

Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp



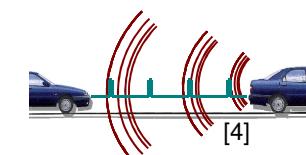
Vorlesungsübersicht

01 Einführung 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	01 Einführung 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	01 Übung Einführung 28.04.2022 – Hoffmann
02 Sensorik / Wahrnehmung I 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	02 Sensorik / Wahrnehmung I 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	02 Sensorik / Wahrnehmung I 05.05.2022 – Prof. Lienkamp
03 Sensorik / Wahrnehmung II 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	03 Sensorik / Wahrnehmung II 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	03 Übung Sensorik / Wahrnehmung II 12.05.2022 – Schimpe
04 Sensorik / Wahrnehmung III 19.05.2022 – Schimpe	04 Sensorik / Wahrnehmung III 19.05.2022 – Schimpe	04 Übung Sensorik / Wahrnehmung III 19.05.2022 – Schimpe
05 Funktionslogik / Regelung 02.06.2022 – Winkler	05 Funktionslogik / Regelung 02.06.2022 – Winkler	05 Funktionslogik / Regelung 02.06.2022 – Winkler
06 Übung Funktionslogik / Regelung 09.06.2022 – Winkler	06 Funktionale Systemarchitektur 09.06.2022 – Prof. Lienkamp	06 Aktorik 09.06.2022 – Prof. Lienkamp
07 Deep Learning 23.06.2022 – Majstorovic	07 Deep Learning 23.06.2022 – Majstorovic	07 Übung Deep Learning 23.06.2022 – Majstorovic
08 MMI 30.06.2022 – Prof. Bengler	08 MMI 30.06.2022 – Prof. Bengler	08 MMI Übung 30.06.2022 – Prof. Bengler
09 Controllability 07.07.2022 – Prof. Bengler	09 Controllability 07.07.2022 – Prof. Bengler	09 Übung Controllability 07.07.2022 – Winkle
10 Entwicklungsprozess 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	10 Entwicklungsprozess 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	10 Übung Entwicklungsprozess 14.07.2022 – Hoffmann
11 Analyse und Bewertung FAS 21.07.2022 – Feig	11 Analyse und Bewertung FAS 21.07.2022 – Feig	11 Übung Analyse und Bewertung FAS 21.07.2022 – Feig
12 Aktuelle und künftige Systeme 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	12 Aktuelle und künftige Systeme 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	12 Aktuelle und künftige Systeme 28.07.2022 – Prof. Lienkamp

Leitfragen

02 – Sensorik / Wahrnehmung I

- Wie funktionieren die verschiedenen Sensortypen?
- Welche Vor- und Nachteile besitzen die Sensortypen?
- Für welche Anwendungsfälle sind die Sensoren jeweils geeignet?
- Welche Faktoren beeinflussen die Objekt-Erkennungsgüte von aktiven und passiven Sensoren?



Sensorik / Wahrnehmung I

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

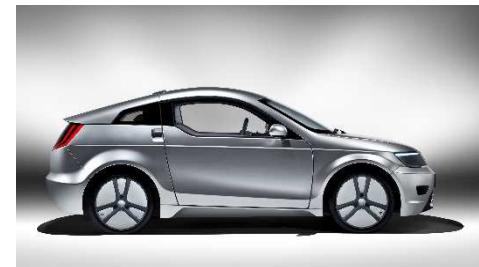
- 2 Sensorik / Wahrnehmung I
 - 2.1 Sensorkategorien
 - 2.2 Ultraschall
 - 2.3 RADAR
 - 2.4 LiDAR
 - 2.5 Kamera
 - 2.6 Vergleich



Sensorik / Wahrnehmung I
Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
(Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

- 2 Sensorik / Wahrnehmung I**
 - 2.1 Sensorkategorien**
 - 2.2 Ultraschall**
 - 2.3 RADAR**
 - 2.4 LiDAR**
 - 2.5 Kamera**
 - 2.6 Vergleich**



Sensorik

- Sensoren und Aktoren sind die elementaren Bestandteile von Fahrerassistenzsystemen
- Sensoren: Liefern die notwendigen Informationen für die FAS



Sensorik

- **Fahrdynamik-Sensoren:**
 - zum Beispiel Raddrehzahlsensoren, Beschleunigungssensoren, Lenkradwinkelsensor, Gierrate etc.
 - fahrzeugeigene Messgrößen
 - zuerst eingesetzt bei konventionellen Fahrzeugassistenzsystemen wie ABS, ESP



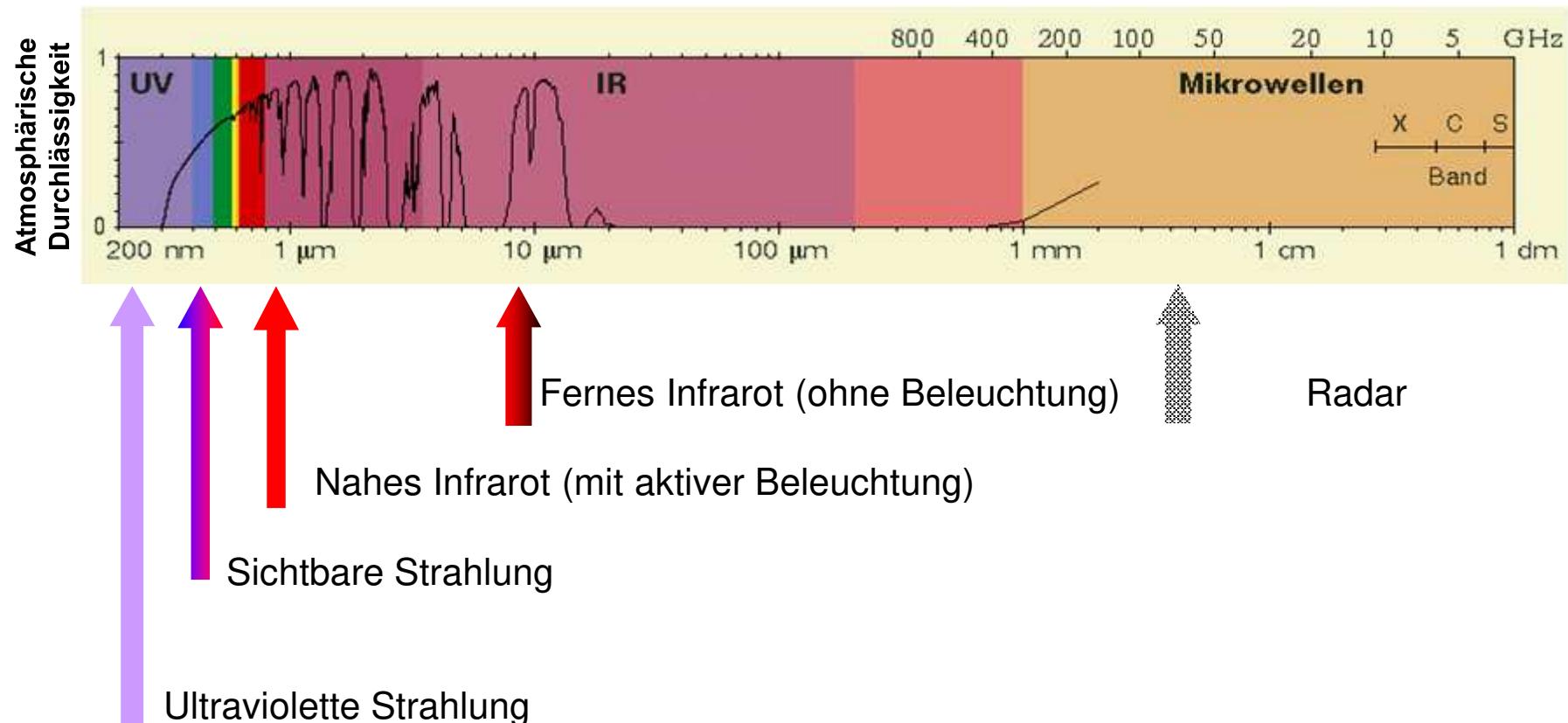
Lenkradwinkelsensor
(Land Rover Freelander) [1]

- **Umgebungserfassende Sensoren**
 - moderne FAS benötigen zusätzlich umgebungserfassende Sensoren
 - eingesetzte Technologien: Ultraschall, Radar, Laser, maschinelles Sehen



Velodyne
Puck 32MR Lidar-Sensor [2]

Spektrum der für Umfelderfassung nutzbaren elektromagnetischen Wellen



Betrachtet man die atmosphärische Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge, so sieht man, dass das für das menschliche Auge sichtbare Licht nur einen Teil des Spektrums ausmacht, für das eine atmosphärische Durchlässigkeit besteht. Daher stehen neben dem sichtbaren Spektrum für eine maschinelle Umfelderfassung weitere Bereiche zur Verfügung, wobei aber nur die Infrarotbereiche eine hinreichend große Eigenleuchtkraft besitzen, um Objekte auch ohne Beleuchtung registrieren zu können.

如果我们将大气渗透性视为波长的函数，就会发现人眼可见光只占存在大气渗透性的光谱的一部分。因此，除了可见光谱外，其他范围的光谱也可用于机器环境检测，不过只有红外范围的光谱具有足够的内在亮度，即使在没有照明的情况下也能记录物体。

Erkennbarkeit

Aktive maschinelle Erfassung

- Nur solche Objekte können erkannt werden, deren Rückstreuung hinreichend stark ist.
- Einfluss auf die Rückstreuung haben:
 - Größe des Objekts (\uparrow)
 - Entfernung (\downarrow)
 - Absorption (\downarrow)
 - Winkel zur Senkrechten bei gerichteter Reflexion (Spiegelung) (\downarrow)
 - Retroreflektivität (Tripelspiegel, Corner-Reflector, Katzenauge) (\uparrow)

- 只有背向散射足够强的物体才能被探测到。

- 对反向散射有影响：

- 物体的大小 (\uparrow)

- 距离 (\downarrow)

- 吸收 (\downarrow)

- 定向反射（镜面反射）与垂直方向的夹角 (\downarrow)

- 逆反射（三面镜、角反射镜、猫眼）(\uparrow)

Aktive Sensoren senden im Unterschied zu passiven Sensoren modulierte Strahlung aus. Die Sendestrahlung hat zumeist drei Funktionen:

- Beleuchtung der Objekte, damit eine Rückstreuung empfangen werden kann.
- Herstellen des Zeitbezugs, damit aus dem empfangenen Signal Laufzeitinformationen gezogen werden können, aus denen wiederum der Abstand ermittelt werden kann.
- Kodierung des Sendestrahls, um im Empfänger den selbst erzeugten Reflex von anderer empfangener Strahlung unterscheiden zu können. Diese Kodierung wird oftmals implizit über Pulsfolgen oder die Art der Modulation realisiert.

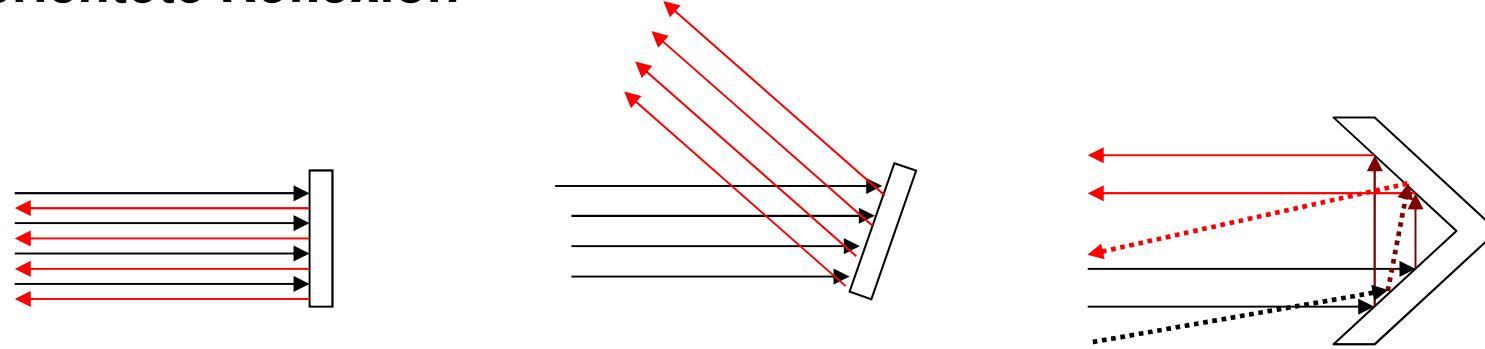
Für Ultraschall- und Lidarsensoren wird ausschließlich die nicht-kohärente Pulsmodulation eingesetzt, bei der kurze Pulse einer Trägerfrequenz ausgesandt werden. Diese Art der Modulation ist zwar auch bei Radar möglich, aber Radar bietet durch die Fähigkeit der Doppler-Frequenzverschiebung weitaus mehr Möglichkeiten zur Modulation.

Eine weitere Gemeinsamkeit aktiver Sensoren ist die Art der Wahrnehmung. Sie basiert auf Schwellwerten der reflektierten Signale, wobei Peaks sowohl im Zeit- als auch im Frequenzraum (Fourierspektrum) ermittelt werden. Diesen Peaks können Positions- oder Geschwindigkeitsinformationen zugeordnet werden, die dann als Objekthypothesen im so genannten Tracking weiterverarbeitet werden.

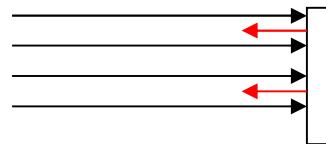
Für die Beobachtung des Fahrzeugumfelds ist die Fähigkeit der Objektseparierung ein wichtiges Kriterium. Sie beinhaltet die Mehrzielfähigkeit zur Ermittlung von mehreren Objekten in der Umgebung, z. B. mehrerer Fahrzeuge im Vorfeld. Dies gelingt umso besser, je schärfer die Objekte auseinandergehalten werden können. In Abhängigkeit vom Sensortyp kommen dafür die Kriterien Abstand, Raumwinkel, Relativgeschwindigkeit oder Kombinationen dieser Größen zur Anwendung.

Reflexionseigenschaften

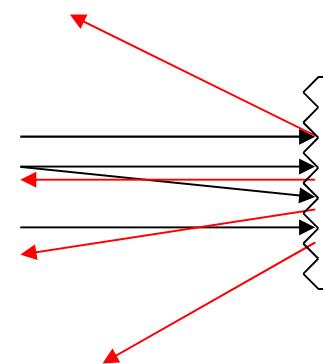
Gerichtete Reflexion



Schlechte Reflexion/Absorption



Diffuse Reflexion



Winner, TUD

Die Reflexionseigenschaften von Objekten lassen sich in drei Kategorien einteilen. Die gerichtete Reflexion spiegelt die Strahlen zurück. Der Ausgangswinkel ist immer der negative Eingangswinkel. Die Empfangsstärke von Objekten mit gerichteter Reflexion ist damit stark winkelabhängig. Eine Ausnahme stellt die 90°-Winkelanordnung (oben rechts dargestellt) dar, die dreidimensional Tripelspiegel oder Corner Reflector genannt wird. Sie reflektiert immer in die Richtung des Senders zurück. Ähnlich, wenn auch mit schwächerer Richtcharakteristik, wirken die „Katzenaugen“, also retro-reflektive Rückleuchtengläser. Die gerichtete Reflexion entsteht an glatten metallischen Oberflächen oder glatten Flächen eines Brechungssprungs. „Glatt“ bezieht sich auf die Wellenlänge der betrachteten Strahlung, denn Rauigkeiten, die deutlich kleiner als die Wellenlänge sind, stören nicht.

Absorbierende Oberflächen lassen nur wenig Rückstreuung zu. Absorption tritt auf, wenn geringe Brechungsunterschiede auftreten und die Strahlungsenergie zum großen Teil durch die Oberfläche hindurchtritt. Beispiele sind Ultraschall, der auf weiche Kleidung trifft, mm-Welle (Radar) und Schaumstoff, Licht/IR und schwarze Oberflächen jeder Art.

Die für die aktive Beobachtung günstigste Eigenschaft besitzt die diffuse Reflexion. Die diffusen Reflektoren streuen mit geringer Winkelabhängigkeit immer einen Anteil zum Beobachter zurück.

Reflexionseigenschaften ausgewählter Objekte

	Ultraschall	RADAR	Licht/IR
Lkw	+	+	+
Pkw	+	+...o	+
Motorrad	+	+...-	+...o
Fußgänger	o...-	+...o	+...-
Maschendrahtzaun	-	+	-
Fensterglas	-	-	-
Pkw mit Streusalzbelaag	+	+...o	-
Leitplanken	+	+	+...-

Winner, TUD

Reflexionseigenschaften ausgewählter Objekte – ausführlich mit zusätzlichen Eigenschaften

	Ultraschall	RADAR	Licht/IR
Lkw	++°	++°	+^R
Pkw	++...+°	++...0°	+^R
Motorrad	+	+...-	(+...0)^R
Fußgänger	0...-	+...0	++...--
Laternenpfahl	+	+	+
Maschendrahtzaun	-	+	--
Fensterglas	--	-	--
Baustellen-Lkw (verdreckt)	++°	++°	--
Pkw mit Streusalzbelag	++...+°	++...0°	-...--
Cola-Dose	+°	++/°	+...0°
Leitplanken	+	++	+^R...-
nasser trockener Beton	+	++° 0	0...- ° +...-

Indizes: ° Richtungsempfindlichkeit

^R Retroreflektoren

Winner, TUD

In der Tabelle sind einige Reflexionseigenschaften von typischen Objekten im Straßenverkehr zusammengefasst. Die Reflexionseigenschaften der mm-Wellen sind durchgängig gut in Bezug auf geringe Absorptionsverluste. Für die Reflexion reicht eine metallische Oberfläche oder ein Sprung in der Dielektrizitätskonstante. Letzterer ist bei Wasser besonders stark, so dass auch biologische Objekte erkannt werden können.

Insbesondere bei mm-Wellen und bei Ultraschall ist die Reflexion stark richtungsabhängig. Das führt zu einer sehr hohen Signaldynamik (Verhältnis von stärkstem zu schwächstem Signal) und oftmals zu Erkennungsaussetzern.

Gute Reflexionseigenschaften sind für die Umfeldbeobachtung nicht immer günstig, denn oft stammen sie von Objekten, deren Detektion gar nicht gewünscht ist, nämlich wenn sie von irrelevanten Objekten stammen. Ein anderer ungünstiger Fall guter Reflexion ist der Mehrwegeempfang über gut reflektierende Spiegelflächen.

Sensorik / Wahrnehmung I

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

- 2 Sensorik / Wahrnehmung I
 - 2.1 Sensorkategorien
 - 2.2 Ultraschall
 - 2.3 RADAR
 - 2.4 LiDAR
 - 2.5 Kamera
 - 2.6 Vergleich



Ultraschallsensoren

- basieren auf piezoelektrischem Effekt zum Aussenden und Messen von Schallwellen im Ultraschallbereich (~ 50 kHz)
- Hauptkomponente: akustischer Wandler (Kombination aus Lautsprecher und Mikrofon)
- Verwendung in der Automobilbranche seit den 1990ern in Einparkhilfesystemen
- Einbau in Fahrzeugfront und -heck
- Überdeckung der Fahrzeuggbreite mit typischerweise 4 oder 6 Sensoren

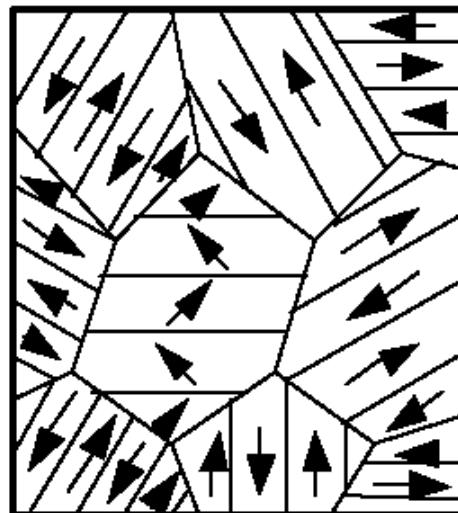


Bild: Bosch

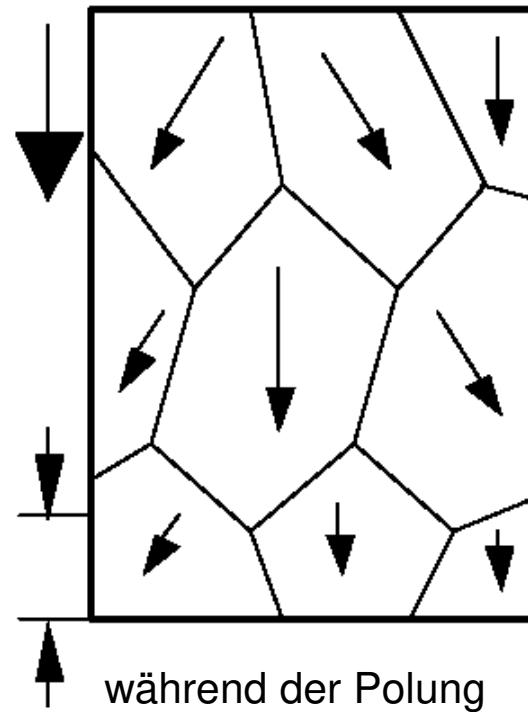


Piezoelektrische Werkstoffe

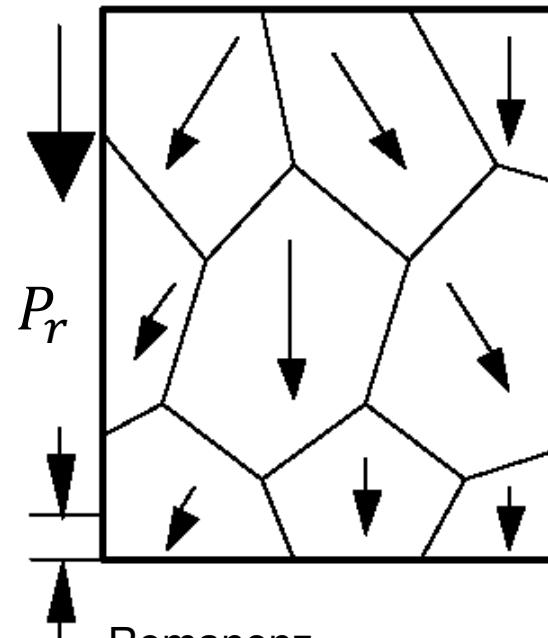
Polare Struktur von Piezokeramiken



vor der Polung



während der Polung
mit angelegtem
elektrischem Feld



P_r
Remanenz
nach der Polung

Winner, TUD nach König 2003

Ausrichtung der Bezirke

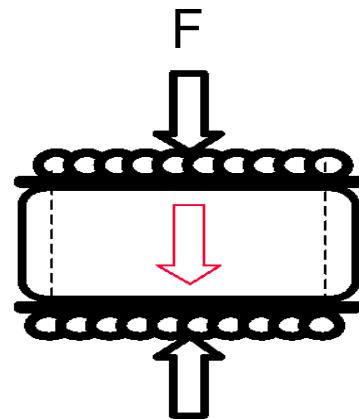
Durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Dipole des tetragonalen Gitters bilden sich spontan Bezirke mit gleicher Dipolrichtung. Aufgrund der statistischen Verteilung dieser Bezirke wirkt ein Stück eines Piezooxides nach außen hin nicht polar und ist nicht piezoelektrisch.

Bei der Polung eines Piezooxides wird das Material auf eine Temperatur oberhalb der Curietemperatur (hier typischerweise ca. 300 °C) gebracht und ein starkes elektrisches Feld angelegt. Während des Abkühlens bleibt die elektrische Spannung angelegt. Die Bezirke richten sich gleich aus und das Material erfährt eine Längenausdehnung.

Nach Abschalten des elektrischen Feldes bleiben die Bezirke ausgerichtet. Es hat sich eine remanente Polarisation ausgebildet (P_r).

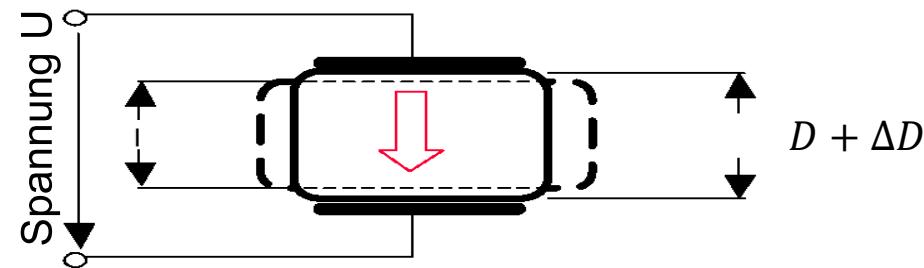
Durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes wird die Polarisation verstärkt oder abgeschwächt. Dies resultiert unter anderem in einer Längenänderung des Materials.

Piezoelektrische Werkstoffe



$$Q = d \times F$$

Ladung proportional
der Kraft



$$\Delta D = d \times U$$

Deformation proportional
der Spannung

d = piezoelektrischer Verzerrungskoeffizient

Winner, TUD nach König 2003

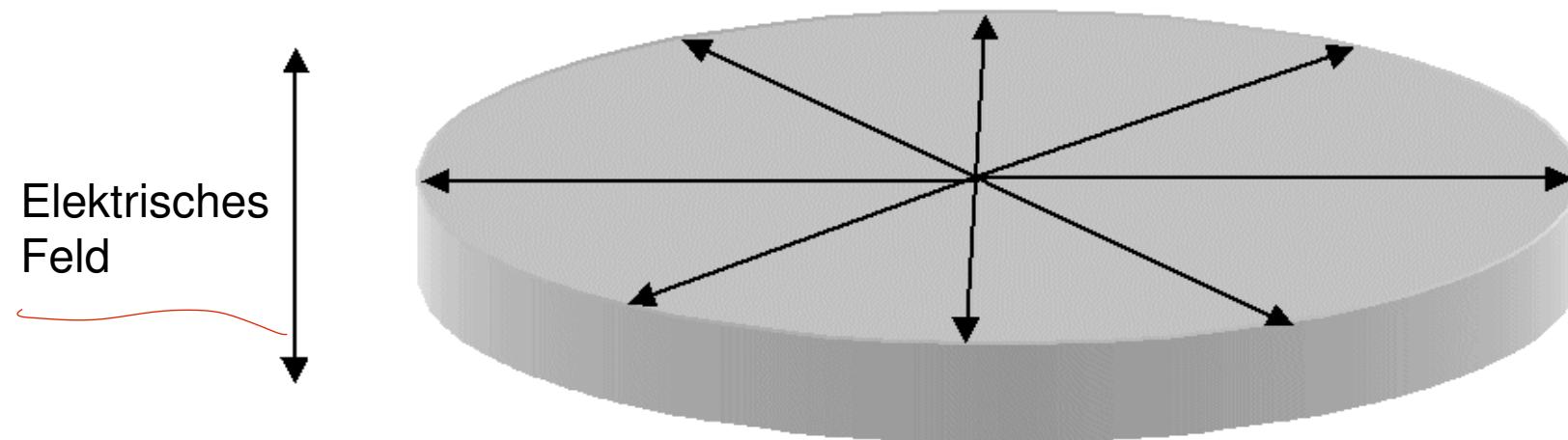
Direkter und inverser piezoelektrischer Effekt

Beim direkten piezoelektrischen Effekt führt eine Krafteinwirkung auf ein Piezooxid zu einer Änderung der Abmessungen und damit zu einer Verschiebung der einzelnen Ladungen. Die resultierende Ladung ist proportional der Kraft.

Beim inversen Effekt führt das Anlegen eines elektrischen Feldes zu einer Deformation des Piezooxides. Diese Deformation ist proportional der Spannung.

Legt man z.B. eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 40 kHz an, wird sich das Piezooxid entsprechend mit 40 kHz ausdehnen und zusammenziehen.

