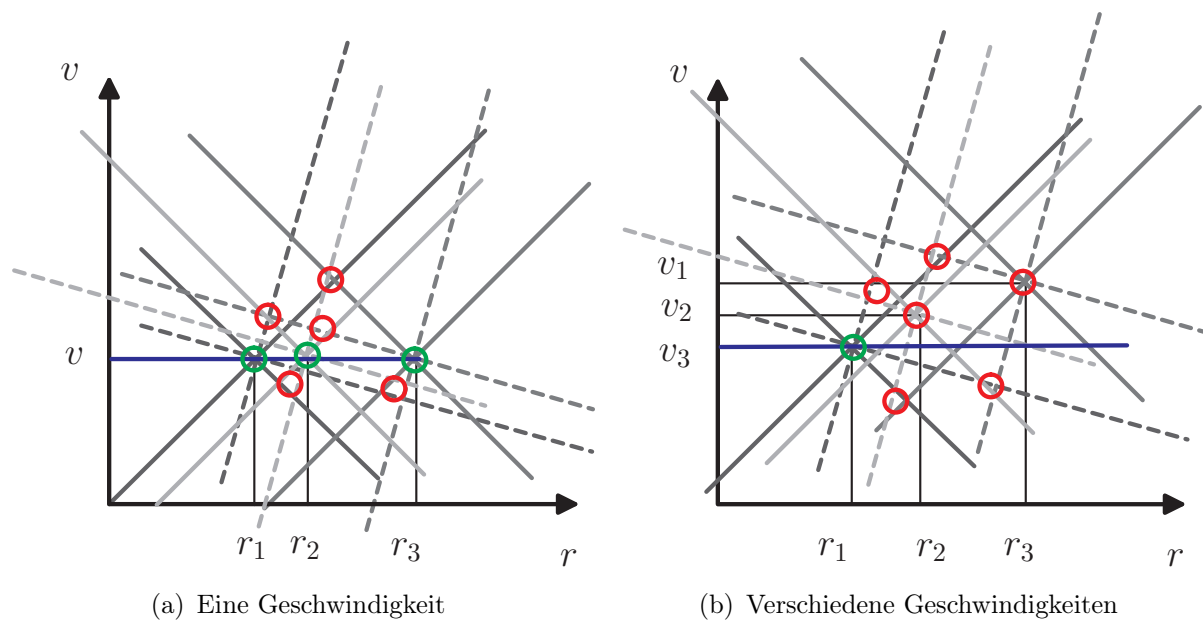


Abbildung 5.16: Auflösung der Mehrdeutigkeiten in der 4-Chirp-LFMCW-Signalform bei ausgedehnten Objekten unter der Hypothese einer einzigen Geschwindigkeit (blaue Linie) über ein langes Ziel (a) und ein doppelt ausgedehntes Ziel (b)

erfüllt ist. Abbildung 5.16(b) zeigt entsprechend die Betrachtung eines ähnlichen Zieles, bei dem sich die Reflexionszentren  $[r_1, v_1]$ ,  $[r_2, v_2]$  und  $[r_3, v_3]$  in den gleichen Entfernungen wie im ersten Beispiel befinden, jedoch leicht unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen. Im Vergleich zur Abbildung 5.16(a) verdeutlicht die blaue Linie wiederum die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit auf Basis der Geschwindigkeitsmessung des dichtesten Reflexionszentrums (grüner Kreis). Es ist leicht zu erkennen, dass diese Hypothese keinen Beitrag zur Interpretation der Situation leistet und die Betrachtung von doppelt ausgedehnten Zielen ein hohes Risiko zur Entstehung von Geisterzielen in sich birgt.

Eine korrekte Behandlung von doppelt ausgedehnten Zielen erfordert entsprechend eine detailliertere Berücksichtigung der Eigenschaften der Objekte bzw. eine eindeutige Messung von Entfernung und Geschwindigkeit [FR06c]. Die experimentellen Messungen zur Verifikation der folgenden Techniken wurden daher unter Verwendung einer FSK- bzw. LFMSK-Signalform aufgenommen, die über eine eindeutige Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung verfügt.

Interessant ist die Analogie zwischen der Darstellung von Mehrdeutigkeiten über eine Gerade im RV-Diagramm im Vergleich zur Darstellung von

Mehrdeutigkeiten über eine Gerade im  $V_x V_y$ -Diagramm. Entsprechend kann für die neue Fragestellung der Bestimmung eines Geschwindigkeitsvektors in der Ebene auf bekannte Techniken zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten durch überbestimmte, redundante Messungen zurückgegriffen werden. Die Redundanz ergibt sich im Folgenden nicht durch den Systementwurf, sondern durch die Ausdehnung der betrachteten Objekte. Auf diese Weise ergibt sich eine Lösung des in Abbildung 5.16(b) skizzierten Zuordnungsproblems, da die Ursache für gemessene unterschiedliche Geschwindigkeiten im Modell berücksichtigt wird.

### 5.4 Geschwindigkeitsbestimmung quer bewegter Fahrzeuge

Die theoretischen Betrachtungen aus 5.3 können genutzt werden, um im Falle der Betrachtung von kinematisch ausgedehnten Zielen im Stadtverkehr zusätzliche Informationen über das Objekt zu gewinnen [FR06a, FR06b]. Werden quer bewegte Fahrzeuge an einer Kreuzung mit einem Radarsensor betrachtet, so liegt eine Bewegungsrichtung der Objekte vor, die im Grunde genommen vom Radarsensor nicht erfasst werden kann, da nur die radialen Anteile des Geschwindigkeitsvektors gemessen werden [AFP04]. Diese sind bei einer Querverkehr selbst bei großen Geschwindigkeiten des Objektes relativ klein und können nahezu in beliebige Richtungen zeigen, je nachdem welcher Punkt des Fahrzeuges eine gute Reflexionseigenschaft aufweist. Der obere Teil von Abbildung 5.17 verdeutlicht den Sachverhalt. Betrachtet wird in allen Teilen der Abbildung das selbe quer fahrende Fahrzeug, ganz so wie es im linken Teil (Abb. 5.17(a)) dargestellt ist. Als Ergebnis der Messungen ergibt sich zunächst das rechts dargestellte Bild (Abb. 5.17(b)) mit einer Anzahl von gemessenen Reflexionspunkten und den zugehörigen radialen Geschwindigkeiten.

Auf Basis einer Punktzielhypothese lässt sich die vorliegende Situation nicht zuverlässig deuten. Drastischer noch als die Deutung der Situation selbst fällt der Unterschied auf, wenn in einem Tracker die Vorhersage für den nächsten Messzeitpunkt getätigt wird. Anstelle die Position des Objektes korrekt über der Zeit zu verfolgen (Abb. 5.17(c)), wird das Objekt beim Punktzieltracking nahezu am selben Ort erwartet (Abb. 5.17(d)) beziehungsweise der anfangs noch wahrnehmbare Punkthaufen zerfällt durch die verschiedenen gerichteten Geschwindigkeitskomponenten. Aus diesem Grund haben auf Punktziele abgestimmte Tracker erhebliche Schwierigkeiten quer fahrenden Verkehr korrekt zu behandeln, zumal davon auszugehen ist, dass die Beobachtungszeiten der

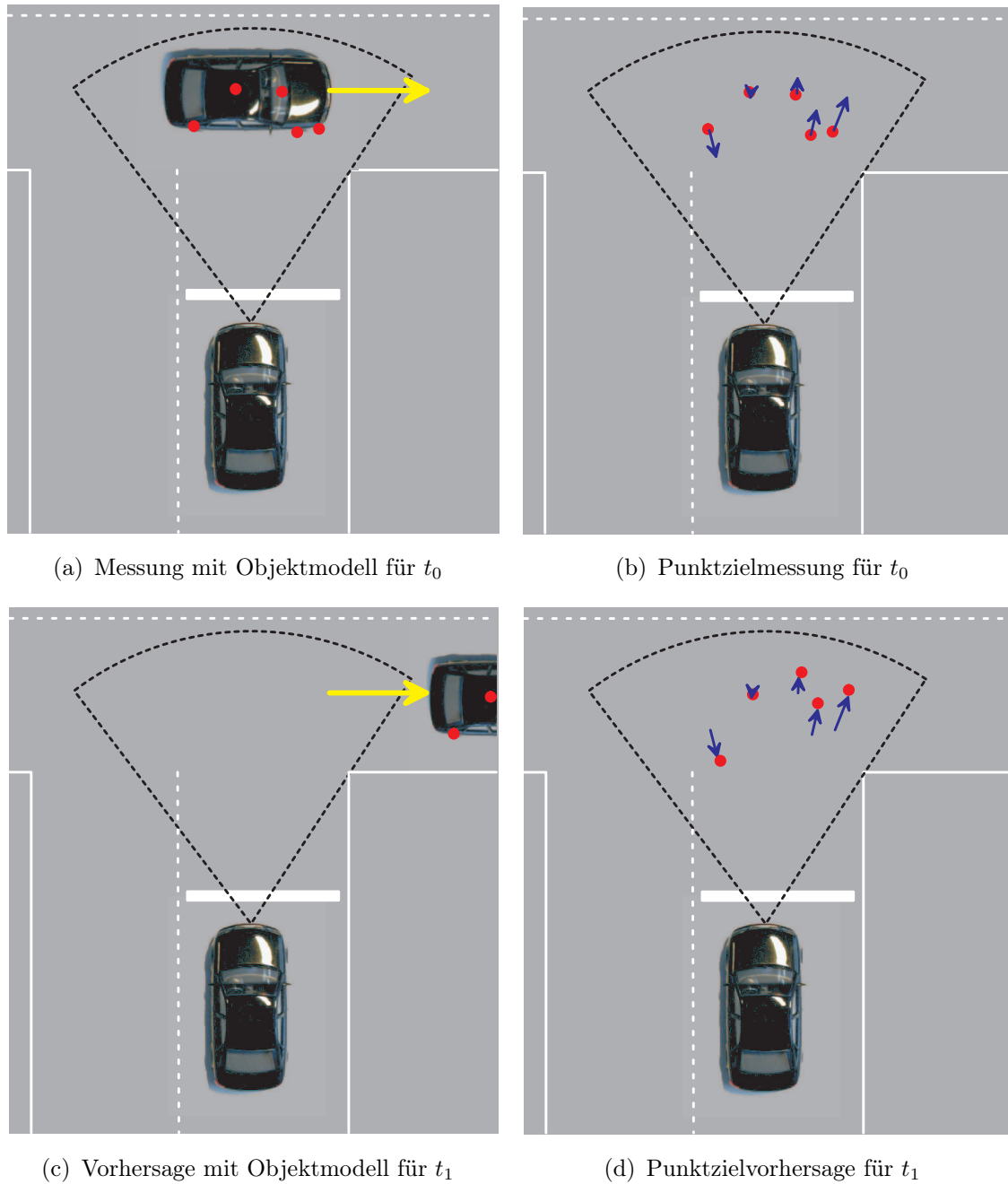


Abbildung 5.17: Interpretation einer Situation mit Querverkehr über ein Punktzielmodell (links) oder über ein angepasstes Objektmodell (rechts) zum Zeitpunkt der Messung (oben) und mit den entsprechenden Vorhersagen für den nächsten Messzeitpunkt auf Basis der gemessenen Positionen und Geschwindigkeiten (unten)

sich lateral bewegenden Objekte relativ kurz sind. Gerade im Stadtverkehr sind Situationen mit Querverkehr relativ häufig anzutreffen.

Das Wissen über ausgedehnte Objekte kann genutzt werden, um derartige Situationen zuverlässig aufzulösen und korrekt zu interpretieren. Darüber hinaus ist durch die streng geometrische Ursache der Geschwindigkeitsausdehnung obendrein sogar eine Schätzung der tatsächlichen Geschwindigkeit des Objektes möglich. Bedingt durch die Eigenschaften der kinematisch ausgedehnten Ziele lässt sich neben der radialen Komponente der Geschwindigkeit auch eine gute Schätzung der lateralen Komponente der Geschwindigkeit - ganz ohne Tracking - ermitteln, sofern nur genügend Messpunkte unter unterschiedlichen Aspektwinkeln zur Verfügung stehen. Statt die einzelnen gemessenen Reflexionspunkte separat zu betrachten, müssen diese bereits am Anfang der Signalverarbeitungskette unter der Hypothese ausgedehnter Ziele betrachtet und entsprechend gemeinsam verarbeitet werden. Abbildung 5.18 zeigt die sich ergebende Signalverarbeitungskette. Erkennbar ist im Vergleich zum Beispiel mit dem Fußgängermodell in Abbildung 5.9, aus dem vorangegangenen Abschnitt, die Berücksichtigung des Zielmodells innerhalb der Signalverarbeitungskette schon vor dem Tracking.

