

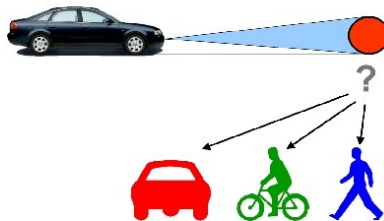


Frank Kruse (Autor)

## Ein Beitrag zur Sensorsignalanalyse für Fahrzeuganwendungen

Frank Kruse

### Ein Beitrag zur Sensorsignalanalyse für Fahrzeuganwendungen



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2128>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Kapitel 1

## Einleitung

Mobilität bekommt in unserer Gesellschaft einen immer höheren Stellenwert. So sind heute Reisen über Entfernungen von mehreren hundert Kilometern dank moderner Verkehrsmittel nicht weiter ungewöhnlich. Aber auch alltägliche Wege, wie beispielsweise die Fahrt vom Wohnort zum Arbeitsplatz oder zum nächsten Supermarkt, können schnell und bequem zurückgelegt werden, selbst wenn diese mehrere Kilometer voneinander entfernt liegen.

Vor nicht einmal einhundert Jahren stellte sich die Situation noch völlig anders dar. Damals war es unüblich, viel weiter als bis in die nächste Stadt zu reisen. Man pflegte in der Nähe der Arbeit zu wohnen und auch seine Einkäufe vor Ort zu tätigen. Individualverkehr, wie wir ihn heute kennen, gab es kaum.

Der zunehmende Bedarf nach Mobilität wurde im 19. Jahrhundert durch die Erfindung der Eisenbahn (Richard Trevithick, 1804) und des Automobils (Gottlieb Daimler und Karl Benz, 1886) eingeleitet. Sie ermöglichten erstmalig Reisen auch über größere Entfernungen und mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten. Seitdem haben beide Transportsysteme eine enorme Weiterentwicklung und Verbreitung erfahren. Sie haben dadurch eine sehr große gesellschaftliche Bedeutung erlangt und sind zu einem unverzichtbaren Teil unseres Alltags geworden.

Doch obwohl sich die verschiedenen Personentransportsysteme erheblich weiterentwickelt haben und die jeweiligen Verkehrswege sehr gut ausgebaut sind, stoßen sie heute zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen. Dies ist auf das stetig wachsende Verkehrsaufkommen zurückzuführen. Ein Ende dieser Entwicklung ist auch für die Zukunft nicht abzusehen. Neben dem kontinuierlichen Ausbau der Verkehrssysteme wird es deshalb zunehmend wichtiger, die vorhandene Infrastruktur effizienter zu nutzen und bestehende Verkehrswege leistungsfähiger und sicherer zu machen.

Im Laufe der Jahre wurden vor diesem Hintergrund schon viele technische Lösungen für die bessere Steuerung von Verkehrsflüssen entwickelt und umgesetzt. Durch eine zunehmende Automatisierung der Systeme wird auch in Zukunft die Leistungsfähigkeit weiter gesteigert, die Bedienung vereinfacht und eine sichere Funktion gewährleistet. Großes Potenzial für weitere Optimierungen

besteht jedoch noch am Arbeitsplatz des Fahrers. Auch hier ist es das Ziel, durch technische Einrichtungen den Menschen bei seinen Aufgaben zu unterstützen und dadurch die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Verkehrssystems weiter zu steigern. Um diese Entlastung des Fahrers zu erreichen, benötigen viele der neuen Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme detaillierte Kenntnisse des Fahrzeugumfeldes. Die Ermittlung der erforderlichen Umfeldinformationen erfolgt durch entsprechende Sensoren. Durch die teilweise recht unterschiedlichen Anforderungen der spezifischen Applikationen müssen diese Sensorsysteme für die jeweilige Aufgabe passend gestaltet werden.

### **1.1. Verwendung von Sensorik für Fahrzeuganwendungen**

Umfeldvermessende Sensorik gewinnt durch die zunehmende Automatisierung sowohl im Bahn- als auch im Kraftfahrzeugbereich eine immer größere Bedeutung. Welche Informationen vom jeweiligen Sensorsystem bereitgestellt werden müssen, wird dabei durch die angestrebte Applikation definiert. In jedem Fall stellen diese Anwendungen jedoch sehr hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit der verwendeten Sensorsysteme.