Beispiel: Piezokeramik für Ultraschallsensor „Bosch Park-Pilot“



Durchmesser: 7,1 mm

Dicke : 0,2 mm

Material: Blei-Zirkonat-Titanat

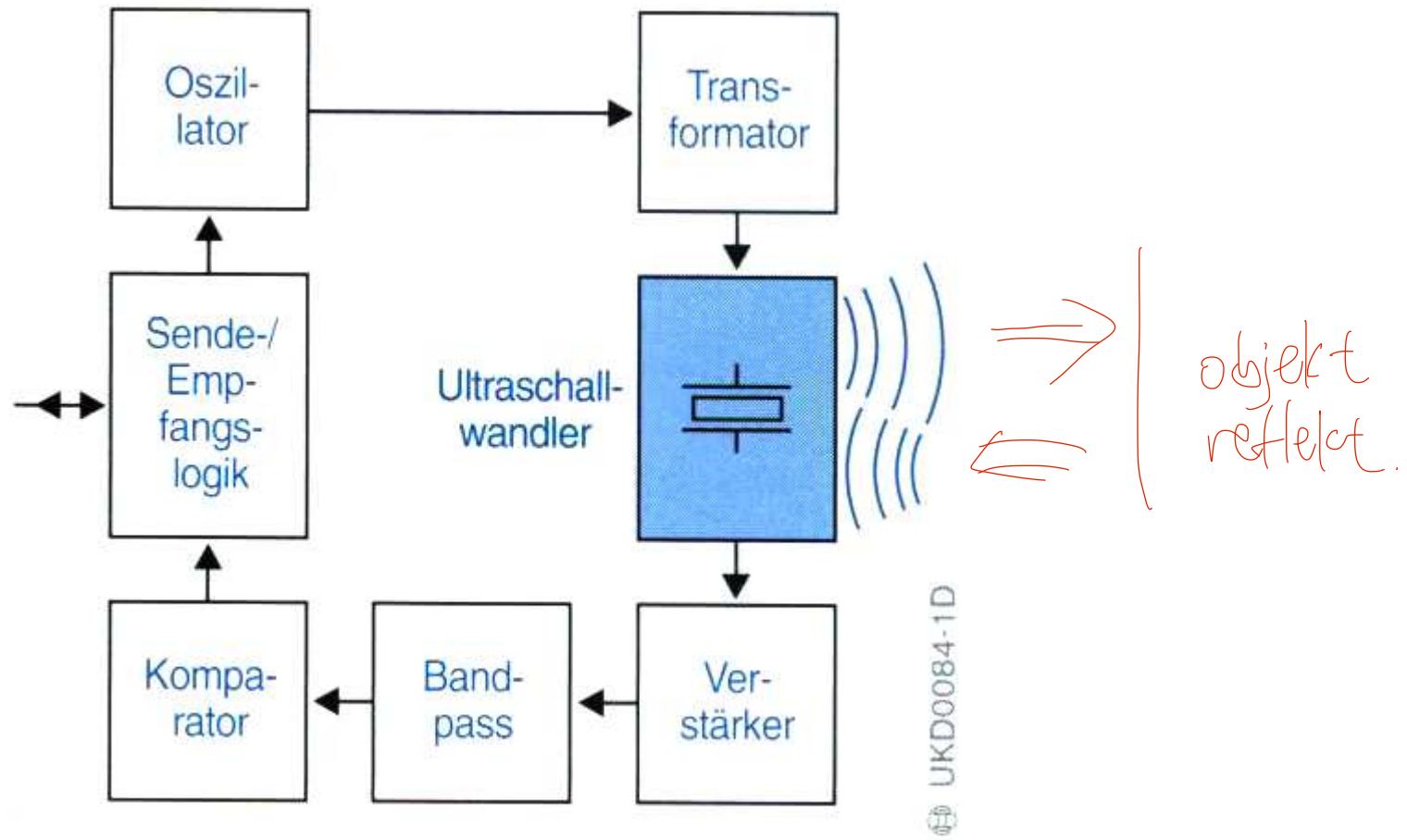
Winner, TUD nach König 2003

Ultraschallsensoren im Fahrzeug

Für Ultraschallsensoren im Fahrzeug werden dünne Piezoscheiben verwendet. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes (der Größenordnung z.B. 100-200 V) an die Piezoscheibe erfährt diese eine Änderung des Durchmessers.

Winner, TUD nach König 2003

Übersicht: Blockschaltbild



UKD0084-1D

Winner, TUD nach Bosch 2001

Messprinzip

Der Abstand r berechnet sich aus der Laufzeit t_{tof} :

$$r = \frac{1}{2} \cdot c_s \cdot t_{\text{tof}}$$

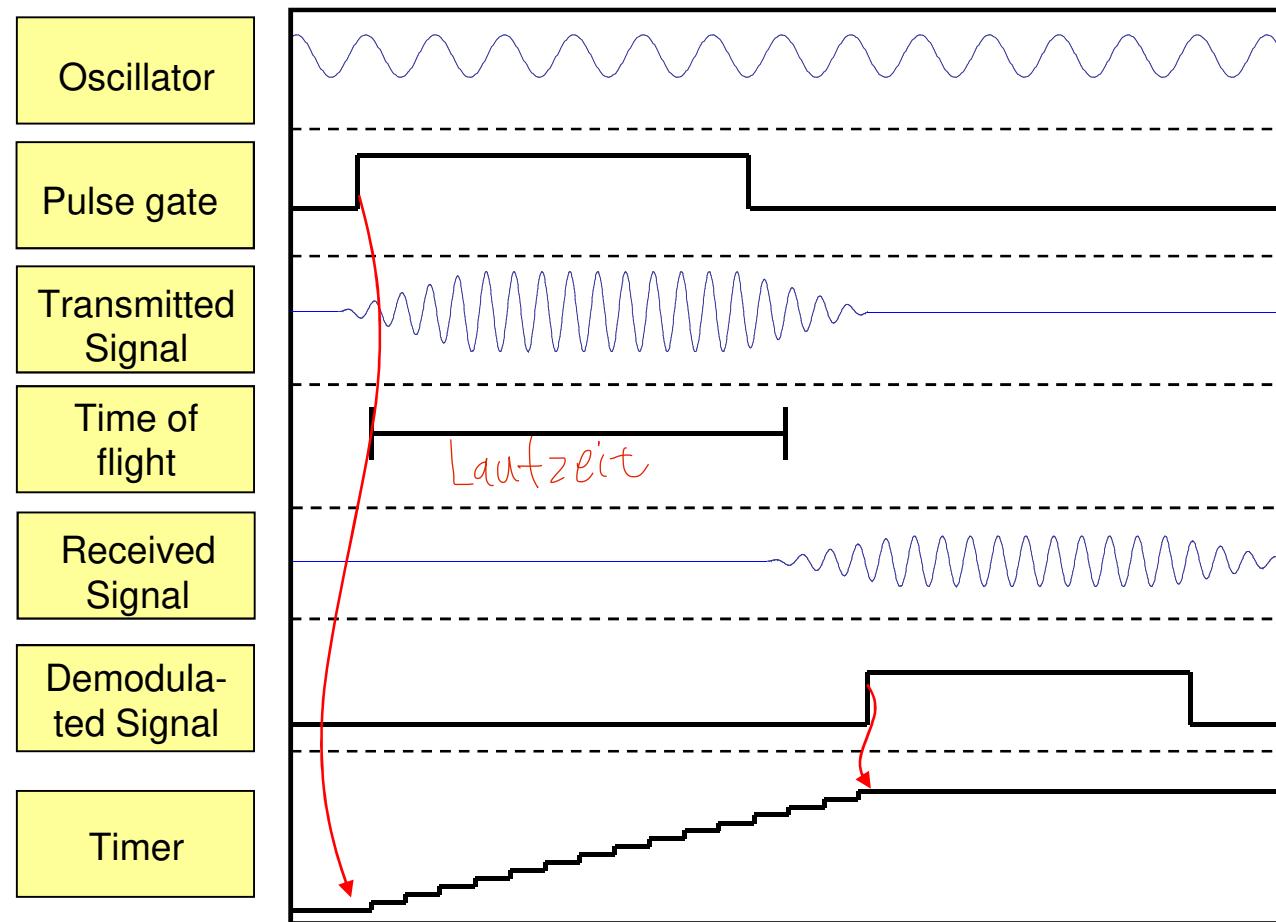
mit

- Abstand r ,
- Laufzeit (time of flight) t_{tof} ,
- Schallgeschwindigkeit im Medium c_s ,
in Luft $\approx 340 \text{ m/s}$

r	t
34 cm	2 ms
3,4 m	20 ms

Winner, TUD

Pulsmodulation

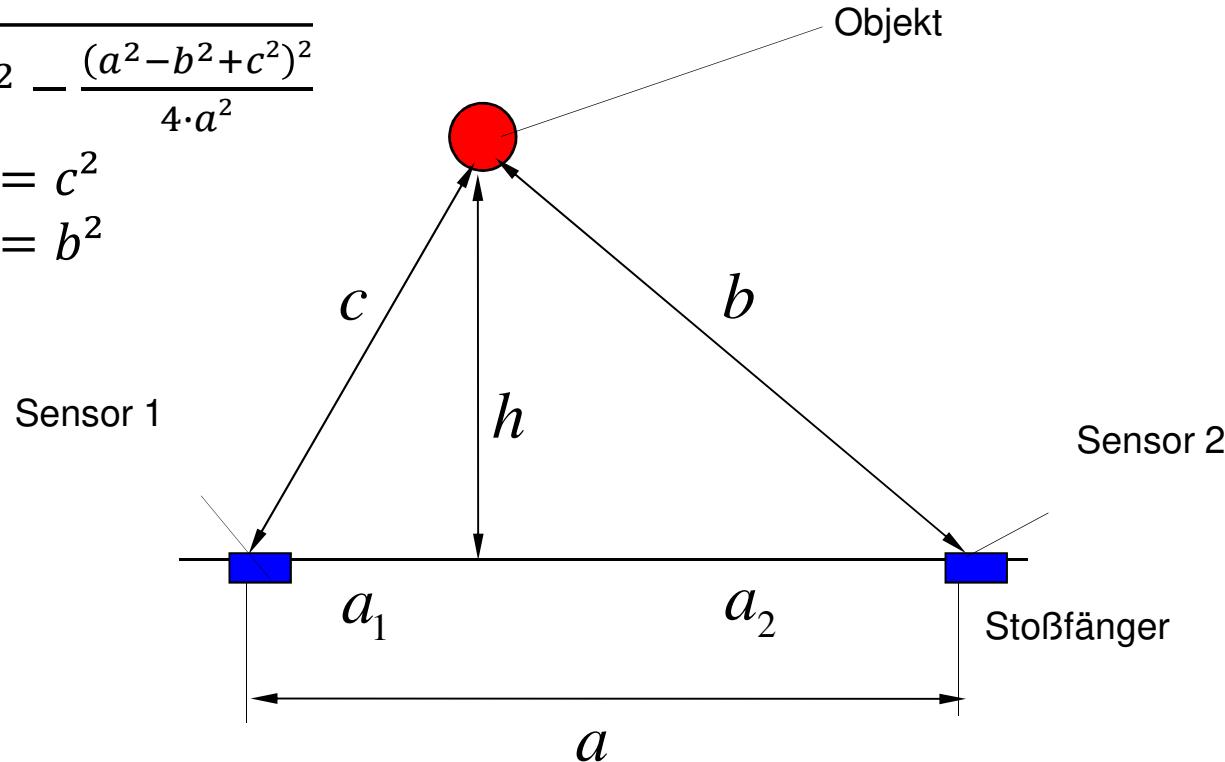


Winner, TUD

Aus dem zeitlichen Abstand zwischen Sendebeginn und dem Überschreiten einer Schwelle kann die für den Hin- und Rückweg benötigte Laufzeit t_{tof} ermittelt werden, aus der der Abstand r des Objekts von der Sensorposition abgeleitet wird.

Entfernungsmessung durch Triangulation

- $h = \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4 \cdot a^2}}$
- $a_1^2 + h^2 = c^2$
- $a_2^2 + h^2 = b^2$



Winner, TUD nach König 2003

Triangulationsmessung

Zur genauen Abstandsmessung zum Stoßfänger werden Triangulationsmessungen durchgeführt.

Jeder Sensor kann als Sender und Empfänger betrieben werden.

Ein Steuergerät steuert die Sensoren so an, dass die obigen Abstände c , b und $c + b$ (Kreuzmessung) ermittelt werden. Dies wird mit verschiedenen Sensorpaarungen längs der Stoßfänger realisiert, um so den Abstand des nächstliegenden Objektes zum Stoßfänger zu bestimmen.

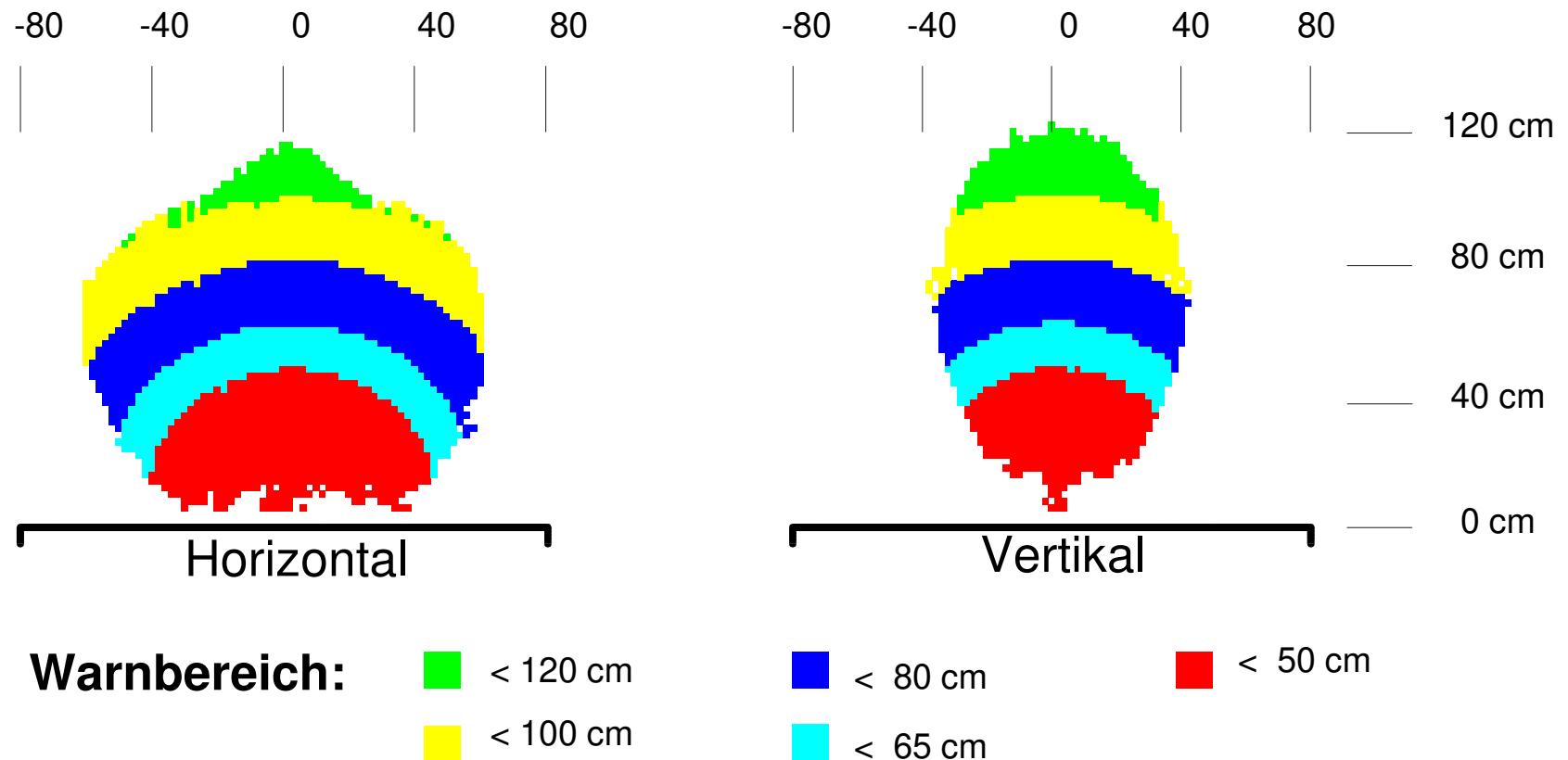
- 小巧、经济高效的设计
- 水平开启角度大 (120°-140)
- 检测质量几乎不受检测材料的影响:
- 典型材料 (金属、塑料、木材等) "坚硬无比"
- 吸音材料 (如泡沫) 不太重要
- 车内距离约 5-6 米 [1], [2]
- 除雪地外, 几乎与天气条件无关!
- 易受超声波范围内的灰尘和噪音干扰

Leistungsfähigkeit

Bewertung der Anwendbarkeit in der Automobilbranche

- kleine, kostengünstige Bauform
- großer horizontaler Öffnungswinkel (120°-140°)
- Erkennungsqualität nahezu unabhängig vom detektierten Material:
 - Typische Materialien (Metall, Kunststoff, Holz, etc.) sind „schallhart“
 - Schallabsorbierende Materialen (z.B. Schaumstoff) weniger relevant
- Reichweite im Kfz ca. 5-6 m [1], [2]
- nahezu keine Witterungsabhängigkeit außer Schnee!
- störungsanfällig bei Schmutz und Störgeräuschen im Ultraschallbereich

Detektionscharakteristik Einzelsensor



Winner, TUD nach Bosch 2002

Um die Fahrzeugbreite mit möglichst wenigen Sensoren lückenlos abdecken zu können, sollte die Schallverteilung jedes Sensors einen großen horizontalen Öffnungswinkel haben (ca. 120° bis 140°, um im Nahbereich bis ca. 50 cm ein Referenzobjekt erkennen zu können). Der vertikale Öffnungswinkel muss jedoch gleichzeitig so gering gehalten werden, dass Reflexionen von der Fahrbahn (besonders bei schlechten Wegen, Schotter, Pflaster, etc.) keine Pseudo-Hindernisanzeige auslösen. Für den Einbau der Sensoren im Stoßfänger hat sich ein vertikaler Öffnungswinkel von ca. 60° bis 70° bewährt, der nur etwa halb so groß ist wie der horizontale.

Winner, TUD nach Bosch 2002

Detektionsfeld und Warnstufen

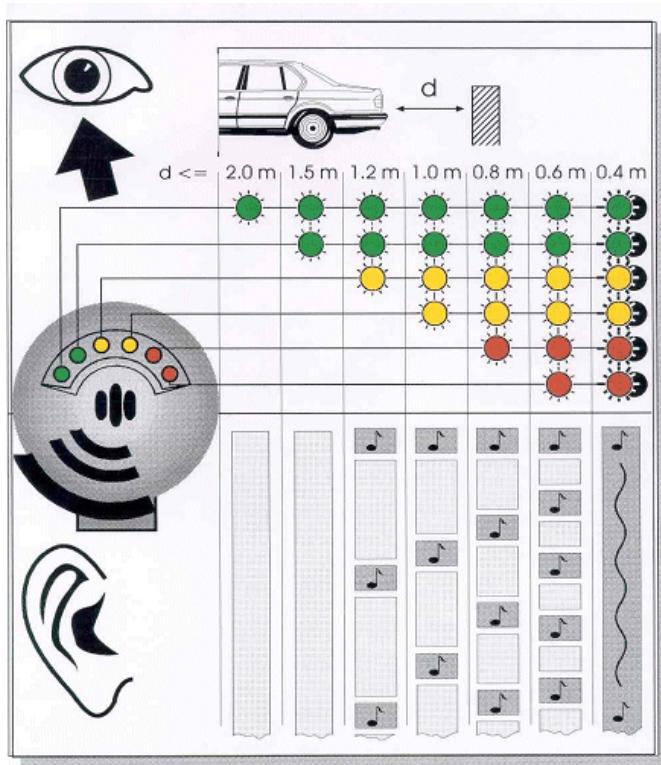


Bild: König (2003)

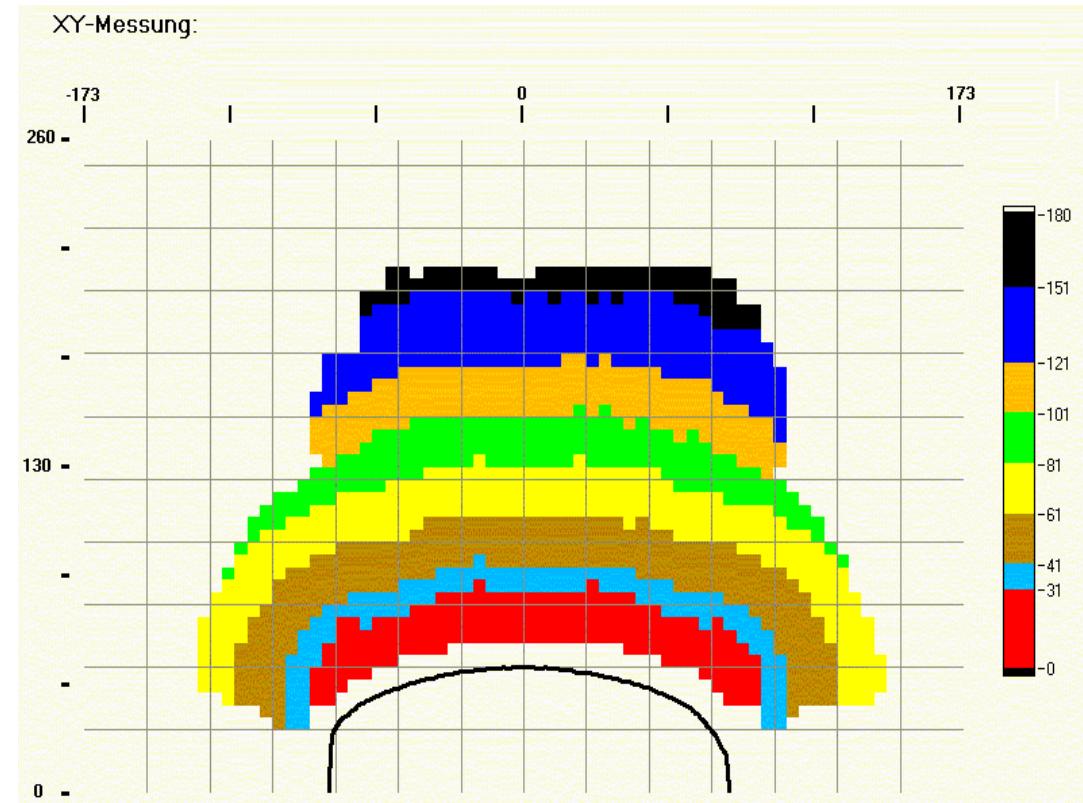


Bild: Bosch (2002)

Winner, TUD

Detektionsfeld und Warnstufen am Beispiel Einparkhilfe

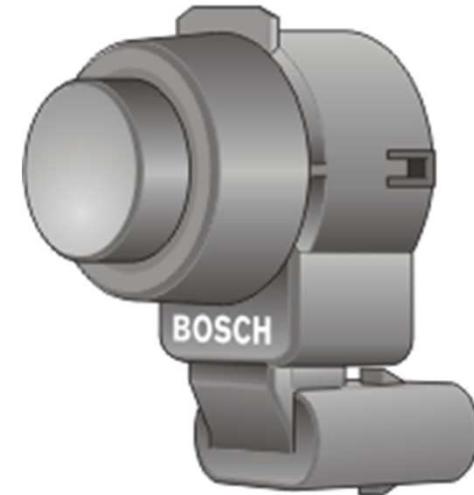
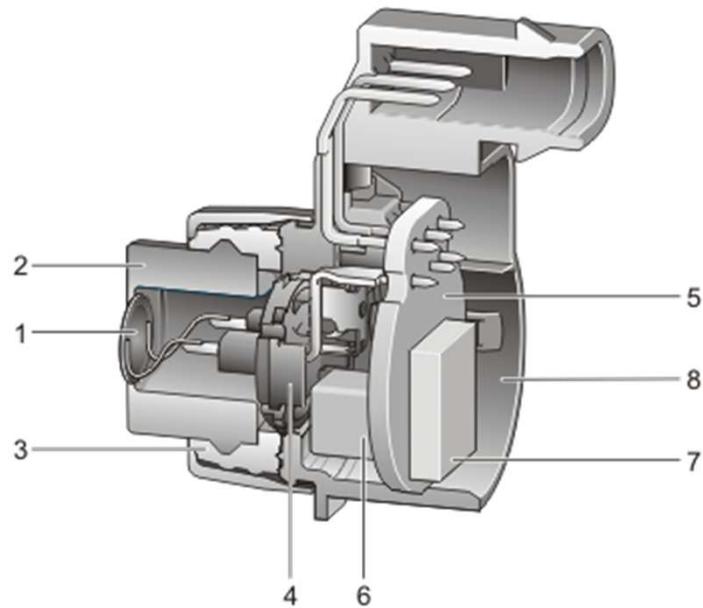
Die rechte Abbildung zeigt das Gesamt-Detektionsfeld und die unterschiedlichen Entfernungsbereiche, die sich mit den (typischerweise vier) Ultraschallsensoren einer Einparkhilfe auflösen lassen. Dem Vermessungsbild aus der Vogelperspektive ist das Messraster der Prüfanlage überlagert. Am rechten Bildrand findet sich eine Farbskala, die die Ausdehnung des jeweiligen Entfernungsbereichs in Zentimetern angibt.

Zur Information des Fahrers über den aktuellen Restabstand des Fahrzeugs zu Objekten in der Umgebung wird den unterschiedlichen Entfernungsbereichen ein gewisses Warnschema zugeordnet. Ein Beispiel dafür ist in der linken Abbildung dargestellt. Je geringer der Abstand des Fahrzeugs zu Objekten in der Umgebung, desto mehr Leuchtdioden werden angezeigt. Zunächst grüne, dann gelbe und schließlich rote. Gleichzeitig erklingt ab mittleren Abständen eine immer schneller werdende Abfolge an Warntönen, die bei Erreichen eines als kritisch eingestuften Mindestabstands in einen Dauerwarnton übergeht.

Anmerkung:

Die Entfernungsbereiche der beiden Abbildungen stimmen nicht exakt überein, da sie aus verschiedenen Quellen stammen.

Baugruppen eines ausgeführten Ultraschallsensors



- 1. Piezokeramik
- 2. Membrantopf
- 3. Entkopplungsring
- 4. Kontaktträger
- 5. Leiterplatte
- 6. Übertrager
- 7. ASIC-Baustein
- 8. Gehäuse mit Steckverbindung

Winner, TUD nach Bosch 2004

Aufbau

Ein Sensor besteht aus einem Kunststoffgehäuse mit integrierter Steckverbindung, einem Ultraschallwandler (Aluminiummembran, auf deren Innenseite eine Piezoscheibe eingeklebt ist) und einer Leiterplatte mit Sende- und Auswerteelektronik. Zwei der drei elektrischen Verbindungsleitungen zum Steuergerät dienen der Spannungsversorgung. Über die dritte, bidirektionale Leitung wird die Sendefunktion eingeschaltet und das ausgewertete Empfangssignal an das Steuergerät zurückgemeldet.

Einbau im Fahrzeug und konstruktive Details

Die Ultraschallsensoren werden in der Regel so in die Stoßfänger des Fahrzeuges integriert, dass die Oberfläche des Membrantopfes damit bündig abschließt. Entscheidend für die Sensorfunktion ist die vollständige Entkopplung der Membranschwingung von Sensorgehäuse und der Befestigung im Fahrzeug. Um dies zu erreichen, ist der Membrantopf in einen Entkopplungsring aus weichem Silikon eingebettet, der über den gesamten Einsatz-Temperaturbereich fast unveränderte akustische Eigenschaften besitzt. Weiterhin ist die Schwingungsform des Membrantopfes so ausgelegt, dass die Randschwingungen im Bereich der äußeren Einspannung möglichst kleine Amplituden aufweisen. Die elektrische Anbindung der Piezokeramik erfolgt über dünne Litzen oder Drähte derart, dass auch hier keine Schwingungskopplung auf die Leiterplatte stattfindet.

Winner, TUD nach Bosch 2004

Beispiel: Bosch Park-Pilot-Sensor

- Reichweite 15 cm ... 550 cm
(Objekte → 3 - 15 cm)
- Datenrate (Sensor) <~ 50 Hz
- Datenrate (System) <~ 10 Hz
- Öffnungswinkel horizontal → 70°
vertikal → 35°
- Sendefrequenz 48 kHz
- Typische Pulslänge 300 µs

Eigenschaften

- Sender und Empfänger
- Puls-Echo-Prinzip
- Abstandsberechnung mittels Triangulationsverfahren



Winner, TUD nach Bosch 2017

bosch-mobility-solutions.com, 2020

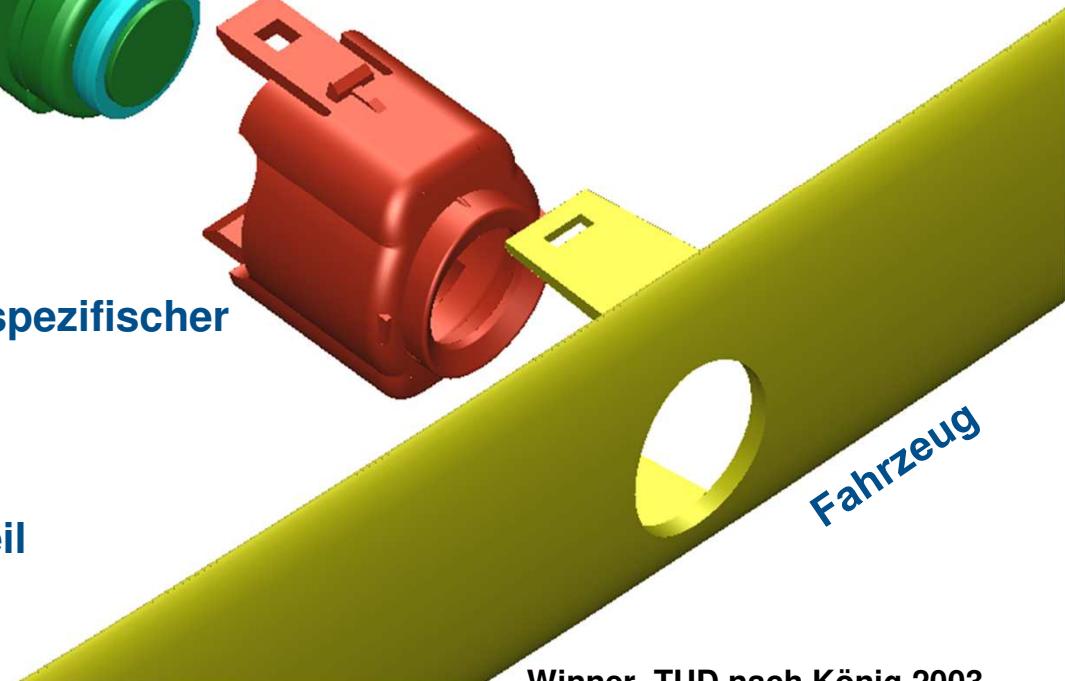
Einbau im Fahrzeug

Integration und Montage

**Standardsensor
(Massenproduktion)**



**Fahrzeugspezifischer
Adapter**



**Lösung des Zielkonflikts Massenteil
(Sensor) – spezifisches Design
(Fahrzeug) durch Adapter**

Winner, TUD nach König 2003

Befestigungskonzepte

Der Wandler wird in ein Zwischenteil geklippt, das je nach Position am Stoßfänger eine andere Form aufweist (Anpassung an die Rundungen des Stoßfängers).

Befestigungskonzept für Nachrüstsensor

Der Stoßfänger wird abgebaut und entsprechende Löcher gebohrt. Über ein Zwischenteil (dunkelgrün, immer dasselbe) und ein äußeres Anpassungsteil (je nach Position am Stoßfänger) wird der Wandler dann über eine Haltefeder eingebaut.