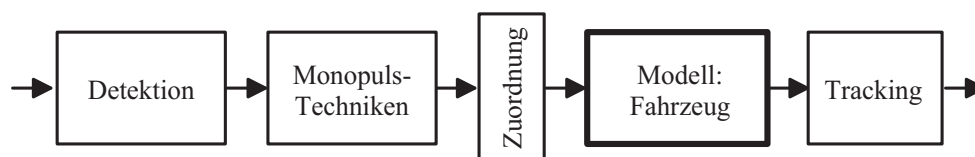


Abbildung 5.18: Signalverarbeitungskette bei der Betrachtung von quer bewegten, doppelt ausgedehnten Zielen

Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge ist für eine Trennung der einzelnen Reflexionspunkte seitens des Sensors eine Auflösung in Geschwindigkeit ausreichend. Die Vielzahl von Detektionen tritt folglich auch bei Sensoren ohne Winkelauflösung auf. Wichtig für eine korrekte Interpretation der Situation ist vielmehr eine zuverlässige und eindeutige Messung von Geschwindigkeit und Winkel.

Wie aus den vorangegangenen Betrachtungen bereits bekannt ist, ergibt sich die gemessene radiale Komponente  $v$  der Geschwindigkeit eines Objektes aus dem Aspektwinkel  $\alpha$  und dem tatsächlichen Geschwindigkeitsvektor  $[v_x, v_y]$  des Objektes. Je näher das Objekt an die Sensoren kommt, desto größer ist der abgedeckte Winkelbereich (vgl. Abb. 5.14) und entsprechend größer sind die Unterschiede in den gemessenen Radialgeschwindigkeiten. Zu-

sätzlich unterscheiden sich die gemessenen Geschwindigkeiten mit steigender Geschwindigkeit des Objektes stärker.

Wird beispielsweise als Objekt ein Auto der Länge  $L = 4\text{ m}$  mit einer Geschwindigkeit von  $v_y = 11.5\text{ m/s} = 41\text{ km/h}$  und ein Sensor mit der Geschwindigkeitsauflösung von  $\Delta v = 0.2\text{ m/s}$  angenommen, so beträgt der erforderliche Winkelunterschied der Reflexionspunkte

$$\Delta\alpha_y = \arcsin\left(\frac{\Delta v}{v_y}\right) \quad (5.24)$$

$$= \arcsin\left(\frac{0.2\frac{\text{m}}{\text{s}}}{11.5\frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) = 1^\circ \quad . \quad (5.25)$$

In einer Entfernung von  $r = 15\text{ m}$  entspricht dies einem Abstand der Reflexionspunkte von  $\Delta y = 26\text{ cm}$ . Es kann also von mehreren Detektionen ausgegangen werden. Im Vergleich hierzu liegt die erforderliche Winkeldifferenz für eine gerade Fahrtrichtung mit  $v_x = 11.5\text{ m/s}$  bei  $\Delta\alpha_x = 89^\circ$ .

Jedes gemessene Paar aus radialer Geschwindigkeit  $v_i$  und Beobachtungsrichtung  $\alpha_i$  führt zu einer Mehrdeutigkeitsgerade in der  $V_x V_y$ -Ebene. Liegen ausgeprägte Reflexionszentren unter verschiedenen Aspektwinkeln vor, ergeben sich entsprechend unterschiedliche gemessene radiale Geschwindigkeiten und damit mehrere Geraden in der Ebene. Diese Geraden schneiden sich im Punkt der tatsächlichen Geschwindigkeit des Objektes, wie in Abbildung 5.19 dargestellt, und ermöglichen damit eine Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors in der Ebene.

Rechnerisch lässt sich aus unterschiedlichen gemessenen radialen Geschwindigkeiten in Kombination mit den gemessenen Winkeln ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem zur Schätzung der tatsächlichen Richtung der Geschwindigkeit aufstellen.

$$\vec{v}_M = \mathbf{M} \cdot \vec{v} \quad (5.26)$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\alpha_n) & \sin(\alpha_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Die Lösung ergibt sich bei Verwendung der Quadratmitteltechnik zu

$$\hat{\vec{v}} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \cdot \vec{v}_M \quad . \quad (5.28)$$

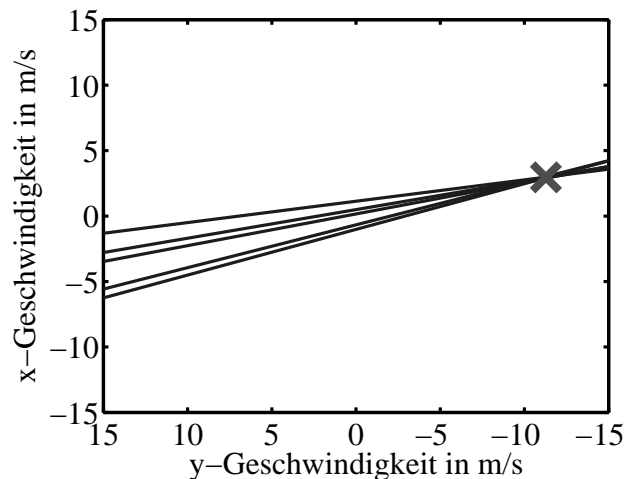


Abbildung 5.19: Schnittpunktbildung der Mehrdeutigkeitsgeraden aus der Messung der Radialgeschwindigkeit zur Bestimmung der beiden Komponenten der Geschwindigkeit mit den Werten des ersten Beispiels aus Abbildung 5.21

Für den Fall mit lediglich zwei Messwerten, lässt sich die Lösung direkt über die inverse Matrix angeben.

$$\vec{v} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \vec{v}_M \quad (5.29)$$

$$\mathbf{M}^{-1} = \frac{1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_2) & -\cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Dieses System eignet sich auch zur Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten über eine Fehlerfortpflanzung. Werden normalverteilte Fehler für die Winkel- und Geschwindigkeitsmessung mit den Standardabweichungen  $\sigma_\alpha$  bzw.  $\sigma_v$  angenommen, ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\sigma_{v_x}^2 = \sigma_\alpha^2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial \alpha} \right)^2 + \sigma_v^2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial v} \right)^2 \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sigma_\alpha^2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[ (v_2 \cos(\alpha_1))^2 + (v_1 \cos(\alpha_2))^2 \right] \\ &\quad + \frac{\sigma_v^2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[ \sin^2(\alpha_1) + \sin^2(\alpha_2) \right] \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$\sigma_{v_y}^2 = \sigma_\alpha^2 \left( \frac{\partial v_y}{\partial \alpha} \right)^2 + \sigma_v^2 \left( \frac{\partial v_y}{\partial v} \right)^2 \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sigma_\alpha^2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[ (v_2 \sin(\alpha_1))^2 + (v_1 \sin(\alpha_2))^2 \right] \\ &\quad + \frac{\sigma_v^2}{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[ \cos^2(\alpha_1) + \cos^2(\alpha_2) \right] \quad . \end{aligned} \quad (5.34)$$

Es ist leicht ersichtlich, dass der zu erwartende Fehler abnimmt, wenn die Differenz zwischen den beiden Winkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  größer wird, jedoch einen Wert von  $90^\circ$  nicht übersteigt. Für ein Objekt fester Größe steigt die Genauigkeit entsprechend, wenn sich das Objekt den Sensoren nähert. Während der Querversatz auf die Schätzung der  $v_y$ -Komponente keinen großen Einfluss hat, nimmt der Fehler der  $v_x$ -Komponente sein Minimum an, wenn sich das Objekt gerade vor dem Sensor befindet. Der Fehler steigt in beiden Komponenten mit quadratisch wachsender Geschwindigkeit. Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge eignet sich diese Berechnung entsprechend besonders zur Bestimmung der Geschwindigkeit von quer bewegten Fahrzeugen, deren Behandlung im Allgemeinen als schwierig angesehen wird.

In Abbildung 5.20 sind zur Veranschaulichung exemplarisch die Standardabweichungen für ein Ziel mit einer Breite von 4 m und einer rein lateralen Geschwindigkeit von  $v_y = 10$  m/s dargestellt.

## Beispiele

Zur praktischen Anwendung wurde ein Monopuls-Sensor mit einer reinen Geschwindigkeitsauflösung über eine FSK-Signalform in realen Straßenverkehrssituationen im Stadtverkehr zur Gewinnung von Messwerten eingesetzt. Das Auto mit dem Sensor wartet zum Zeitpunkt der Messung an einer roten Ampel und vermisst den vorbeifahrenden Verkehr. Die Abbildungen 5.21 und 5.22 zeigen die Ergebnisse zweier Situationen. Im ersten Fall wird ein von links nach rechts fahrendes Fahrzeug in einer Entfernung von etwa  $r = 15$  m betrachtet, welches sich im normalen Verkehrsfluss über die Kreuzung bewegt (vgl. Abb. 5.21(a)). Die Schätzung der Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung ergibt hierbei die folgenden Werte:

$$|\vec{v}| = 11.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.35)$$

$$\angle \vec{v} = -75^\circ \quad . \quad (5.36)$$

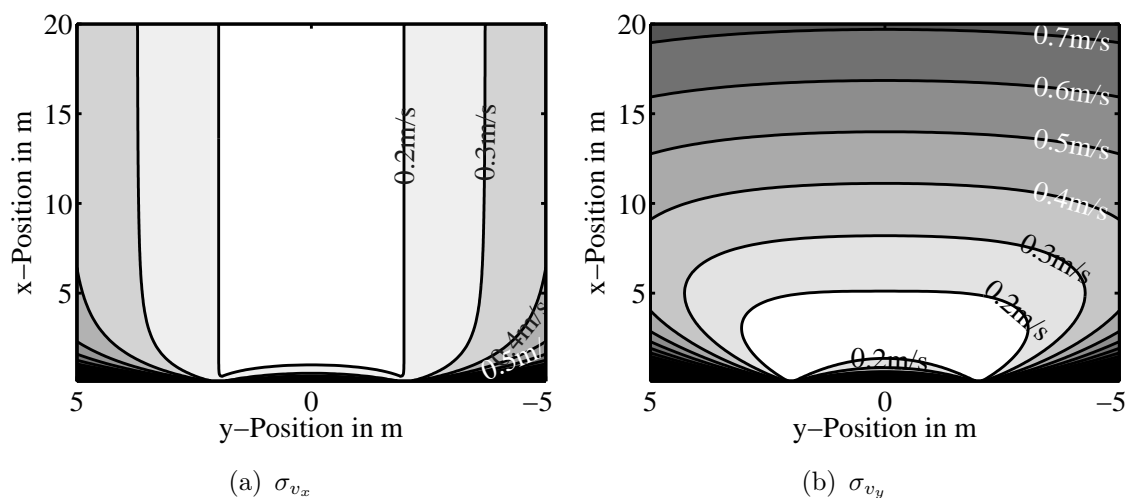


Abbildung 5.20: Standardabweichungen  $\sigma_{v_x}$  und  $\sigma_{v_y}$  der Geschwindigkeitsbestimmung für ein Ziel der Breite 4 m bei einer Geschwindigkeit von  $v_x = 0 \text{ m/s}$  und  $v_y = 10 \text{ m/s}$  in Abhängigkeit von der Position

Als zweites Beispiel wird ein Fahrzeug betrachtet, welches zunächst an einer Ampel wartet und dann zum Zeitpunkt der Messung vor dem Messfahrzeug in die Straße einbiegt und damit eine schräge Bewegungsrichtung aufweist (vgl. Abb. 5.22(a)). Die Schätzung der Geschwindigkeit für diese zweite Situation ergibt sich zu

$$|\vec{v}| = 9,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.37)$$

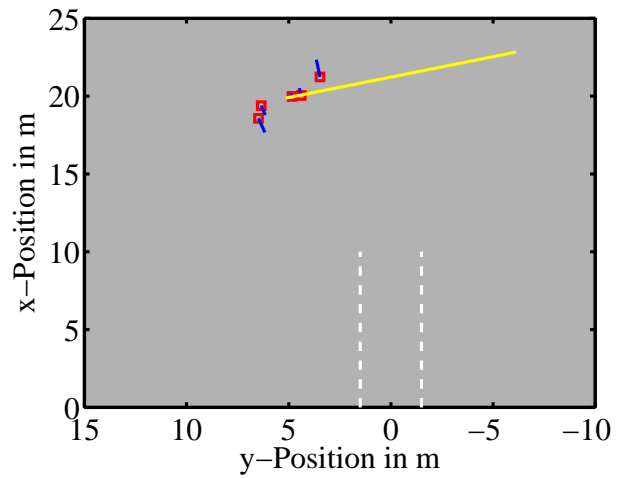
$$\angle \vec{v} = 127^\circ \quad . \quad (5.38)$$

In den Fotos sind die betrachteten Objekte jeweils durch gelbe Kreise hervorgehoben. Die Graphen 5.21(b) bzw. 5.22(b) rechts neben den Fotos zeigen zu den Situationen die detektierten Messwerte nach Position (rot) und gemessener radialer Geschwindigkeit (blau) sowie den aus den Messungen geschätzten Geschwindigkeitsvektor (gelb) der betrachteten Fahrzeuge.