Häufig sind deshalb die direkt mit einem einzelnen Sensor ermittelten Messwerte für derart anspruchsvolle Aufgaben noch nicht aussagekräftig genug. In diesem Fall müssen durch geschickte Auswertung der Sensormesswerte Wege gefunden werden, um mehr Informationen über die relevanten Messobjekte zu gewinnen. Dies kann einerseits durch die Kombination mehrerer Informationsquellen geschehen, andererseits lässt sich durch eine intelligente Interpretation anhand von entsprechendem Vorwissen die Informationsbasis für die einzelnen beobachteten Objekte erweitern.

Vor dem Hintergrund konkreter Aufgabenstellungen werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Vorgehensweisen für die Erweiterung der Umgebungskennntnis durch die Analyse von Sensordaten für Fahrzeuganwendungen vorgestellt. Es handelt sich dabei einerseits um ein Multisensorsystem für den Einsatz in Eisenbahnen und andererseits um ein radarbasiertes Objektklassifikationssystem für die Verwendung in Kraftfahrzeugen. Ziel des Multisensorsystems ist es, Hindernisse im Gleis vor einem automatisch fahrenden Triebfahrzeug bereits in großer Entfernung sicher zu erkennen und präzise zu vermessen. Bei dem zweiten betrachteten Verfahren liegt eine völlig andere Aufgabenstellung vor. Hier ist das Ziel, aus den Messwerten bestehender Automobilradare auf den Objekttyp von detektierten Verkehrsteilnehmern zu schließen. Für diese Aufgabe findet ein Klassifikationsverfahren Verwendung, das zuvor mit bekannten Datensätzen trainiert wurde.

### **1.2. Automatisierung des Bahnbetriebs**

Für den Betrieb von Eisenbahnen wurden in den letzten Jahren bereits in großem Umfang automatische Lösungen beispielsweise im Bereich der Stellwerke und der Streckenplanung eingeführt.

Ein nächster Schritt wird es sein, die Aufgaben des Fahrers zunehmend zu automatisieren und langfristig sogar einen Bahnbetrieb ohne Triebfahrzeugführer zu realisieren.

Mit dem Einsatz führerlos und automatisch fahrender Züge und der damit verbundenen Entkopplung der Ressourcen Fahrzeug und Personal lässt sich das Fahrplanangebot flexibler und damit für den Kunden erheblich attraktiver gestalten. Auch ein nachfrageorientierter Betrieb, bei dem nicht nur zu den bekannten Stoßzeiten, sondern ebenfalls bei unerwartet auftretenden Verkehrsspitzen kurzfristig zusätzliche Züge eingesetzt werden, lässt sich so sehr einfach realisieren. Abgesehen davon ermöglicht der automatische Betrieb den Einsatz mehrerer kleiner Fahrzeugeinheiten statt eines großen Zuges. So wird auch in den Nebenzeiten ein höherer und damit für den Kunden erheblich attraktiverer Takt wirtschaftlich durchführbar. Außerdem ist durch die hohe Verfügbarkeit von technischen Systemen mit einer Reduzierung von Unfällen, die auf menschliches Versagen zurückzuführen sind, zu rechnen.

Ein derartiges zum automatischen Fahren mit Bahnen entwickeltes System besteht aus einer Vielzahl einzelner Komponenten. Eine besonders wichtige Funktion für einen sicheren Betrieb besteht hierbei in der sehr zuverlässigen Erkennung von eventuell im Gleisbereich befindlichen Hindernissen. Anstelle des Triebfahrzeugführers übernimmt dann das technische System die wichtige Aufgabe der Streckenbeobachtung. Zusätzlich zur Zieldetektion ist die sehr präzise Vermessung der Objekte von großer Bedeutung für die Entscheidung, ob sich ein potenzielles Hindernis im Gefahrenbereich befindet oder nicht. Zurzeit existiert jedoch kein Einzelsensorsystem, das diese Aufgabe vollständig bewältigen kann.

