

Ramona Behrendt

# Radarsensor für ein Verkehrs- beobachtungssystem



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



## Radarsensor für ein Verkehrsbeobachtungssystem





# Radarsensor für ein Verkehrsbeobachtungssystem

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Ramona Behrendt

aus  
Buxtehude

2018



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2018

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Hermann Rohling

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Arne Jacob

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Februar 2018

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9759-2

eISBN 978-3-7369-8759-3



## Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei dem Betreuer dieser Arbeit Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Hermann Rohling bedanken, der es mir ermöglicht hat, mich mit diesem sehr spannenden Thema eingehend zu befassen. Dabei hatte er immer ein offenes Ohr für neue Herausforderungen und war stets bereit spannende Diskussionen zu führen. Gleichzeitig waren sein Interesse, seine Ermutigungen und die motivierenden Ansprachen ein großer Grund für das erfolgreiche Gelingen dieser Arbeit.

Weiterhin möchte ich Prof. Dr.-Ing. Arne Jacob für die Übernahme des Zweitgutachtens und seine offene, fröhliche und konstruktive Art sowie Prof. Dr. rer. nat. Ernst Brinkmeyer für den Vorsitz des Prüfungsausschusses danken.

Zusätzlich möchte ich mich bei meinen Kollegen bedanken, die stets zu mir gehalten haben und bedanke mich, dass mit euch alles stets etwas einfacher war. Besonders bedanken möchte ich mich dabei bei Dipl.-Ing. Marc Behrens, der sich im besonderen Maße Zeit genommen hat, um mit mir viele fachliche Diskussionen zu führen und technische Hintergründe zu erläutern.

Ein großer Dank gilt auch allen meinen Freunden. Hervorheben möchte ich dabei Dr. rer. nat. Stefanie Neske, Dipl.-Ing. Stephan Bechstedt und M.Sc. Nike Walter – ihr seid die Besten. Vielen Dank, dass ihr euch die Zeit genommen und die Mühe gemacht habt, die Arbeit Korrektur zu lesen und konstruktiv mitzuwirken. Zusätzlich möchte ich mich für eure stets motivierende Unterstützung herzlichst bedanken. Ebenfalls gilt



Dank den Auflaufauffülllöffeln sowie den Handballern fürs kontinuierliche Daumendrücken und Ablenken.

Ein Dank gebührt ebenfalls Ulrike und Dipl.-Ing. Bernd Thies für die Aufmunterung und die organisatorische Hilfe, sowie dafür, dass ich mich bei euch immer wie zu Hause fühlen darf. Zusätzlich natürlich dafür, dass ihr Borana und Sona mit mir teilt, denen ich auch für ihre ganz spezielle Art der Ablenkung danken möchte.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Mutter und Rechtschreibfee Brigitte Behrendt sowie meiner Schwester Bianca Behrendt bedanken, dafür dass ihr immer an mich geglaubt habt und immer da seid, wenn ich euch brauche. Ein großes Dankeschön auch an meinen Vater Dipl.-Ing. Henry Behrendt, der mich schon mit 8 Jahren meinen ersten Schaltschrank verdrahten lassen hat und trotzdem nicht wollte, dass ich Elektrotechniker werde. Ich bin sicher, du wärst sehr stolz auf mich.

Am meisten jedoch möchte ich mich bei meinem Freund Dipl.-Ing. Sascha Thies bedanken, ohne dessen Geduld, ständige Unterstützung und kontinuierliche Aufmunterung diese Arbeit wahrscheinlich nie entstanden wäre. Vielen Dank für deinen Rückhalt, deine Sicherheit, dein Interesse und deine bedingungslose Liebe.