Da die tatsächlichen Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge nicht bekannt sind, kann rechnerisch kein Fehler ermittelt werden. Werden jedoch die Ergebnisse mit den Erwartungen anhand der betrachteten Situation und der Umgebungsbedingungen verglichen, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Gerade die zweite Situation kann bei einer einfachen Punktzielannahme zunächst den Eindruck erwecken, dass sich ein Ziel relativ zügig direkt auf das eigene Fahrzeug zubewegt. Die vorgestellte erweiterte Signalverarbeitung



(a) Foto

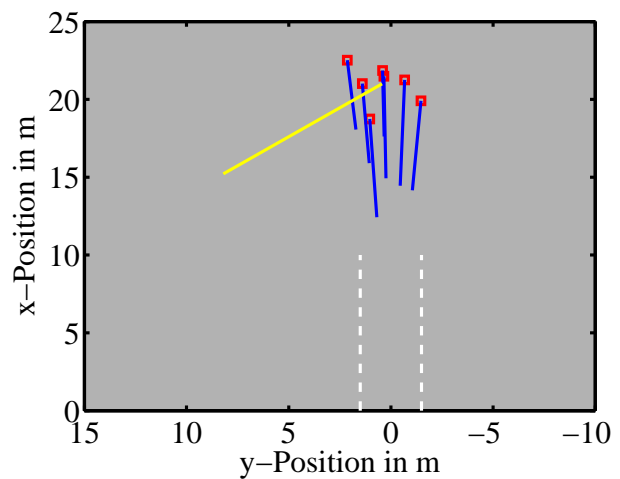


(b) Radarbild

Abbildung 5.21: Darstellung der Situation mit einem von links nach rechts quer bewegten Fahrzeug. Die zugehörigen Radarmessungen (rot und blau) sowie die resultierende Schätzung der tatsächlichen Geschwindigkeit (gelb) ist im rechten Teil der Abbildung angegeben.



(a) Foto



(b) Radarbild

Abbildung 5.22: Darstellung der Situation mit einem von rechts einbiegenden Fahrzeug. Die zugehörigen Radarmessungen (rot und blau) sowie die resultierende Schätzung der tatsächlichen Geschwindigkeit (gelb) ist im rechten Teil der Abbildung angegeben.

führt jedoch zu dem korrekten Ergebnis eines schräg vorbeifahrenden Fahrzeuges. Interessant am ersten Beispiel ist die plausible Schätzung einer schnellen querlaufenden Bewegung, obwohl die Messung der Geschwindigkeit über den DOPPLER-Effekt nur sehr geringe Geschwindigkeiten aufweist, da das Ziel keine Bewegung in radialer Richtung ausführt.

### 5.5 Bestimmung der Eigengeschwindigkeit

Das größte Objekt, das von den Sensoren beobachtet werden kann, ist die stationäre Umgebung des Fahrzeuges. Allen Reflexionen von stationären Zielen im Erfassungsbereich der Sensoren ist gemein, dass sie über keine Geschwindigkeit verfügen. Bewegt sich jedoch das Fahrzeug mit dem Sensor, so wird als Geschwindigkeit der stationären Ziele eine radiale Komponente der Eigengeschwindigkeit des Messfahrzeuges gemessen [HM06]. Die Größe der gemessenen Geschwindigkeit ist dabei wieder abhängig von der Bewegung des Fahrzeuges und dem Winkel, unter dem das Ziel detektiert wird. Da in der Regel mehrere stationäre Ziele detektiert werden, können die Zielmesswerte der Umgebung genutzt werden, um die Geschwindigkeit des Fahrzeuges zu schätzen. Dabei ist es wiederum möglich beide Komponenten der Geschwindigkeit in der Ebene zu bestimmen, so dass auch Kurvenfahrten erkannt werden können. Die Berechnung entspricht dabei genau derjenigen aus dem vorherigen Abschnitt. Ein im Folgenden angegebenes Beispiel verdeutlicht die Ergebnisse.

In Abbildung 5.23(a) sind dazu die gemessenen Positionen von stationären Zielen angegeben, die zu einem Zeitpunkt detektiert werden, in dem sich das Fahrzeug mit den Sensoren auf einer Autobahnauffahrt befindet und damit gerade eine Kurvenfahrt durchführt. Die Position des Sensors wird als Ursprung des Koordinatensystems angenommen. Der von den Bewegungssensoren im Fahrzeug zum Zeitpunkt der Messung erfasste Geschwindigkeitsvektor beträgt dabei  $v_x = 7.4 \text{ m/s}$   $v_y = 1.2 \text{ m/s}$ . Werden die Mehrdeutigkeitsgeraden im rechten Teil der Abbildung (5.23(b)) betrachtet, ergibt sich ein deutlicher Schnittpunkt der einzelnen Geraden. Die im Koordinatenursprung beginnende Gerade mit den Kreisen an den Enden zeigt dabei auf den Wert der Geschwindigkeit, der auf Basis der Bewegungssensoren im Fahrzeug bestimmt wird, und dient als Vergleich [Sch05].

Eine Berechnung der Eigenbewegung des Fahrzeuges auf Basis der vom Radar gemessenen Geschwindigkeiten und Winkel führt auf die Geschwindigkeiten  $v_x = 7.6 \text{ m/s}$  sowie  $v_y = 1.1 \text{ m/s}$  und entspricht im Rahmen der Messgenauigkeit der über die Bewegungssensoren im Fahrzeug gemessenen Geschwindigkeit.

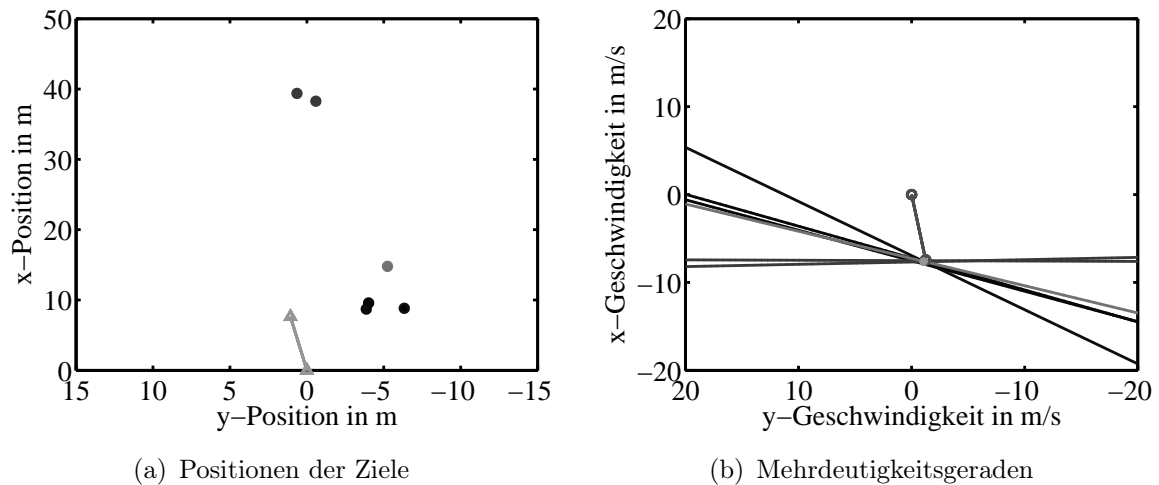


Abbildung 5.23: Gemessene Positionen von stationären Zielen (links) und Mehrdeutigkeitsgeraden in der Geschwindigkeitsebene (rechts) für eine Situation während der Auffahrt auf eine Autobahn

Dieser Geschwindigkeitsvektor ist in Abbildung 5.23(a) eingetragen, so dass die Position der stationären Ziele entsprechend interpretiert werden kann. Die Genauigkeit dieser Schätzung ist abhängig von der Genauigkeit des Sensors in Bezug auf Geschwindigkeits- und Winkelmessung sowie der Geometrie der aktuell vorliegenden Umgebungssituation. Um zuverlässige Schätzungen zu ermöglichen, sollte sich der Schnittpunkt der Mehrdeutigkeitsgeraden als steiler Schnitt ergeben. Allgemein steigt die Genauigkeit mit der Anzahl der Ziele und wird besser, je stärker sich die Winkel dieser Ziele unterscheiden.

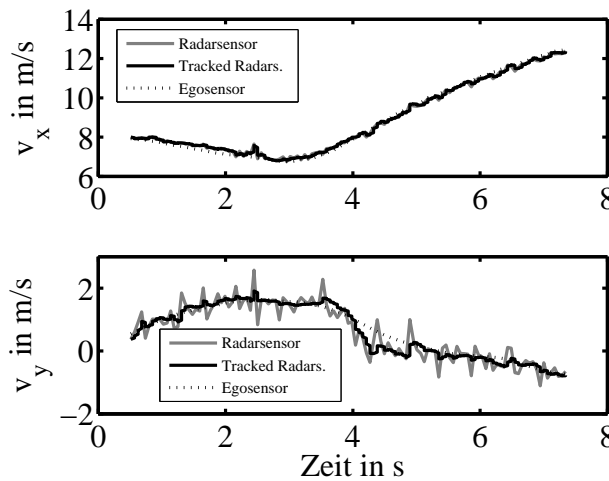
Wird diese Betrachtung nicht nur für einen einzigen Zeitpunkt, sondern für den kompletten Beschleunigungsvorgang während der Auffahrt auf die Autobahn betrachtet, ergeben sich die in Abbildung 5.24(a) über der Zeit dargestellten Werte für die beiden Komponenten der Geschwindigkeit. Zum Vergleich sind als gepunktete Linien zusätzlich die von den fahrzeuginternen Bewegungssensoren gelieferten Ergebnisse eingetragen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass diese Werte bereits über der Zeit geglättet wurden und entsprechend eine deutlich geringere Fluktuation aufweisen. Die Differenzen der Schätzwerte beider Messverfahren sind in Abbildung 5.24(b) dargestellt. Eine statistische Analyse führt auf die Standardabweichungen der Differenzen von

$$\sigma_{dv_x} = 0.17 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{und} \quad \sigma_{dv_y} = 0.34 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad , \quad (5.39)$$

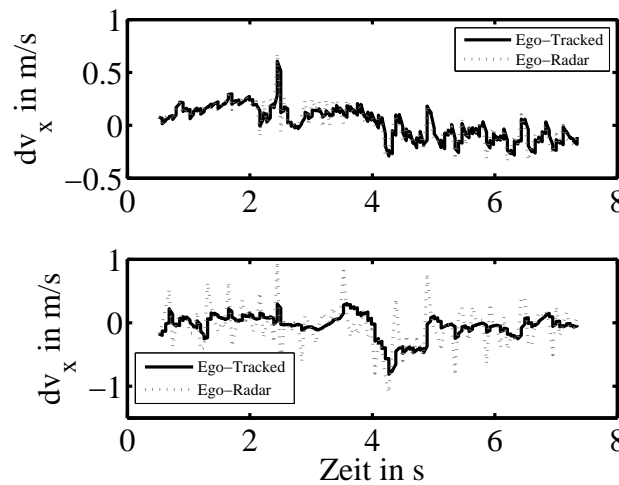
welche sich mit der zu erwartenden Genauigkeit der Schätzung decken. Werden

die vom Radarsensor gemessenen Werte der Geschwindigkeiten mit einem Tracker über der Zeit geglättet um Rauscheinflüsse zu unterdrücken, so reduzieren sich die Standardabweichungen der Differenzen zu

$$\sigma_{dv_x}^- = 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{und} \quad \sigma_{dv_y}^- = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad . \quad (5.40)$$



(a) Ergebnisse der Schätzungen



(b) Abweichungen

Abbildung 5.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse der geglätteten (schwarz) und ungeglätteten (grau) radarbasierten Schätzung der Eigengeschwindigkeit zu den über die Bewegungssensoren im Fahrzeug aufgenommenen Geschwindigkeiten (gepunktet)

## 5.6 Ansatz für ein Kriterium zur Objekterkennung

Bei der Betrachtung von doppelt ausgedehnten Zielen wird von einer Ausdehnung des Objektes in Entfernung und Geschwindigkeit ausgegangen, da sich dieses Modell als logische Erweiterung der separaten Formen der Ausdehnung im Sinne der Teilmengen in der RV-Ebene ergibt und es über eine praktische Relevanz verfügt. Ein direkter funktioneller Zusammenhang der Größen Entfernung und Geschwindigkeit bleibt dabei jedoch unberücksichtigt.

Detailliertere Analysen sich in der Ebene bewegender flächiger Objekte haben gezeigt, dass sich dasselbe Objekt bei Betrachtung der Geschwindigkeit in einem anderen Koordinatensystem, hier der  $V_x V_y$ -Ebene als Punkt beschreiben lässt. Die Ursache hierfür ist die Abhängigkeit der von einem Radar gemessenen Geschwindigkeit von der Richtung der Bewegung und der Richtung der Beobachtung. Wird diese Erkenntnis in einem erweiterten Modell berücksichtigt, wie in Abbildung 5.25 dargestellt, so kann diese Information zu Zwecken der Klassifikation genutzt werden.