Es wird deshalb in dieser Arbeit ein Verbundsystem aus mehreren unterschiedlichen Radarsensoren und Kamerasystemen vorgestellt, die gemeinsam den Bereich vor dem Zug beobachten. Durch die Fusion der unterschiedlichen Sensormesswerte werden gemessene Reichweite, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Umgebungskennntnis erheblich gesteigert und somit wird ein effektiver Schutz nach vorn ermöglicht.

### **1.3. Objektklassifikation im Kraftfahrzeug**

Auch im Automobilbereich übernehmen technische Einrichtungen zunehmend Aufgaben, die bisher vom Fahrer durchgeführt wurden. Das Ziel ist es hier zunächst jedoch nicht, ein völlig autonom fahrendes Fahrzeug zu verwirklichen, sondern den Fahrer im immer dichter werdenden Verkehr zu entlasten. Insbesondere auf der Basis von umfeldvermessender Sensorik lassen sich neuartige Fahrerassistenzsysteme entwickeln. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Radarsensorik. Sie zeichnet sich neben ihren sehr guten Allwettereigenschaften und der Möglichkeit des unsichtbaren Einbaus durch die sehr genaue Messung von Entfernung und Geschwindigkeit aller beobachteten Objekte aus. Beispiele für derartige, auf den Daten umfeldvermessender Sensorik basierender Fahrerassistenzfunktionen sind automatische Distanzregelung, Stop-and-Go-Assistenz, Einparkhilfe

oder Überwachung des „toten Winkels“. Diese wurden bereits eingeführt oder befinden sich derzeit in der Entwicklung. Abgesehen vom Fahrkomfort wird aber auch das Sicherheitsniveau durch derartige Systeme gesteigert, da sich der Fahrer besser auf den Straßenverkehr konzentrieren kann.

Kommt es trotz allem zu einem Unfall, so sorgen in modernen Fahrzeugen unter anderem wirkungsvolle, technische Systeme wie Airbags, aktive Kopfstützen und Gurtstraffer für den Schutz der Fahrzeuginsassen. Die Auslösung der einzelnen Schutzsysteme muss dabei in wenigen Sekundenbruchteilen erfolgen, da eine Kollision beispielsweise beim Airbag erst nach dem Aufprall detektiert wird. Großes Potenzial für die Steigerung der Effizienz solcher Systeme besteht deshalb in der zusätzlichen Auswertung der Daten umfeldvermessender Sensorik. Sie ermöglichen es, einen bevorstehenden Zusammenstoß frühzeitig zu erkennen. Außerdem lassen sich der Kollisionspunkt und die Richtung des Unfallgegners bestimmen. Mit diesen zusätzlichen Informationen können Schutzmaßnahmen deutlich gezielter und somit erheblich wirkungsvoller durchgeführt werden.

Neben den Sicherheitsmaßnahmen für die Fahrzeuginsassen kommt auch dem Schutz schwächerer Verkehrsteilnehmer wie Fußgängern und Radfahrern eine sehr große Bedeutung zu. Da sie selbst über keine eigenen Schutzvorrichtungen verfügen, müssen künftige Kraftfahrzeuge so gestaltet werden, dass im Falle einer Kollision Personenschäden vermieden werden oder möglichst geringfügig ausfallen. Wirksamen Schutz versprechen in diesem Zusammenhang technische Systeme, die bei einer Kollision aktiv die Aufprallenergie reduzieren.

Zur Umsetzung effektiver Schutzmechanismen ist jedoch eine zusätzliche Kenntnis über die Art des Unfallgegners notwendig. Neben der Fragestellung nach einer bevorstehenden Kollision muss deshalb auch geklärt werden, ob es sich dabei um ein Kraftfahrzeug oder eventuell um einen schwächeren, speziell zu schützenden Verkehrsteilnehmer handelt. Die Sensorik, mit der die Fahrzeugumgebung vermessen wird, muss also zusätzlich anhand der empfangenen Signale jedem detektierten Objekt einen charakteristischen Typ zuordnen.