Allgemeine Eigenschaften ausgeführter Ultraschallsensoren

- Ultraschallpuls mit 45 kHz ca. 300 μ s lang
- 1 Wandler für Sende- und Empfangsbetrieb
- Komplette Abdeckung Heck- o. Frontbereich durch Triangulation nach Kreuz-Echo-Prinzip
- + Robust, klein und kostengünstig (ca. 2 € Zuliefererabgabepreis)
- + Hohe Technologiereife
- Verwehung des Schalls durch (Fahrt-)Wind
- Nicht verdeckbar (direkter Zugang zur Umgebung)
- Medienbindung an Luft beschränkt Einsatzbereich auf kleine Reichweiten (0,15...6 m).
- Signallaufzeit beschränkt Einsatzbereich auf kleine Fahrgeschwindigkeiten (< 20 km/h)
- Mit den üblichen Auslegungen ($\pm 70^\circ$ h, 40° v) sind Abstände von nicht mehr als 6m zu erreichen.



Winner, TUD, Bosch; Bilder: Bosch

Die Marktführer für auf Ultraschallsensoren basierende Einparkhilfesysteme sind Bosch und Valeo (vor der Übernahme: SWF).

Neben den Weiterentwicklungen für weitere Kostensenkungen wird daran gearbeitet, den Arbeitsbereich auszudehnen. Dies bezieht sich sowohl auf die Reichweite als auch auf höhere Fahrgeschwindigkeiten, bei denen heutige Sensoren wegen der durch den Fahrtwind erzeugten Geräusche „taub“ sind. Aktueller Stand bei der Reichweite: 6 m

Einbau im Fahrzeug

Beispiel: Park-Assistent, Heckansicht BMW X5 E70



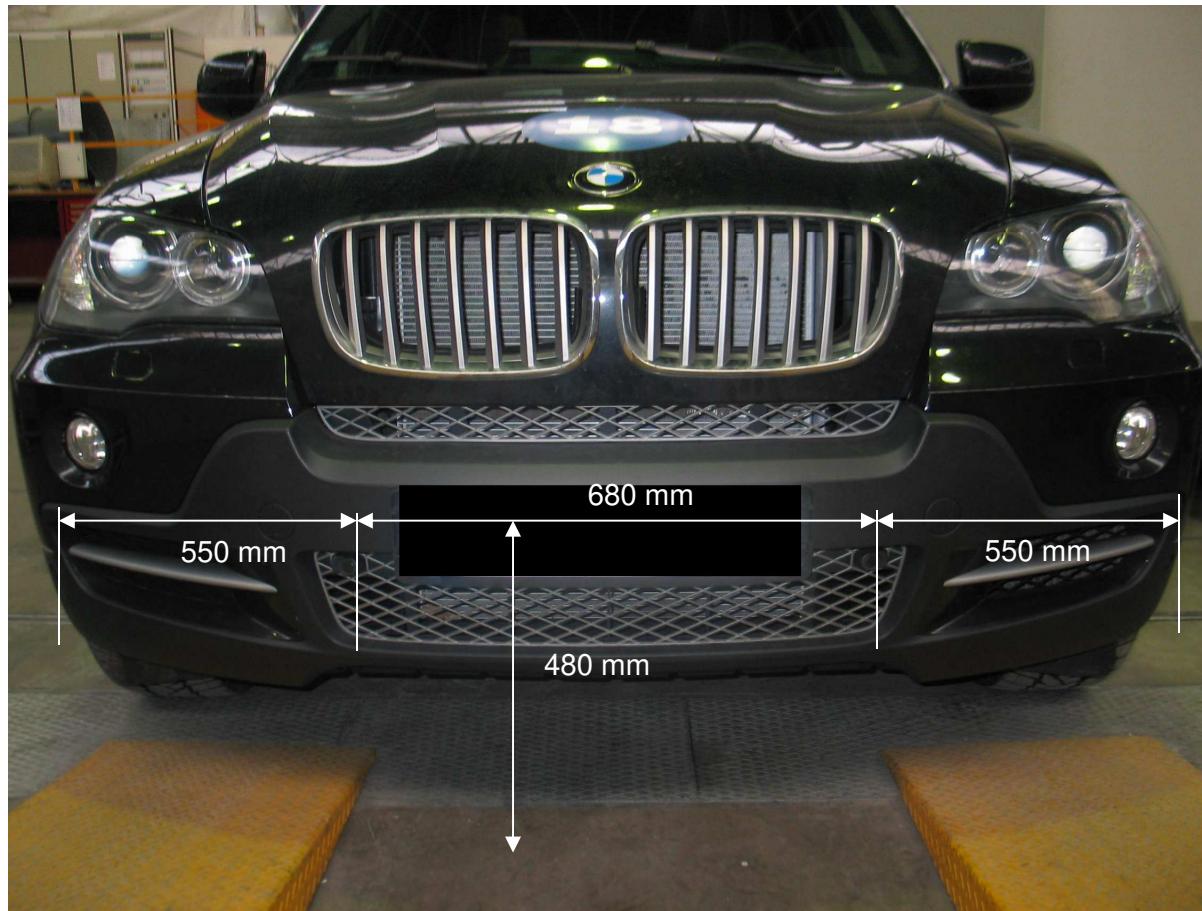
Winner, TUD

Beispiel BMW X5, Heckansicht

Bei diesem Fahrzeug werden hinten 4 Sensoren eingesetzt. Die Anbauhöhe der Sensoren über der Fahrbahn beträgt 550 mm. Um Fehlmessungen durch eine Anhängerkupplung auszuschließen, sind die zwei inneren Sensoren etwas weiter auseinander angebracht.

Einbau im Fahrzeug

Beispiel: Park-Assistent, Frontansicht BMW X5 E70



Winner, TUD

Beispiel BMW X5, Frontansicht

Vorn werden 4 Sensoren verwendet. Durch das Nummernschild muss ein relativ großer Abstand zwischen den inneren Sensoren eingehalten werden. Dies erfordert eine besonders geringe Fertigungstoleranz bei der Empfindlichkeit der Sensoren und der Ausrichtung ihrer Keulen. Der Anstellwinkel beträgt 3° , damit keine Bodenechos auftreten.

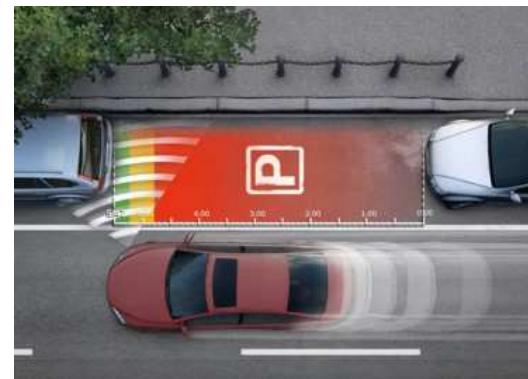
Assistenzziele

停车和操作

- Komfortableres Einparken und Rangieren
- Überprüfung möglicher Parklücken auf ausreichende Größe und Tauglichkeit
- Nutzung enger Parklücken auch für ungeübte Fahrer
- Hilfe zur Vermeidung von Parkremplern und kostspieligen Reparaturen, z. B. an lackierten Stoßfängern



Quelle: Siemens VDO (2007)



Quelle: Bosch (2007)



Quelle: Bosch (2007)

Winner, TUD

Sensorik / Wahrnehmung I
Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
(Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

- 2 Sensorik / Wahrnehmung I**
 - 2.1 Sensorkategorien
 - 2.2 Ultraschall
 - 2.3 RADAR**
 - 2.4 LiDAR
 - 2.5 Kamera
 - 2.6 Vergleich



Radarsensoren

- **Radio Detection and Ranging**
- Ursprünglich in der Militärtechnik eingesetzt
- Seit 1998 in Serienfahrzeugen; Zunächst im Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC)



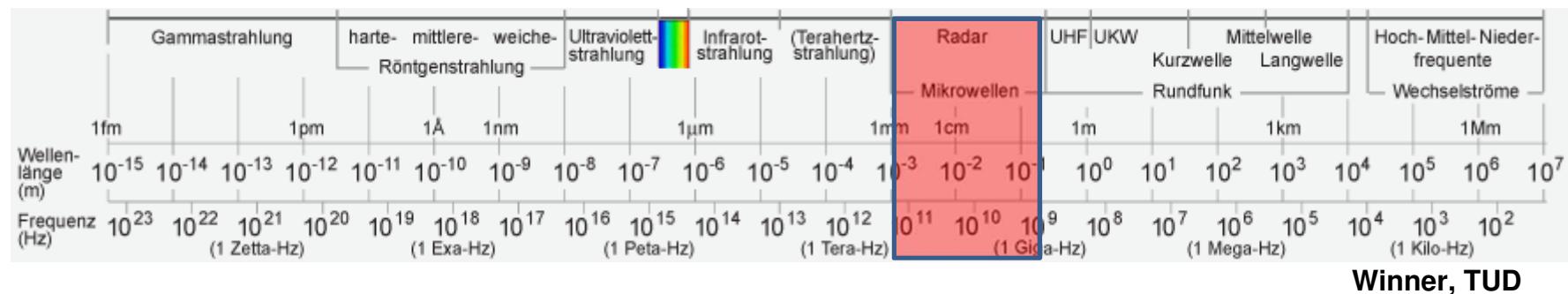
Anforderungen

- Gleichzeitiges Messen von bewegten & stationären Objekten
 - Abstand
 - Relativgeschwindigkeit
 - Winkelposition
- Im gesamten Geschwindigkeitsbereich
- Auch in Situationen mit mehreren Zielen
- Robuster Aufbau und unanfällig gegen Störungen & Umweltbedingungen
- Niedrige Kosten

Frequenzbänder

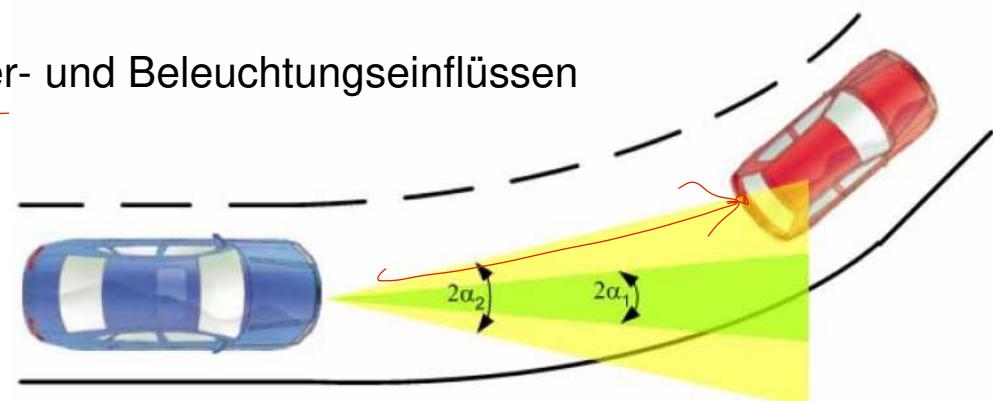
- 24 GHz-Band (24,0-24,25 GHz)
 - Short-Range ab 0,5 m und Mid-Range bis 100 m
 - kostengünstiger als 77 GHz-Radar

- 77 GHz-Band (76-77 GHz)
 - Long-Range bis 400 m
 - derzeit dominierend

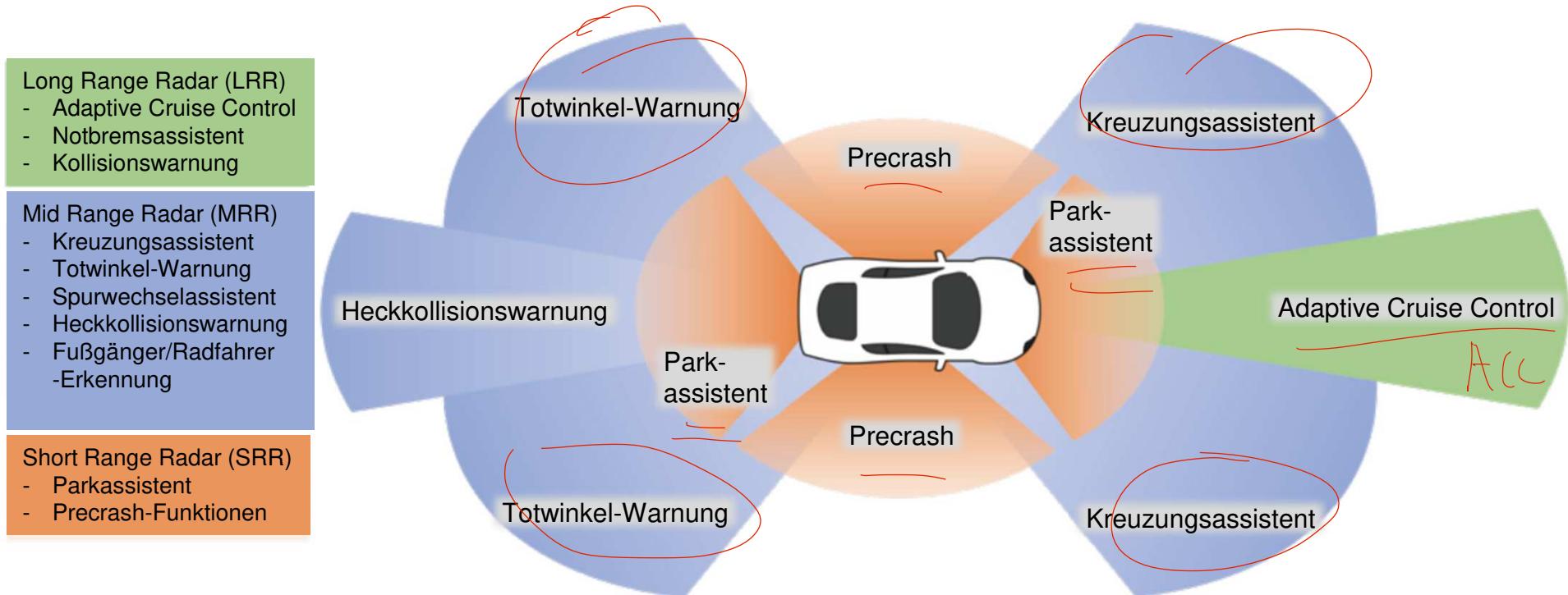


Radarsensoren – Leistungsfähigkeit

- Abstandsmessung:
 - zwischen 0,5 und 250 m
- Öffnungswinkel:
 - ca. 20° im Long-Range-Bereich
 - 60° - 120° im Mid-Range-Bereich
- Mehrzielfähigkeit:
 - durch Trennfähigkeit von Abstand ($\Delta r \sim 0,3$ m), Relativgeschwindigkeit ($\Delta v \sim 0,1$ m/s) und Azimutwinkel ($\Delta\Phi \sim 1^\circ$)
- Vorteil:
 - Unabhängig gegenüber Wetter- und Beleuchtungseinflüssen
(außer großen Regentropfen)
- Nachteil:
 - Messung der Quer-geschwindigkeit von Objekten
ist schwer möglich



Anwendungsbereiche



UHNDER, 2020

Es stehen für Anwendungen im Straßenverkehr momentan Frequenzbänder im Bereich von 24,0-24,25 GHz, 76-77 GHz und 77-81 GHz sowie ein UWB-Band (**Ultra Wide Band**, Ultra-Breitband) im Bereich von 21,65-26,65 GHz zur Verfügung. Dominierend ist derzeit das 77 GHz-Band, welches explizit für Automotive-Anwendungen geregelt wurde und weltweit zur Verfügung steht. Im Vergleich hierzu ist die Nutzung des 24 GHz-Bandes aufgrund preiswerterer Komponenten kostengünstiger. Allerdings ist die Reichweite geringer. Für einen Einsatz im Nahbereich unter 0,5 m ist dieses aufgrund der Bandbegrenzung nicht geeignet.

Einen nur temporär geduldeten Ausweg bietet die UWB-Technik. Bei dieser Technik wird ebenfalls mit einer Trägerfrequenz von 24,15 GHz gearbeitet. Allerdings führen nur etwa 0,5 ns lange Pulse zu einer effektiven Nutzbandbreite von 5 GHz → UWB-Band: 21,65-26,65 GHz

Weiterhin dürfen nur maximal 7% der nationalen Zulassungen auf Fahrzeuge entfallen, die mit UWB-Radar ausgerüstet sind. Letzte Grenze für das Indienststellen eines 24 GHz-UWB-Radars war der 30.06.2013. Spätestens seitdem ist es erforderlich, auf das bisher ungenutzte 79 GHz-Band auszuweichen, wodurch eine Kostensteigerung unvermeidbar ist.

Radarsensoren – Signalverarbeitung

- Signalformung: Modulation, Strahlumschaltung
- Vorverarbeitung: Demodulation, Verstärkung, digitale Erfassung
- Spektralanalyse: (Fast-)Fouriertransformation; aus Frequenzlage und Amplitude ergeben sich Abstand, Geschwindigkeit und Winkel
- Detektion: Suche nach Peaks im Spektrum
- Matching: Zuordnung von detektierten Peaks zu einem Objekt
- Azimutwinkelbestimmung: Vergleich der Amplituden
- Bündelung: Zusammenfassung von Detektionen, die zu einem Objekt gehören
- Tracking: Aktuelle Objektdaten einem vorher bekannten Objekt zuordnen (Assoziation)

Modulation und Demodulation

- Ausgesandte Strahlung lässt sich als harmonische Wellenfunktion beschreiben:

$$u_t(t) = A_t \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$


- Modulation bedeutet Änderung dieser Parameter.

参数随时间的变化包含了信息，因此就是标签。

- Die zeitliche Änderung der Parameter enthält die Information und ist damit die Kennzeichnung.

- Grundarten der Modulation

- Amplitudenmodulation
- Frequenzmodulation
- Phasenmodulation

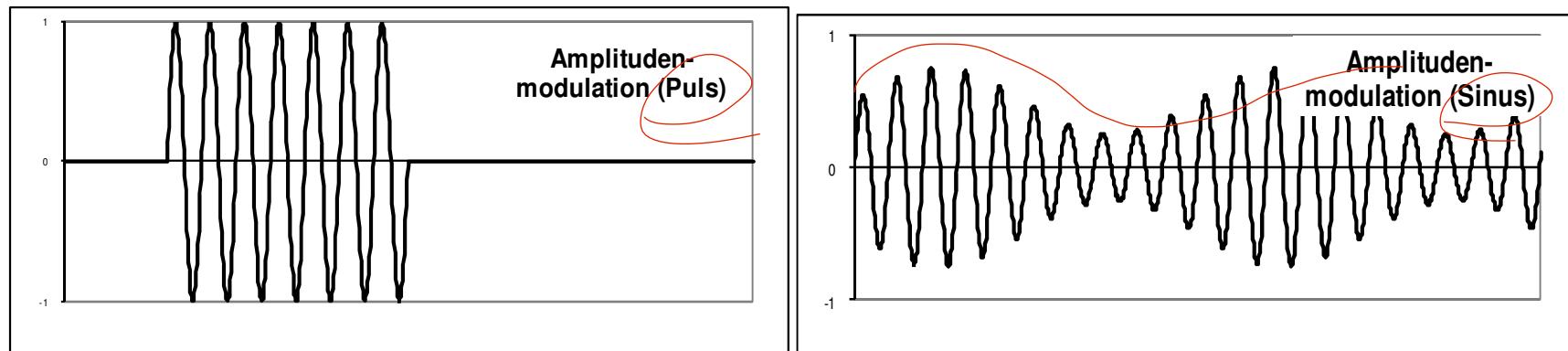


Modulation und Demodulation

Amplitudenmodulation

A

- Amplitudenmodulation → Änderung der Amplitude
 - Pulsmodulation (kurzes Wellenpaket)
 - Kontinuierliche Amplitudenschwankung



Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015

Eine Modulation der Amplitude wird erzeugt, indem die Amplitude einer Trägerschwingung von einem zeitabhängigen Signal verändert wird.

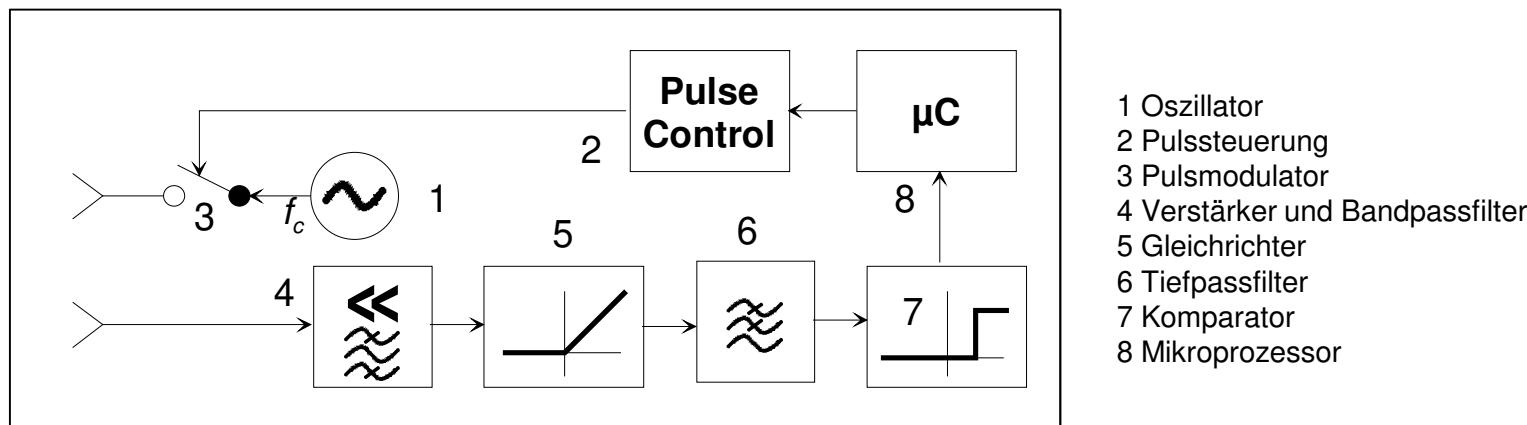
Bei der Pulsmodulation wird ein kurzer Wellenzug der Pulslänge τ_p gebildet. Technisch wird dies durch einen schnellen elektronischen Schalter realisiert. Dieser wird von einem kontinuierlich betriebenen Oszillatoren gespeist.

Eine andere Möglichkeit der Amplitudenmodulation besteht in der kontinuierlichen Änderung der Amplitude, z.B. durch Überlagerung mit einem niederfrequenten Sinussignal.

Amplitudenmodulation

Pulsmodulation

- Nicht-kohärente Demodulation
 - Einfache Methode (wie bei LIDAR oder Ultraschall)
 - Empfindlich gegenüber Störungen
 - Nur Laufzeitmessung *TOF*
 - Keine Nutzung des Doppler-Effektes



Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015

Das empfangene Signal wird zunächst verstärkt, durch einen der Pulsbandbreite entsprechenden Bandpass um die Trägerfrequenz f_0 gefiltert (Block 4), dann gleichgerichtet (Block 5), damit aus der Wechselspannung ein der Amplitude entsprechender Gleichanteil entsteht, der im nachfolgenden Tiefpass (Block 6) als Ausgangssignal zur Verfügung steht. Dieses Signal wird dann abgetastet und im Mikroprozessor (Block 8) oder direkt mit vorgegebenen Schwellwerten im Komparator (Block 7) verglichen.

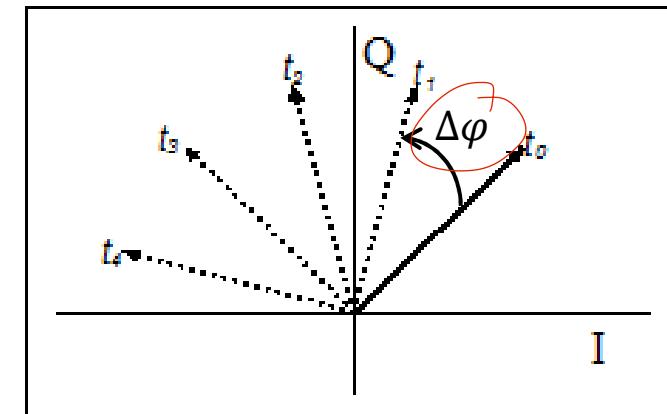
Nachteilig an dieser Demodulationstechnik ist, dass diese leicht durch Fremdpulse zu stören ist und nur Laufzeitmessungen möglich sind. Der Dopplereffekt kann nicht genutzt werden.

Amplitudenmodulation

Pulsmodulation

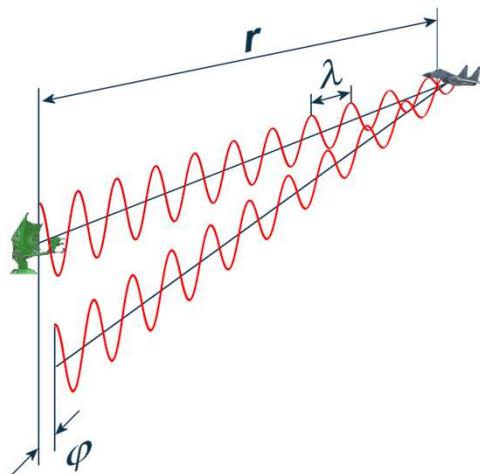
- Kohärente Puls-Demodulation (Puls-Doppler-Verfahren)

- Reflektion durch bewegtes Ziel führt zwischen Sende- und Empfangssignal zu Verschiebung um Dopplerfrequenz
- Dadurch Änderung der Phase des Empfangssignals $\Delta\varphi$
- Abtastung (t_0, t_1, \dots) und Bildung von Realteil Q und Imaginärteil I
- (Relativ-) Geschwindigkeitsbestimmung aus $\Delta\varphi$
- Abstandsbestimmung aus Signallaufzeit



Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015

Bei der Reflektion eines Signals durch ein bewegtes Ziel ist die Empfangsfrequenz ungleich der Sendefrequenz. Der Unterschied entspricht der Dopplerfrequenz. Beim Puls-Doppler-Verfahren wird diese und damit die Relativgeschwindigkeit des detektierten Objekts durch die zeitliche Änderung der Phase des Empfangssignals bestimmt. Dafür wird vom Empfangssignal der Realteil und der Imaginärteil (Zeiger in der komplexen Ebene) gebildet. Bei bewegten Zielen wird dieser Zeiger bei einer späteren Messung um einen bestimmten Winkel weiter gedreht. Dieser Winkel ist abhängig von der Relativgeschwindigkeit des detektierten Objektes.



Winner, TUD

<https://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.de.html>

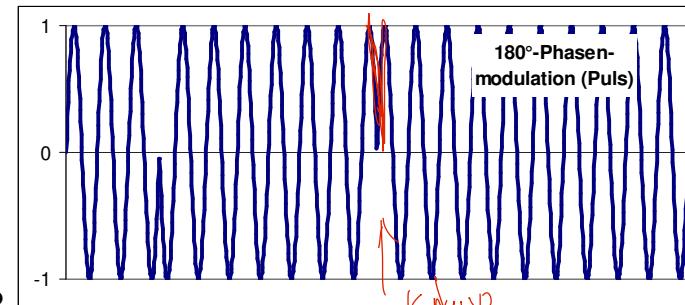
<https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp06.de.html> VL 2- 62

Modulation und Demodulation

Grundarten der Modulation

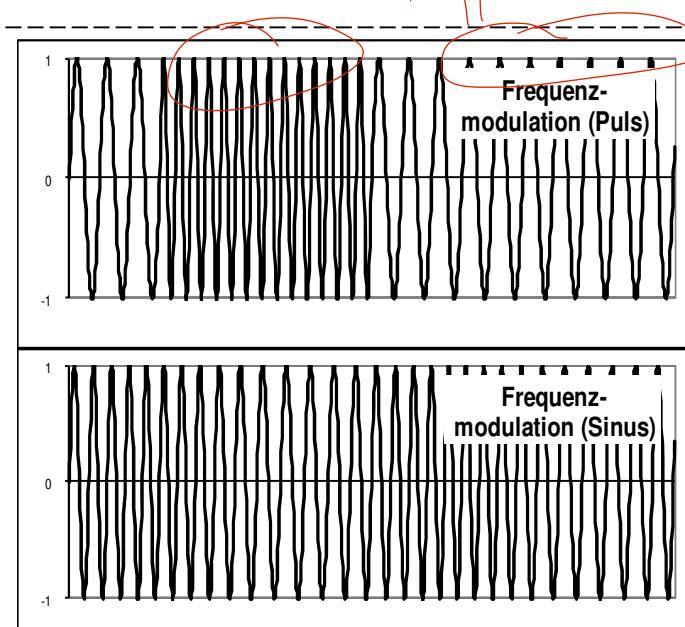
▪ Phasenmodulation

- Variation der Phase
- Beispiel: Umschalten zwischen verschiedenen Phasenlagen, z.B. 180°



▪ Frequenzmodulation

- Variation der (Momentan-)Frequenz
- Beispiele:
 - Umschalten zwischen zwei Frequenzen
 - Kontinuierliche Frequenzänderung (Rampe), z.B. im Rundfunk



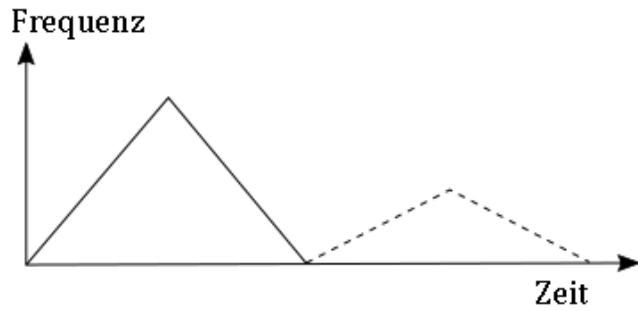
Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015

Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz als Funktion der Zeit variiert. Anzumerken ist, dass es sich um eine Momentanfrequenz und nicht um eine absolute und somit konstante Frequenz handelt. Die Frequenzmodulation wird beim Radio im UKW-Band und in der (analogen) Fernsehtechnik eingesetzt.