Braunschweig, Februar 2018

Ramona Behrendt

*Was wir im Leben am meisten brauchen, ist ein Mensch,  
der uns zwingt, das zu tun, was wir können.*

– Ralph Waldo Emerson



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Straßenverkehr .....</b>	<b>3</b>
2.1	Infrastruktur.....	3
2.1.1	Straßen .....	4
2.1.2	Kreuzungen.....	4
2.2	Verkehrsteilnehmer .....	5
2.3	Modal Split.....	5
2.4	Fahrzeugklassen.....	6
<b>3</b>	<b>Verkehrsbeobachtung .....</b>	<b>9</b>
3.1	Merkmale.....	10
3.2	Im Straßenverkehr eingesetzte Sensoren.....	11
3.2.1	Induktionsschleifen .....	11
3.2.2	Lasersensoren.....	12
3.2.3	Radarsensoren.....	12
3.2.4	Videokamerasystem .....	13
3.3	Sensoren und zu erfassende Merkmale .....	14
<b>4</b>	<b>Applikationen in der Verkehrsbeobachtung .....</b>	<b>15</b>
4.1	Beobachtung einzelner Fahrzeuge .....	15
4.1.1	Geschwindigkeitskontrollen .....	15
4.1.2	Rotlichtüberwachung .....	16



4.1.3	Sonderspurüberwachung .....	16
4.2	Statistische Erhebungen über eine Allgemeinheit der Fahrzeuge .....	17
4.2.1	Verkehrsflussmessungen.....	18
4.2.2	Kreuzungsüberwachung und -steuerung .....	19
4.3	Sensoren und Applikationen.....	20
<b>5</b>	<b>Radartechnik .....</b>	<b>23</b>
5.1	Radartechnische Messgrößen und Anwendungsprinzip .....	24
5.1.1	Definitionen .....	26
5.1.2	Messung der Entfernung .....	26
5.1.3	Messung der radialen Geschwindigkeit .....	27
5.1.4	Messung des Azimutwinkels .....	31
5.2	Sendesignalformen .....	35
5.2.1	Pulsradar.....	35
5.2.2	Dauerstrichradar.....	38
5.2.3	Linear frequenzmoduliertes Radar.....	39
5.2.4	Frequenzumtastendes Radar .....	44
5.2.5	Linear moduliertes frequenzumtastendes Radar.....	46
5.2.6	Weitere Sendesignalformen.....	48
5.3	Detektion .....	49
5.3.1	CFAR-Detektor .....	54
<b>6</b>	<b>Tracking.....</b>	<b>59</b>
6.1	Bewegungsmodelle.....	62
6.2	Initialisierung.....	65
6.3	Filterung mit Prädiktion und Update .....	67



6.3.1	$\alpha$ - $\beta$ -Filter .....	67
6.3.2	Kalman-Filter .....	70
6.3.3	Extended-Kalman-Filter .....	76
6.3.4	Unscented-Kalman-Filter .....	77
6.4	Assoziation .....	80
6.5	Vergleichende Untersuchung der Kalman-Filter .....	83
<b>7</b>	<b>Tracking anhand von bekannten Umgebungsdaten .....</b>	<b>93</b>
7.1	Vorwissen über den Ausrichtungswinkel.....	94
7.2	Schätzen der Beschleunigung mit Vorwissen .....	106
<b>8</b>	<b>Umgebungsdaten für das Vorwissen .....</b>	<b>117</b>
8.1	Umgebungsraster.....	118
8.2	Erkennung der Fahrspuren .....	121
8.2.1	Spurfindungsalgorithmus .....	121
8.2.2	Spurfindungsverfahren von mehreren Fahrspuren .....	128
8.2.3	Erfassung der Fahrtrichtung .....	129
8.2.4	Kreuzende Fahrspuren .....	130
8.3	Extraktion des Vorwissens aus der gefundenen Fahrspur .....	132
8.4	Integration des Vorwissens in das Tracking.....	134
<b>9</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>139</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>





# 1 Einleitung

Der Verkehr auf den Straßen nimmt immer weiter zu. Alleine zwischen 2015 und 2016 wuchs die Anzahl der in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge um 1,7 % auf 54,6 Millionen [Sta17]. Neben anderen Ursachen führte diese Entwicklung dazu, dass die Gesamtfahrleistung in Deutschland im genannten Zeitraum um 1,8 % anstieg [Bun16] und die erfassten Stautunden sowie Staukilometer um gut 20 % zugenommen haben [ADA17].