Wie bereits erwähnt finden sehr häufig Radarsysteme bei den oben beschriebenen neuartigen Fahrerassistenz- und Sicherheitskonzepten für Kraftfahrzeuge Verwendung. Es stellt sich deshalb die Frage, inwieweit eine Zuordnung unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer zu bestimmten Objektklassen mithilfe von Radarechosignalen möglich ist. In dieser Arbeit werden für diese Klassifikationsaufgabe ein Lösungsansatz für zwei unterschiedliche Automobilradarsysteme untersucht und die Ergebnisse vorgestellt.

# Kapitel 2

## Sensorik für Fahrzeuganwendungen

Für viele Fahrerassistenz- und Sicherheitsanwendungen ist eine zuverlässige Vermessung aller Objekte innerhalb des durch die Applikation definierten Erfassungsbereichs die Grundlage für ein gut funktionierendes Gesamtsystem. Dies gilt auch für die hier betrachteten Systeme zur Überwachung des Gleisbereichs vor einem Triebfahrzeug mit einem Multisensorsystem und zur Vermessung und Klassifikation der Objekte in der Umgebung eines Kraftfahrzeugs mit Radarsensorik.

Die Kombination aus bewegtem Beobachter, sich bewegenden Objekten und einem ständig variierenden Umfeld machen Aufgaben aus dem Bereich der Fahrzeugapplikationen jedoch zu den anspruchsvollsten Sensoranwendungen. Für diese Aufgabe gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher technischer Lösungen, die sich jeweils im physikalischen Messprinzip und in den Signalverarbeitungstechniken unterscheiden. Es wird deshalb zunächst die Aufgabe unabhängig vom spezifisch ausgewählten Sensor definiert.

### **2.1. Anforderungen an die Sensorik**

Gerade vor dem Hintergrund sicherheitsrelevanter Anwendungen soll die Sensorik in der Lage sein, die Objekte im gesamten Beobachtungsbereich zu jeder Zeit und unter allen Witterungsbedingungen zuverlässig zu erfassen. Zusätzlich müssen entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung sämtliche Ziele in Position und Geschwindigkeit in extrem kurzer Zeit präzise vermessen werden. Hieraus lassen sich die folgenden grundsätzlichen Anforderungen für die Sensorik ableiten:

- Hohe Messwiederholrate  $f_{\text{Mess}}$
- Große Reichweite bzw. großer eindeutiger Entfernungsmessbereich  $R_{\text{max}}$
- Entfernungsmessung  $R$  im Bereich  $0 \cdots R_{\text{max}}$  mit hoher Genauigkeit
- Relativgeschwindigkeitsmessung  $v_{\text{rel}}$  im Bereich  $v_{\text{min}} \cdots v_{\text{max}}$  mit hoher Genauigkeit

- Winkelmessung  $\varphi$  mit hoher Genauigkeit
- Hohe Detektionswahrscheinlichkeit  $P_D$
- Geringe Falschalarmwahrscheinlichkeit  $P_{Fa}$

Die oben beschriebenen Anforderungen beziehen sich zunächst auf die in Einzelzielsituationen erreichbare Messgenauigkeit. Darüber hinaus spielt die Mehrzielfähigkeit der Sensoren in den hier diskutierten Anwendungsbereichen eine wichtige Rolle. Von den Sensoren wird deshalb zusätzlich gefordert, dass sie mehrere Objekte in mindestens einer der betrachteten Koordinaten (Entfernung, Winkel oder Geschwindigkeit) auflösen. Die hier getroffenen Aussagen für die Positionsinformation in der polaren Darstellung  $R$  und  $\varphi$  gilt entsprechend für Sensorsysteme, die in kartesischen Koordinaten messen.

Mit diesem Anforderungskatalog ist ein Sensorsystem aus messtechnischer Sicht spezifiziert. Neben den rein messtechnischen Parametern müssen außerdem weitere Eigenschaften wie beispielsweise eine gute Allwetter-Einsatzfähigkeit, ein geringes Einbauvolumen, ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis, eine hohe Störfestigkeit und eine hohe Systemlebensdauer erfüllt sein. Im Automobilbereich werden schon seit einigen Jahren Erfahrungen mit entsprechenden Sensorsystemen gesammelt. Die verschiedenen verfügbaren Systeme basieren auf unterschiedlichen Technologien. Sie lassen sich in erster Linie in aktive und passive Sensorik unterteilen.