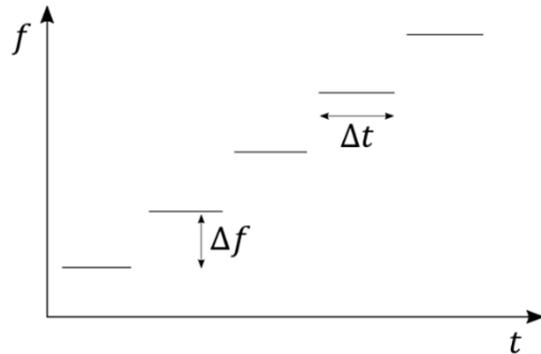
Eine Phasenmodulation entsteht durch Variation der Phase, d.h. durch „Verschieben“ des Signals. Eingesetzt wird diese, wenn auch deutlich komplizierter, in Daten-Modems für das analoge Festnetz.

Frequenzmodulation

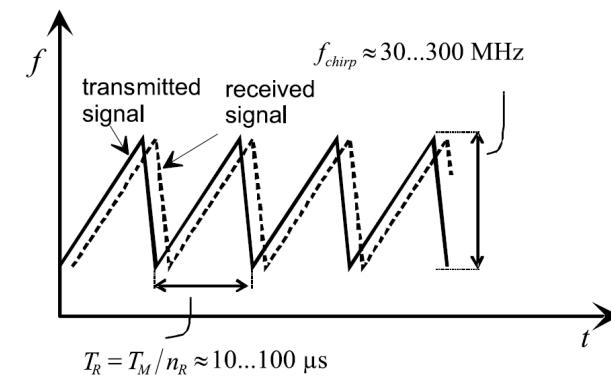
Dauerstrich-Frequenzmodulation
(FMCW)



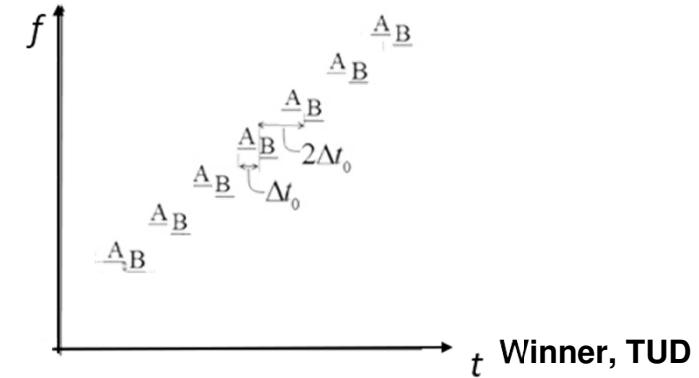
Frequenzumtastung (FSK)



Pulskompression
(Chirp Sequence Modulation)

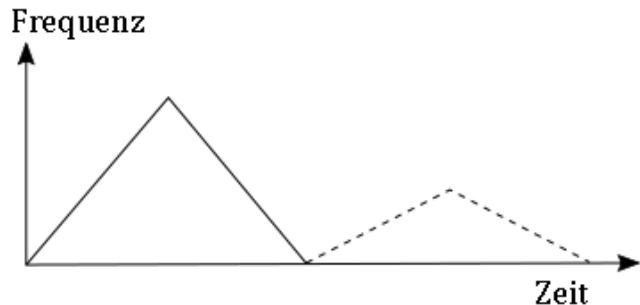


Frequency Modulation Shift Keying (FMSK)

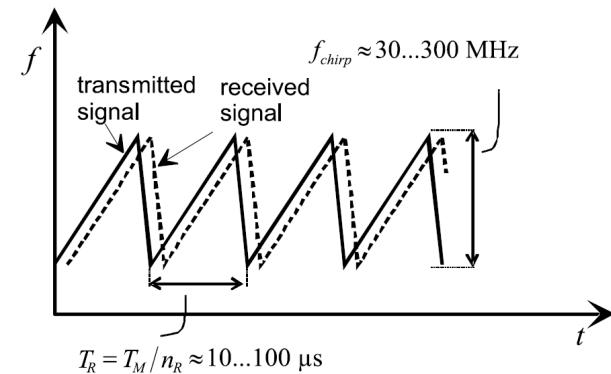


Frequenzmodulation

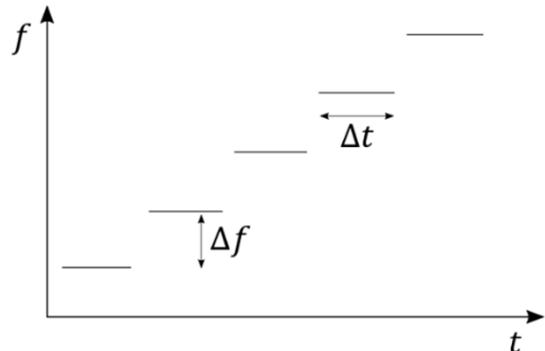
Dauerstrich-Frequenzmodulation
(FMCW)



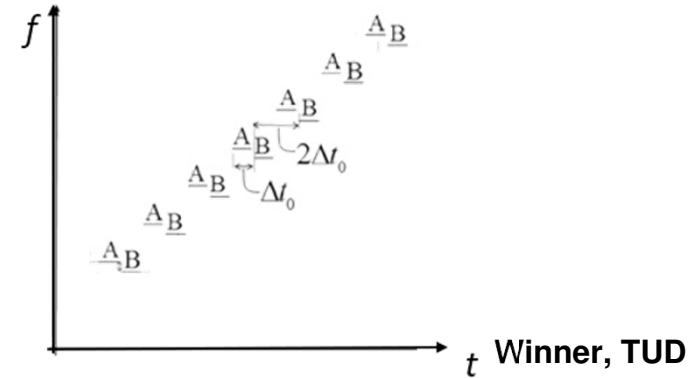
Pulskompression
(Chirp Sequence Modulation)



Frequenzumtastung (FSK)

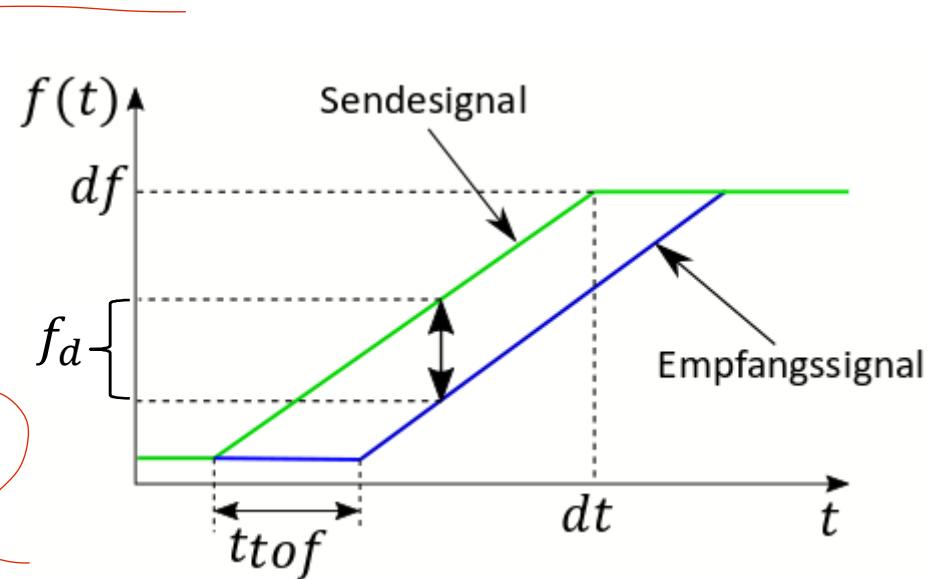


Frequency Modulation Shift Keying (FMSK)



Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW)

- Zunächst: $v_{rel} = 0$
- $\frac{df}{dt} = \frac{f_d}{t_{tof}}$ $\Rightarrow f_d = \frac{t_{tof}}{dt} df$
- Mit: $t_{tof} = \frac{2}{c} r$ und $\frac{df}{dt} = m$
- $f_d = \frac{2}{c} m \cdot r$



mit:

- f_d : Differenzfrequenz
- m : Steigung der Frequenz ($\frac{df}{dt}$)
- t_{tof} : time of flight
- c : Lichtgeschwindigkeit
- r : Abstand

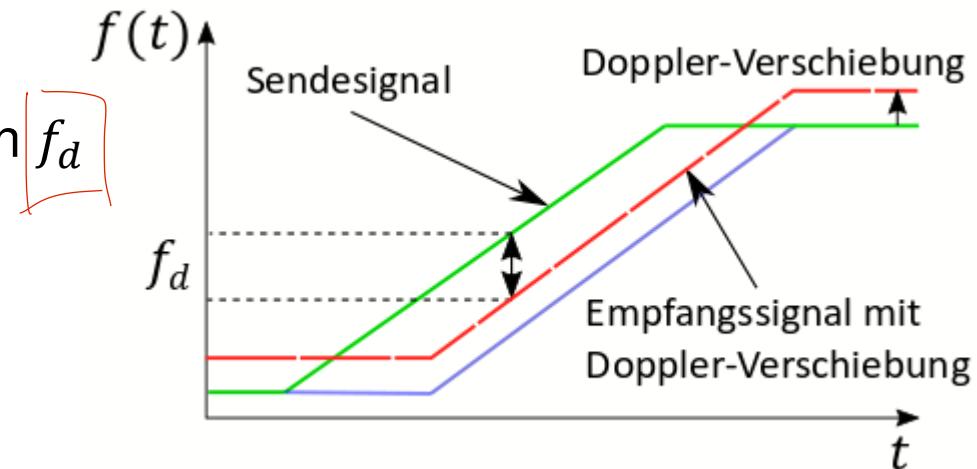
Rohde & Schwarz

Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW)

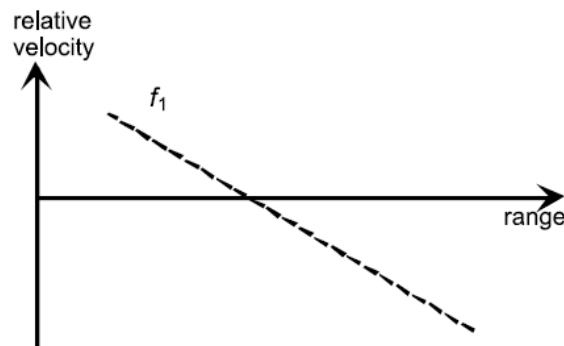
jetzt: $v_{rel} = const.$

→ Zusätzlicher Doppler Anteil in f_d
 $f_d = f_r - f_D$

$$f_d = \frac{2}{c} m \cdot r - \frac{2}{c} f_0 \cdot v_{rel}$$



→ Eine Gleichung mit zwei unbekannten (r und v_{rel})
 → nicht lösbar



mit:

- f_d : Differenzfrequenz
- f_D : Doppler-Verschiebung
- f_r : Abstands-Verschiebung
- f_0 : Anfangsfrequenz
- m : Steigung der Frequenz $\left(\frac{df}{dt}\right)$
- c : Lichtgeschwindigkeit
- r : Abstand

Rohde & Schwarz

Bei der Dauerstrich-Frequenzmodulation wird die Sende(momentan)frequenz kontinuierlich, möglichst linear variiert (Steigung m). Dies führt im heruntergemischten Signal zu einer von der Laufzeit und damit auch vom Abstand abhängigen Frequenz.

Die maximale Frequenz hängt vom maximalen Abstand und der Steilheit der Frequenzrampe ab.

Bei endlicher Relativgeschwindigkeit ändert sich die Differenzfrequenz mit der Dopplerfrequenz. In diesem Fall wird bei einer Annäherung ($v_{\text{rel}} < 0$) die Empfangsfrequenz erhöht und damit die Differenzfrequenz zunächst reduziert.

Es ist darauf zu achten, dass die Differenzfrequenz vorzeichenbehaftet ist. Ohne Einsatz eines I/Q-Mischers ist das Vorzeichen der Frequenz aber nicht bekannt, sodass über Annahmen das Vorzeichen zu bestimmen ist. Dabei können positive Abstände vorausgesetzt werden, sodass die Objektfrequenzen bei positiver Steigung positiv sind.

Anmerkung: t_{ttc} steht für time to collision, die übliche Bezeichnung des Quotienten von Abstand und negativer Relativgeschwindigkeit.

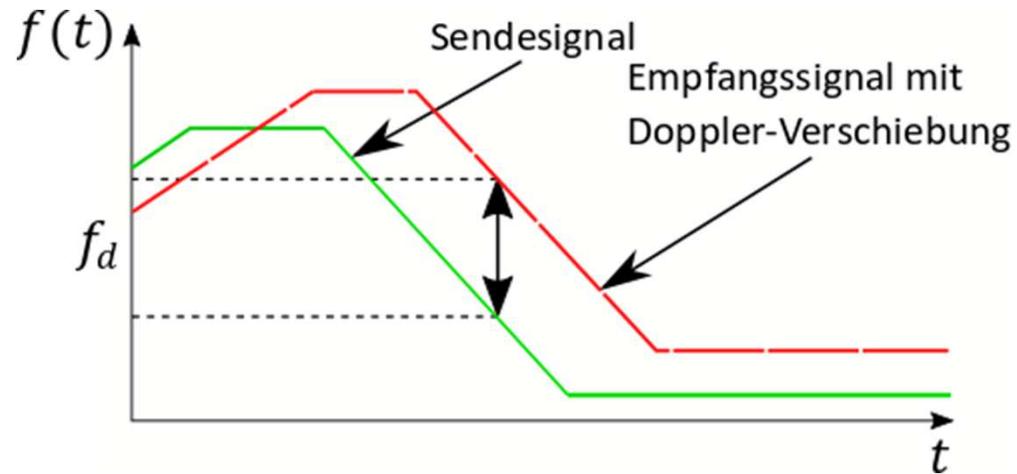
两翼

Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW)

- Zwei Flanken:

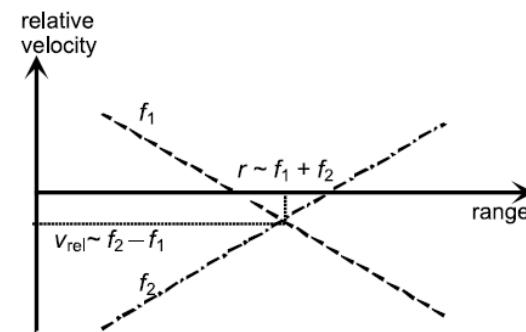
$$f_d = \frac{2}{c} mr - \frac{2}{c} f_0 \cdot v_{rel}$$

$$f_{d2} = \frac{2}{c} mr - \frac{2}{c} f_0 \cdot v_{rel}$$



→ Zwei Gleichungen
mit 2 Unbekannten

→ Lösbar nach r und v_{rel}



Rohde & Schwarz

Aus einer einzigen Rampe lässt sich nur eine Linearkombination von Abstand und Relativgeschwindigkeit erfassen. Da aber die Steigung der Geraden im Diagramm von der Rampensteigung abhängt, lässt sich mit einer Rampe anderer Steigung ein Schnittpunkt ermitteln. Wird beispielsweise als zweite Rampe die negierte Steigung der ersten gewählt, so entsteht der in der Abbildung angedeutete Zusammenhang. Eine negierte Steigung führt zu einer negierten Addition der Dopplerverschiebung auf die durch die Laufzeit verschobene Differenzfrequenz. Die im Diagramm Abstand gegen Relativgeschwindigkeit zur negierten Rampe gehörende Gerade schneidet die Gerade, die zur ersten Rampe mit positiver Steigung gehört. Der Schnittpunkt der Geraden liefert den korrekten Wert für den Abstand und die Relativgeschwindigkeit. Die Trennschärfe bzgl. der Relativgeschwindigkeit ist durch die Länge der Messrampe bestimmt.

使用频率差而不是时差

利用多普勒效应获得第二个输出变量

LGS 变得可解

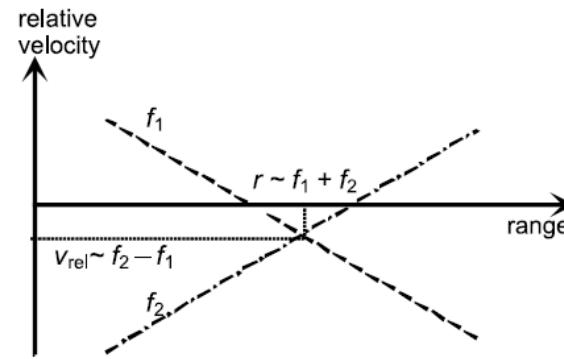
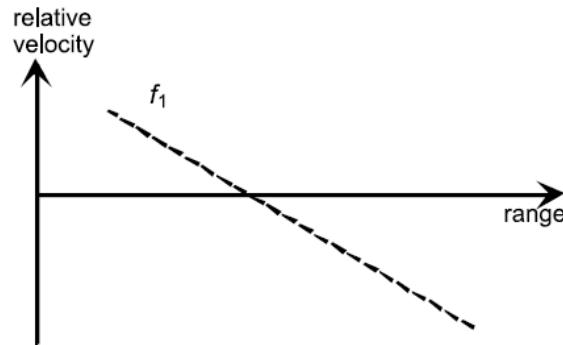
Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW):

Zusammenfassung

Anstatt der Zeitdifferenz wird die Differenzfrequenz verwendet

→ Dadurch Ausnutzung des Dopplereffekts zur Gewinnung einer zweiten Ausgangsgröße

→ LGS wird lösbar

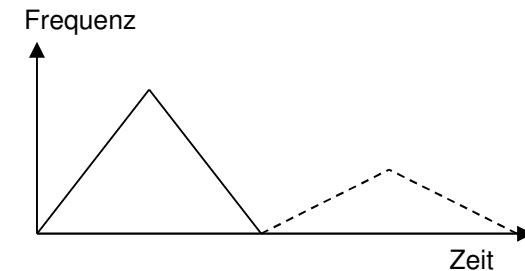
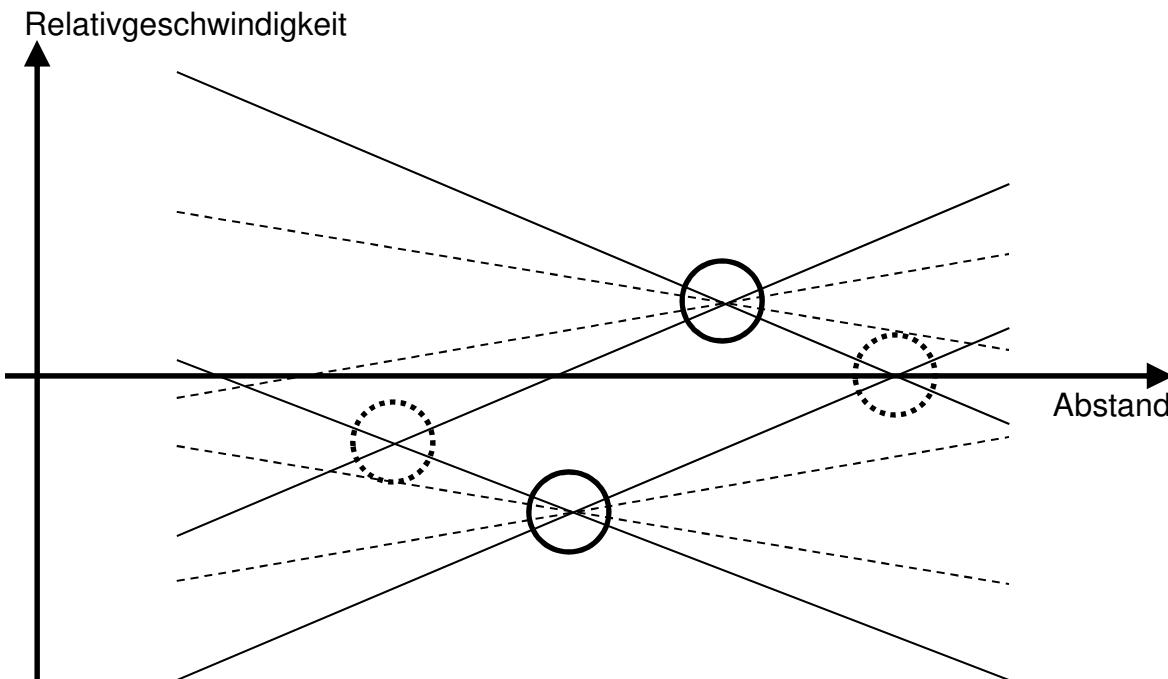


Rohde & Schwarz

Dauerstrich-Frequenzmodulation (FMCW):

多目标能力

- Mehrzielfähigkeit:
 - Einsatz von zwei Frequenzrampen ist nicht mehrzielfähig
 - Mehrzielfähigkeit durch mehrere Rampen unterschiedlicher Steigung

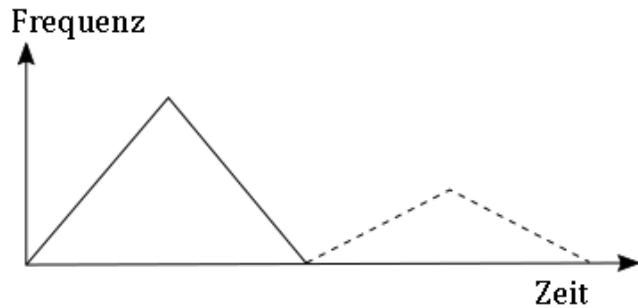


Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015

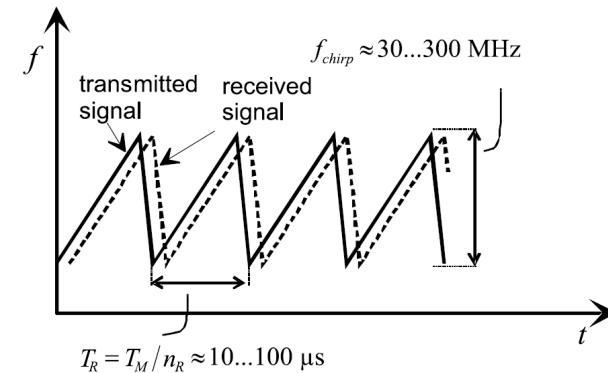
Wird nur ein Objekt detektiert, ist das Mehr-Rampen-FMCW-Verfahren einfach anzuwenden. Dann ist eine eindeutige Zuordnung möglich. Werden mehrere Objekte detektiert, so ist dies nicht mehr ohne Weiteres möglich. Wie in der Abbildung dargestellt, kann es zu Fehldeutungen kommen. Das erste Rampenpaar (durchgezogene Linien) erzeugt von zwei Objekten vier Schnittpunkte, von denen nur zwei korrekt sind. Durch zusätzliche Rampen mit unterschiedlichen Steigungen lässt sich die Mehrdeutigkeit zumindest für eine kleine Anzahl von Objekten auflösen, indem nur die Detektionen ausgewertet werden, die einen Schnittpunkt aller Rampen zeigen.

Frequenzmodulation

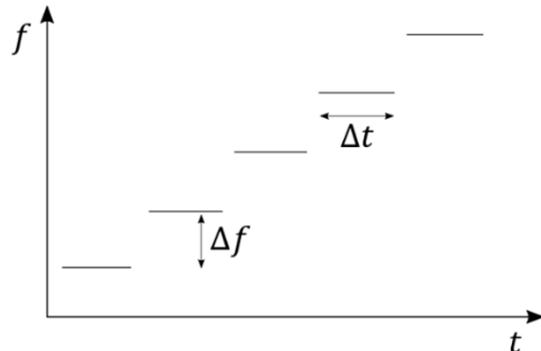
Dauerstrich-Frequenzmodulation
(FMCW)



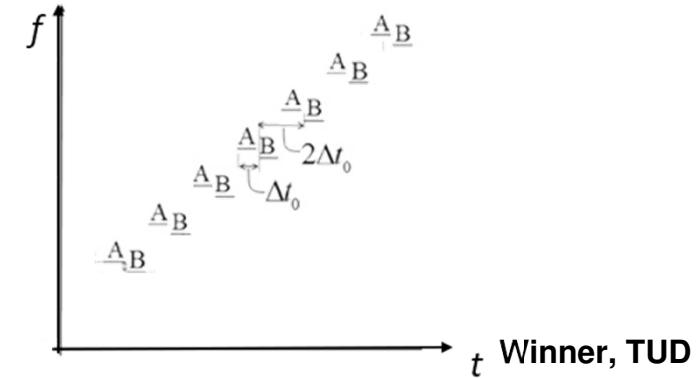
Pulskompression
(Chirp Sequence Modulation)



Frequenzumtastung (FSK)



Frequency Modulation Shift Keying (FMSK)

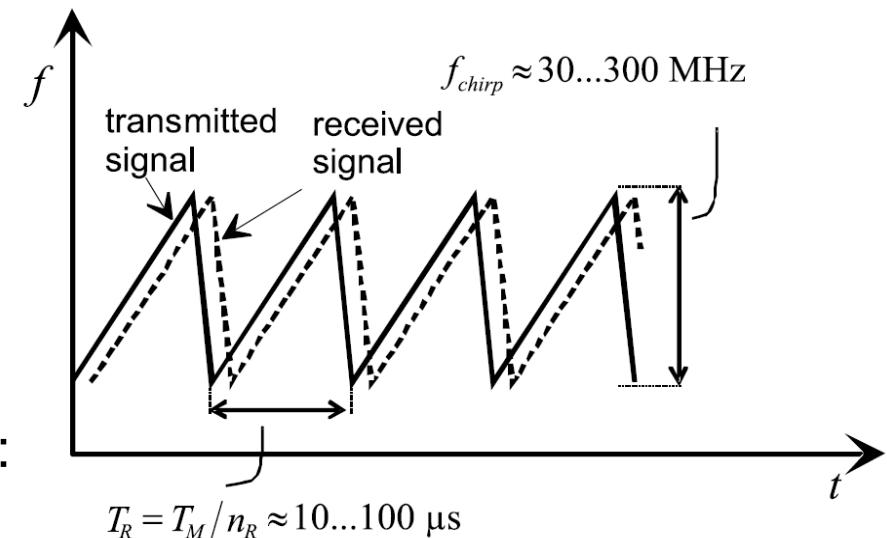


Chirp Sequence Modulation

- Sequenz gleicher, sehr kurzer Rampen
- Wiederholrate ca. **80 kHz**
- Durch kurze Rampen Dopplereffekt nicht relevant, d.h.:

$$f_d = \frac{2}{c} m \cdot r = f_r$$

→ Unabhängige Zuordnung von f_D und Abstand



Winner, TUD nach Winner et al.: FAS-Buch, 2015
Rohde & Schwarz

Chirp Sequence Modulation

- Doppler wird durch Phasendifferenz zwischen den kurzen Chirps definiert
 - Fourier-Transformation erlaubt Ermittlung der Phasenverschiebung
→ Berechnung der Relativgeschwindigkeit nur hiervon abhängig
- Verfahren erlaubt auch Erfassung mehrerer Ziele durch Fouriertransformation

Die hier beschriebene Modulation hat verschiedene Bezeichnungen. Da sie aus einer Sequenz gleicher linearer Frequenzrampen besteht (s. Abbildung), wird hier „Chirp Sequence Modulation“ verwendet, wobei die Bezeichnung „Pulskompression“ ebenfalls gebräuchlich ist. Dieses Verfahren kombiniert die Vorteile aller bisher beschriebenen Verfahren.

In kurzen Abständen werden n_R gleiche lineare frequenzsteigernde (Up-Chirp) Rampen wiederholt. Im akustischen Bereich würden sie dem Zirpen (Chirp) angehören. Der Hub der Rampen ist typischerweise 30-300 MHz. Die Wiederholrate richtet sich nach der Dopplerfrequenz und sollte etwa 80 kHz betragen, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Die kurzen Rampen ermöglichen eine eindeutige Zuordnung des Abstandes zur Frequenzzelle, da eine Dopplerverschiebung innerhalb der Rampendauer nicht relevant wird. Dies gilt allerdings nur, solange das Ziel in der Gesamtzeit innerhalb der Abstandszellenausdehnung bleibt.

Zu jeder Zelle existiert nach der Fouriertransformation wie bei der Puls-Doppler-Auswertung (Kohärente Puls-Demodulation) eine komplexe Amplitude. Diese Amplitude beschreibt in den folgenden Rampen in gleicher Weise wie die Pulsfolgen in der komplexen Ebene einen Kreis mit der der Dopplerfrequenz zugehörigen Kreisgeschwindigkeit.

Eine Fouriertransformation der komplexen Amplituden der Rampenfolge mit derselben Abstandszelle liefert daher direkt die Dopplerfrequenz, und zwar sowohl für mehrere Ziele in derselben Abstandszelle und unterschiedlicher Relativgeschwindigkeit als auch mit Vorzeichen, da nun ein komplexer Datensatz transformiert wird. Die Analogie zur Puls-Doppler-Auswertung führt daher auch zur Bezeichnung *Pulskompression*, weil nun die gesamte Energie der Rampe auf ein Range-Gate konzentriert wurde und somit gegenüber einer ca. tausendfach kleineren Pulsdauer ein erheblich besseres Signal-Rausch-Verhältnis erreicht wird, ohne die Spitzenleistung dafür anzuheben. Der beschriebene Ansatz mit zwei aufeinanderfolgenden Fouriertransformationen ist nichts anderes als eine zwei-dimensionale Fouriertransformation des Datenfelds, bei dem Messdaten einzelner Chirps die Spalten bilden und die Folgechirps die Zeilen.