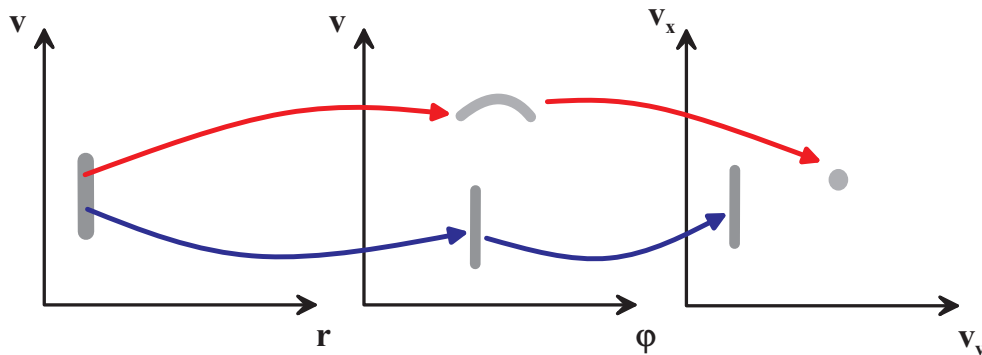


Abbildung 5.25: Erweitertes Modell zur Beschreibung der Hintergründe einer Ausdehnung des Objektes durch Verwendung verschiedener Bezugssysteme

Wird zum Beispiel ein Sensor mit einer sehr geringen Entfernungsauflösung, aber einer sehr hohen Geschwindigkeitsauflösung verwendet, können ein radial gehender Fußgänger und ein anfahrendes Fahrzeug auf einer benachbarten Spur auf das gleiche Bild in der RV-Ebene führen, wodurch zunächst keine Unterscheidung in Bezug auf eine Klassifikation möglich ist. Werden anstelle der Radien jedoch die gemessenen Winkel in Bezug zur Geschwindigkeit gesetzt, sind unterschiedliche Bilder zu erkennen. Transformation für die Messwerte des Autos sind dabei über rote und die für den Fußgänger über blaue Pfeile

symbolisiert dargestellt. Bei der weiteren Transformation in die  $V_x V_y$ -Ebene werden die Unterschiede noch stärker sichtbar, da im Falle des Fahrzeuges die Ursache für die vielfachen Geschwindigkeitsmessungen in der Geometrie der Situation und den Eigenschaften der Radarmessung liegt, während bewegte Fußgänger tatsächlich mehrere unterschiedliche Geschwindigkeiten an einem Ort aufweisen. Die Messwerte des Autos bilden sich in dieser Darstellung folglich als Punkt und die des Fußgängers weiterhin als Strich ab. Die Unterscheidung anhand der Verkehrssituation erfordert in diesem Fall eine sehr differenzierte Trennung der Situationen.

## 6 Zusammenfassung

Bisherige Algorithmen zur Radarsignalverarbeitung beschreiben die vermessenen Objekte häufig unter Verwendung eines Punktzielmodells. Während diese Beschreibung für herkömmliche Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel die Flugsicherung oder auch erste Anwendungen im Straßenverkehr, wie die automatische Abstandsregelung auf Autobahnen, hinreichend sein mag, so erweist sich dieses Modell für Radaranwendungen im Stadtverkehr als unzureichend. Hierfür sind verschiedene Gründe ausschlaggebend. Zum einen verfügen die zurzeit für den Einsatz in Fahrzeugen vorgesehenen Sensoren über eine derart hohe Auflösung, dass sich die Objekte im Messsignal nicht mehr als Punktziel darstellen. Zum anderen erfordert die korrekte Deutung der gemessenen Signale und deren weitere automatische Verarbeitung eine detaillierte Analyse der Zusammenhänge zwischen der betrachteten Situation und den Messdaten.

Die systematische Untersuchung der Beziehungen zwischen Objekten, Situationen und den Techniken der Radarmessung zeigt die Limitierungen des Punktzielmodells. Ein wichtiges Merkmal jeder Messung ist neben der Maßzahl und ihrer Genauigkeit auch die Auflösung. Diese beschreibt, welche Differenz zwei Werte haben müssen, um als zwei unterschiedliche Werte erkannt zu werden. Für die Radartechnik relevante Messgrößen sind die Entfernung, die radiale Geschwindigkeit und der Winkel. Zu jeder Größe lassen sich bei Kenntnis der Sensorhardware und der verwendeten Sendesignale die Genauigkeit und die Auflösung bestimmen. Aus der vorliegenden Auflösung lässt sich direkt der Begriff der Ausdehnung als Differenz zwischen dem größten und kleinsten Messwert, der von einem Objekt gemessen wurde, ableiten. Da das Verhältnis zwischen der physikalischen Abmessung der Objekte und der Auflösung der Sensoren eine messbare Ausdehnung für Radaranwendungen im Stadtverkehr zur Folge hat, kann ihr neben einer formalen auch eine strukturierende inhaltliche Bedeutung zugeschrieben werden. Bedingt durch die Radarmessverfahren zeigen die Messungen eine Ausdehnung sowohl in Entfernung als auch Geschwindigkeit. Zu beachten ist, dass aufgrund der formalen Definition der Ausdehnung dieser Begriff über die gebräuchliche Beschreibung geometrischer Ausdehnungen hinaus auch für messbare Geschwindigkeitsausdehnungen erwei-

tert werden kann und werden muss. So stellt sich eine Laterne in der Messung als Punktziel dar und ein gerade vorausfahrendes Fahrzeug führt zu einer Verteilung der reflektierten Leistung über der Entfernung. Die Vermessung eines sich radial bewegenden Fußgängers führt zu unterschiedlichen gemessenen Geschwindigkeiten an einem einzigen Ort. Fahrzeuge, die sich in dichter Entfernung mit lateraler Bewegungskomponente zum Sensor bewegen, führen zu einer Vielzahl von gemessenen Entfernungen und Geschwindigkeiten.

Radarsensoren für den Einsatz im Straßenverkehr erfassen immer ein konkretes Szenario. Dieses wird durch die Art der beobachteten Verkehrsteilnehmer und der Situationen bestimmt, in denen sie sich befinden. Aus diesem Grund reicht eine ausschließliche Berücksichtigung der vermessenen Objekte nicht hin. Vielmehr ist generell von einem Paar aus Verkehrsteilnehmer und Verkehrssituation auszugehen. Zur Beschreibung dieses Paares wird der Begriff *Sujet* eingeführt. Radarsensoren eignen sich besonders zur Messung von Entfernungen und Geschwindigkeiten und verfügen neben einer hohen Genauigkeit auch über eine hohe Auflösung dieser Messgrößen. Die Vermessung der *Sujets* lässt sich deshalb über eine Zuordnung auf ein Bild in der Entfernungs-Geschwindigkeits-Ebene beschreiben. Die Ausdehnung der jeweils betrachteten Messgröße gibt an, ob sie durch eine einzige Maßzahl oder über ein Intervall bestimmt ist. Da in genau zwei Messgrößen eine Auflösung vorliegt, können vier idealisierte Ausdehnungstypen unterschieden werden. Punktförmige Ziele werden durch die Angabe einer Maßzahl sowohl für die Entfernung als auch die Geschwindigkeit beschrieben (keine Ausdehnung). Lange Ziele werden über die Angabe einer Geschwindigkeit und eines Intervalls für die Entfernung beschrieben (Ausdehnung in der Entfernung). Ziele mit kinematischer Ausdehnung werden über eine Entfernung und ein Intervall für die Geschwindigkeit beschrieben (Ausdehnung in der Geschwindigkeit). Doppelt ausgedehnte Ziele werden über ein Intervall in der Entfernung und ein Intervall in der Geschwindigkeit beschrieben (Ausdehnung in Entfernung und Geschwindigkeit).

Bisherige Strategien zur Radarsignalverarbeitung im Automobilbereich wurden für den Autobahnverkehr entwickelt. Werden diese ohne Anpassungen auf Anwendungen im Stadtverkehr übertragen, so sinkt deren Leistungsfähigkeit deutlich und es kommt zu Fehlern. Ein typischer Fehler ist dabei die Erzeugung von Geisterzielen, also Zielen, die tatsächlich gar nicht existieren. Anhand der entwickelten Ausdehnungstypen lassen sich Ursachen für dieses Verhalten analysieren und besser geeignete Verfahren zur Signalverarbeitung von ausgedehnten Zielen entwickeln.

Der Entwurf der Signalverarbeitungskette geht immer von einem bestimmten Modell der Ziele aus. Wenn die von einem *Sujet* gemessenen Eigenschaften

---

nicht zu dem in der Signalverarbeitung enthaltenen Modell passen, zum Beispiel weil sich ein Objekt in der Messung als Intervall von Messwerten darstellt, die Verarbeitung aber nur von einem einzelnen Wert ausgeht, so entstehen Fehler innerhalb der Signalauswertung. Diese können an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Signalverarbeitungskette entstehen. Die gemeinsame Ursache liegt jedoch meistens in Mehrdeutigkeiten, die fehlerhaft interpretiert werden. So kann eine mangelnde Auflösung des Sensors dazu führen, dass sich Informationen unterschiedlicher Objekte überlagern und nicht mehr trennbar sind. Die häufigste Ursache sind jedoch systembedingte Mehrdeutigkeiten beim Sendesignalentwurf (korrelierte Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung beim LFM CW-Signal) oder der Positionsbestimmung (Trilateration mit Sensoren ohne Winkelmessung). Da Verfahren zum Auflösen der Mehrdeutigkeiten häufig unter der Hypothese von Punktzielen entwickelt wurden, zeigen sich ihre Limitierungen bei der Betrachtung ausgedehnter Ziele. Die in herkömmlichen Verfahren enthaltenen Mehrdeutigkeiten werden durch den Einsatz von Redundanzen aufgehoben, welche jedoch im Falle von dicht platzierten oder ausgedehnten Zielen zu mehrdeutigen Lösungen und damit zu Fehlentscheidungen führen können. Der Zuordnung der redundanten Messungen zu einem Objekt kommt damit die entscheidende Bedeutung zu. Als Alternative bieten sich gerade für Anwendungen mit ausgedehnten Zielen Verfahren an, die keine systemimmanenten Mehrdeutigkeiten besitzen. Für die Messung von Entfernung und Geschwindigkeit kann dies die Verwendung einer Pulsdoppler- oder einer LFMSK-Signalförm sein. Als Technik zur Positionsbestimmung kann anstelle einer Trilateration eine Winkelmessung über Monopuls-Verfahren eingesetzt werden.

Generell muss die Signalverarbeitung an die zu vermessenden Objekte angepasst werden. Wird zum Beispiel eine Trilateration im Radarnetzwerk zur Positionsbestimmung verwendet, so sind die veränderten Gegebenheiten beim Entwurf der Datenzuordnung zu berücksichtigen. Das entwickelte Bottom-up-Verfahren ermöglicht die optimale Zuordnung der gemessenen Entfernungen in Situationen mit dicht platzierten Punktzielen zur Bestimmung der korrekten Zielpositionen bei gleichzeitiger Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Erzeugung von Geisterzielen und dient als Grundlage der weiterführenden Betrachtung ausgedehnter Ziele. Am Beispiel eines angepassten Modells zur trilaterationsbasierten Positionsbestimmung von langen Zielen wird gezeigt, auf welche Weise ein geeignetes Modell die Verminderung von Fehlentscheidungen mit dem Gewinn zusätzlicher Informationen aus den Messdaten vereinen kann. Eine Bestimmung der Länge der Objekte schon vor der Trilateration ermöglicht dabei eine korrekte Bestimmung der Position des Objektes in der Ebene ganz

ohne Erzeugung der sonst typischen großen Anzahl von Geisterzielen, die sich in korrekter Entfernung, aber unter falschen Winkeln ergeben.

Wird die Signalverarbeitung unter Berücksichtigung von passenden Zielmodellen entworfen, lassen sich nicht nur Fehlentscheidungen verhindern, sondern zusätzliche Informationen über das Objekt aus den gewonnenen Messdaten extrahieren, deren Bestimmung über ein falsch gewähltes Modell nicht möglich ist. Die Gewinnung zusätzlicher Informationen über ein Objekt kann die Betrachtung gemessener Eigenschaften in einem Raum erfordern, der nicht dem ursprünglichen Messraum der Radarsensoren entspricht. So ergeben sich aus der Betrachtung der gemessenen Werte über der Zeit oder der Transformation von einer polaren in eine kartesische Darstellung Eigenschaften, die in der ursprünglichen Darstellung nicht eindeutig sichtbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Schrittfrequenz eines Fußgängers durch ein entsprechend verwendetes Objektmodell im Trackingalgorithmus, das die Schwankungen in der gemessenen Geschwindigkeit nicht als Messfehler, sondern als Eigenschaft des Objektes interpretiert. Hierfür wird zwischen der gleichmäßigen Bewegung des Schwerpunktes eines Fußgängers und den tatsächlich messbaren vielfältigen Geschwindigkeiten einzelner Körperteile unterschieden. Die daraus resultierende Möglichkeit zur Messung der Schrittfrequenz stellt ein wichtiges Merkmal zur radarbasierten Erkennung von Fußgängern dar.