## 2.2. Aktive Sensorik

Sensoren, die selbst ein Signal aussenden, werden als aktiv bezeichnet. Die aus der Streuung und den Reflexionen an zu vermessenden Zielobjekten resultierenden Echos werden empfangen und ausgewertet. Sensorik dieser Kategorie unterscheidet sich in erster Linie durch die verwendete Wellenlänge, welche die physikalischen Randbedingungen definiert.

### 2.2.1. Radar

Das aus dem englischen stammende Akronym Radar = **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging beschreibt mikrowellenbasierte Messtechnik. Bei dieser Technologie werden elektromagnetische Wellen mit einer bestimmten Trägerfrequenz als Puls oder als frequenzmoduliertes Signal gesendet. Abhängig von der verwendeten Sendesignalform können anhand von Laufzeit und Dopplerverschiebung des Echosignals Entfernung und Relativgeschwindigkeit eines detektierten Objekts bestimmt werden.

Die für Aufgaben der Fahrzeugumfeldvermessung geeigneten Radare wurden im Allgemeinen für Anwendungen im Automobilbereich entwickelt. Sie arbeiten gewöhnlich mit einer Sendefrequenz

von 24 oder 77 GHz. Bedingt durch eine limitierte Sendeleistung sind die maximale Reichweite und die Größe des zu vermessenen Winkelbereichs gegensätzliche Designparameter. Man unterscheidet deshalb entsprechend der Reichweite für die verschiedenen Verwendungszwecke zwischen Nah- und Fernbereichsradaren. Von Nahbereich spricht man, wenn die maximale Reichweite kleiner ist als 50 m. Im anderen Fall handelt es sich um Fernbereichsradare.

Eine Besonderheit im Nahbereich ist die Verwendung von mehreren Radaren als Netzwerk. Die hierfür benutzten Nahbereichssensoren verfügen im Azimutwinkel über einen großen Erfassungsbereich. So können mit derartigen Systemen Objekte flächendeckend und sehr genau bis direkt vor das Fahrzeug vermessen werden. Radare für den Fernbereich arbeiten im Allgemeinen mit einer Sendefrequenz von 77 GHz. Der Antennenöffnungswinkel von Fernbereichsradaren wird sehr eng gewählt und ist damit für die Erkennung weit entfernter Hindernisse ausgelegt. Die Auslegung des einzelnen Radarsystems ist also abhängig vom gewünschten Erfassungsbereich, der durch die jeweilige Applikation definiert wird.

Gegenüber allen anderen alternativen Sensorsystemen haben Radarsensoren für den Einsatz in Straßenfahrzeugen und Eisenbahnen den Vorteil, dass sie bei allen Sichtverhältnissen und Wetterbedingungen in der Lage sind, zuverlässige Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessungen durchzuführen. Eine grundsätzliche Einschränkung der Radarmesstechnik liegt aufgrund der verhältnismäßig kleinen Apertur der verwendeten Antennen in der limitierten Fähigkeit, die Winkel zu Zielobjekten mit hoher Präzision messen zu können. Charakteristische Zielmerkmale wie Länge, Höhe und Breite eines detektierten Objekts lassen sich mit einem Radar ebenfalls nur schwer erfassen.

Die einzelnen Radarsysteme unterscheiden sich neben der Größe des Beobachtungsbereiches zusätzlich durch die verwendete Sendesignalform. Man unterscheidet dementsprechend Pulsradare und frequenzmodulierte Radarsensoren. Des Weiteren gibt es verschiedene Verfahren zur Bestimmung des Azimutwinkels.