Abstandsmessung

- Abstandsmessung durch Laufzeitmessung:

- $r = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_{\text{tof}}$

mit

- t_{tof} : Laufzeit (time of flight)

- c : Ausbreitungsgeschwindigkeit, entspricht bei elektromagnetischen Wellen der Lichtgeschwindigkeit ($c \approx 300.000 \text{ km/s}$)

- Beispiele:

- $r = 150 \text{ m}, \rightarrow t_{\text{tof}} = \frac{2r}{c} \approx 1 \mu\text{s}$

- $r = 0,15 \text{ m}, \rightarrow t_{\text{tof}} = \frac{2r}{c} \approx 1 \text{ ns}$

Für die Abstandsmessung wird im Allgemeinen die Laufzeitmessung (engl. time-of-flight-measurement) eingesetzt. Das Zwischenergebnis ist die Zeitdauer, die ein Wellenpaket von der Quelle über die Reflexion am Messobjekt bis zum Empfänger benötigt. Quelle (Sendeantenne) und Senke (Empfangsantenne) sind oft identische Baugruppen, und wenn nicht, zumindest aber nahe beieinander angeordnet. Für elektromagnetische Wellen in Luft gilt mit guter Genauigkeit die Faustregel, dass in einer Mikrosekunde 300 m überstrichen werden (entsprechend 150 m Hin- und 150 m Rückweg).

(Relativ-)Geschwindigkeitsmessung

Ableitung der Abstandswerte

- Relativgeschwindigkeit:

$$v_{\text{rel}} = \dot{r} = \frac{dr}{dt}$$

- Relativbeschleunigung:

$$a_{\text{rel}} = \frac{dv_{\text{rel}}}{dt}$$

- Beispiele (für erforderliche Abstandspräzision):

- $\Delta r = 0,06 \text{ m}, \Delta t = 0,25 \text{ s} \rightarrow \Delta v_{\text{rel}} = 0,24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- $\Delta r = 0,01 \text{ m}, \Delta t = 0,1 \text{ s} \rightarrow \Delta v_{\text{rel}} = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- $\Delta v_{\text{rel}} = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \Delta t = 0,5 \text{ s} \rightarrow \Delta a_{\text{rel}} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

- $\Delta v_{\text{rel}} = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \Delta t = 0,25 \text{ s} \rightarrow \Delta a_{\text{rel}} = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Eine einfache Möglichkeit zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit eines Objekts ist die Ableitung des Abstands. Dazu wird (im Prinzip) die Differenz der gemessenen Abstandswerte, die im zeitlichen Abstand Δt aufgenommen wurden, durch diese Zeitdauer dividiert. Mit verschiedenen Filtermaßnahmen lassen sich Messausreißer und höherfrequentes Rauschen unterdrücken. Letztendlich bleibt aber die Beziehung gültig, dass für gute Geschwindigkeits- und daraus abgeleitete Beschleunigungswerte die Abstandswerte sehr genau sein müssen. Problematisch wird es, wenn die Werte von aufeinander folgenden Messungen nicht vom gleichen Objekt stammen oder von „wandernden“ Reflexionspunkten, wie dies bei seitlichen Wänden auftritt.

(Relativ-)Geschwindigkeitsmessung

Dopplereffekt – Herleitung

- Schwingungsgleichung mit f_0 = Trägerfrequenz:

$$u_r = A_r \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi)$$

- Rückstreuphase wird durch Relativbewegung verändert:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= -2\pi \cdot 2 \frac{\frac{v_{\text{rel}}}{\lambda}}{t} \\ &= 2 \frac{v_{\text{rel}}}{c} f_0\end{aligned}$$

- Zeitlich konstante Phasenänderung führt zu einer Frequenzänderung:

$$f = f_0 - 2 \underbrace{\frac{v_{\text{rel}}}{c} f_0}_{f_{\text{Doppler}}}$$

- Beispiele:

- $f_0 = 76,5 \text{ GHz}$, $f_{\text{Doppler}} = 510 \text{ Hz} \cdot \frac{v_{\text{rel}}}{m} \frac{s}{s}$
- $f_0 = 24,125 \text{ GHz}$, $f_{\text{Doppler}} = 161 \text{ Hz} \cdot \frac{v_{\text{rel}}}{m} \frac{s}{s}$



Eine direkte Relativgeschwindigkeitsmessung erlaubt der Dopplereffekt. Dazu ist erforderlich, dass die Phase des Wellenpakets als Information herangezogen werden kann (kohärente Wellen). Die durch Relativbewegung verursachte Phasendrehung während der Messung führt zu einer Frequenzänderung bezogen auf die gesendete Trägerfrequenz f_0 . Akustisches Analogon ist die Tonhöhenverschiebung von vorbeifahrenden Rennwagen. In der Astronomie wird das die anhaltende Ausdehnung des Universums über den als Rotverschiebung zu beobachtenden Dopplereffekt nachgewiesen.

(Relativ-)Geschwindigkeitsmessung

Vergleich Abstandsableitung vs. Dopplerauswertung

- $\Delta v_{\text{rel,derivative}} = \frac{\Delta r}{T_M} \leftrightarrow \Delta v_{\text{rel,Doppler}} = \frac{c \cdot \Delta f}{2f_0}$ mit $\Delta f = \frac{1}{T_M}$
- $\Delta v_{\text{rel,derivative}} \equiv \Delta v_{\text{rel,Doppler}}$

$$\rightarrow \Delta r = \frac{c}{2f_0}$$

Beispiel:

- $f_0 = 76,5 \text{ GHz}, \Delta r \approx 2 \text{ mm} \hat{=} T_M \approx 13 \text{ ps}$

Beide Messmethoden liefern umso genauere Werte, je länger gemessen wird. Der Vergleich der beiden Methoden ergibt, dass bei einer Trägerfrequenz von 76,5 GHz die Abstandsmessung auf 2 mm genau sein muss, um vergleichbare Geschwindigkeitsgenauigkeiten zu erzielen. Die für diese Abstandsauflösung notwendige Zeitauflösung von 13 ps ist um ein bis zwei Größenordnungen kleiner als heute mit bezahlbarer Technik machbar ist. Beim Mikrowellen-RADAR schwankt darüber hinaus der Reflexionsabstand im Bereich von 0,1 ... 1 m, sodass eine genaue Geschwindigkeitsermittlung durch Ableitung nur mit langer Filter- oder Wartezeit möglich ist.

Radarsensoren – Prinzipien

- Winkelmessung durch Anordnung der Antennen:
 - Scanning
 - Monopuls
 - Mehrstrahler
 - Dual-Sensor

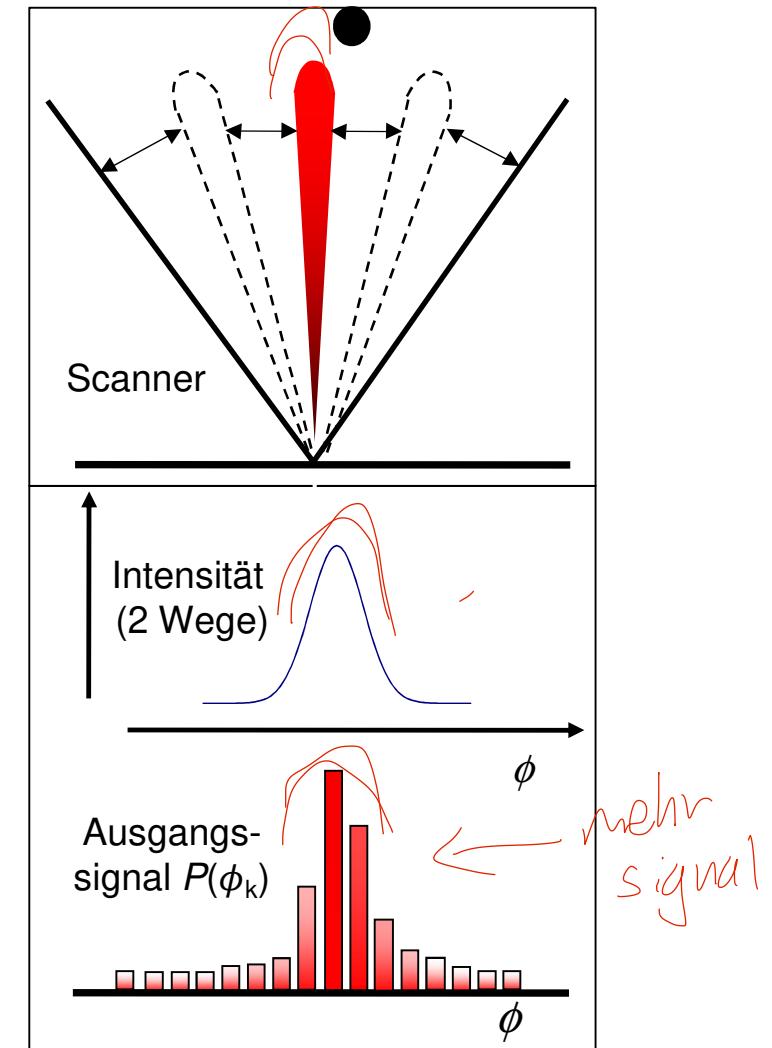


Bild: Bosch LRR3

Winkelmessung

Scanning

- schnelle mechanische Bewegung einer Antenne
- Abfahren des gesamten Erfassungsbereiches innerhalb eines Messzyklus
- Vorteil:
 - genau, da schmaler Strahl (im Vergleich zu LIDAR aber ungenauer, weil Strahl physikalisch bedingt breiter als bei LIDAR ist)
- Nachteile:
 - mechanisch aufwendig
 - schlechte Auflösung der Relativgeschwindigkeit bei kurzer Messdauer



Winner et al.: FAS-Buch, 2015

Die Lateralposition eines Objekts kann recht einfach und zuverlässig durch eine Scanning-Antenne bestimmt werden. Dazu wird innerhalb eines Messzyklus kontinuierlich oder in kleinen Schritten der gesamte RADAR-Sichtbereich durchfahren. Es muss lediglich das Maximum der Rückstreuamplitude als Funktion des Strahlwinkels gesucht werden. Der Aufwand steckt allerdings im Strahlschwenkmechanismus. Hier wird ein zusätzlicher oder ein bereits vorhandener Reflektor an einen Schwenkaktor gekoppelt, der diesen Reflektor bewegt. Für die genaue Bestimmung der aktuellen Winkellage ist zusätzlich eine Winkelmessung oder -regelung erforderlich. Weiterhin ist die Messzeit auf die einzelnen Winkelsegmente aufzuteilen, worunter die Relativgeschwindigkeitsauflösung leidet.

Ausführungsbeispiele

Continental ARS400

Technische Daten:

- Zyklusdauer: 60 ms
- Frequenzbereich: 76-77 GHz
- Modulationsverfahren: Chirp Sequence
- Winkelmessung: Scanning
- Abstand:

$$r_{\min} \dots r_{\max} = 0,25 \text{ m} \dots 70 \text{ m} \text{ (NRS), } 0,25 \text{ m} \dots 250 \text{ m} \text{ (FRS)}$$
$$\Delta r = 0,2 \text{ m}$$

- Geschwindigkeit:

$$v_{\text{rel},\min} \dots v_{\text{rel},\max} = -110 \text{ m/s} \dots +55 \text{ m/s}$$
$$\Delta v_{\text{rel}} = 0,03 \text{ m/s}$$

- Winkel:

$$\phi_{\max} = 150^\circ \text{ (NRS), } 18^\circ \text{ (FRS)}$$
$$\Delta \phi = 5^\circ \text{ (NRS), } 1^\circ \text{ (FRS)}$$



Continental

Ausführungsbeispiele

Hella 24 GHz ACC-Radar 4. Generation

Technische Daten:

- Taktzeit: 50 ms
- Frequenzbereich: 24,05-24,25 GHz
- Modulationsverfahren: Modifiziertes FMSK
- Winkelmessung: Monopuls
- Abstand:

$$r_{\min} \dots r_{\max} = 0,75 \text{ m} \dots 70 \text{ m}$$
$$\Delta r = 1,5 \text{ m}$$

- Geschwindigkeit:

$$v_{\text{rel},\min} \dots v_{\text{rel},\max} = -70 \text{ m/s} \dots +70 \text{ m/s}$$
$$\Delta v_{\text{rel}} = 0,32 \text{ m/s}$$

- Winkel:

$$\phi_{\max} = 165^\circ$$
$$\Delta \phi = 0,5^\circ \text{ (Punktziel)}$$

→ Anwendungen im Heckbereich: Totwinkelwarner, Spurwechselassistent, Auspark-Assistent



Ausführungsbeispiele

Bosch LRR 4

Technische Daten:

- Zyklusdauer: 60 ms
- Frequenzbereich: 76-77 GHz
- Modulationsverfahren: FMCW
- Winkelmessung: 6-Strahl-Konzept
- Abstand:

$$r_{\min} \dots r_{\max} = 0,36 \text{ m} \dots 250 \text{ m}$$
$$\Delta r = 0,36 \text{ m}$$

- Geschwindigkeit:

$$v_{\text{rel},\min} \dots v_{\text{rel},\max} = -80 \text{ m/s} \dots +30 \text{ m/s}$$
$$\Delta v_{\text{rel}} = 0,2 \text{ m/s}$$

- Winkel:

$$\phi_{\max} = 12^\circ \text{ (LR), } 30^\circ \text{ (SR)}$$
$$\Delta \phi = 2^\circ$$



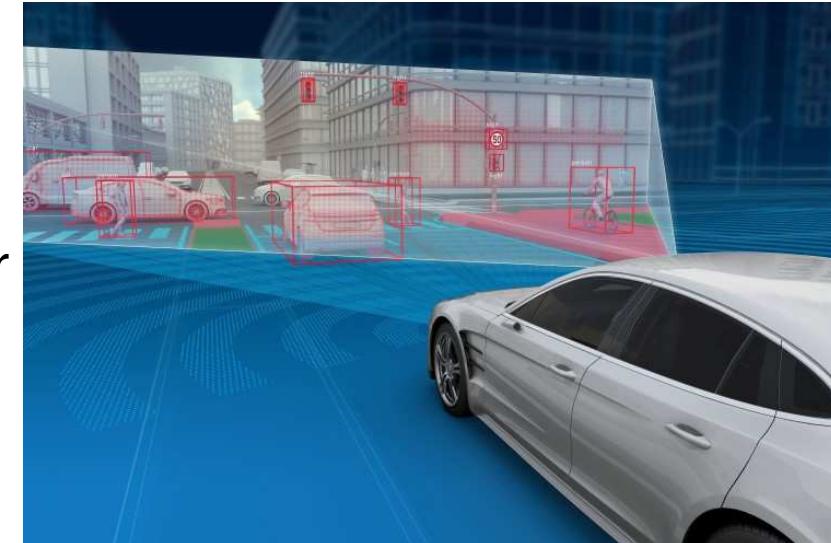
Winner et al.: FAS-Buch, 2015; Bild: Bosch

Die dritte und vierte Generation des Long-Range-Radars bleiben sowohl dem Gehäuse- als auch dem Funktionsprinzip der zweiten Generation treu. Daher sind sowohl die Abmessungen als auch die Kontur in etwa gleich geblieben. Die Sensorhardwarearchitektur weist zwar noch Grundzüge der zweiten Generation auf, hat aber die Frequenzerzeugung grundlegend verändert. Sie erfolgt nun monolithisch integriert auf der Basis von SiGe (Silizium-Germanium). Zwar verwendeten andere Hersteller schon früher monolithische mm-Wellen-ICs, allerdings bisher auf Basis des teuren GaAs (Gallium-Arsenid). SiGe verspricht wegen der angedachten Nutzung auch für PCs und Spielekonsolen eine breitere Anwendungsbasis und damit kostengünstigere Fertigungsbedingungen als GaAs. Die HF-MMICs bieten mehr Möglichkeiten für den Transceiver. Insbesondere wurde dies beim LRR3 und LRR4 für die Empfangselektronik genutzt. Nun kommen Gilbert-Zellen-Mischer zum Einsatz, die zum einen die Konvertierungsverluste verringern und somit eine geringere Peak-Leistung erlauben. Zum anderen ermöglichen sie auf einfache Weise, die Mischerverstärkung der einzelnen Empfangszweige zu modifizieren und somit eine angepasste Antennencharakteristik einzustellen.

Trend: 4D Imaging Radarsensoren

- Bisheriges Problem von Radar: Stillstehende Objekte
 - Kritische Situationen: Durchfahrt unter Brücken, Unfallfahrzeuge auf Fahrbahn, Stauende, ...
- 4D Radarsensoren – Messung von:
 - Entfernung
 - Geschwindigkeit
 - Horizontalwinkel (Azimut)
 - **Neu:** Vertikalwinkel (Elevation)

→ Radarsensor wird zu bildgebender Technologie
→ Objektklassifikation möglich



4D High-Resolution Radar:

Klassische Radarsensoren erfassen drei Merkmale von Objekten: Abstand, Bewegungsrichtung und Relativgeschwindigkeit. Bisher wurden Reflektionen von stehenden Objekten meist ignoriert und nur Objekte mit einer Relativgeschwindigkeit ungleich 0 zum Ego-Fahrzeug verfolgt. Zusätzlich konnte durch die hohe Streuung der reflektierten Strahlen und die ausschließlich horizontale Messung keine Klassifikation von detektierten Objekten erfolgen.

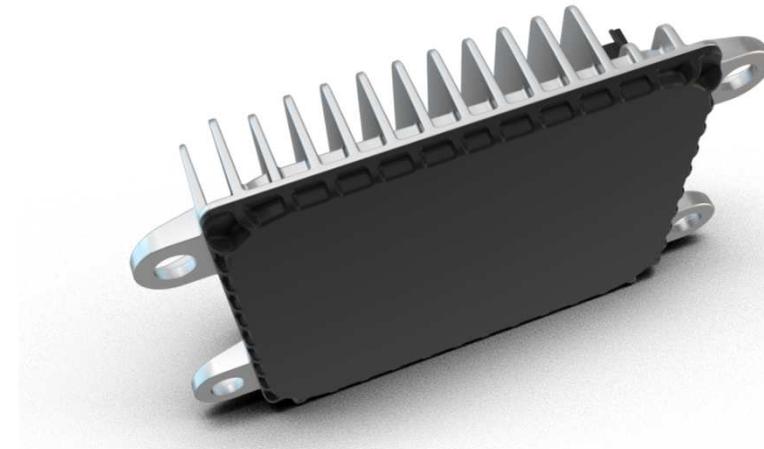
4D-Radarsensoren können durch die Erweiterung des Messbereichs um einen vertikalen Winkel (Elevationswinkel) zusätzlich Informationen über die Höhe von detektierten Objekten gewinnen. Dadurch können Objekte klassifiziert werden, was bisher mit Radarsensoren noch nicht möglich war. So können ein erhöhter Fahrbahnrand, eine Brücke oder parkende Fahrzeuge zuverlässig erkannt und eingeordnet werden.

High-Resolution Radarsensoren besitzen dank *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) zudem eine wesentlich höhere Auflösung. Beispielsweise besitzt der 4D Radarsensor von ZF 12 Sender und 16 Empfänger. Dadurch ergeben sich 192 virtuelle Kanäle – die 16-fache Anzahl der Kanäle von klassischen Radarsensoren (12 Kanäle). Dadurch entstehen pro Messzyklus mehrere Tausend Datenpunkte, gegenüber wenigen hundert Punkten bei heute üblichen Sensoren.

Mit 4D High-Resolution Radarsensoren wird die Leistungsfähigkeit von Radar als Umgebungssensor in Fahrzeugen auf ein neues Level gehoben. Durch seine Robustheit und den günstigen Preis wird die Technologie als wichtige Entwicklung auf dem Weg zu hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen gesehen.

Beispiel: ZF 4D Full-Range Radar

- Frequenz: 77 GHz
- Modulationsverfahren: FMCW-Modulation
- Reichweite: 350m
- 192 Kanäle
- Azimutwinkel: +/- 60°
- Elevationswinkel: +/- 7,5°



ZF

Sensorik / Wahrnehmung I

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

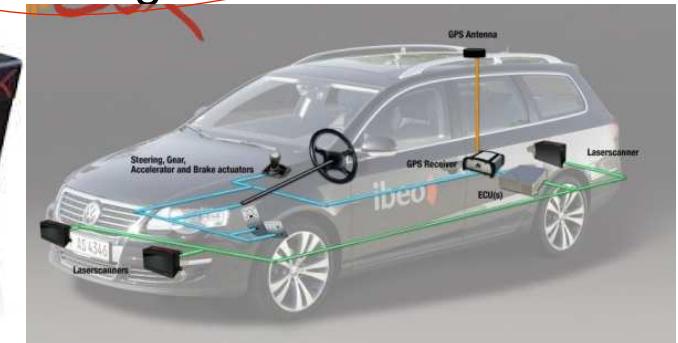
- 2 Sensorik / Wahrnehmung I
 - 2.1 Sensorkategorien
 - 2.2 Ultraschall
 - 2.3 RADAR
 - 2.4 LiDAR
 - 2.5 Kamera
 - 2.6 Vergleich



Lasersensoren

与雷达类似，但发射的不是微波，而是紫外线、红外线或可见光

- LiDAR = **Light Detection and Ranging**
- Ähnlich zum Radar, allerdings anstelle von Mikrowellen werden Ultraviolett-, Infrarot- oder sichtbare Strahlen emittiert *Laser*
- Abstandsmessung nach „Time of Flight-Prinzip“:
 - Entfernung proportional zur Zeitdauer von Aussendung bis Empfang von Lichtimpuls
- Geschwindigkeitsmessung per Doppler-Effekt möglich
 - Wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen zurzeit aber nicht wirtschaftlich umsetzbar



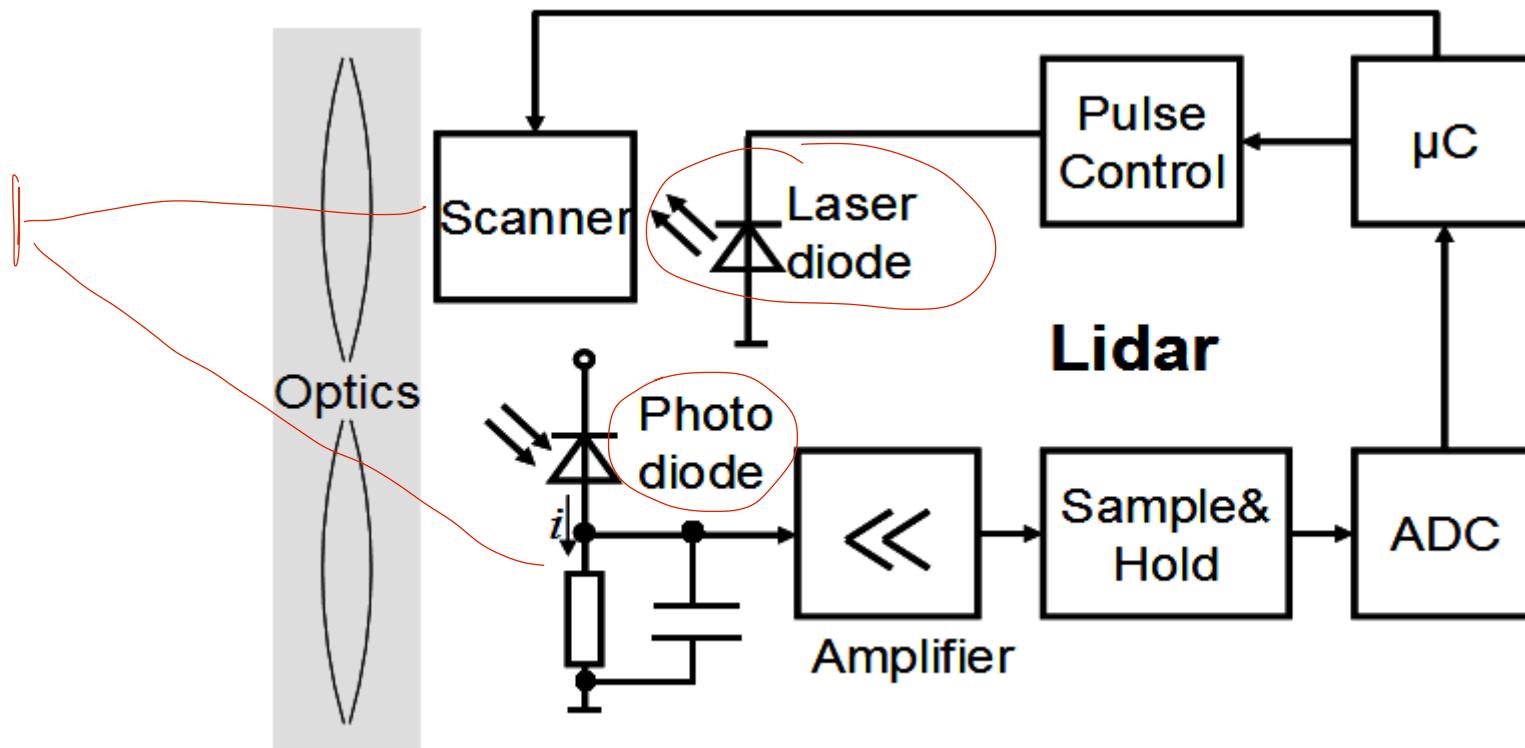
Bilder: Ibeo

Lasersensoren – Leistungsfähigkeit

- bedingte Wetterabhängigkeit
 - zum Beispiel bei (Sprüh-)Regen oder Nebel Reflexion des Lichts an Wassertropfen
- Mehrzielfähigkeit
- Abstandsmessung: 1 bis 200 m im Long Range Modus, bis 30 m Short Range
- Geschwindigkeitsermittlung via Tracking
 - Genauigkeit $\Delta v \sim 0.3$ m/s
- Öffnungswinkel: 30° Long Range und bis 180° Short Range
- Vorteil: Messung der Breite und der Quergeschwindigkeit von Objekten ist möglich
- Problem: schwarze Fahrzeuge



Sensoraufbau

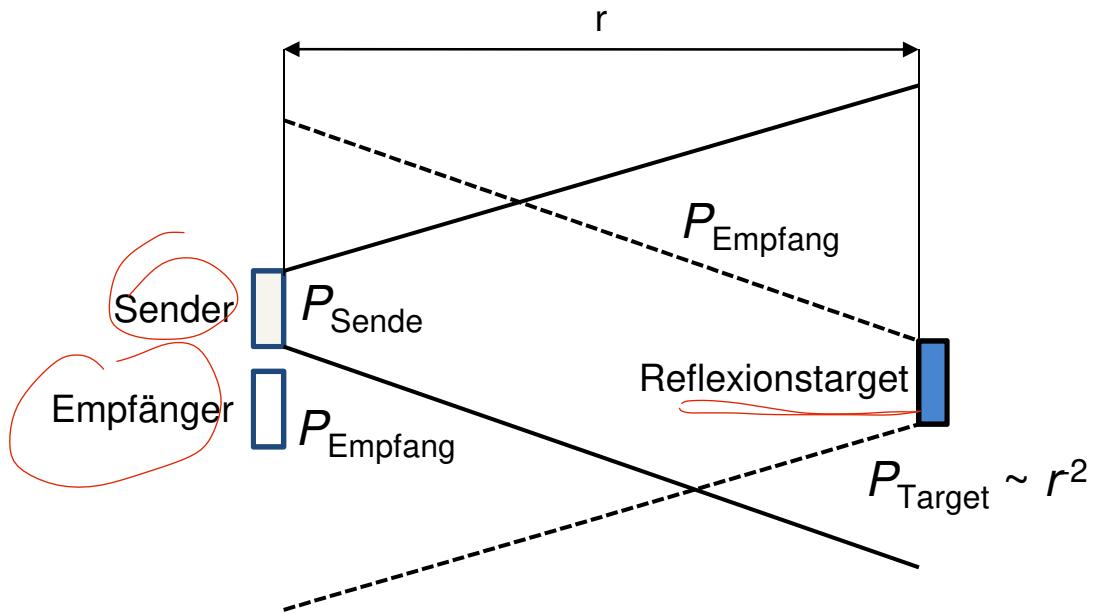


Winner, TUD

Ähnlich den Ultraschallsensoren arbeiten die Lidar-Sensoren mit einer Pulsmodulation. Die Quelle ist ein Halbleiter-Laser, der kurze Pulse von etwa 10 ns (entspricht einer Paketlänge von $\Delta t \cdot c \approx 3$ m) aussendet. Anders als beim Ultraschallsensor sind Sender und Empfänger getrennt und die Eingangs- und Ausgangssignalwege optisch entkoppelt. Dadurch entfallen die Ausklingzeiten und der Empfänger ist spätestens nach Ende des Sendepulses bereit. Die Mindestentfernung beträgt bei den im Kfz-Einsatz üblichen Sensoren etwa 1 m.

Ein spezifisches Merkmal von aktiven optischen Sensoren wie Lidar ist die nichtlineare Wandlung der Fotodiode. Der an der Diode gemessene Strom i steigt linear mit der Leistung P des empfangenen Lichts. Die empfangene elektrische Leistung ($\sim P^2$) ist damit proportional zum Quadrat der Lichtleistung. Damit steht bei Halbierung der rückgestreuten Lichtleistung nur ein Viertel der elektrischen Empfangsleistung zur Verfügung. Abschwächung durch zunehmende Objektentfernung oder schwächere Rückstreuung führen dann zu einer überproportionalen Abschwächung des Messsignals.