Diese Daten können und müssen durch eine umfangreiche Verkehrsbeobachtung ermittelt werden, denn mit ihnen wird die nötige Basis für weiterführende Forschung im Verkehrsbereich gelegt. Zusätzlich zeigen diese Zahlen, wie wichtig es ist, den Verkehr kontinuierlich zu analysieren, um beispielweise den Bedarf des Straßenausbaus zu ermitteln.

Gleichzeitig zeigt der Anstieg der jährlichen Fahrleistung, dass es immer wichtiger wird, den Straßenverkehr zu beaufsichtigen und direkt steuernden Einfluss auf die Verkehrsströme zu nehmen. So können Verkehrsleitschilder bei dichtem Verkehr schneller eine Umleitung empfehlen und den Verkehrsfluss entsprechend lenken, um weiteren Stau zu vermeiden.

In dieser Arbeit werden aktuelle Möglichkeiten der automatisierten Verkehrsbeobachtung aufgezeigt. Der Straßenverkehr besitzt mehrere Merkmale, die mit einer solchen erfasst werden können und die für viele Applikationen zur Verfügung stehen müssen.



Eine von diesen Applikationen ist die Steuerung einer Lichtsignalanlage, so dass möglichst viele Fahrzeuge eine Kreuzung in möglichst kurzer Zeit passieren können und dementsprechend auch weniger Fahrzeuge warten müssen. Hier kann der Verkehrsfluss durch die Beobachtung des Verkehrs mit entsprechender Einflussnahme deutlich verbessert werden.

Die Radartechnik ist im Vergleich zu anderen Messsystemen sehr gut geeignet, um in einer Verkehrsbeobachtung benutzt zu werden. Ein Radarsensor misst zuverlässig und genau die Entfernung  $r$ , den azimutalen Winkel  $\varphi$  und die radiale Geschwindigkeit  $v_r$  von Zielen. Eine zusätzliche Stärke ist seine Allwetterfähigkeit. Viele andere Systeme haben Schwierigkeiten, bei Dunkelheit, Nebel, Regen oder Schnee weiterhin verlässliche Daten zu liefern und die Verkehrsbeobachtung und -steuerung auch unter solchen Bedingungen zu gewährleisten. Ein Radarsensor hingegen wird von den äußeren Wettereinflüssen nur geringfügig beeinflusst.

Da jedoch die Kreuzungen vor allem in großen Städten immer komplexer werden, ist es für den Trackingalgorithmus im Radarsensor auch bei guten Bedingungen eine Herausforderung, sämtliche Fahrzeuge in Kreuzungssituationen richtig zu verfolgen. Dies gilt insbesondere in Straßensituationen mit engen Kurvenbahnen.

Der Radarsensor selbst gewinnt, während er den Verkehr auf einer Kreuzung beobachtet, laufend Daten über die Position und die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Damit ist es möglich, Informationen über die Lage und Ausrichtung der Fahrspuren im Sichtbereich des Radarsensors zu gewinnen. Es wird dargestellt, wie diese Informationen über die Fahrspuren gewonnen werden, und untersucht, wie sehr das Tracking davon profitieren kann. Mit der Annahme, dass weitere Fahrzeuge denselben Fahrspuren folgen, kann das Tracking verbessert werden, so dass Radarobjekte auch in Kurvenfahrten besser verfolgt werden können.

Dieses ist hilfreich, um sämtliche Fahrzeuge in unterschiedlichen Verkehrssituationen mit dem Radarsensor zu erkennen und zu verfolgen. Durch diese Technik der Verkehrsbeobachtung sollen potentielle Stausituationen im Voraus erkannt und durch entsprechende Verkehrsleitetechniken vermieden werden, um den Fahrzeugdurchsatz auf der Straße zu erhöhen.