Das Beispiel der von flächigen Objekten, wie zum Beispiel Fahrzeugen, gemessenen Geschwindigkeitswerte verdeutlicht ferner, welchen wesentlichen Einfluss die Verkehrssituation auf die gewonnenen Messdaten hat. Eine geeignete Interpretation der Zusammenhänge von Objektausdehnung, den Eigenschaften der Radarmessung und einer Analyse der situationsbedingten Auswirkungen kann genutzt werden, um die laterale Komponente der Geschwindigkeit eines Zieles zu bestimmen. Hierzu ist eine parallele Betrachtung der unterschiedlichen Koordinatensysteme, polare Koordinaten für die Radarmessung und kartesische Koordinaten bei der Objektbewegung, der entscheidende Ansatz zur korrekten Auswertung der gemessenen Daten. Da die Geschwindigkeitsmessung bei einem Radar auf der Auswertung von Dopplerfrequenzen beruht, ist eine messtechnische Bestimmung der lateralen Bewegungskomponente normalerweise mit einem Radar nicht möglich. Erst aus der gemeinsamen Betrachtung aller Messwerte eines ausgedehnten Zieles kann diese Information gewonnen werden. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei die Breite des Objektes. Werden umgekehrt die verschiedenen stationären Objekte aus der Umgebung des Sensorfahrzeuges als Teile eines einzigen großen ausgedehnten Zieles aufgefasst, so lässt sich die gleiche Technik auch nutzen, um aus den Reflexionen dieser stationären Objekte auf die Eigengeschwindigkeit des Fahr-

---

zeuges mit beiden Richtungskomponenten zu schließen. Obwohl die aktuell verfügbaren Sensoren über keine Winkelauflösung verfügen, lassen sich die Auswirkungen der Objektbreite durch den Einsatz von Sensoren mit einer hohen Geschwindigkeitsauflösung und einer reinen Winkelmessung auswerten.

Die dargelegten Verfahren verdeutlichen, welches Potential eine entsprechende Berücksichtigung von messbaren Ausdehnungen für die Anwendungen der Radartechnik im Stadtverkehr hat. Laufende Neuerungen hin zu Sensoren mit Winkelauflösungen können dabei systematisch in die vorgestellten Modelle zur Beschreibung integriert werden. Auf diese Weise entstehen als Erweiterung von doppelt ausgedehnten Zielen drei- und mehrfach ausgedehnte Ziele. Die tatsächliche Berücksichtigung der dann neu gewonnenen Ausdehnungsgröße muss in folgenden Arbeiten jedoch erst genau analysiert und umgesetzt werden. Die sich ergebenden Möglichkeiten wurden bisher nur skizziert.



# Konventionen und Symbole

## Mengen

Ausdruck	Bedeutung
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen
$\mathbb{Z}$	Menge der ganzen Zahlen
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathbb{R}_+$	Menge der positiven reellen Zahlen
$[a, b]$	abgeschlossenes Intervall

Um Verwechslungen zwischen Intervallen und Vektoren zu vermeiden, werden Vektoren als Spaltenvektor aufgefasst  $\vec{v} = [v_1, \dots, v_n]^T$ .

## Vektoren und Matrixen

Ausdruck	Bedeutung
$\mathbf{A}$	Großbuchstaben in Fettdruck stehen für Matrizen
$\vec{v}$	Kleinbuchstaben mit Pfeil stehen für Vektoren
$\mathbf{A}_{ij}$	Bezeichnung eines Matrixelements
$v_i$	Bezeichnung eines Vektorelements
$\mathbf{A}^T$	Transponierte der Matrix $\mathbf{A}$
$\vec{v}^T$	Transponierte des Vektors $\mathbf{v}$
$\mathbf{A}^{-1}$	Inverse der Matrix $\mathbf{A}$
$\ \mathbf{A}\ $	Matrix norm
$ \vec{v} $	(Euklidische) Vektornorm , Betrag
$\angle \vec{v}$	Richtungswinkel
$\langle \vec{v}, \vec{v} \rangle = \vec{v}\vec{v}$	Skalarprodukt zweier Vektoren
$\mathbf{J}$	JACOBI-Matrix
$\mathbf{I}_n$	$(n \times n)$ -Einheitsmatrix (auch ohne Größenangabe $n$ )

## Rechenregeln

Ausdruck	Bedeutung
$v = \dot{r}$	Ein Punkt über einem Symbol steht für eine zeitliche Ableitung
$\alpha = f(r)$	$\alpha$ ergibt sich durch eine Funktion aus $r$
$\stackrel{!}{=}$	Forderung auf Gleichheit
$\{G\}$	Zahlenwert der Größe $G$ . $\{3 \text{ m/s}\} = 3$
$[G]$	Maßeinheit der Größe $G$ . $[3 \text{ m/s}] = \text{m/s}$

## Stochastische Größen und Schätzungen

Ausdruck	Bedeutung
$\hat{x}$	Ein Dach über einem Formelzeichen kennzeichnet in der Regel einen Schätzwert
$\bar{x}$	Ein Strich über einem Formelzeichen kennzeichnet in der Regel einen Mittelwert
$E_2(\vec{x})$	Mittlerer quadratischer Fehler (MSE)
$\vec{o}_k$	Wert im $k$ -ten Schritt eines iterativen Verfahrens
$\varepsilon$	Fehlerschwelle
$E\{x\}$	Erwartungswert einer Zufallsvariablen $x$
$\sigma$	Genauigkeit, Standardabweichung
$P$	Wahrscheinlichkeit
$x^+$	Wert von $x$ unmittelbar vor einer Berechnung
$x^-$	Wert von $x$ unmittelbar nach einer Berechnung

## Konstanten

Ausdruck	Bedeutung
$\pi = 3.14159\dots$	Verhältnis von Kreisumfang und Kreisdurchmesser
$c = 2.99\dots 10^8 \text{m/s}$	Lichtgeschwindigkeit
$e = 2.71828\dots$	Basis der natürlichen Logarithmen

---

## Radarmessung und Sendesignale

Zeichen	Bedeutung	Seite
$\sigma$	Standardabweichung	9
$h$	Genauigkeitsmaß	9
$t$	Zeit	10
$x, y$	Kartesische Koordinaten in der Ebene nach [DIN94] (auch Position genannt)	10, 38
$r, \alpha$	Polarkoordinaten	10
$\vec{o} = [x_o, y_o]^T$	Ortsvektor eines Punktes	10
$\vec{s} = [x_s, y_s]^T$	Ortsvektor eines Sensors	10
$r$	Entfernung, Radius	11, 48
$\alpha$	Zielwinkel, Azimut	9, 69
$v = \dot{r}$	Geschwindigkeit, Radialgeschwindigkeit	19, 21, 48
$\vec{v} = [v_x, v_y]^T$	Geschwindigkeitsvektor	10, 19
$\phi$	Winkel zwischen Bewegungs- und Beobachtungsrichtung	20
$\Delta r$	Entfernungsauflösung des Sensors	9,12,17,54
$\Delta \alpha$	Winkelauflösung des Sensors	9, 69
$\Delta v$	Geschwindigkeitsauflösung des Sensors	9, 21
$\Delta f, \Delta f_{FFT}$	Frequenzauflösung (der FFT)	9, 16
$\Delta r \times \Delta v$	Zweidimensionale Auflösungszelle	48
$\tau$	Laufzeit	11
$r_{max}$	Maximal eindeutige Entfernung	13, 24
$v_{max}$	Maximal eindeutige Geschwindigkeit	22, 24
$T_P$	Pulslänge bei einem Pulsradar	12
$T_R$	Zeitlicher Abstand zwischen zwei Pulsen	12
$PRF = \frac{1}{T_R}$	Pulswiederholrate	12
$T_{Chirp}$	Zeitliche Dauer eines Chirps bei einem LFM CW Signal	13
$T_{Block}$	Zeitliche Dauer einer Folge von Chirps	31
$T$	Messzeit	23
$P_s$	Sendeleistung	11
$P_e$	Empfangene Leistung	11

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$\sigma$	Radarrückstreuquerschnitt (RCS)	11
$G$	Antennengewinn	11
$A$	Wirkfläche der Antenne	11
$\lambda$	Wellenlänge	12, 44
$B$	Bandbreite	12, 38
$f_0 = c/\lambda$	Trägerfrequenz	13, 18
$f_{Hub}$	Frequenzhub bei einer LFMCW-Signalform	13
$\Lambda$	Chirp Indikator: $\Lambda = 1$ Upchirp, $\Lambda = -1$ Downchirp	13
$f_s$	Frequenz des Sendesignals	13
$f_e$	Frequenz des empfangenen Signals	15, 18
$f_R$	Durch die Laufzeit hervorgerufene Frequenzdifferenz	15, 26
$s_s(t)$	Sendesignal	15
$s_e(t)$	Empfangssignal	15
$s_R(t)$	Abgemischtes komplexwertiges Empfangssignal	15
$f_D$	DOPPLER-Frequenz	19, 26
$f_M$	Gemessene Frequenzdifferenz	26
$f_a$	Abtastfrequenz	16
$N$	Anzahl der Abtastwerte	16
$f_{Shift}$	Frequenzversatz der Stufen bei einem FSK- oder LFMSK-Signal	26, 33
$\delta\psi$	Differenzphase beim FSK- oder LFMSK-Signal	27, 33
$a, b, \mathbf{A}$	Parameter eines LMWCW-Blocks in Matrixdarstellung	31
$f_{Step}$	Frequenzstufen beim treppenförmigen LFMCW-Signal	33
$\vec{m}$	Vektor mit Messwerten	31
$\vec{e}$	Vektor mit Messfehlern	38
$\vec{o} = [x_o, y_o]^T$	Ortsvektor eines Punktes	38

---

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$\vec{s} = [x_s, y_s]^T$	Ortsvektor eines Sensors	38
$E_2(\vec{o})$	Mittlerer quadratischer Fehler	39
$\mathbf{J}, \mathbf{J}_{(i,j)}$	JACOBI-Matrix, Element dieser Matrix	39
$\mathbf{R}$	Kovarianzmatrix der Messung	39
$\mathbf{P}$	Kovarianzmatrix des Zustandsvektors	127
$\varepsilon$	Fehlerschwelle	39
$\varepsilon(\alpha)$	Fehlersignal beim Amplituden-Monopuls	42
$\Sigma, \Delta$	Summen- und Differenzterme beim Monopuls	42, 44
$A, B$	Signale beim Monopuls	42, 44
$d$	Abstand zwischen den Empfangsantennen beim Phasen-Monopuls	44
$\psi$	Phasendifferenz beim Phasen-Monopuls	44

## Objekte und Sujets

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$\mathcal{A}$	physikalische Abmessung	47
$\mathfrak{A} = \Delta r \times \Delta v \times \Delta \alpha$	Auflösungszelle	48
$\mathcal{A}$	Ausdehnung	48
$\mathcal{A}_r$	Entfernungsausdehnung	48
$\mathcal{A}_\alpha$	Winkelausdehnung	140
$\mathcal{A}_v$	Geschwindigkeitsausdehnung	48
$\vec{m}_{\text{Punkt}} = [r, \alpha, v]^T$	Messvektor eines Punktzieles	48, 52
$\vec{m}_{\text{Lang}} \in \mathbf{M}_{\text{Lang}}$	Messvektor eines langes Zieles	52
$\vec{m}_{\text{Kin}} \in \mathbf{M}_{\text{Kin}}$	Messvektor von kinematisch ausgedehnten Zielen	53
$\vec{m}_{\text{Doppelt}} \in \mathbf{M}_{\text{Doppelt}}$	Messvektor von doppelt ausgedehnten Zielen	53
$\vec{o}_R$	Referenzpunkt	57
$T$	Zeitpunkt oder Zeitintervall	58,61,127

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$L$	Länge eines Objektes, Schrittlänge bei Menschen	54, 57, 61
$\hat{L}$	Geschätzte Länge	55
$l_i$	Abstand zu einem Referenzpunkt bei langen Zielen	57
$M_{\text{Lang}}$	Beschreibung eines langen Zieles über eine Menge von Punkten	57
$M_{\text{Kin}}$	Beschreibung eines kinematisch ausgedehnten Zieles über eine Menge von Punkten	62
$f_s$	Schrittfrequenz	61
$v_{\text{Rumpf}}$	Geschwindigkeit des Rumpfes eines Menschen	60
$v_{\text{Beine}}$	Geschwindigkeit der Beine eines Menschen	61
$v\%$	Amplitude der Geschwindigkeitsänderung	60
$\vec{r}_i$	Ortsvektor zu einem Referenzpunkt	69
$B$	Breite eines Objektes	69
$M_{\text{Doppelt}}$	Beschreibung eines doppelt ausgedehnten Zieles über eine Menge von Punkten	69
$\mathcal{S}$	Eine Verkehrssituation	73
$\mathcal{T}$	Ein Verkehrsteilnehmer	74
$\mathcal{O} = (\mathcal{T}, \mathcal{S})$	Ein Sujet bezeichnet das geordnete Wertepaar aus einem Verkehrsteilnehmer in einer Verkehrssituation	74
$\mathcal{T}$	Die Menge aller Verkehrsteilnehmer	75
$\mathcal{S}$	Die Menge aller Verkehrssituationen	75
$R$	Die Menge aller Entfernungswerte	75
$V$	Die Menge aller Geschwindigkeitswerte	75
$A$	Die Menge aller Winkelwerte	76
$M \subset R \times V$	Die Menge aller einem Sujet zugeordneten Messwerte	75
$N$	Anzahl der Messwerte für ein Sujet	76
$M$	Modellbildung	75
$K$	Objekterkennung	79