Reflexion und Abschwächung



- $P_{\text{Empfang}} = A_b \cdot P_{\text{Sende}} \cdot \frac{A_{\text{Refl}}}{A_{\text{Sende}}} \cdot \frac{A_{\text{Linse}}}{A_{\text{Empfang}}} \cdot k_R$
- $A_{\text{Sende}} \text{ und } A_{\text{Empfang}} \sim r^2 \rightarrow \frac{P_{\text{Empfang}}}{P_{\text{Sende}}} \sim \frac{1}{r^4}$
- $A_b = 10^{-2kr} = 10^{-2 \cdot \frac{T_R}{10} \cdot \frac{1}{1000 \cdot r}}$

r : Abstand in m

P_{Sende} : Sendeleistung

P_{Empfang} : Empfangsleistung

A_b : Abschwächung

k : Dämpfung der Atmosphäre

P_{Target} : am Target ankommende Leistung

k_R : Reflexions- Transmissionskoeffizient

T_r : Abschwächungskoeffizient in dB/km

A_{Refl} : Reflektierende Fläche in m^2

A_{Sende} : Querschnittsfläche Sendestrahl in m^2

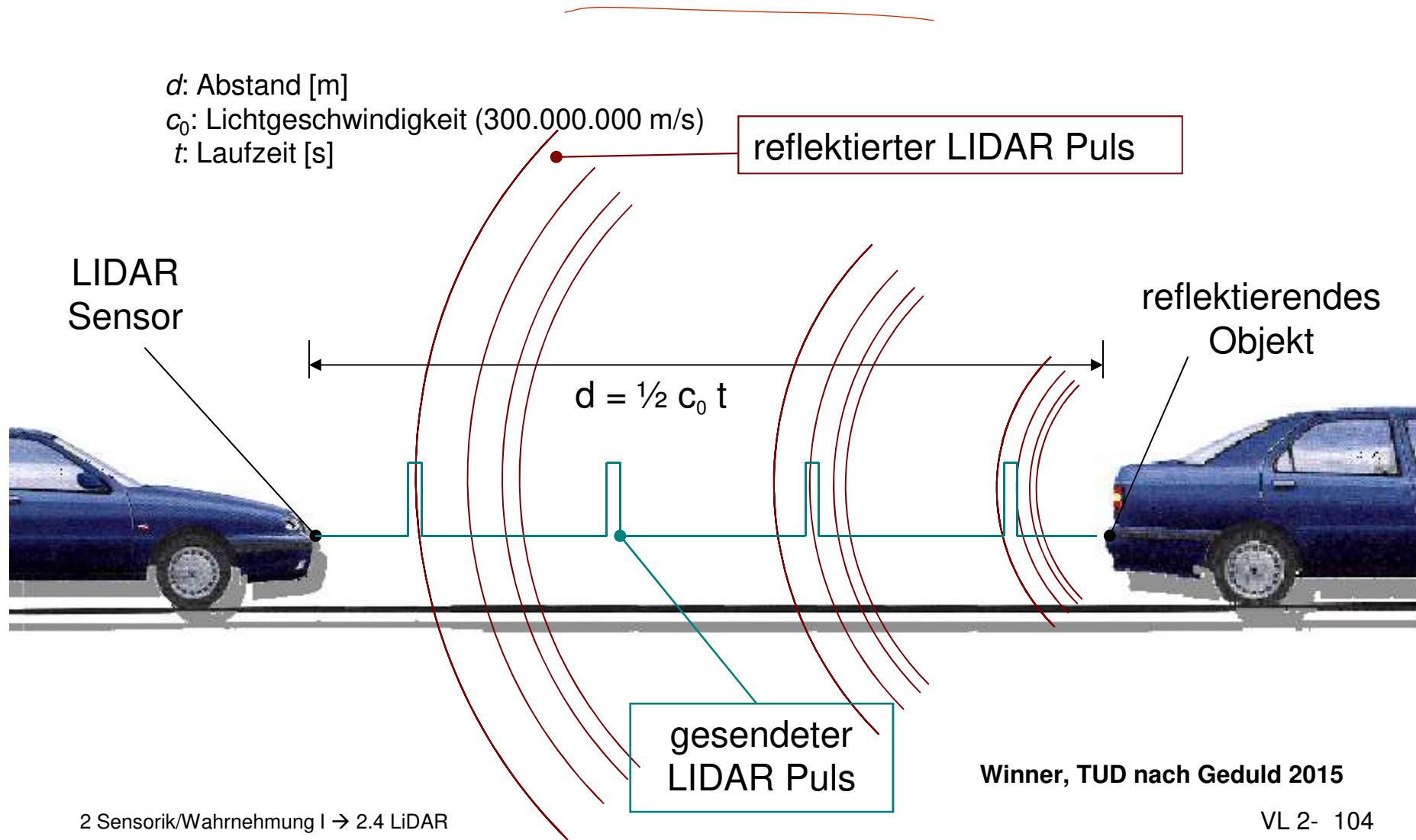
A_{Empfang} : Effektive Querschnittsfläche des reflektierten Strahls am Empfänger in m^2

A_{Linse} : Fläche der Empfangslinse in m^2

Durch die Ausbreitung des Laserlichts in Form eines Kugelausschnittes ist die am Target reflektierte Leistung (P_{Target}) proportional zu $1/r^3$. Diese wird ebenfalls kugelförmig (bzw. als Ausschnitte einer Kugel) abgestrahlt und zum Empfänger zurückgeworfen, dies ist ebenfalls proportional zu $1/r^3$. Dadurch sind Sendeleistung (P_{Senden}) und empfangene Leistung (P_{Empfang}) mit dem Proportionalitätsfaktor $1/4$ voneinander abhängig. Vereinfachend sind die Transmissionseigenschaften des umgebenden Mediums sowie die Reflexionseigenschaften des Targets im Faktor k_R zusammengefasst.

Ein Reflektor, der die Energie im Raumwinkel (innerhalb einer Kugel) zurückstrahlt, wird als Lambert-Reflektor bezeichnet.

Laufzeitmessung – Time of Flight (ToF)

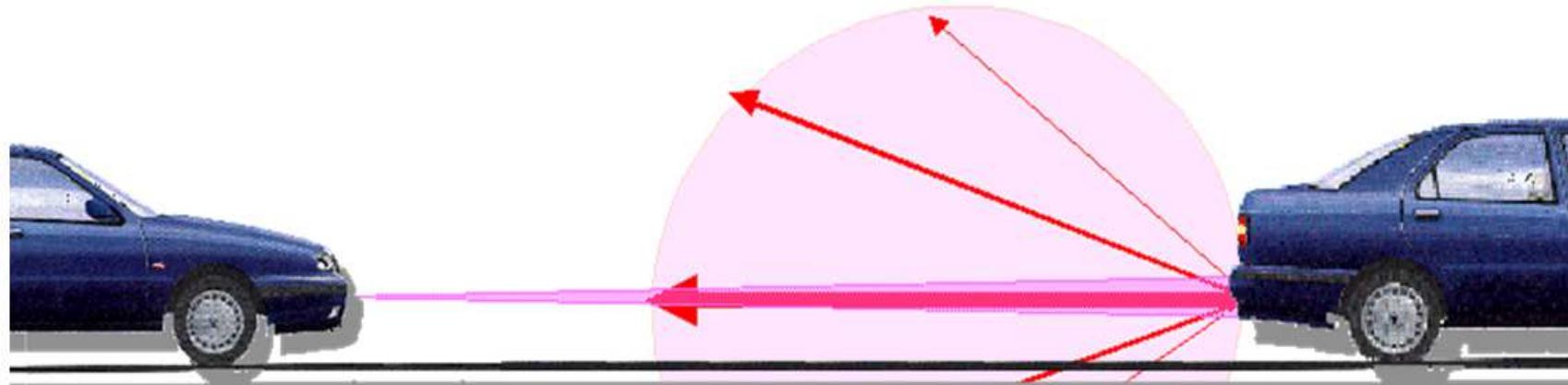


Time-of-Flight-Messung: Dabei werden ein oder mehrere Lichtpulse ausgesendet und an einem evtl. vorhandenen Objekt reflektiert. Die Zeit bis zum Empfang des reflektierten Signals ist dann proportional der Entfernung. Bei einer Geschwindigkeit des Lichtes von ca. 300.000 km/s (in Luft) beträgt die zu messende Laufzeit bei einem Abstand von 50 m (bei 100 km/h = Tacho/2) etwas über $3 \cdot 10^{-7}$ Sekunden oder 333 ns.

Beschränkt durch die durch die Laserklassen limitierte Ausgangsleistung (Class 1 ist zwingend vorgeschrieben) und die diffuse Reflexion am Objekt werden enorme Anforderungen an den Empfänger sowie die Auswertemethode gestellt.

Lambert – Reflektor

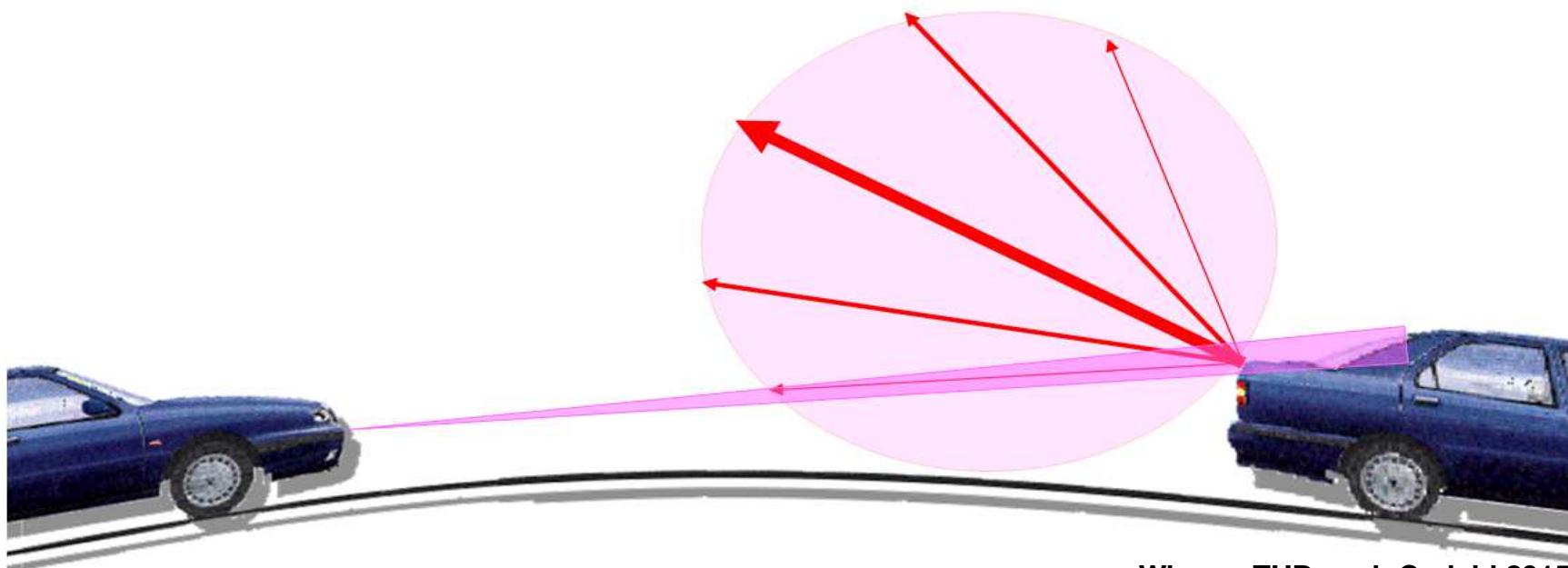
- Rückstreuung der Energie nicht gerichtet, sondern im Raumwinkel (innerhalb einer „Kugel“), wobei die Absorption bis zu 80% beträgt.
- Maßnahmen:
 - Höhere Sendeleistung
 - Gebündelter Strahl (Erhöhung der Energiedichte)
 - Empfindlicherer Empfänger



Winner, TUD nach Geduld 2015

Totalreflexion

- Ablenkung gebündelter Strahlen an „spiegelnden“ Flächen
- Maßnahmen:
 - Größerer Strahlquerschnitt (Aufweitung)
 - Mehrere Strahlen in Azimut und Elevation



Winner, TUD nach Geduld 2015

Eine große Herausforderung bei der Lasermesstechnik besteht darin, die stark limitierte Energie (Augensicherheit) nach der Reflexion an einem Objekt wieder zu empfangen (detektieren).

Dabei ist zu beachten, dass gewöhnlich das Objekt (Fahrzeug) ähnlich einem Lambert-Reflektor seine Energie in den vollen Raumwinkel (360°) abstrahlt.

Da, wie erwähnt, die Sendeleistung beschränkt ist, kann man als Abhilfe den Strahl stärker bündeln, um die Energiedichte zu erhöhen, oder einen höher verstärkenden Empfänger einsetzen.

Totalreflexion tritt dann auf, wenn man schmale Strahlen einsetzt, die auf eine schräge Fläche treffen.

Abhilfe kann man nur durch aufgeweitete Strahlen oder mehrere Strahlen schaffen, um auf Kanten oder anders gerichtete Teile zu treffen.

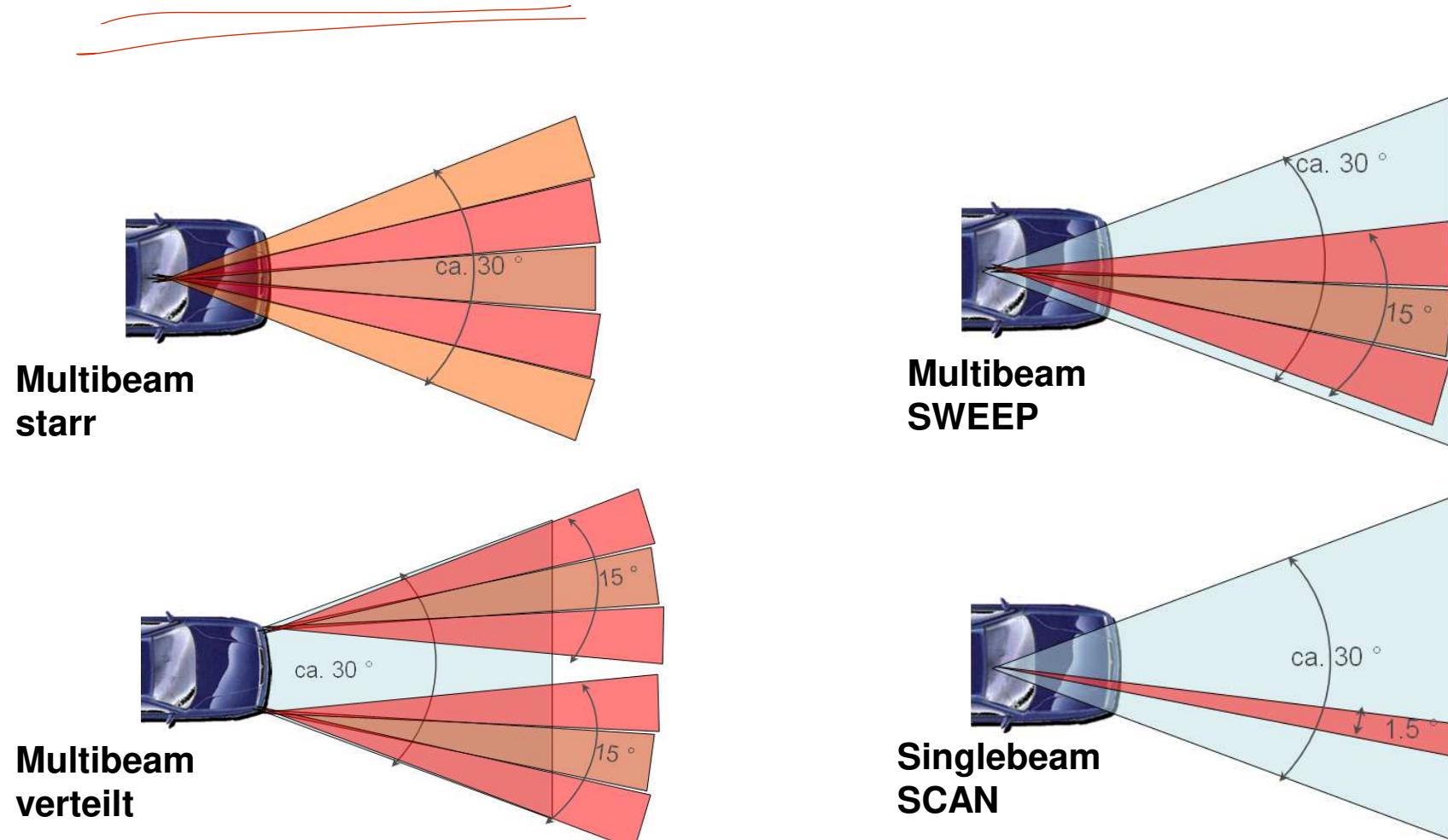
Nachteile dieser Maßnahme:

- Entweder kontraproduktiv zur Gegenmaßnahme bei einem Lambertreflektor
- Oder verursacht Mehrkosten beim Einsatz von mehreren Strahlen.

Mechanische LiDAR

- Bestandteile:
 - Laser-Array
 - Optik (Linsen, Reflektoren, etc.)
 - Elektronik
 - Detektoren
- Gesamtes System ist mechanisch beweglich gelagert
→ Horizontale Rotation (je nach Anwendungsfall 10°- 360°)
- Nachteil: Aufwendige Konstruktion
 - Montage komplex
 - Hohe Kosten
 - Begrenzte Lebensdauer (Abnutzung der beweglichen Bauteile, Ausfall bei Beschädigung)

Mechanische LiDAR: Horizontal Features



Winner, TUD nach Geduld 2003

Es gibt verschiedene technische Konzepte, um mit einem Laser den notwendigen Erfassungsbereich vor dem Fahrzeug zu detektieren.

Notwendig im Sinne der Funktion ACC ist z.B. die Erfassung des eigenen Fahrstreifens respektive des Fahrschlauches vor dem Fahrzeug.

Wie vorher beschrieben ist die Strahlauflaufweitung begrenzt aufgrund der Empfindlichkeit. Durch Einsatz mehrerer Strahlen kann der Erfassungsbereich erweitert werden (Multibeam). Schwenkt man das Strahlbündel langsam, um dem Straßenverlauf zu folgen, spricht man von (Multibeam) Sweep. Alternativ kann man auch einen schmalen Strahl schnell über den Erfassungswinkel bewegen (Singlebeam Scan).

Dabei ergeben sich mehrere Möglichkeiten der Auswertung:

- Erfassung des gesamten bestrahlten Gebietes und Auswertung des relevanten Ziels anhand des ermittelten Fahrschlauches
- Blickrichtungssteuerung und damit Erfassung nur im Fahrschlauch

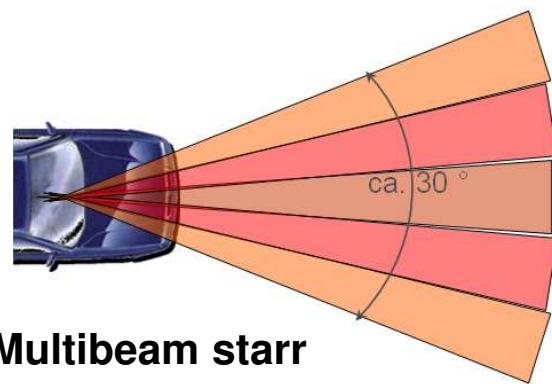
Je nach Ausprägung ergeben sich unterschiedliche Performance- sowie Kostenaspekte.

Für die Bestimmung der Objektlage kommen drei Möglichkeiten in Frage:

- Multi-Beam mit 6 bis 16 Strahlen
- Scanner mit Abtastung von 16 bis 250 Winkelsegmenten in oftmals drei bis sechs Ebenen
- Sweep-System mit bewegtem Multi-Beam, der in die Kurve schaut

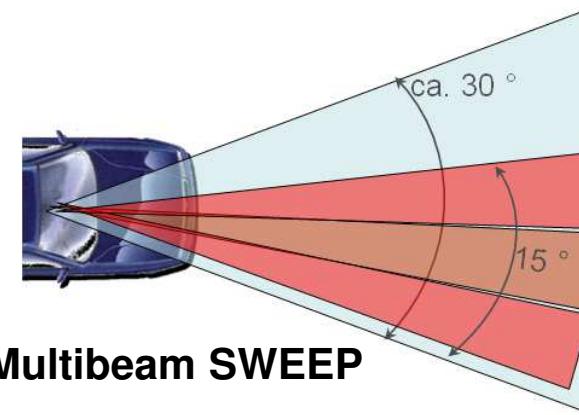
Grundsätzlich kann ein lateral und/oder vertikal gut auflösender Scanner auf eine Mehrzielfähigkeit innerhalb eines Raumwinkelsegments verzichten, da kaum anzunehmen ist, dass sich hinter dem ersten Objekt ein weiteres verbergen kann, welches für die Funktion z. B. einer Abstandsregelung relevant wäre. Allerdings tritt dann ein Problem auf, wenn das erste Objekt ein Scheinobjekt (z. B. Nebel) ist.

Mechanische LiDAR: Auswahl relevantes Ziel



z. B. Multibeam starr

- Erfassung von Objekten im gesamten Erfassungsbereich
- Tracking der Objekte
- Diskretisierung der Ziele über Fahrschlauch
- Vorteil: Erfassung aller Objekte
- Nachteil: Rechen- und Speicheraufwand auch für nicht relevante Objekte



z. B. Multibeam SWEEP

- Ermittlung der relevanten Blickrichtung
- Aktivierung der Messung nur im relevanten Bereich
- Tracking der erfassten Objekte
- Vorteil: Geringe Rechenleistung
- Nachteil: Erfassung abhängig von Blickwinkelermittlung

Winner, TUD nach Geduld 2015

Solid-State-LiDAR

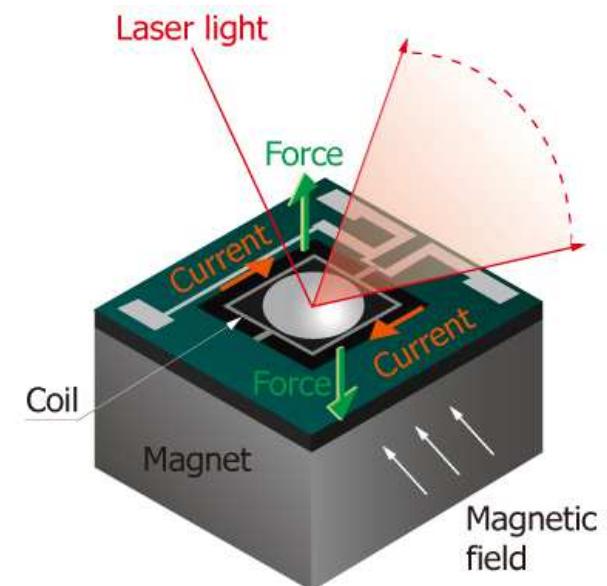
Vorteil: Wenig bis keine beweglichen Bauteile

- Komplexität ↓
- Bauraum ↓
- Kosten ↓
- Lebensdauer ↑

Technologie:

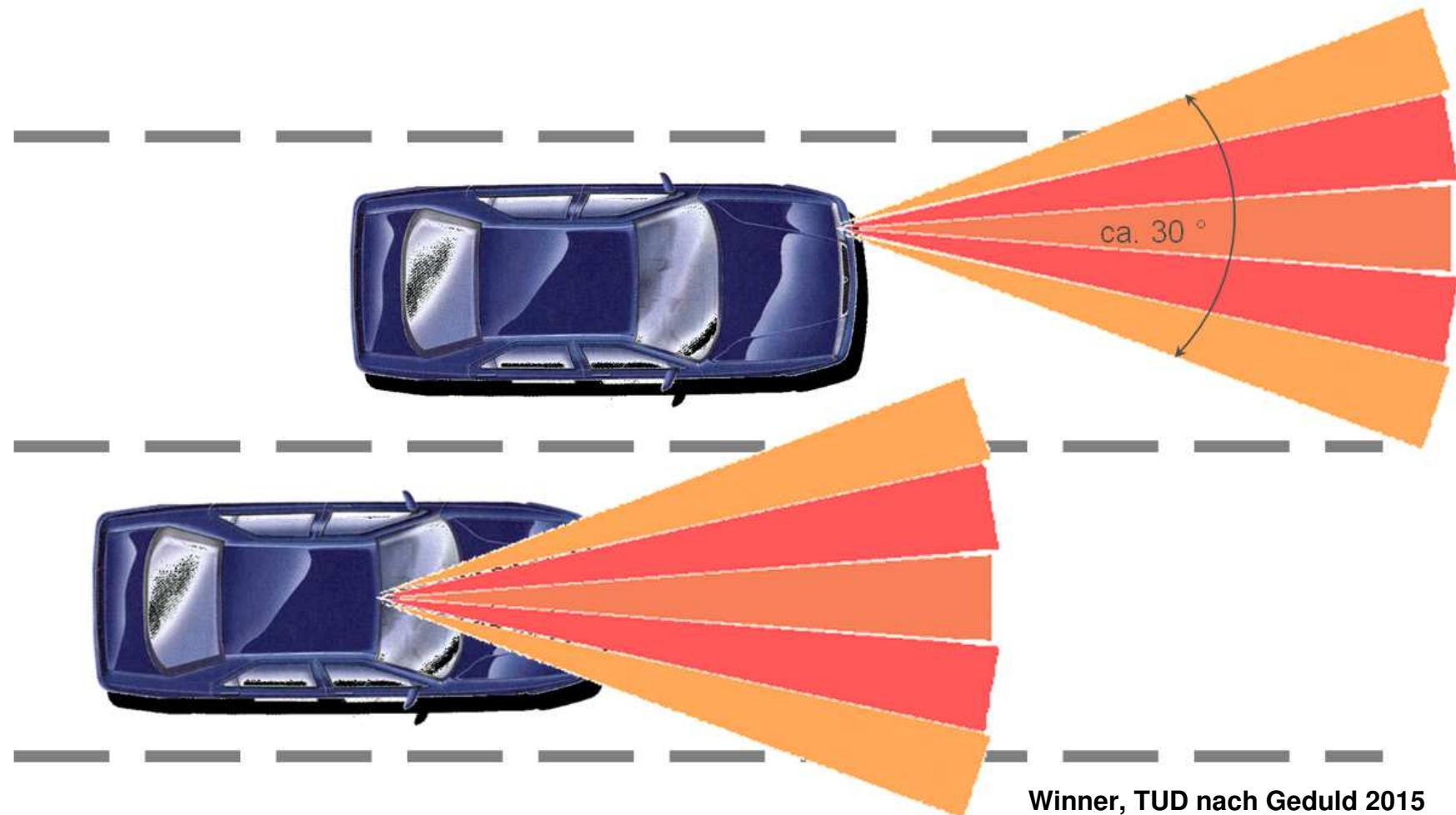
- Array aus mehreren Laser-Reihen
- Aktuell: MEMS-Spiegel (Micro-electro mechanical system) steuert Strahlen der stationären Laser
- Zukünftig: SoC (System on a Chip)
→ Alle Bauteile (Laser, Optik, Elektronik, Detektoren, ...) auf einem Halbleiter-Bauteil

ibeoNEXT Solid State LiDAR



MEMS-Mirror (Hamamatsu)

Horizontal Features – Einbauposition



Winner, TUD nach Geduld 2015

Da man von einer punktförmigen Quelle ausgehen muss, hat ein nach hinten versetzter Einbauort (z.B. Windschutzscheibe) den Vorteil, einen möglichst großen Bereich direkt vor dem Fahrzeug abzudecken.

Winner, TUD nach Geduld 2015

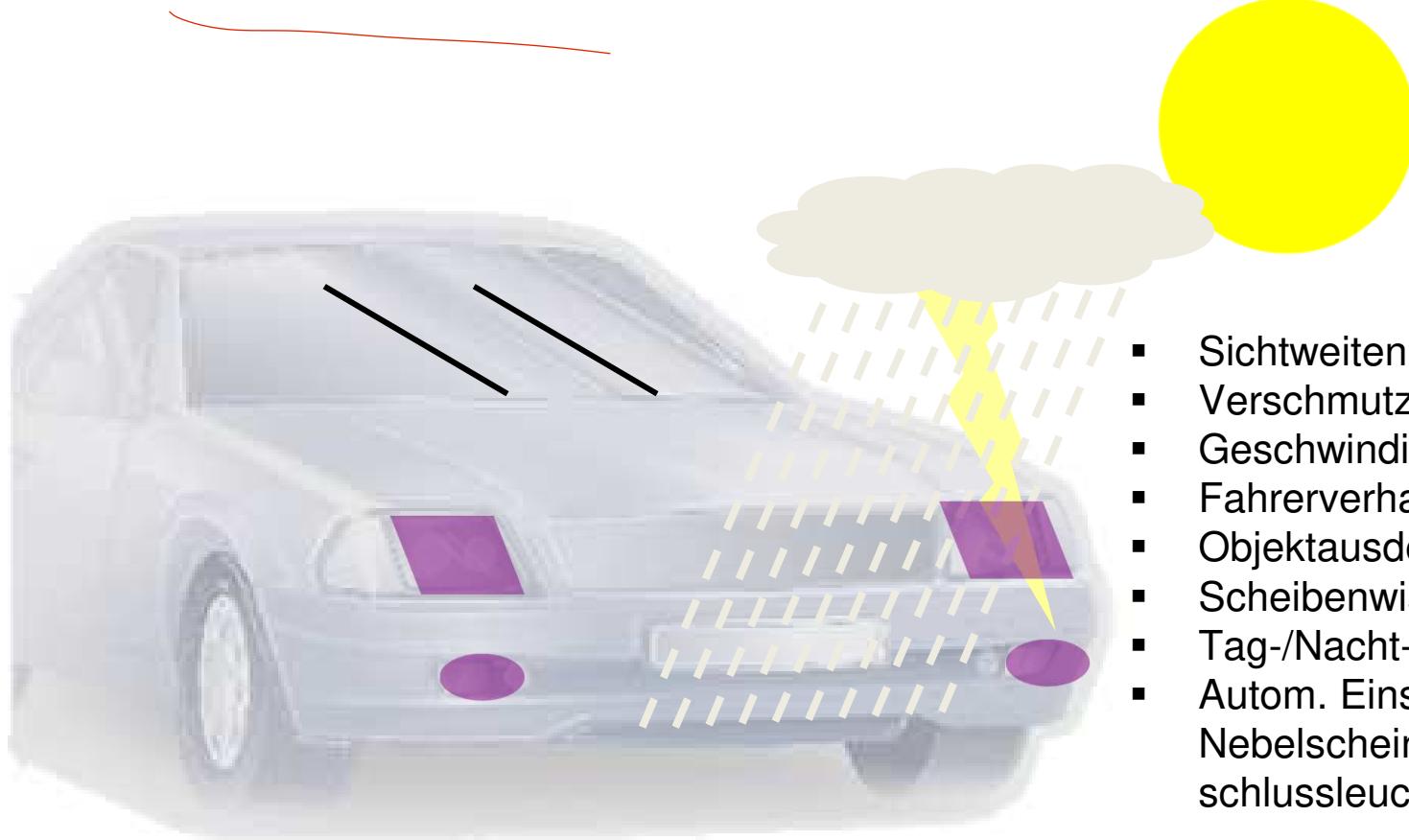
Einbauposition – Flexible Einbauraum

- Fahrzeugfront
 - Kühlergrill, Scheinwerfer,
hinter Windschutzscheibe, etc.
- Sichtbarer oder verdeckter Bereich
 - Optimaler Bereich
 - horiz.: +/- 400 mm
 - vert.: 300-1200 mm
 - Tolerierbarer Bereich
 - horiz.: +/- 600 mm
 - vert.: 200-1500 mm



Winner, TUD nach Geduld 2015; Bild: Cnet

Zusatzfunktionen



- Sichtweitenmessung
- Verschmutzungserkennung
- Geschwindigkeitsermittlung
- Fahrerverhalten/-zustand
- Objektausdehnung/-erkennung
- Scheibenwischer-Ansteuerung
- Tag-/Nacht-Erkennung
- Autom. Einschalten
- Nebelscheinwerfer/-schlussleuchte

Winner, TUD nach Geduld 2015

Neben der originären Funktion der Abstands- und Relativgeschwindigkeitsermittlung können mit der Infrarottechnologie weitere Funktionen dargestellt werden.