### 2.2.1.1. Pulsradare

Beim Pulsradarverfahren werden kurze Sendepulse einer bestimmten Trägerfrequenz mit definiertem Pulsabstand und Pulsbreite abgestrahlt (siehe Abbildung 2-1). Wird der Puls von einem Objekt reflektiert, so wird das Reflexionssignal vom Radar wieder empfangen und damit die Laufzeit bestimmt. Ausgehend von einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Pulses lässt sich durch Messung der Laufzeit  $\tau$  entsprechend Gleichung (2-1) die Entfernung  $R$  zu einem detektierten Objekt bestimmen.

$$R = \frac{c}{2} \cdot \tau \quad (2-1)$$



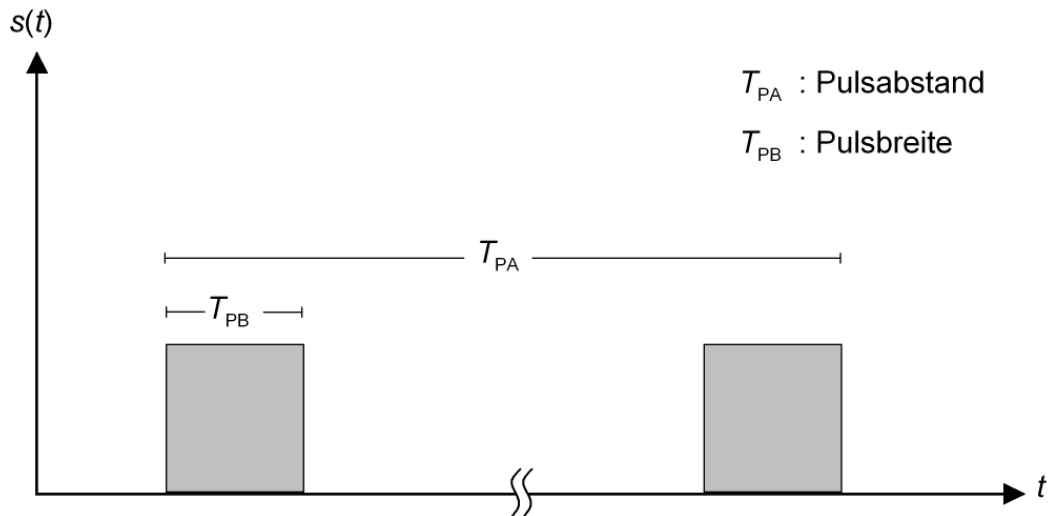


Abbildung 2-1: Typische Sendesignalform für ein Pulsradar

Als Entfernungsauflösung  $\Delta R$  wird der minimale Distanzunterschied von zwei Objekten bezeichnet, in dem diese Ziele noch getrennt detektiert werden können. Beim Pulsradar wird die Entfernungsauflösung durch die Pulsbreite  $T_{PB}$  bestimmt. Wenn zwei Ziele den radialen Abstand  $\Delta R$  voneinander haben, wird zunächst die Reflexion des näher liegenden Zieles vom Radar empfangen. Die Reflexion des zweiten Zieles beginnt um  $2 \cdot \Delta R/c$  verzögert. Damit sie von der Reflexion des ersten Zieles getrennt erkannt wird, muss also  $2 \cdot \Delta R/c > T_{PB}$  sein. Die Entfernungsauflösung beträgt demnach

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot T_{PB} . \quad (2-2)$$

Der gewünschte bzw. mögliche eindeutige Entfernungsmessbereich eines Pulsradarsystems wird durch die Pulsfolgefrequenz  $PRF$  (engl.: Pulse Repetition Frequency) bzw. den Pulsabstand  $T_{PA}$  limitiert. Um Mehrdeutigkeiten beim Empfang zu vermeiden, müssen erst alle Echos eines Pulses eingetroffen sein, bevor ein neuer Puls ausgesandt wird. Die Entfernungseindeutigkeit ergibt sich somit zu

$$R_{\max} = \frac{c}{2} \cdot T_{PA} = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{PRF} . \quad (2-3)$$

Die Entfernungsmessgenauigkeit  $\delta R$  hingegen bezieht sich nur auf ein einzelnes Ziel und ist umso größer, je höher der Signal-Störabstand ( $S/N$ ) ist. Für ein hohes  $S/N$  wird in der Literatur [Lud 02] als Richtwert für die Schätzgenauigkeit ein Wert in der Größe von etwa 10% der Auflösung angegeben. Es gilt folgende Proportionalität:

$$\delta R \sim \frac{c}{2} \cdot T_{PB} \quad (2-4)$$

### 2.2.1.2. Frequenzmodulierte Dauerstrichradare

Dauerstrichradare senden und empfangen im Gegensatz zu Pulsradaren kontinuierlich ein Signal. Es erfolgt also keine Umschaltung zwischen Sende- und Empfangsphase. Diese Systeme werden dementsprechend auch als CW-Radare (Continuous Wave) bezeichnet.