---

## Signalverarbeitung

Zeichen	Bedeutung	Seite
$\vec{o}$	Ortsvektor eines Punktes	10, 72
$\Sigma, \Delta$	Summen- und Differenzterme beim Monopuls	44, 71
$B$	Signale beim Monopuls	42, 44, 71
$\psi$	Phasendifferenz beim Phasen-Monopuls	44, 71
$O_i$	Zielliste des $i$ . Sensors	93
$\vec{m}, m_{ij}$	Messvektor, einzelner Messwert	38, 93
$K_i$	Anzahl der Messwerte in der Zielliste	94
$\vec{o}$	Hypothetische Position	93
$R_{step}, \varphi_{Step}$	Radien- und Winkelschritte im Zuordnungsgitter	93
$E_2(\vec{o})$	Mittlerer quadratischer Fehler	39, 94
$r_i(\vec{o})$	Entfernung zwischen Punkt $\vec{o}$ und dem Sensor $i$	38, 94
$I$	Anzahl der Sensoren	94, 96
$\Delta r$	Entfernungsauflösung	9, 96
$\sigma_r$	Genauigkeit der Entfernungsmessung	96
$P_d$	Detektionswahrscheinlichkeit	104
$P_4, P_3, P_3^+$	Detektionswahrscheinlichkeit in Sensornetzwerken	104
$a(f)$	Spektrum eines Empfangssignals	111
$b(f), c(f), d(f)$	Funktionen über der Frequenz	112
$S_{OSCFAR}(f)$	Rauschschätzung der OSCFAR	111
$k \cdot S_{OSCFAR}(f)$	Detektionsschwelle der OSCFAR	111
$\mathbb{D}$	Frequenzbereich oberhalb der Schwelle	111
$f_{peak}$	Frequenzkomponente mit höchster Leistung	111
$r_{peak}$	Entfernung zum stärksten Reflexionszentrum	112
$r_{min}$	Entfernung zum dichtesten Punkt	112
$r_{max}$	Entfernung zum entferntesten Punkt	112
$\mathbb{U}$	Umgebung um eine Frequenz mit der Breite $F$	112
$f'$	Frequenz relativ zum Maximum	112

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$K_I, K_F$	Korrekturterme	115
$\bar{L}$	Mittlere Länge	116, 117
$\delta f$	Spektrale Breite des Objektes	115
$\delta\psi$	Phasendifferenz bei einer LFMSK-Signalform	33, 119
$k$	Diskreter Zeitpunkt	126
$T$	Zeitintervall zwischen den Messungen	126
$r$	Entfernung	126
$v$	Geschwindigkeit	126
$a$	Beschleunigung	127
$\vec{x}$	Zustandsvektor	126
$\vec{p}$	Modellfehler	127
$\vec{n}$	Messrauschen	127
$\vec{e}$	Fehlervektor	127
$\Phi$	Systemmatrix	126
$\mathbf{H}$	Messmatrix	127
$\mathbf{K}$	Kalman-Verstärkung (engl. Kalman gain)	127
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix	128
$\sigma, \sigma_x$	Varianz, der Größe x	127
$\mathbf{P}$	Kovarianzmatrix des Zustandsvektors	127
$\mathbf{Q}$	Kovarianzmatrix des Modellfehlers	127
$\mathbf{R}$	Kovarianzmatrix des Messrauschens	127
$f_{\text{Schritt}}$	Schrittfrequenz	136
$L_{\text{Schritt}}$	Schrittlänge	136
$\bar{v}$	Mittlere Geschwindigkeit	136
$\alpha$	Zielwinkel, Azimut	9, 69, 140
$\phi$	Winkel zwischen Bewegungs- und Beobachtungsrichtung	20, 140
$\vec{r} = [x, y]^T$	Ortsvektor eines Punktes	38, 140
$\vec{v} = [v_x, v_y]^T$	Geschwindigkeitsvektor in kartesischen Koordinaten	19, 140
$v$	(gemessene) Radialgeschwindigkeit	19, 139
$\mathcal{A}_\alpha$	Winkelausdehnung	140
$\mathcal{A}_v$	Geschwindigkeitsausdehnung	48, 139

---

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Seite</b>
$\mathcal{A}_{v,\%}$	Relative Geschwindigkeitsausdehnung	144
$\vec{e}_x, \vec{e}_y$	Einheitsvektor in x- bzw. y-Richtung	144
$t_0, t_1$	Zeitpunkt, nachfolgender Zeitpunkt	10, 145
$\Delta\alpha$	Winkelauflösung des Sensors	9, 151
$\Delta v$	Geschwindigkeitsauflösung des Sensors	9, 151
$\vec{v}_M$	Vektor gemessener Radialgeschwindigkeiten	19, 151
<b>M</b>	Geometrische Abbildungsmatrix	19, 151



# Literaturverzeichnis

- [A<sup>+</sup>85] ALMÁSSY, György u. a. ; RICHTER, Werner (Hrsg.): *Fachlexikon ABC Meßtechnik*. Thun and others : Deutsch, 1985. – ISBN 3–87144–846–X. – [Autoren d. ungar. Ausg.: György Almássy ... Bearb.: Werner Richter]
- [ADA05] *Innovation 2005: PSS Auf dem Weg zum sensitiven Auto*. München, Germany, Februar 2005 (ADACmoterwelt)
- [AFP04] AMDITIS, Angelos ; FLOUDAS, Nikolaos ; POLYCHRONOPOULOS, Aris: Lateral motion tracking of automobiles. In: SVENSSON, Per (Hrsg.) ; SCHUBERT, Johan (Hrsg.): *Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion* Bd. II. Mountain View, CA : International Society of Information Fusion, Jun 2004. – ISBN 91–7056–116–8, 768–774
- [Agh01] AGHA, Adel: *Entwicklung von Postprocessing-Algorithmen für Automotive Radarsysteme*. Aachen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Juni 2001
- [Ahr05] AHRHOLDT, Malte: *Ein System zur automatischen Auswertung von Ultraschall-Messdaten*. Göttingen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Juni 2005
- [Bau98] BAUMANN, Eberhard: *Vermessungskunde*. Bd. 2: *Punktbestimmung nach Höhe und Lage*. 6. bearb. Aufl. Bonn : Ferd. Dümmlers Verlag, 1998. – ISBN 3–427–79056–8
- [BBG<sup>+</sup>03] BERTOZZI, Massimo ; BROGG, Alberto ; GRISLERI, Paolo ; GRAF, Thorsten ; MEINECKE, Marc-Michael: Pedestrian Detection in Infrared Images. In: *Procs. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003*. Columbus, USA, June 2003, 662-667
- [BBP98] BLAIR, William D. ; BRANDT-PEARCE, Maite: Unresolved Rayleigh Target Detection Using Monopulse Measurements. In:

- IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst* AES-34 (1998), April, Nr. 2, S. 543–551
- [BBP01] BLAIR, William D. ; BRANDT-PEARCE, Maite: Monopulse DOA Estimation of Two Unresolved Rayleigh Targets. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst* AES-37 (2001), April, Nr. 2, S. 452–469
- [BEF<sup>+</sup>88] BRETTERBAUER, Kurt ; EDEN, Alec ; FÄRBINGER, Karl ; FIRNEIS, Matia G. ; MITTERMAYER, Peter ; PFLIGERSDORFFER, Peter ; ZWINK, Prof. E. (Hrsg.): *Christian Doppler Leben und Werk Der Dopplereffekt*. Salzburg, Austria : Schriftenreihe des Landesbüros, 1988 (Sonderpublikationen 76). – ISBN 3–85015–069–0
- [Bla86] BLAKE, Lamont V.: *Radar range-performance analysis*. Norwood, MA : Artech House, 1986 (The Artech House radar library). – ISBN 0–89006–224–2
- [BP99] BLACKMAN, Samuel ; POPLI, Robert: *Modern Tracking Systems*. Boston; London : Artech House, 1999. – ISBN 1–58053–006–0
- [Bro98] BROOKNER, Eli: *Tracking and Kalman Filtering Made Easy*. New York : John Wiley & Sons, Inc, 1998. – ISBN 0–471–18407–1
- [BSMM97] BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, Konstantin A. ; MUSIOL, Gerhard ; MÜHLIG, Heiner: *Taschenbuch der Mathematik*. 3. überarb. u. erw. Aufl. Frankfurt am Main; Thun : Verlag Harri Deutsch, 1997. – ISBN 3–8171–2003–6
- [Bun03] BUNDESNETZAGENTUR: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzbereichen gemäß Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV), Teil B: Nutzungsbestimmungen (NB) D138 und D150 für die Nutzung durch die Allgemeinheit für ISM-Anwendungen*. Version: 2003. <http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/298.pdf>, Abruf: 22. März 2006. – Vfg 76 / 2003
- [Bun04] BUNDESNETZAGENTUR: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Benutzung durch die Allgemeinheit für Kraftfahrzeug-Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 77-81 GHz*. Version: 2004. <http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/838.pdf>, Abruf: 22. März 2006. – Vfg 59 / 2004

- [Bun05] BUNDESNETZAGENTUR: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Benutzung durch die Allgemeinheit für Kraftfahrzeug-Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 21.65-26.65 GHz*. Version: 2005. <http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/2408.pdf>, Abruf: 22. März 2006. – Vfg 40 / 2005
- [Che05] CHEN, Victor C.: Spatial and Temporal Independent Component Analysis Of Micro-Doppler Features. In: *Proc. IEEE International Radar Conference - RADAR 2005*. Arlington, USA, May 2005, S. 348–353
- [Cla98] CLARKE, CCE Marconi Co. & P.: *Moyle District Council celebrates the Centenary of the World's First Commercial Use of Radio. Rathlin Island to Ballycastle, 6th July 1898*. July 1998. – CCE Marconi Co. & Paddy Clarke
- [CLHW06] CHEN, Victor C. ; LI, Fayin ; HO, Shen-Shyang ; WECHSLER, Harry: Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst* 42 (2006), January, Nr. 1, S. 2–21
- [DG03] DORP, Philip van ; GROEN, Frans: Real-Time Human Walking Estimation with Radar. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 645–649
- [DHD03] DANG, Hongshe ; HAN, Chongzhao ; DUAN, Zhansheng: A New Data Association Approach for Automotive Radar Tracking. In: *The 6th International Conference on Information Fusion (FUSION'2003)*. Cairns, Australia, July 2003, 1384–1388
- [DIN94] Norm ISO 8855 Januar 1994. *Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten Begriffe DIN 70000*. – Ausgabe 1991, modifiziert
- [Dop42] DOPPLER, Christian: Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. In: *Abhandlungen der königlich-böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften* V Folge, Bd. 2 (1842). – Sonderabdruck in [BEF<sup>+</sup>88]
- [Ein05] EINSTEIN, Albert: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: *Annalen der Physik und Chemie* 17 (1905), S. 891–921. – hier: § 7 Theorie des DOPPLERSchen Prinzips und der Aberration

- [Euc91] EUCLIDES: *Die Elemente: Buch I-XIII / Euklid. Nach Heibergs Text aus dem Griech. übers. und hrsg. von Clemens Thaer. Sonderausg., 8., unveränd. Aufl. Darmstadt : Wiss. Buchges., [Abt. Verl.], 1991. – ISBN 3-534-01488-X*
- [FD03] FUERSTENBERG, Kay C. ; DIETMYAER, Martin: Data Fusion and Ego-Motion Estimation using Laserscanners. In: *Proceedings of IEEE 6th International Conference on Intelligent Transport Systems (ITSC 2003)*, 2003
- [FD04] FUERSTENBERG, Kay C. ; DIETMYAER, Klaus: Object Tracking and Classification for Multiple Active Safety and Comfort Applications using a Multilayer Laserscanner. In: *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symposium IV04*. Parma, Italy, June 2004, S. 802–807
- [FDEW02] FUERSTENBERG, Kay C. ; DIETMYAER, Klaus ; EISENLAUER, Stephan ; WILLHOEFT, Loker: Multilayer Laserscanner for robust Object Tracking and Classification in Urban Traffic Scenes. In: *Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS 2002)*, 2002
- [Fis01] FISCHER, Dorte: *Statistisch basierte Klassifikation des Menschlichen Gangs*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., Januar 2001
- [Fit82] FITZGERALD, Robert: Simple Tracking Filters: Position and Velocity Measurements. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst* AES-18 (1982), September, Nr. 5, S. 531–537
- [Fli91] FLIEGE, Nobert: *Systemtheorie*. Stuttgart : B.G. Teubner, 1991. – ISBN 3-519-06140-6
- [FOGR04] FÖLSTER, Florian ; OPRISAN, Dan ; GÖRNER, Stefan ; ROHLING, Hermann: Detection and Tracking of extended targets for a 24 GHz automotive radar network. In: *Proc. International Radar Symposium 2004*. Warsaw, Poland, May 2004, S. 75–80
- [Foy76] FOY, Wade. H.: Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*. AES-12 (1976), March, Nr. 2, S. 187–194