Zum Beispiel:

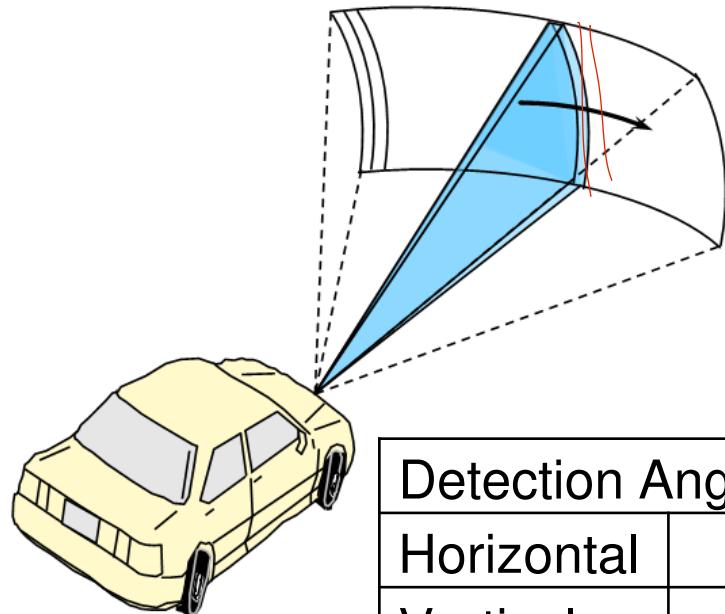
- Geschwindigkeitsempfehlung anhand der gemessenen Sichtweite.
- Automatische Scheibenwischeransteuerung durch die Erkennung von Verschmutzung und Nässe.
- Steuerung der Scheinwerfer durch Erkennung von Tag oder Nacht (Tunnel etc.).
- Steuerung der Nebellampen (vorne und hinten) anhand der Sichtweitenerkennung.
- Steuerung der Scheinwerferwaschanlage und ökonomischer Einsatz von Reinigungswasser.

2D-Scanning Lidar

1-Dimensional Scanning

No Höhe Info

Horizontal Scanning Direction

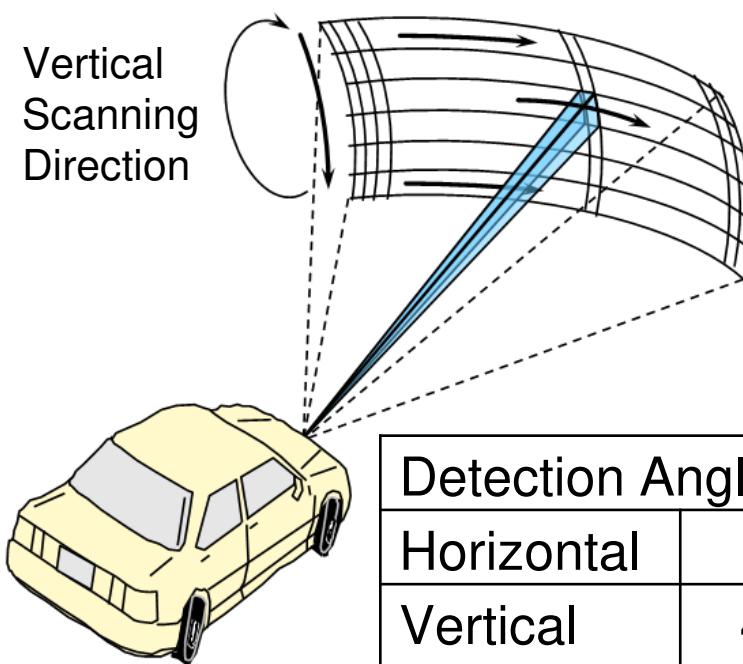


Detection Angle

Horizontal	12°
Vertical	4°

2-Dimensional Scanning

Horizontal Scanning Direction



Detection Angle

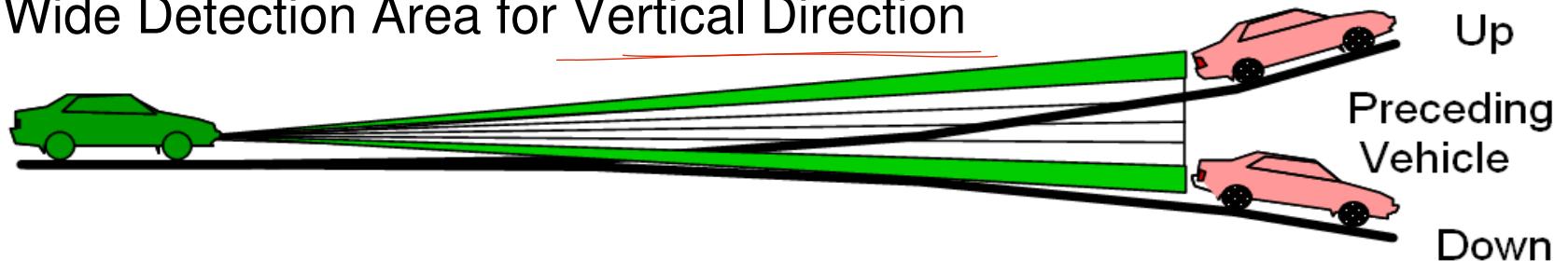
Horizontal	16°
Vertical	4.4°

Winner, TUD nach Denso

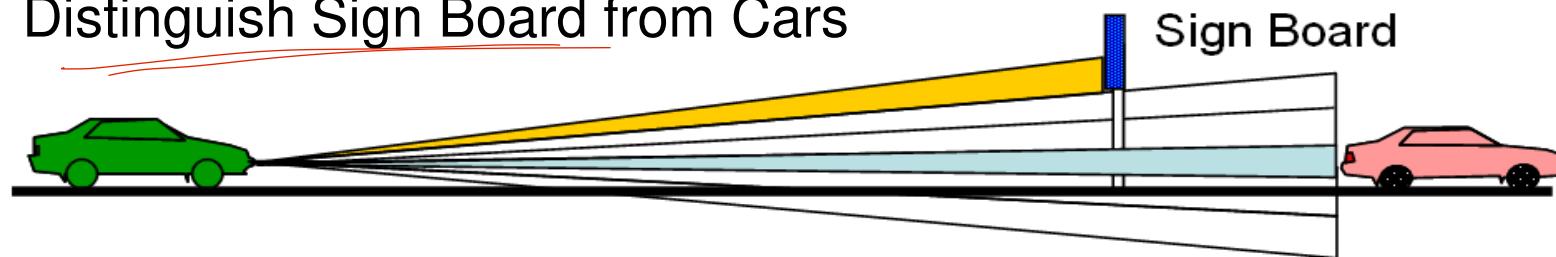
Vergleich des 2D-Scanners mit einem von Mitsubishi auf den Markt gebrachten 1D-Scanner.
Auf der folgenden Seite werden die Vorteile des 2D-Scanners illustriert. Ein Hauptnachteil dieses Prinzips ist die starke Verschmutzungsempfindlichkeit. Eine Verdeckung durch Fliegendreck kann signifikante Einbußen zur Folge haben, da damit ein ganzer Raumwinkel ausfällt.

2D Scanning Lidar – Vorteile

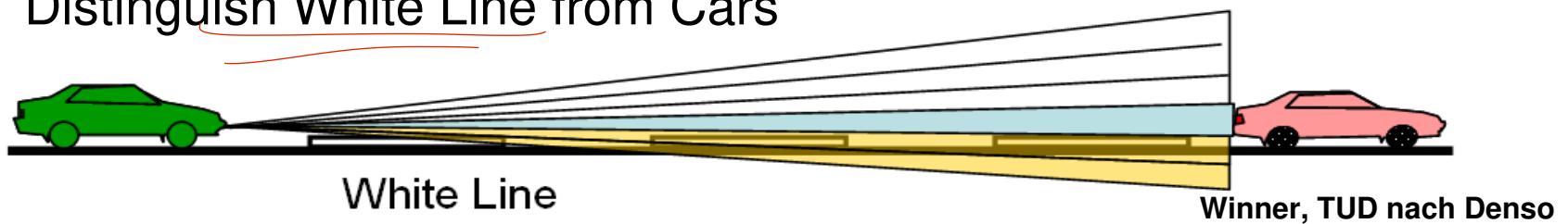
Wide Detection Area for Vertical Direction



Distinguish Sign Board from Cars

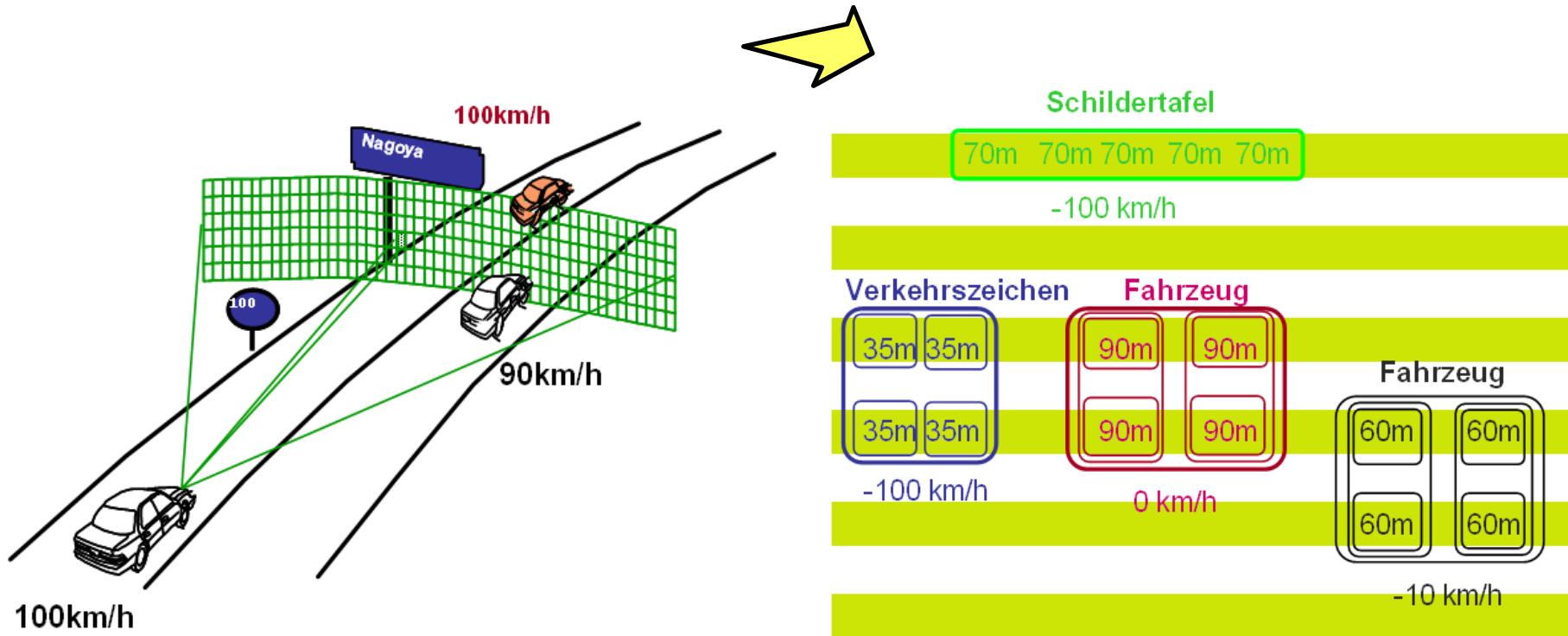


Distinguish White Line from Cars

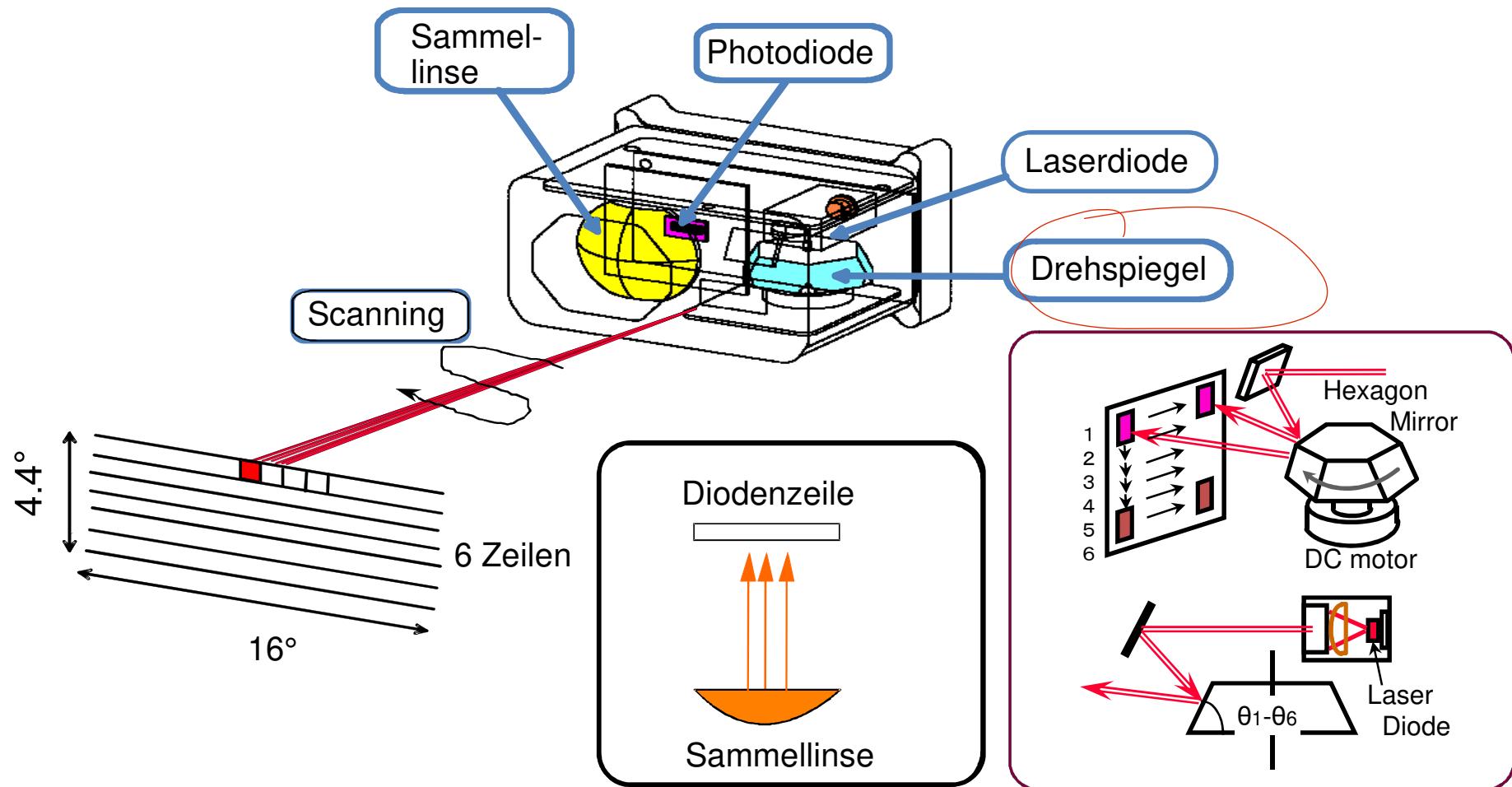


Winner, TUD nach Denso

2D Scanning Lidar – Vorteile



2D Scanning Lidar – Vorteile

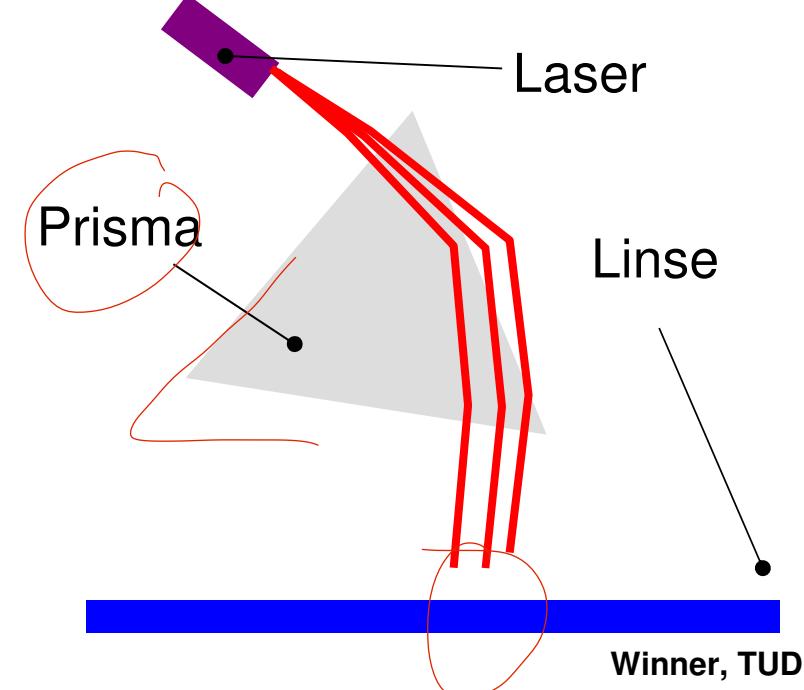
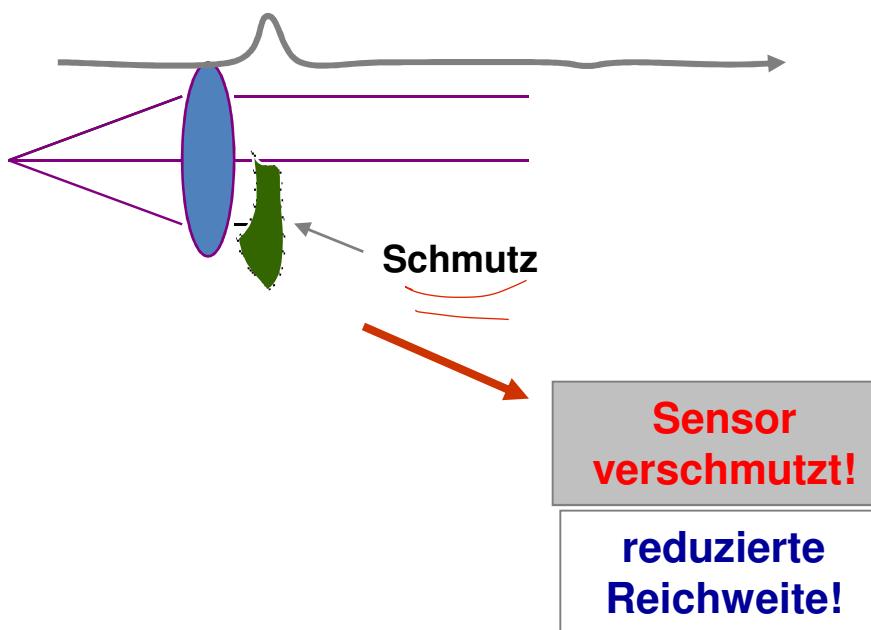


Winner, TUD nach Denso

扫描仪：脏污时实体角度和范围严重受损

Scanner vs. Prismenablenkung

- Scanner: Starke Raumwinkel- und Reichweiteneinbußen bei Verschmutzung
- Prismenablenkung von aufgeweiteten Strahlen ist erheblich robuster gegen lokale Abdeckung. (Reichweiteneinbuße ca. 20% bei 50% Verdeckung der Linse)
- Verschmutzungserkennung möglich
- Aber: geringere laterale Auflösung



Die große Stärke der aktiven optischen Sensoren, die Schärfe des Strahls, wird allerdings zum Nachteil, wenn dieser als enger Strahl aus dem Gehäuse tritt. Dann können schon kleine Verdeckungen, wie z. B. anhaftende Fliegen, größere Raumwinkel „erblinden“ lassen. Abhilfe kann eine Strahlaufweitung leisten, die aber zum Verschleifen des Strahls führt und somit den Vorteil der hohen lateralen Auflösung wieder reduziert.

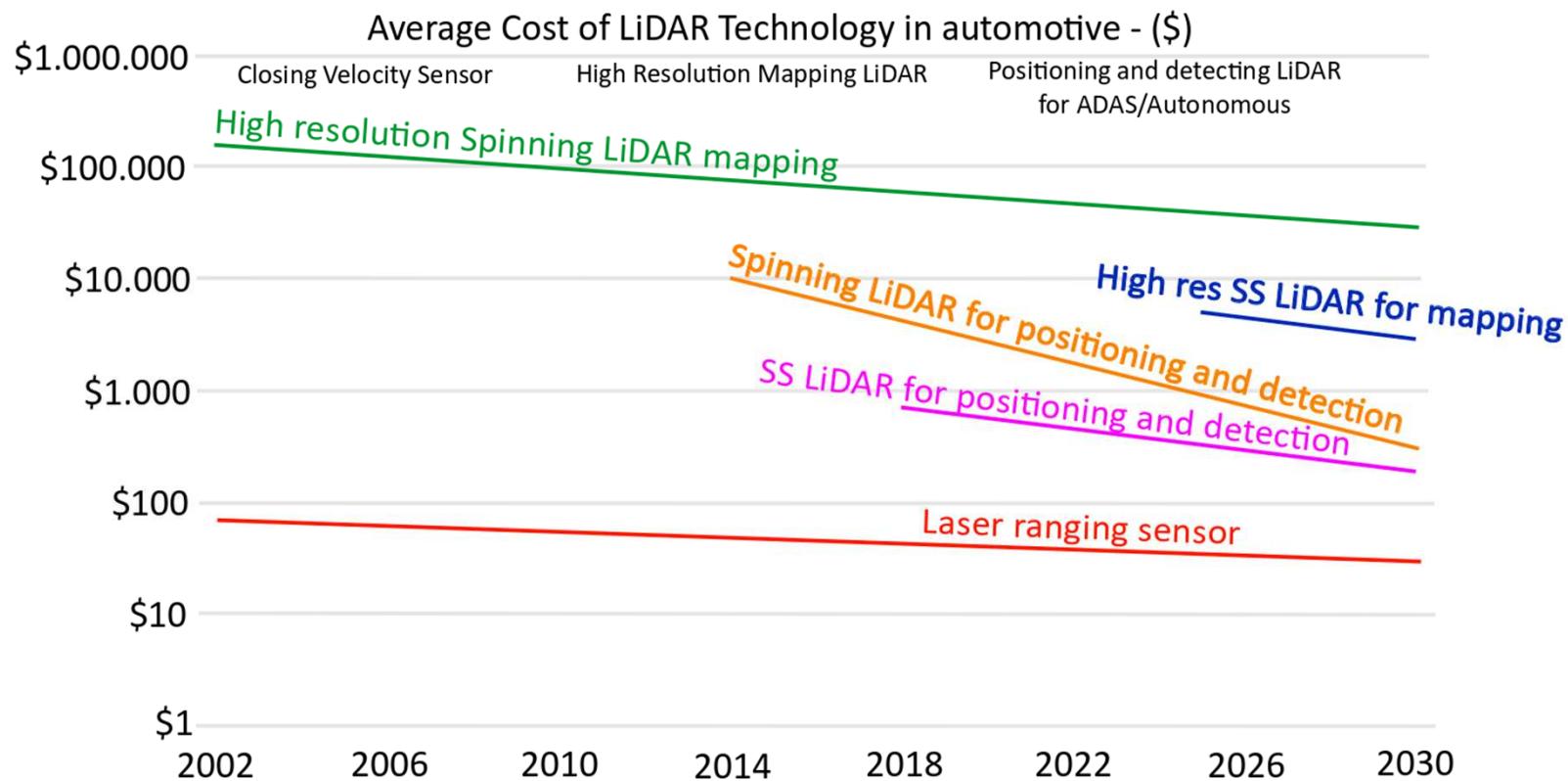
Scanner mit eng gebündelten Strahlen büßen schon bei kleinen Verschmutzungsflecken erheblich an Erkennungsleistung ein.

Prismenablenkung von aufgeweiteten Strahlen wie im ContiTemic AIS200 (Anm: Entwicklung wurde 2004 gestoppt) sind erheblich robuster gegen lokale Abdeckung. (Reichweiteeinbuße ca. 20% bei 50% Verdeckung der Linse)

Da das Messprinzip auch bei 0 m messen kann, ist es möglich, eine Verschmutzung des eigenen Sensors sofort zu erkennen!

Nachteil: Die laterale Auflösung ist erheblich geringer als bei einem Scanner.

Lidar Preisentwicklung



Yole, 2017

Ibeo Scala (mechanisch)

- Sichtfeld:
 - 145° Horizontal,
 - 3,2° Vertikal
- Reichweite: 80m
- 4 Ebenen
- Datenrate: 25 Hz
- Genauigkeit < 10cm
- Winkelauflösung:
 - Bis zu 0.25° Horizontal
 - 0.8° Vertikal
- Datenvorverarbeitung(→ Klassifizierung)
- Real Time Objekt-Tracking
- Bestimmung der Objektbreite (→ Klassifizierung)
- EGO Bewegungskompensation (benötigt Bewegungsdaten)



Ibeo, 2017

Valeo hat in 2010 eine Kooperation mit der Firma Ibeo geschlossen mit dem Ziel, die Ibeo-Laser-scanner-Technologie (LUX 2010) so weiterzuentwickeln, dass sie den Anforderungen im Automobilbereich gerecht wird. Der Valeo Lidar ScaLa berücksichtigt die Anforderungen hinsichtlich vollautomatisierten Fahrens, d. h. eine breite Abdeckung mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 145°, einer Winkelauflösung von 0,25° und einer max. Entfernung bis zu 150 m.

Velodyne Mechanische LiDAR



- Lidar-Sensorsystem für Fahrerassistenzsysteme
- bis zu 128 Ebenen
- Reichweite 100 bis 200m
- Reichweiten-Auflösung: bis zu +/- 2 cm
- Bis zu 2,2 Mio. Datenpunkte pro Sekunde
- Objektinformationen:
 - Time of Flight Distanzmessung
 - Rotationswinkel
 - Intensitätsmessung
- Weitere Informationen (z.B. Geschwindigkeit) durch Berechnung aus o.g. Objektinformationen



Velodyne, 2018

Velodyne VelArray H800

- Solid State Sensor
- Reichweite 0,1-200m
- Field-of-View (FoV):
 - Horizontal: 120°
 - Vertikal: 16°
- Winkelauflösung: 0,1° - 0,25° variabel
- Preis: < 500 €



Quelle: Velodyne

ibeo NEXT (Solid State)

- Wellenlänge: 885 nm
- Reichweite:
 - Long Range: 200m (Fußgänger), 250m (Auto)
 - Short Range: 50m (Fußgänger), 70m (Auto)
- Field of View (FoV) horizontal x vertikal:
 - Long Range: $11.2^\circ \times 5.6^\circ$
 - Short Range: $60^\circ \times 30^\circ$
- Scan-Mechanismus: rein elektronischer sequentieller Reihen-Scan
- Update Rate: 25 Hz
- Abmessungen: 108x102x83 mm



Quelle: ibeo

Sensorik / Wahrnehmung I

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Andreas Schimpe, M.Sc.)