#### *Linear frequenzmodulierte Dauerstrichradare (LFMCW)*

Zur Umfeldvermessung von Fahrzeugen wird häufig eine gleichzeitige Messung von Entfernung und Geschwindigkeit für alle Objekte im Erfassungsbereich benötigt. Um dies zu ermöglichen, wird bei CW-basierten Messverfahren oft das Sendesignal über einen definierten, festen Frequenzbereich (Frequenzhub)  $f_{\text{Hub}}$  linear moduliert. Diese linear modulierten, sich periodisch wiederholenden Signalblöcke werden als Chirps bezeichnet. In Abbildung 2-2 ist dieser Sachverhalt beispielhaft für ein Sendesignal aus einer ansteigenden (Upchirp) und einer fallenden (Downchirp) Signalrampe dargestellt.

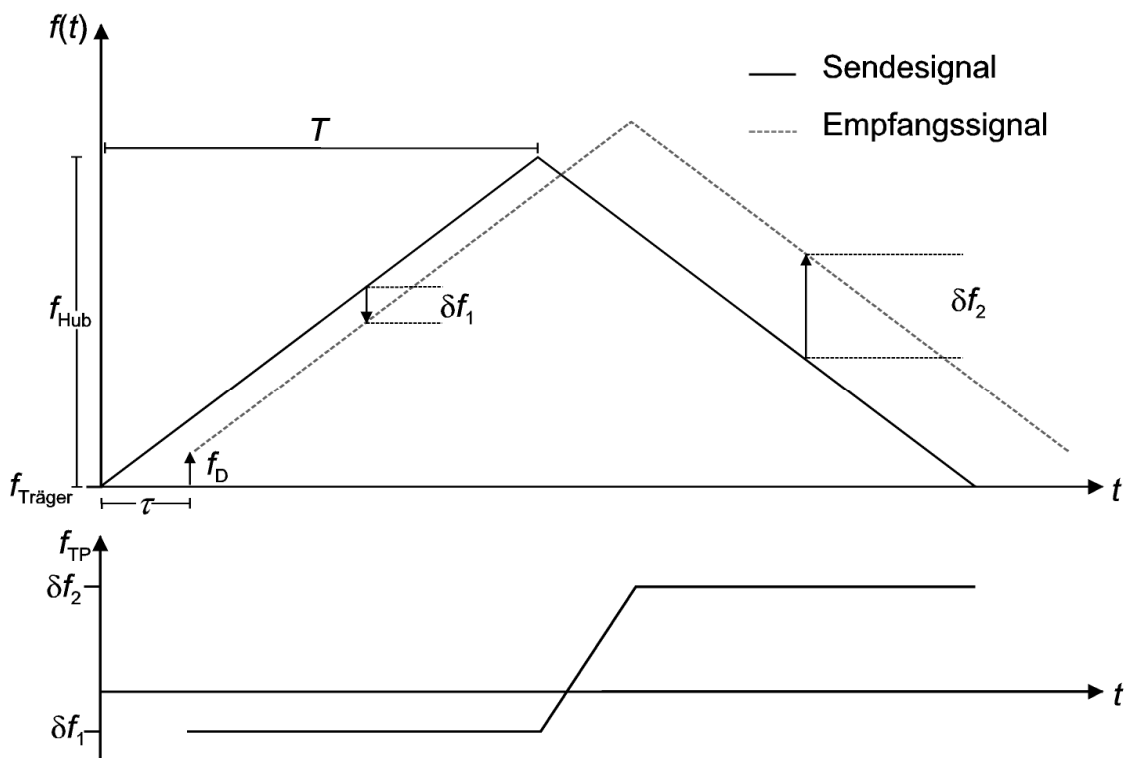


Abbildung 2-2: Beispiel für das Sende- und Empfangssignal eines linear frequenzmodulierten Dauerstrichradars