- [FR05] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Data Association and Tracking for Automotive Radar Networks. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst. ITS-6* (2005), December, Nr. 4, S. 370–377
- [FR06a] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Lateral velocity estimation based on automotive radar sensors. In: SHUNJUN, Wu (Hrsg.): *Proc. of 2006 CIE International Conference on Radar*. Shanghai, China : IEEE Press, Oktober 2006, S. 481–484. –
- [FR06b] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Observation of lateral moving traffic with an automotive radar. In: *Proc. International Radar Symposium 2006*. Krakow, Poland, Mai 2006, S. 197–200
- [FR06c] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Signal processing structure for automotive radar. In: *Frequenz* 60 (2006), Jan/Feb, Nr. 1-2, S. 20–23
- [FRL05] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann ; LÜBBERT, Urs: An Automotive Radar Network based on 77 GHz FMCW Sensors. In: *Proc. IEEE International Radar Conference - RADAR 2005*. Arlington, USA, May 2005, S. 871–876
- [FRM05] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann ; MEINECKE, Marc-Michael: Pedestrian recognition based on automotive radar sensors. In: *Proc. of The 5th European Congress on Intelligent Transportation Systems and Services 2005*. Hannover, Germany, June 2005
- [FRR06] FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann ; RITTER, Henning: Observation of a walking pedestrian with a 24GHz automotive radar sensor. In: *Proc. German Microwave Conference (GeMic) 2006*. Karlsruhe, Germany, March 2006
- [GN03] GÖTZ-NEUMANN, Kirsten: *Gehen verstehen - Ganganalyse in der Physiotherapie*. Stuttgart, Germany : Georg Thieme Verlag, 2003
- [Höß] HÖSS, Alfred: *RadarNet*. <http://www.radarnet.org>, Abruf: 23. Mai 2006. – European Research Project (beendet Dez. 2004)
- [Hei87] HEISENBERG, Werner: *Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis d. Atomphysik*. Ungekürzte Ausg. 10. Aufl. München,

- Germany : Dt. Taschenbuch-Verlag, 1987 (dtv ; 903). – ISBN 3-423-00903-9. – Lizenz d. Piper-Verl., München
- [Hül04a] Schutzrecht DE 165546-A ( April 1904). HÜLSMEYER, Christian (Erfinder). "Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden", eingereicht (1904-04-30)
- [Hül04b] Schutzrecht DE 169154-A ( November 1904). HÜLSMEYER, Christian (Erfinder). "Verfahren zur Bestimmung der Entfernung von metallischen Gegenständen (Schiffe o.dgl.), deren Gegenwart durch das Verfahren in Patent 165546 festgestellt wird", eingereicht (1904-11-11)
- [HM06] HANTSCH, Andeas ; MENZEL, Wolfgang: A 76GHz Folded Reflector Antenna for True Ground Speed Measurement. In: *Proceedings of the German Microwave Conference*. Karlsruhe, Germany, March 2006
- [HMS97] HERING, Ekbert ; MARTIN, Rolf ; STOHRER, Martin: *Physik für Ingenieure*. 6. Aufl. Berlin; Heidelberg and others, Germany : Springer, 1997. – ISBN 3-540-6244-2
- [Hun91] HUNT, Bruce J.: *The Maxwellians*. New York, US : Cornell, 1991. – ISBN 0-8014-2641-3
- [Kal60] KALMAN, Rudolf E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. In: *Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering* 82 (Series D) (1960), S. 35–45
- [KFA<sup>+</sup>03] KRUSE, Frank ; FÖLSTER, Florian ; AHRHOLDT, Malte ; MEINECKE, Marc-Michael ; ROHLING, Hermann: Object Classification with Automotive Radar. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 137–142
- [KFA<sup>+</sup>04] KRUSE, Frank ; FÖLSTER, Florian ; AHRHOLDT, Malte ; ROHLING, Hermann ; MEINECKE, Marc-Michael ; TO, Thanh-Binh: Target Classification Based on Near-Distance Radar Sensors. In: *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symposium IV04*. Parma, Italy, June 2004, 722–727

- [Kir00] KIRCHNER, Alexander: *Sensordatenverarbeitung eines Laserscanners für autonome Fahrfunktionen von Kraftfahrzeugen*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany, Universität der Bundeswehr Hamburg, Diss., August 2000
- [Klo02] KLOTZ, Michael: *An Automotive Short Range High Resolution Pulse Radar Network*. Aachen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Januar 2002
- [KPDA60] KLAUDER, J.R. ; PRICE, A.C. ; DARLINGTON, S. ; ALBERSHEIM, W.J.: The Theory and Design of Chirp Radars. In: *Bell System Technical Journal* 39 (1960), July, S. 745–808
- [Kru06] KRUSE, Frank: *Ein Beitrag zur Sensorsignalanalyse für Fahrzeuganwendungen*. Göttingen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., May 2006
- [Lüb05] LÜBBERT, Urs: *Target Position Estimation with a Continuous Wave Radar Network*. Göttingen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Juni 2005
- [LK01a] LEE, Moon-Sik ; KIM, Yong-Hoon: New data association method for automotive radar tracking. In: *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.* 148 (2001), October, Nr. 5, S. 297–301
- [LK01b] LEE, Moon-Sik ; KIM, Yong-Hoon: New Multi-Target Data Association Using OSJPDA Algorithm for Automotive Radar. In: *IEICE Transactions on Electronics* E84-C (2001), August, Nr. 8, S. 1077–1083
- [Lof90] LOFFELD, Otmar: *Estimationstheorie*. München [u.a.] : R. Oldenbourg Verlag, 1990. – ISBN 3–486–21616–3
- [LRR02] LOHMEIER, Stephan P. ; RAJARAMAN, Raviprakash ; RAMASAMI, Vijaya C.: Development on an Ultra-Wideband Radar System for Vehicle Detection at Railway Crossings. In: *Proc. of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*. Baltimore, MD, May 2002
- [Lud98] LUDLOFF, Albrecht: *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1998. – ISBN 3–528–16568–5

- [Lut02] LUTZENBERGER, Christian: *Dynamik des menschlichen Ganges*. Düsseldorf, Germany, Technische Universität München, Diss., 2002
- [Mah05] MAHAFZA, Bassem R.: *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 2. Boca Raton; London [u.a.] : Chapman and Hall/CRC, 2005. – ISBN 1–58488–532–7
- [May79] MAYBECK, Peter S.: *Stochastic Models, Estimation and Control*. Bd. 1. London : Academic Press, 1979. – ISBN 0–12–480701–1
- [MBM+03] MENDE, Ralph ; BEHRENS, Marc ; MEINECKE, Marc-Michael ; BARTELS, A. ; TO, Thanh-Binh: The UMRR-S: A High-Performance 24GHz Multi Mode Automotive Radar Sensor for Comfort and Safety Applications. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 113–118
- [Mei01] MEINECKE, Marc-Michael: *Zum optimierten Sendesignalentswurf für Automobilradare*. Aachen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Juli 2001
- [Men99] MENDE, Ralph: *Radarsysteme zur automatischen Abstandsregelung in Automobilen*. Aachen, Germany, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., Juli 1999
- [Men04] MENDE, Ralph: UMRR: A certified 24GHz Radar Sensor for Automotive Applications. In: *Proc. 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*. Hamburg, Germany, March 2004, S. 13–17
- [MJK03] MÖBUS, Rainer ; JOOS, Armin ; KOLBE, Uli: Multi-Target Multi-Object Radartracking. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2003)*. Columbus, US, June 2003, S. 489–494
- [MOTD05] MEINECKE, Marc-Michael ; OBOJSKI, M.-A ; TÖNS, M. ; DEHESSA, M.: SAVE-U: First experiences with a pre-crash system for enhancing pedestrian safety. In: *The 5th European Congress on Intelligent Transportation Systems and Services 2005*. Hannover, Germany, June 2005
- [MR00] MEINECKE, Marc-Michael ; ROHLING, Hermann: Combination of FSK and LFMCW Modulation Principles for Automotive Radars.

In: *Proc. German Radar Symposium 2000*. Berlin, Germany, October 2000

- [MRK<sup>+</sup>05] Schutzrecht DE 103 44 299 A1 ( April 2005). MEINECKE, Marc-Michael ; ROHLING, Hermann ; KRUSE, Frank ; FÖLSTER, Florian ; AHRHOLDT, Malte ; OPRISAN, Dan (Erfinder); Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg, DE (Anmelder). "Klassifizierung der in einer Umgebung eines Kraftfahrzeuges befindlichen Objekte", eingereicht 2003-09-23
- [MS05] MEIS, U. ; SCHNEIDER, R.: Information Retrieval Capabilities of High-Resolution Mobile Radar. In: *Proc. 2nd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2005)*. Hamburg, Germany, March 2005, S. 101–105
- [MV93] MACKENS, Wolfgang ; VOSS, Heinrich: *Mathematik I für Studierende der Ingenieurwissenschaften*. 1. Aufl. Alsdorf : HECO Verlag, 1993. – ISBN 3–930121–00–X
- [ND02] NAGEL, D. ; DECOENE, A.: A Synthetic Target Generator to Create Range Profiles with High Resolution. In: *Proceedings of the German Radar Symposium (GRS 2002)*. Bonn, Germany : German Institute of Navigation (DGON), September 2002, S. 627
- [NN05] NIEDERMAIR, Elke ; NIEDERMAIR, Michael: *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X : das Praxisbuch*. 2. vollst. aktualisierte und überarb. Neuaufl. Berker, Germany : Poing : Franzis, 2005 (Franzis professional series). – ISBN 3–7723–6434–9
- [NRW03] NALECZ, M. ; RYTEL-ANDRIANIK, R. ; WOJTKIEWICZ, A.: Micro-Doppler Analysis of Signals Received by FMCW Radar. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 651–656
- [OB85] OSTROVITYANOV, R.V. ; BASALOV, F.A.: *Statistical Theory of Extended Radar Targets*. Dedham, US : Artech House, 1985. – ISBN 0–89006–144–0
- [OFR05] OPRISAN, Dan ; FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Monopulse versus Multilateration Technique for azimuth measurement

- in automotive Radar Networks. In: *Proc. International Radar Symposium 2005*. Berlin, Germany, September 2005, S. 73–77
- [Opi04a] OPITZ, Felix: Multidimensional Assignment Techniques based on Linear Programming and Non-Differentiable Optimisation. In: *Proc. International Radar Symposium 2004*. Warsaw, Poland, May 2004, S. 297–302
- [Opi04b] OPITZ, Felix: A Variable Structure Augmented IMM Algorithm based on Unscented Transformations. In: *Proc. International Radar Symposium 2004*. Warsaw, Poland, May 2004, S. 323–328
- [OR02] OPRISAN, Dan ; ROHLING, Hermann: Tracking Systems for Automotive Radar Networks. In: *IEE Conference Publication Number 490 (Radar 2002)*. Edinburgh, UK, October 2002, S. 339–343
- [OR03] OPRISAN, Dan ; ROHLING, Hermann: Multitarget Tracking Procedures for Automotive Radar Networks. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 417–421
- [OS99] OPPENHEIM, Alan V. ; SCHAFER, Ronald W.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. 3. Aufl. München; Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1999. – ISBN 3–486–24145–1. – Autorisierte Übersetzung der englischsprachigen Originalausgabe, erschienen im Verlag Prentice Hall Inc., unter dem Titel: *Discrete-Time Signal Processing*
- [Per03] PERRY, Jacquelin: *Ganganalyse*. 1. Aufl. in deutscher Sprache. München : Urban & Fischer, 2003. – ISBN 3–437–47110–4
- [RF05] ROHLING, Hermann ; FÖLSTER, Florian: Radar Network based on 77 GHz FMCW Sensors. In: *Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS)*. Kiev, Ukraine, September 2005
- [RFKA04] ROHLING, Hermann ; FÖLSTER, Florian ; KRUSE, Frank ; AHRHOLDT, Malte: Target Classification Based on a 24GHz Radar Network. In: *Proc. Radar 2004*. Toulouse, France, September 2004
- [RFMM04] ROHLING, Hermann ; FÖLSTER, Florian ; MEINECKE, Marc-Michael ; MENDE, Ralph: A New Generation of Automotive