## 2 Straßenverkehr

Laut Duden ist Verkehr die "Beförderung, Bewegung von Fahrzeugen, Personen, Gütern, Nachrichten auf dafür vorgesehenen Wegen". Dabei gibt es verschiedene Arten von Verkehr, wie den Schiffs-, Flug- und Straßenverkehr, wobei in dieser Arbeit nur auf den Straßenverkehr eingegangen werden soll. Die vorgesehenen Wege sind hierbei die Straßen, auf denen Fahrzeuge bewegt und Personen und Güter befördert werden.

### 2.1 Infrastruktur

Die im Straßenverkehr benutzte Infrastruktur umfasst die Verkehrswege, wie Straßen, Fahrradwege und Bürgersteige, sowie alle dazugehörigen Aufbauten. Eine Straße ist zunächst ein befestigter Verkehrsweg, welcher Fahrzeugen und Fußgängern zur Fortbewegung dient. Sie ist ein Teil des Verkehrsnetzes, welches durch Kreuzungen, Kreiseln, Übergänge, Tunnel und Brücken ergänzt wird. Zusätzlich gehören Verkehrszeichen, Leitplanken sowie Lichtsignalanlagen, die zur Regelung und Lenkung des Verkehrsflusses dienen, zur Infrastruktur des Straßenverkehrs. Darin eingeschlossen sind alle Arten von Masten, die zur Anbringung von Signalen oder Schildern dienen.



### 2.1.1 Straßen

Das Straßennetz für den überörtlichen Verkehr besteht in Deutschland aus Autobahnen, Bundes-, Land-, Kreis- und Gemeindestraßen. Diese haben, Stand 2013, insgesamt eine Länge von ca. 23.4 Tsd. km [Bun15]. Die meist befahrenen Straßen im deutschen Raum sind die Autobahnen, welche im Normalfall zwischen zwei und vier Fahrspuren zusätzlich zu einem Standstreifen je Richtung haben. Den Autobahnen folgen die Bundesstraßen, welche ebenso dem überregionalen Verkehr dienen und dabei maximal 3-spurig sind, dabei jedoch meist nur eine Fahrspur je Richtung besitzen. Die etwas weniger ausgebauten Landesstraßen überbrücken mehrere Landkreise, während die kleineren Kreisstraßen Orte innerhalb eines Landkreises miteinander verbinden. Der Großteil des Straßennetzes, gemessen an der gesamten Straßenlänge, indessen besteht aus Gemeindestraßen.

### 2.1.2 Kreuzungen

Der verkehrstechnische Begriff für die umgangssprachliche Kreuzung ist Knotenpunkt. Ein solcher befindet sich dort, wo sich Verkehrswege gleicher Bauart kreuzen. Kreuzungen sind die Knotenpunkte des Verkehrsnetzes, während die Straßen die Verbindungselemente sind. Je nachdem wie hoch das Verkehrsaufkommen an einer Kreuzung ist, muss an dieser Stelle der Verkehr geregelt werden. Wenn nur wenig Verkehr vorhanden ist, wird die Regelung durch Verkehrsschilder und/oder Verkehrsregeln, wie "rechts vor links", vorgenommen. Wenn die Kreuzung größer ist und ein entsprechend hohes Verkehrsaufkommen besitzt oder keine eindeutige Vorzugsrichtung hat, werden häufig Lichtsignalanlagen zur Regelung eingesetzt, welche umgangssprachlich als Ampeln bezeichnet werden. Je besser die Regelung der Lichtsignalanlage auf die äußeren Verkehrsbedingungen abgestimmt ist, desto besser ist der Verkehrsfluss.



## 2.2 Verkehrsteilnehmer

Als Verkehrsteilnehmer wird jede Person bezeichnet, die aktiv am Straßenverkehr teilnimmt. Unterschieden werden die Verkehrsteilnehmer hauptsächlich in Fußgänger und Fahrzeugführer. Fußgänger sind Personen, die am Verkehr teilnehmen und dabei keine Verkehrsmittel benutzen, während als Fahrzeugführer solche Personen gelten, die ein Verkehrsmittel zur Fortbewegung nutzen. Dazu gehören sowohl Fahrradfahrer als auch Fahrer von Kraftfahrzeugen jeglicher Art.