- Radar Waveform Design Techniques. In: *Proc. First International Conference on Waveform Diversity and Design*. Edinburgh, UK, November 2004
- [RFR06] RITTER, Henning ; FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Identification of pedestrians with radar sensors. In: *Proc. 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006)*. Hamburg, Germany, March 2006, S. 167–171
- [RHLS02] ROHLING, Hermann ; HÖSS, Alfred ; LÜBBERT, Urs ; SCHIEMENTZ, Mark: Multistatic Radar Principles for Automotive RadarNet Applications. In: *Proc. German Radar Symposium 2002*. Bonn, Germany, September 2002, S. 181–185
- [RKFA04a] ROHLING, Hermann ; KRUSE, Frank ; FÖLSTER, Florian ; AHRHOLDT, Malte: Target Classification with a Narrowband 24 GHz Radar System. In: *Proc. 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*. Hamburg, Germany, March 2004, S. 19–23
- [RKFA04b] ROHLING, Hermann ; KRUSE, Frank ; FÖLSTER, Florian ; AHRHOLDT, Malte: Target Recognition in Automotive Radar Systems. In: *Proc. International Radar Symposium 2004*. Warsaw, Poland, May 2004, S. 69–74
- [RM96] ROHLING, Hermann ; MENDE, Ralph: OS CFAR Performance in a 77 GHz Radar Sensor for Car Application. In: *CIE International Conference on Radar*. Beijing, China, October 1996, S. 109–114
- [Roh83] ROHLING, Hermann: Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* AES-19 (1983), July, Nr. 4, S. 608–621
- [Roh84] ROHLING, Hermann: *Adaptive Methoden zur Zielerkennung in Pulsradargeräten mit Dopplerprozessoren*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., Juli 1984
- [Roh86] ROHLING, Hermann: Zur Auflösung von Radialgeschwindigkeits- und Entfernungsmehrdeutigkeiten bei der Radarmessung. In: *ntzArchiv* 8 (1986), Nr. 2, S. 25–34

- [RPL94] Schutzrecht DE 4244608 A1 ( Juli 1994). ROHLING, Hermann ; PLAGGE, Wilfried ; LISSEL, Ernst (Erfinder). "Computerisiertes Radarverfahren zur Messung von Abständen und Relativgeschwindigkeiten zwischen einem Fahrzeug und vor ihm befindlichen Hindernissen"
- [RSD04] ROLLMANN, Gerhard ; SCHMID, Volker ; DOMINIK, Hans: 24 GHz Short Range Radar - Potential Benefits and Regulatory Issues. In: *Proc. 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*. Hamburg, Germany, March 2004, S. 25–28
- [Sch05] SCHIEMENTZ, Mark: *Postprocessing Architecture for an Automotive Radar Network*. Göttingen, Germany, Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, Diss., Juni 2005
- [SFR03] SCHIEMENTZ, Mark ; FÖLSTER, Florian ; ROHLING, Hermann: Angle Estimation Technique for different 24 GHz Radar Networks. In: *Proc. International Radar Symposium 2003*. Dresden, Germany, September 2003, S. 405–410
- [SK97] SCHWETLICK, Hubert ; KRETZSCHMAR, Horst: *Numerische Verfahren für Naturwissenschaftler*. 1. Aufl. Leipzig : Fachbuchverlag, 1997. – ISBN 3–343–00580–0
- [SS05] SCHUMACHER, R. ; SCHILLER, J.: Non-cooperative Target Identification Of Battlefield Targets - Classification Results Based On SAR Images. In: *IEEE International Radar Conference - RADAR 2005*. Arlington, USA, May 2005, S. 167–172
- [Sto92] STOVE, Andrew G.: Linear FMCW radar techniques. In: *IEE Proceedings-F* 139 (1992), October, Nr. 5, S. 343–350
- [Sto98] STOLLE, Reinhard: *Präzisionsmeßverfahren zur mehrzielfähigen Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung mit Mikrowellenradaren kleiner Leistung*. Bochum, Germany, Ruhr-Universität Bochum, Diss., Oktober 1998
- [SYLW05] SCHULER, Karin ; YOUNIS, Marwan ; LENZ, Rainer ; WIESBECK, Werner: Test Setup for Digital Beamforming Short Range Radar. In: *2nd International Workshop on Intelligent Transportation - WIT 2005*. Hamburg, Germany, March 2005, S. 13–16

- [Tor84] TORRIERI, Don. J.: Statistical Theory of Passive Location Systems. In: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* AES-20 (1984), March, Nr. 2, S. 183–198
- [Trö01] TRÖSTER, Fritz: *Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure*. München, Germany : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001. – ISBN 3–486–25044–2
- [Ung94] UNGER, Hans-Georg: *Hochfrequenztechnik in Funk und Radar*. 4. Aufl. Stuttgart, Germany : Teubner, 1994. – ISBN 3–519–30018–4
- [Wag97] WAGNER, Klaus Peter: *Winkelauflösende Radarverfahren für Kraftfahrzeuge*, Technische Universität München, Diss., 1997
- [WCNJ04] WEIL, C.M. ; CAMELL, D. ; NOVOTNY, D.R. ; JOHNK, R.T.: Across-the-road photo traffic radars: New calibration techniques. In: *Proc. MIKON 2004*. Warszawa, Poland, May 2004
- [WPMM04] WALDMANN, Bernd ; PETELKA, Rajko ; MEINECKE, Marc-Michael ; MENDE, Ralph: System for Automatic Parking using Radar-based Parking Slot Recognition. In: *Proc. International Radar Symposium 2004*. Warsaw, Poland, May 2004, S. 81–84



# Glossar

1D	eindimensional, 69
2D	zweidimensional, 69
A/D-Wandler	analog-digital Wandler, 17
ACC	Adaptive Cruise Control, 1
BAB	Bundesautobahn, 75
Cluster	Zusammenfassung einzelner Detektionen eines Objektes (engl. für Gruppe), 107
Clutter	Reflexionen an parasitären Zielen (engl. für Wirrwarr), 111
CW	Dauerstrich-Radar (engl. continuous wave), 13
DFT	Diskrete Fouriertransformation (engl. diskrete fourier transformation), 16
EU	Europäische Union, 87
FFT	Recheneffiziente Realisierung der diskreten Fourier Transformation (engl. fast fourier transformation), 16
FSK	Frequenzumtastung (engl. frequency shift keying), 26
Gangzyklus	Doppelschritt bei der Bewegung eines Menschen, 60
IMM	Tracking mit mehreren Bewegungsmodellen (engl. interacting multiple model), 145

Kadenz	Schritte pro Minute, 61
LFMCW	linear modulierte Sendefrequenz (engl. linear frequency modulated continuous wave), 13
LFMSK	Linear modulierte Frequenzumtastung (engl. linear frequency modulated shift keying), 33
LKW	Lastkraftwagen, 52
MHT	Datenzuordnung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Hypothesen (engl. multi hypothesis tracking), 145
MMSE	Quadratmitteltechnik (engl. minimum mean square estimation), 94
OSCFAR	Ordered statistic constant false alarm rate (engl.), 106
PKW	Personenkraftwagen, 52
PRF	Pulswiederholrate (engl. pulse repetition frequency), 11
RCS	Radarrückstreuquerschnitt (engl. radar cross section), 11
RV-Diagramm	Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm (engl. range-velocity Diagram), 26
SI	Genormtes metrisches Einheitensystem (franz. Le Système international d'unités), 9
SNR	Signal-zu-Rausch-Abstand (engl. signal-to-noise ratio), 108
SVD	Singulärwertzerlegung (engl. singular value decomposition), 40
TP	Tiefpassfilter, 14
w.E.	Willkürliche Einheit, 9

# Index

- ACC, 1  
Amplituden-Monopuls, *siehe* Monopuls  
Apertur, 36  
Auflösung, 9, 51  
Ausdehnung, 50  
Azimut, 36, 75
- Bandbreite, 12, 17, 38  
Beobachtung, 19, 55, 60, 64  
Bewegungsmodell, 62, 125–133, 146  
Bewegungsmuster, 58, 125, 131, 134  
Bild, 75–77  
biomotorisch, 58  
bistatisch, 40  
Bottom-up, 93–102
- Clutter, 109, 112, 121  
CW, *siehe* Dauerstrich
- Datenzuordnung, *siehe* Zuordnung  
Dauerstrich, 13–17, 20–21, 26–35, 38  
Detektionswahrscheinlichkeit, 103–104  
Doppelreflexion, 120  
Doppelt ausgedehntes Ziel, 53, 63–73, 159  
Doppler, 18, 24, 26, 112, 126, 156
- Eigengeschwindigkeit, 130, 156  
Eigenschaften, 10, 36, 47, 57, 62, 69, 77, 78  
Eindeutigkeit, 12, 13, 16, 21, 24, 34
- Elevation, 36  
Entfernungsmessung, 9–17  
Entfernungsprofil, 55, 102, 109, 112, 137
- Flächige Objekte, 68–70, 146  
FSK, 26–27, 33, 153  
Fußgänger, 58, 131–138
- Gangzyklus, 60  
Geisterziel, 32, 38, 83–107, 122, 132, 146, 147  
Genauigkeit, 8  
Geschichte, 7  
Geschwindigkeitsmessung, 18–35  
Geschwindigkeitsprofil, 22, 26, 59–69
- Hülsmeier, 7  
Hessesche Normalform, 144
- Kalman Filter, 126–128, 134  
Kartesische Koordinaten, *siehe* Koordinaten  
Kinematisch ausgedehntes Ziel, 53, 58–63, 125–138  
Klassifikation, *siehe* Objekterkennung  
Koordinaten, 9–11, 19, 36, 159
- Längenschätzung, 107–123  
Langes Ziel, 52, 54–58, 102–123  
Laterale Bewegung, *siehe* Quer bewegt  
Laufzeit, 11, 13, 14, 70

- LFMCW, 13, 27–32, 109–117, 146–148
- LFMSK, 32–34, 118–120
- makroskopisch, 131–134
- Mehrdeutigkeit, 24, 27–34, 79, 83–89, 109–120, 144–148, 151, 156, 157
- Menge, 54, 55, 75–78, 94
- Messfehler, 8, 37, 96, 106, 127, 128
- Messung, *siehe* Radarmessung
- Mikrodoppler-Profile, *siehe* Geschwindigkeitsprofil
- mikroskopisch, 134–137
- Minimierung, *siehe* Optimierung
- Modell, 77, 81, 150
- Modellbildung, 79
- Monopuls, 41–44, 70–73  
Amplituden-M., 42  
Phasen-M., 43, 70
- Normalgleichungen, 39–40
- Objekt, 47–73
- Objekterkennung, 78–79, 137–138, 159–160
- Optimierung, 38, 93–95, 152
- Ortsvektor, 10, 54
- Person, *siehe* Fußgänger
- Phasen-Monopuls, *siehe* Monopuls
- Polarkoordinaten, *siehe* Koordinaten
- Positionsschätzung, 11, 83–123
- Produktmenge, 75–78
- Pulsdoppler, 23–26
- Pulsradar, 11–13, 17, 23–26, 38, 109
- Punktziel, 9, 10, 51–52, 83–102
- Quadratmitteltechnik, *siehe* Optimierung
- Quer bewegt, 53, 130, 140, 144, 148–156
- Radarmessung, 7–44
- Radialgeschwindigkeit, 19, 138–146
- Rauschen, 82, 111, 113, 121
- Rechenaufwand, 107, 123, 133
- Redundanz, 38, 83–104, 118, 146
- Rumpf, 34, 60, 61, 131–138
- RV-Diagramm, 26, 52, 53, 57, 62, 67, 75–79, 119, 132, 134, 146–148
- Schnittpunkt, 30–33, 37–40, 89–107, 118–123, 146–148, 151–157
- sekundäre Ausdehnung, 50, 64, 70
- Sensoren, 44
- Signalverarbeitungskette, 81–89, 95, 105–107, 125, 137, 144
- Situation, *siehe* Verkehrssituation
- Situationsanalyse, 77–79
- Sujet, 74–79, 108, 118, 125, 130, 131, 137–146
- Teilmenge, 50–54, 75–78
- Top-down, 93–95
- Tracking, 82, 86–89, 122, 125–138, 145–150
- Triangulation, 40
- Trilateration, 37–40, 86–93, 122–123
- Verkehrssituation, 73–78, 153, 160
- Verkehrsteilnehmer, 74–79
- Winkelmessung, 36–44, 70–73
- Zuordnung, 75, 84–102, 110, 128–133, 146–148

# Lebenslauf

Name: Eike Florian Fölster  
Geburtsdatum: 23. Februar 1976  
Geburtsort: Hamburg

## Schulbildung

1982 - 1986 Grundschule in Hamburg  
1986 - 1995 Gymnasium in Hamburg

12/1995 - 11/1996 Zivildienst in der Pflegestation der Senioren-  
wohnanlage Rosenhof-Hamburg

## Studium & Praktika

10/1996 - 12/2001 Studium der Elektrotechnik, Studienrichtung  
Nachrichtentechnik - Digitale Übertragungstech-  
nik an der Technischen Universität Hamburg-  
Harburg (TUHH)  
08/2000 - 01/2001 Austauschstudium an der Luleå Tekniska Univer-  
sitet, Schweden (Erasmus Stipendium)  
01/2001 - 07/2001 Praktikum im Bereich Entwicklung und Konstruk-  
tion Anästhesie der Dräger Medizintechnik GmbH  
in Lübeck

## Berufliche Tätigkeit

seit 02/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für  
Nachrichtentechnik der TUHH mit dem Schwer-  
punkt *Automotive Radar*