## 2.3 Modal Split

Ein Modal Split zeigt die Verteilung des Verkehrs auf verschiedene Verkehrsmittel. Er wird im Normalfall für den Personentransport und den Gütertransport getrennt berechnet.

Für den Personentransport zeigt der Modal Split die Verkehrsmittelwahl von Verkehrsteilnehmern, also die Verteilung von Personen auf die verschiedenen Verkehrsmittel. Diese hängt von den Gegebenheiten der Umgebung ab. So werden beispielsweise in Großstädten mehr Strecken mit dem öffentlichen Personennahverkehr zurückgelegt als auf dem Land und dort, wo die Infrastruktur Rücksicht auf Fahrradfahrer nimmt, steigt deren Anzahl. Zusätzlich ist die Verteilung natürlich auch jahreszeitenabhängig, da zum Beispiel im Sommer mehr Motorräder unterwegs sind. Dennoch gibt der Modal Split eine gute Übersicht, welche Verkehrsmittel wie häufig genutzt werden.

Innerhalb der EU legte im Jahr 2012 im Durchschnitt jede Person mit motorisierten Fahrzeugen 12 652 km zurück [Eur14]. Mit ca. 82 % davon entfällt der Großteil der Personenbeförderung auf verschiedene Straßenfahrzeuge, wie Kraftfahrzeuge, Motorräder und Busse.

Der Modal Split im Gütertransport zeigt auf, wie die Güter anhand ihrer Masse auf verschiedene Transportmöglichkeiten verteilt werden. Dabei wurden 2012 innerhalb der EU die geleisteten Tonnenkilometer auf 3 768 Mio. tkm geschätzt [Eur14]. Hiervon



entfielen ca. 45 % auf den Straßenverkehr, der dicht gefolgt vom Schiffsverkehr den größten Anteil am Gütertransport innerhalb der EU hat.

Dadurch, dass sowohl im Personen- als auch im Gütertransport der größte Anteil der Transportleistung auf den Straßenverkehr entfällt, wird eine Beobachtung des Straßenverkehrs immer dringender notwendig, um Kapazitätsengpässe rechtzeitig zu erfassen und beheben zu können.

## 2.4 Fahrzeugklassen

Sowohl im Güter- als auch im Personentransport wird der größte Anteil auf der Straße transportiert, wofür verschiedenste Fahrzeuge genutzt werden. In manuellen Zählungen können durch das menschliche Sehen eine sehr große Zahl verschiedener Fahrzeugklassen unterschieden werden. Um diese Fahrzeuge automatisch unterscheiden zu können, werden sie in verschiedene Klassen aufgeteilt. Nach [FN12] lassen die Klassifizierungsgruppen, in denen die Kraftfahrzeuge (Kfz) jeweils in fünf bzw. acht verschiedene Fahrzeugklassen getrennt werden, eine sehr detaillierte Unterscheidung der einzelnen Fahrzeuge zu. Die Einteilung dieser Klassen wird in Tabelle 1 gezeigt. Dieser Detailgrad wird mittels automatischer Unterscheidung nur von speziellen Messsystemen erreicht.

Klassifizierungsgruppen			
1	2	5+1	8+1
Kfz	Pkw-ähnlich	Nicht klassifizierbare Kfz	Nicht klassifizierbare Kfz
		Pkw-Gruppe	Motorrad
			Pkw
			Transporter
	Lkw-ähnlich	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger
		Lkw > 3,5t ohne Anhänger	Lkw > 3,5t ohne Anhänger
		Lkw > 3,5t mit Anhänger/Sattelzug	Lkw > 3,5t mit Anhänger
			Sattelzug
Bus	Bus		

**Tabelle 1: Fahrzeugartenerfassung an Zählstellen nach Gerätetyp aus [FN12]**