Agenda

2 Sensorik / Wahrnehmung I

- 2.1 Sensorkategorien
- 2.2 Ultraschall
- 2.3 RADAR
- 2.4 LiDAR
- 2.5 Kamera
- 2.6 Vergleich



Kamerasensorik

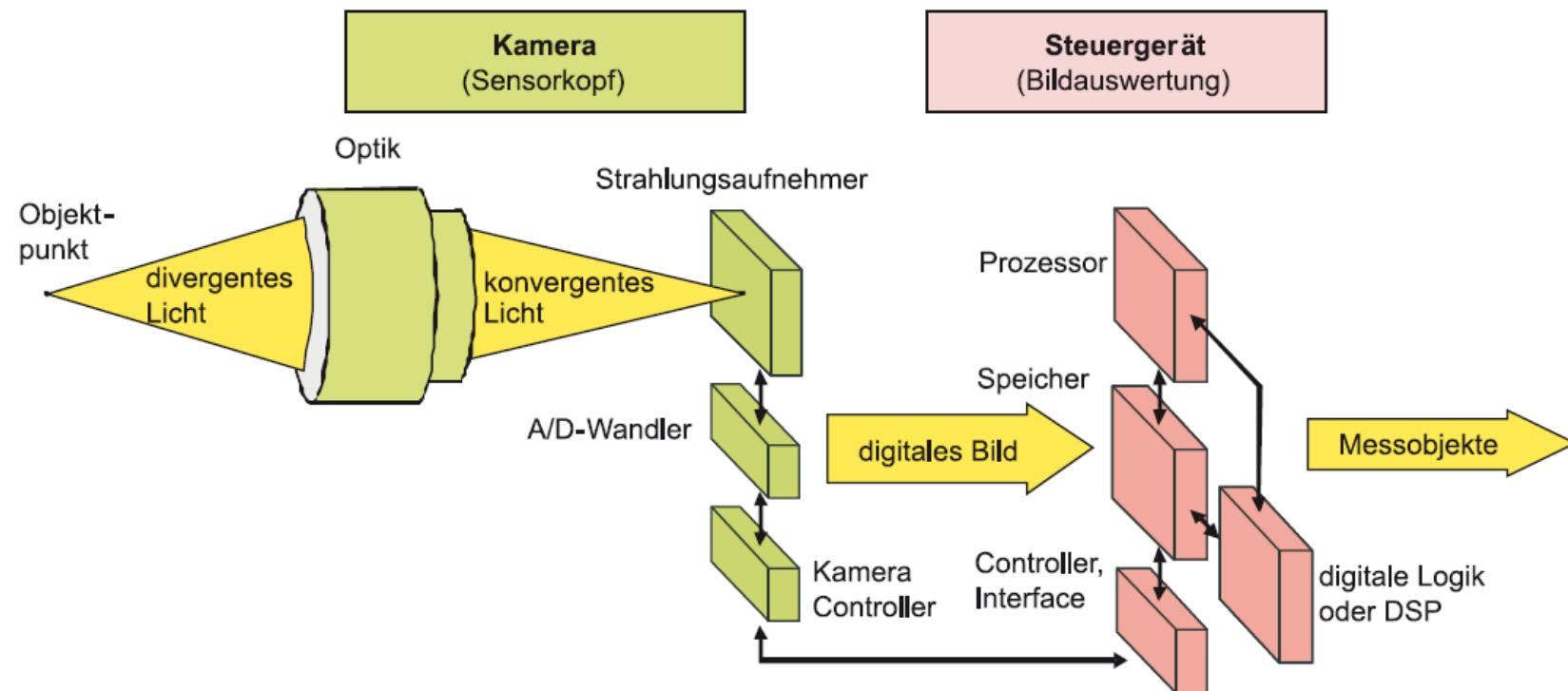
Maschinelles Sehen als Informationsquelle für Fahrerassistenzsysteme

- Abbildung von Lichtsignalen auf Messwerte
- Extraktion sekundärer Messgrößen wie z. B. die Position relevanter Objekte
- Deutlicher Preisverfall von Kamerahardware in den vergangenen Jahren
- Orientierung an der hohen Leistungsfähigkeit des Menschen bei der visuellen Wahrnehmung

光信号与测量值的映射

- 提取次要测量变量，如相关物体的位置
- 近年来相机硬件价格大幅下降
- 面向人类在视觉感知方面的高性能

Bildsensoren: Komponenten



Winner, TUD nach Stiller 2015

Maschinelles Sehen – Leistungsfähigkeit

- Große Witterungs- und Beleuchtungsabhängigkeit
- Öffnungswinkel je nach Optik (normalerweise 30° - 45° , mit Fischaugenobjektiv bis zu 360° möglich)
- Großes Potential, weil
 - Messsystem der menschlichen Wahrnehmung nachempfunden wurde
 - Verkehrsgeschehen auf visuelle Wahrnehmung ausgelegt ist
 - Erkennung von Fahrstreifen, Verkehrsschildern, Objektklassifikation möglich ist

潜力巨大, 因为
- 测量系统以人类感知为模型
- 交通事件是为视觉感知而设计的
- 可识别车道、交通标志和物体分类
- Nachteile:
 - Keine direkte Messung von Position und Geschwindigkeit
 - Auswertung nur durch komplexe Bildverarbeitung möglich

缺点
- 无法直接测量位置和速度
- 只能通过复杂的图像处理进行评估

Durch eine Linsen-Optik werden ausgestrahlte Licht-Informationen der realen Welt (divergent) gebündelt und liegen als Ergebnis als konvergentes Bündel vor. Der Durchmesser der Blende, d. h. die Größe der optisch nutzbaren Optik bestimmt dabei die Intensität des Lichtes, die auf den Strahlungsaufnehmer fällt. Weiterhin wird der Erfassungswinkel von der Brennweite der verwendeten Linsen (Optik) definiert. Als Material für die Linsen kommt aus Kostengründen häufig Kunststoff in Betracht, höherwertige Ausführungen werden aus Glas gefertigt und besitzen bessere Eigenschaften hinsichtlich ihrer Temperaturempfindlichkeit. Durch einen Controller gesteuert wird das konvergente Licht durch einen Strahlungsaufnehmer (Imager) aufgenommen, die dabei detektierte analoge Information in digitale Signale gewandelt (A/D-Wandler) und in einem digitalen Speicher abgelegt.

In den meisten Anwendungen im Automobilbereich wird das Spektrum des sichtbaren Lichtes genutzt (ca. 750-400 nm). Üblicherweise werden dabei zweidimensional strukturierte Halbleiteroberflächen (Wafer) als Detektoren genutzt, der zugrundeliegende physikalische Effekt ist die Anhebung eines Elektrons in das Leitungsband, der sogenannte „Innere Photoeffekt“.

Winner, TUD nach Stiller 2002

Erzwungene Perspektive



Quelle: jocasey.com

除了二极管的反向电流 I_S (暗电流) 外, 还有光电流 I_L 暗电流: 光敏半导体 (如 CCD) 中受热自发形成的自由电荷载流子

Photodiode: Physikalisches Prinzip

- Zusätzlich zum Sperrstrom I_S der Diode (Dunkelstrom) entsteht durch Lichteinstrahlung ein Fotostrom I_L
→ **Dunkelstrom:** spontane Bildung von freien Ladungsträgern durch Wärme in einem lichtempfindlichen Halbleiter (z.B. CCD)

- Kennliniengleichung:

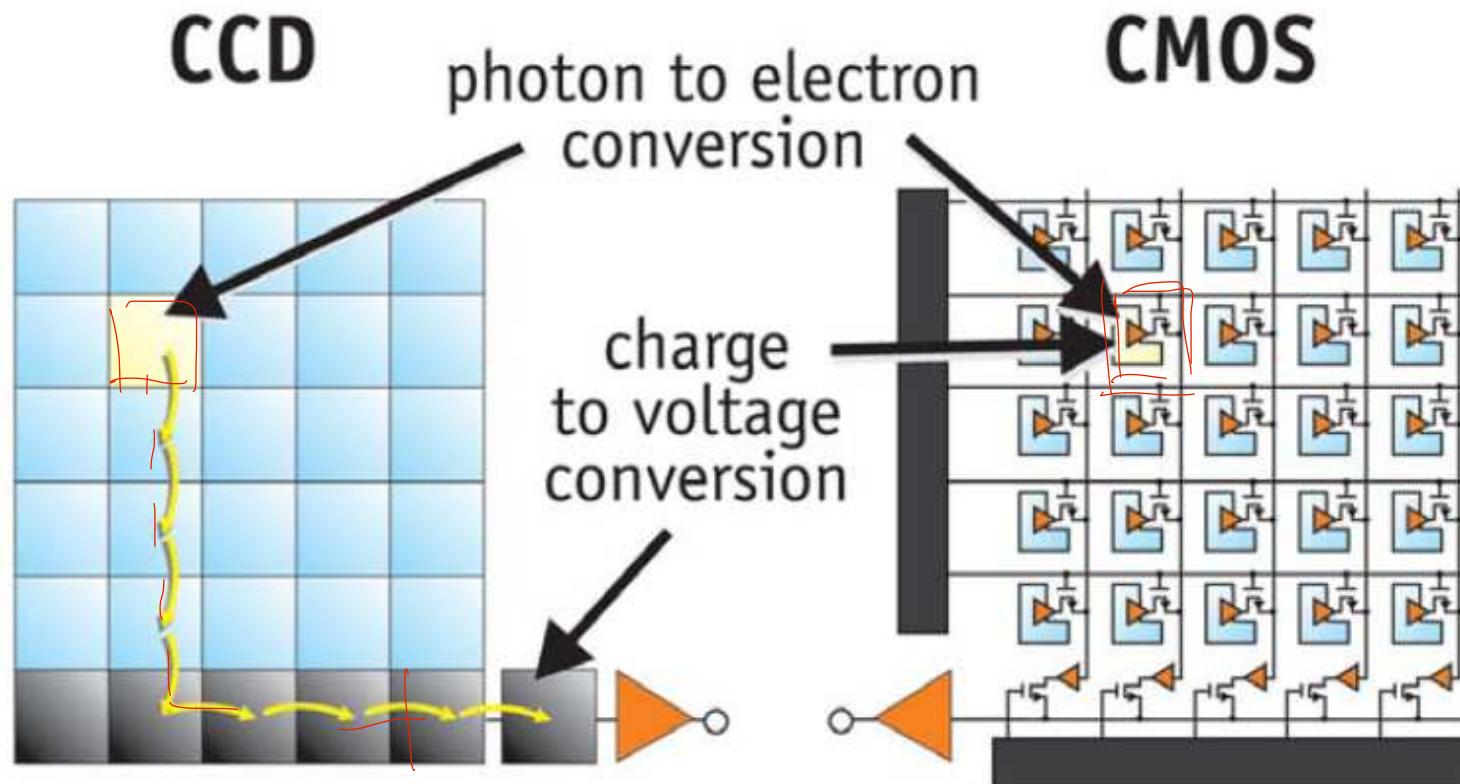
$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) - I_L$$

- U_T : Temperaturspannung
- $I_L \sim P_L$ (P_L : Lichtleistung)

Videosensoren basieren auf Bildaufnehmern, die ein Array von Fotodioden (Fotozellen) aufweisen. Neben dem möglichst gering zu haltenden Dunkelstrom erzeugen einfallende Photonen in den Fotodioden einen zur Lichtleistung proportionalen Strom.

Bildsensoren: Grundtypen

CCD vs. CMOS-Technologie: Funktionsweise



Winner, TUD nach Photonics Spectra 2005

Funktionsweise

CCD-Sensoren „sammeln“ Ladungen, die durch das Auftreffen von Licht erzeugt wurden, schieben diese von Pixel zu Pixel weiter und lesen diese dann als „Datenstrom“ an einem Ausgangsknoten aus. Bei der CMOS-Technik werden die Ladungen von jedem Pixel einzeln ausgelesen, der Vorgang läuft „parallel“ ab.

Historie

CCD und CMOS-Sensoren wurden in den späten 60er und frühen 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Dabei dominierten von Beginn an die CCD-Sensoren aufgrund von verfahrenstechnischen Beschränkungen den Markt über einen Zeitraum von gut 25 Jahren. Gegen Ende dieses Zeitraumes wuchsen jedoch die Bestrebungen, mehr und mehr CMOS-Sensoren einzusetzen. Gründe hierfür waren vor allem:

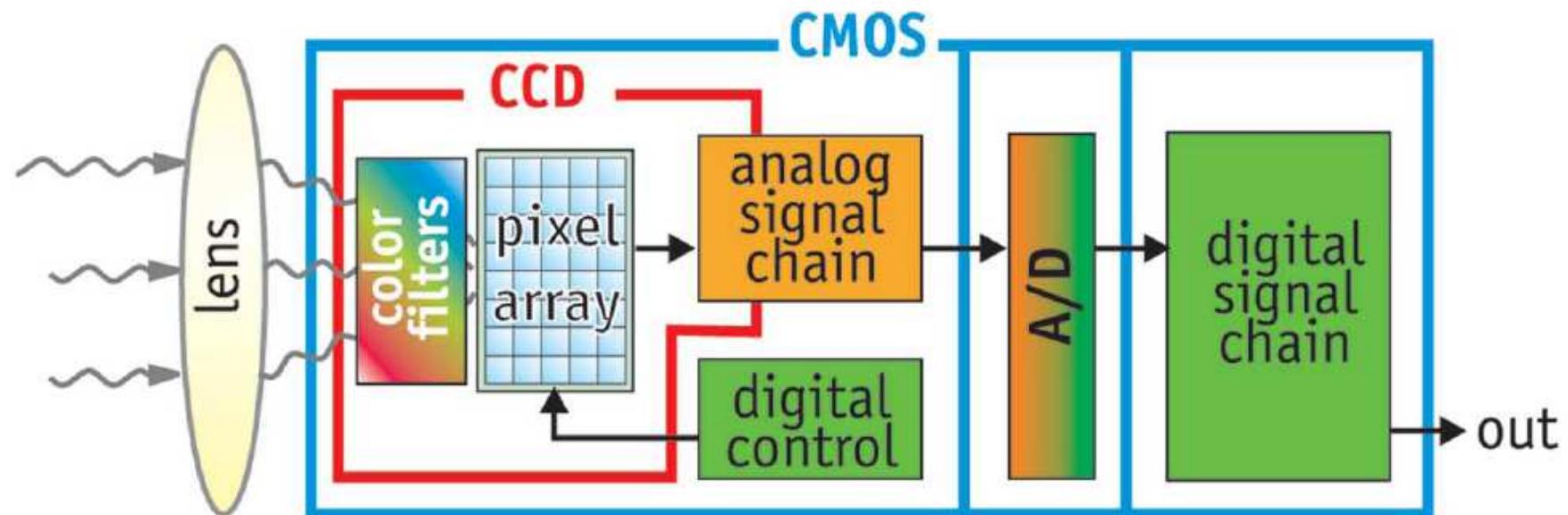
- Verbesserungen der CMOS-Eigenschaften (z. B. Bildrate, Auflösung), die bislang nur mit CCD möglich waren
- Die mögliche Integration von Signalverarbeitungs-Elektronik und Imager mit der gleichen Technologie: Befriedigung von Miniaturisierungsdruck
- Geringer Stromverbrauch, wichtig vor allem bei mobilen Geräten
- Geringere Gerätogrößen durch Integration (system-on-a-chip)
- Die Möglichkeit der Herstellung von Imager-Chips auf den gleichen Fertigungsanlagen von Speicher und Standard-Elektronik

Winner, TUD nach Photonics Spectra 2005

Eigenschaften

- CCD (Charge Coupled Device)
 - Ladungsverschiebungselemente; Ladung von Kapazität zu Kapazität weitergeschoben (Eimerkettenleitung)
 - Reihe von MOS-Kondensatoren (Metall-Oxide-Semiconductor), spezieller Herstellungsprozess, daher teuer
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
 - Einzeln adressierbare Fotozellen (dadurch schnellerer Zugriff)
 - geringerer Stromverbrauch ($\approx 10\%$ von CCD)
 - Lichtempfindlichkeit und Rauschen inzwischen vergleichbar mit CCD-Chips
 - zur Verarbeitungselektronik kompatibler Herstellungsprozess, daher Möglichkeit zur Integration von Imager und Bildverarbeitungselektronik (system-on-a-chip)

CCD vs. CMOS



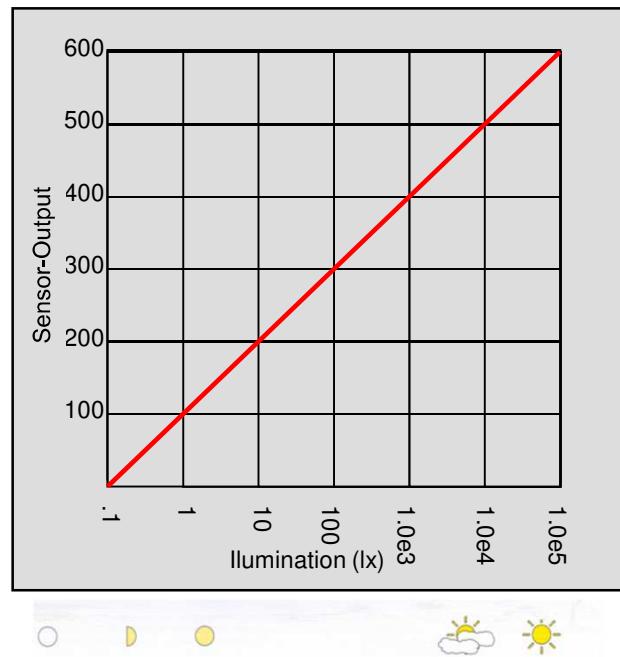
Winner, TUD nach Photonics Spectra 2005

Da die meisten Elektronikbauteile, die in hochintegrierten Schaltungen verwendet werden, auf der CMOS-Technologie basieren, gestattet die Verwendung eines CMOS-Imagers, mehr Elemente der gesamten Signalverarbeitungskette auf einem Chip unterzubringen. Dies bietet entscheidende Vorteile bei der Bauteilgröße (größerer Integrationsgrad erzeugt geringere Bauteilgröße)

Winner, TUD nach Photonics Spectra 2005

Dynamikanforderungen

- Logarithmisch (Stimulus – Empfindung)
- Dynamikbereich: $120 \text{ dB} = 6 \text{ Dekaden}$
- Auflösung: 100 Stufen / Dekade



Winner, TUD

Da die notwendige Dynamik bzgl. der Beleuchtungsstärke (Illumination) bei der Beobachtung von Verkehrssituationen relativ hoch ist, wendet man oft Bildaufnehmer mit dynamischer Kennlinie an, um den Gesamt-Dynamikbereich zu komprimieren.

特征曲线

Kennlinien

Linear



geringe Lichtdynamik (< 50 dB)

Nachteil:

- Arbeitsbereich zu gering
- Steuerung der Integrationszeit erforderlich
- Über- bzw. Unterbelichtung von Bildbereichen

Logarithmisch



hohe Lichtdynamik (< 110 dB)

Vorteil:

- Konstante Kontrastauflösung über den gesamten Helligkeitsbereich

Nachteil:

- Arbeitsbereich nicht adaptierbar
- Schlechte Korrigierbarkeit des Fixed Pattern Noise

Linear-logarithmisch



hohe Lichtdynamik (< 110 dB)

Vorteil:

- Arbeitsbereich adaptierbar
- Gute Kontraste in allen Beleuchtungssituationen

Fixed Pattern Noise

Zeitlich konstante Unterschiede der Pixel zueinander bei gleicher optischer Anregung, d.h. obwohl für alle Pixel der gleiche Ausgangswert erwartet wird, enthält das Bild zeitlich konstante „Rauschanteile“, da die Pixel nicht 100%ig gleiche Empfindlichkeit und gleichen Offset haben.

Ausführungsbeispiele

- Imager-Technik
 - High Definition Range CMOS
 - Dynamikbereich 100-120 dB
 - Monochrom + rote Pixel
(meist im Verhältnis 3:1)
 - Auflösung SVGA (800x600) o. ä.
- Spektren
 - Sichtbarer Bereich
 - Nahes Infrarot mit NIR-Scheinwerfern → mit aktiver Beleuchtung
 - Fernes Infrarot (FIR) → ohne eigene Strahlenquelle



Aktuelle Kameras sind zusätzlich zu den monochromen Pixeln mit zusätzlichen Pixeln mit Rotfilter ausgestattet, z.B. auf 3 monochrome kommt 1 rotes Pixel.

Diese dienen insbesondere zur Erkennung von Rück- und Bremslichtern vorausfahrender Fahrzeuge und werden beispielsweise für eine automatische Abblendlicht-Funktion verwendet.

Ausführungsbeispiele

- Tri-Cam 4 (ZF TRW)
 - Monokamera mit drei Linsen
 - Entwickelt für ANB
 - Teleobjektiv für Fernbereich,
Fischaugenlinse für Nahbereich
 - Ausgelegt auf neue Anforderungen,
z. B. kreuzende Radfahrer
 - Spezielle Unterstützung teilautomatisierter Fahrfunktionen
(Autobahn- oder Stauassistent)
 - Ab 2018 im Serieneinsatz



ZF; Bild: Auto-Medienportal, 2017

Nachtsichtkameras

FIR-Kamera (Flir PathFindIR™ II)

- Sensor Type: 320 x 240 Uncooled Microbolometer
- Spectral Response: 8-14 µm (LWIR)
- Field-of-View: 24° h x 18° v
- Focus Range: 25 m to infinity (automatic)
- Startup Time: < 2 seconds
- Operation temperature: -40 °C to +80 °C
- Cooling: None, thermoelectric stabilized
- 60 x 86 x 82 mm³



Flir, 2017

Beispiele

			
Abmessungen	34,1 x 36,6 x 37,4 mm	48 x 49,4 x 64,5 mm	89 x 89 x 40,5 mm
Auflösung	1280 x 1024	1280 x 960	1280 x 1040 668 x 512 (bin)
Bildwiederholrate	100 fps	30 fps	25 fps, 50 fps (bin)
Pixelabstand	9,7 µm	6,5 µm	3,63 µm
Sensorgröße Diag (h x b)	16 mm (14,8 x 12,7 mm)	10,7 mm (8,3 x 6,7 mm)	6,08 mm
Quantum Effizienz	> 80%	> 50%	~ 67%
Readout noise	< 4 e ⁻	< 2 e ⁻	< 4 e ⁻
Betriebstemperatur	-40 bis 60 °C	-40 bis 71 °C	0 bis 60 °C
Gewicht	< 85 g	175 g	260 g

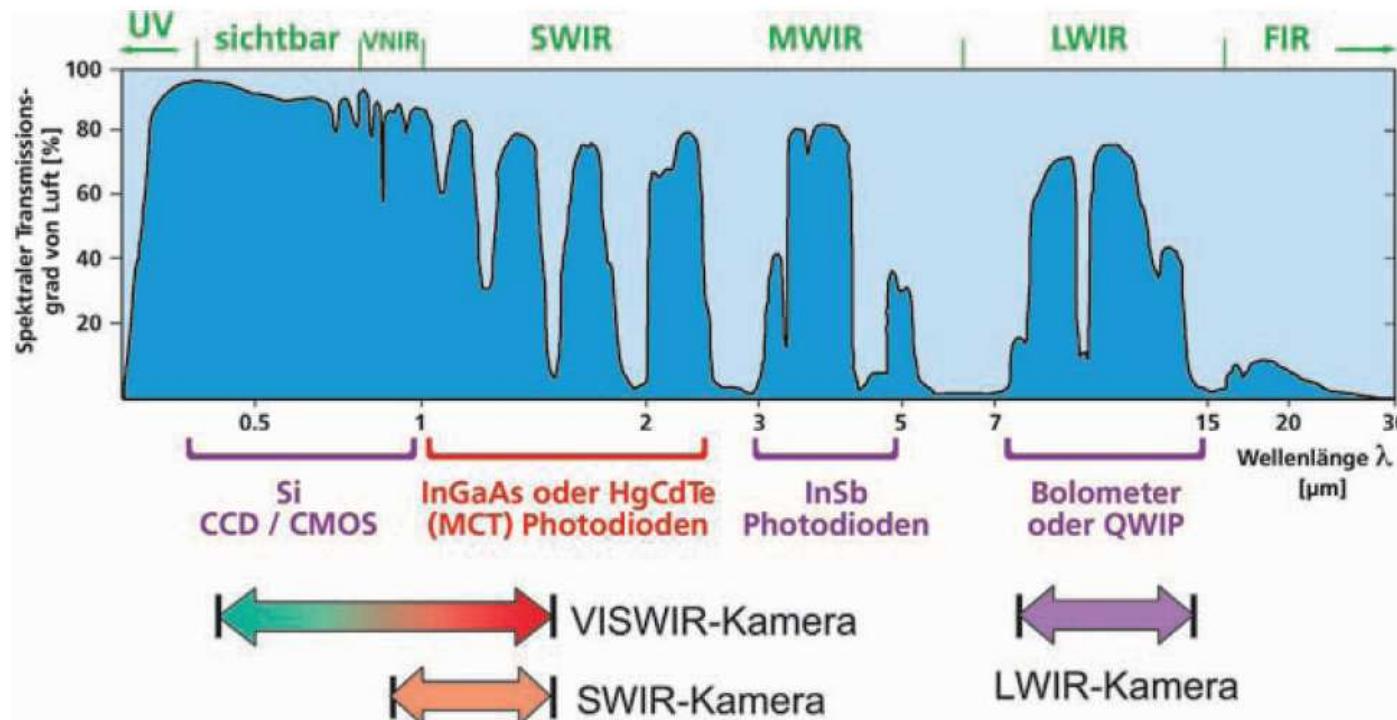
Beispiel: FLIR Tau 2 640



Abmessungen	44 x 44 x 44 mm ohne Objektiv
Auflösung	640 x 512
Bildwiederholrate	Analog: 25/60 Hz (PAL)
Spektralabstand	7,5-13,5 µm
Pixelabstand	17 µm
Empfindlichkeit	< 50 mK
Objektivbrennweite	9 mm
Betriebstemperatur	-40 bis 80 °C
Gewicht	72 g

Kamerasensorik: Infrarotspektrum

相机传感器技术：红外光谱



- NIR: Near Infrared
- SWIR/MWIR/LWIR: Short-/Medium-/Long-wave Infrared
- FIR: Far Infrared

Near-Infrared (NIR): Beispielbilder



Nahinfrarotaufnahme bei Tageslicht

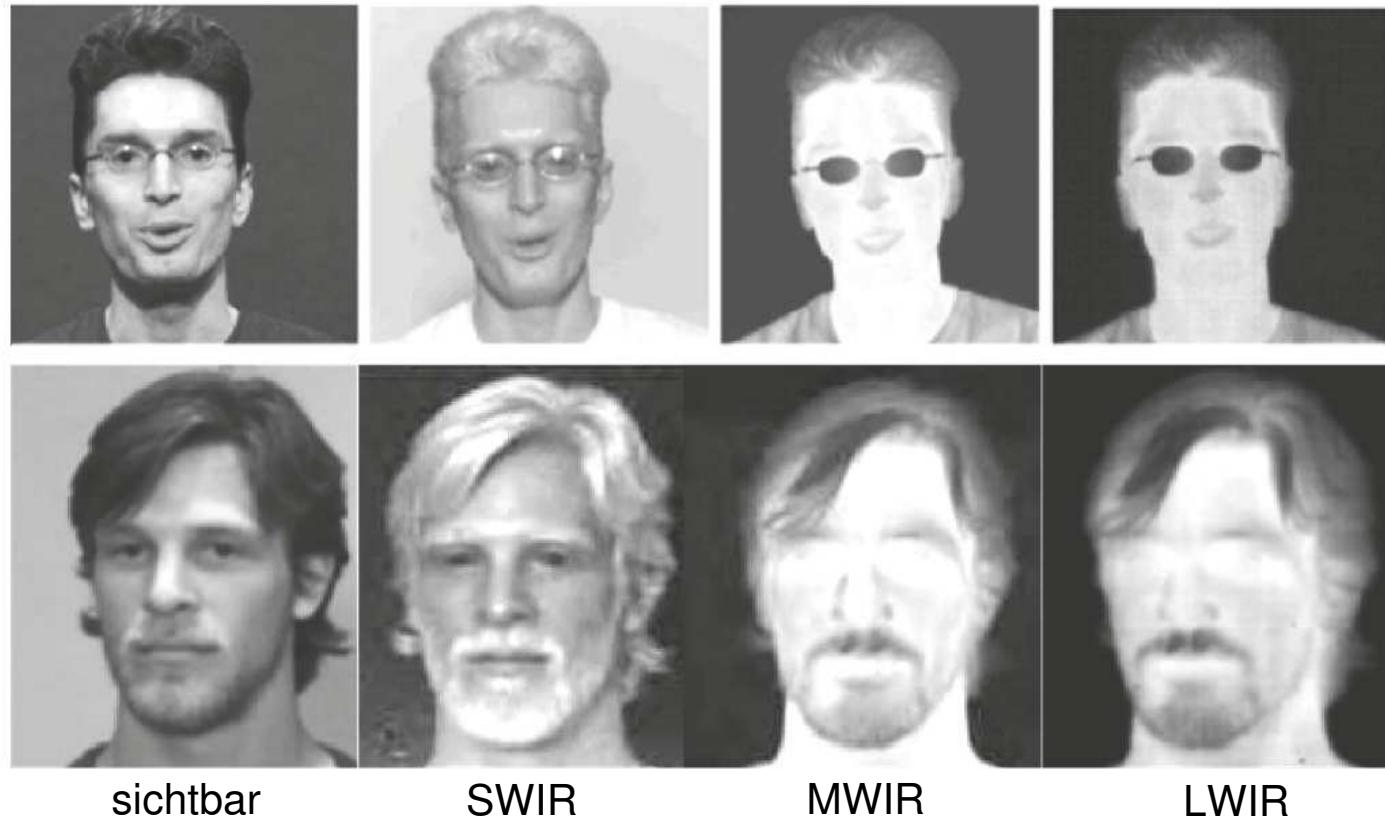


Links: Aufnahmen im sichtbaren Licht
Rechts: NIR-Aufnahme mit aktivem
Infrarotstrahler. Masken und
Sonnenbrillen werden teilweise
durchstrahlt

Bilder: Neumann jr. (oben)
US Korea Hotlink 2013 (unten)

VL 2- 156

Vergleich unterschiedlicher IR-Wellenlängen



Bhowmik et al., 2011

Kamerasensorik – Anwendungsfelder

Fußgängererkennung

Prinzipien:

- Ferninfrarot-Stereokamera (Honda 2004)
- Ferninfrarot-Monokamera (BMW 2009)
- Nahinfrarot-Stereo plus Radar (Lexus 2007)
- Stereokamera plus Radar (Volvo 2008)
- Monokamera plus Radar (Delphi 2009)
- Monokamera plus KI plus Radar (Mobileye 2017)
- High resolution scanning Lidar (noch nicht in Serie)

+ 辐射不会造成环境污染 + 还能识别为人类创造的特征 + 可进行模式识别

o 物体大小识别只能通过立体声（其他估算）实现 o 距离测量复杂，相对精确度最高只能达到 30 米 o 物体识别对计算能力要求很高，但目前可用处理能力的增长率很高

- 速度分辨率较弱 - 取决于外部光源 - 安装罩必须是光学透明的，但要防污



Kamerasensorik – Allgemeine Eigenschaften

- + Keine Umweltbelastung durch abgegebene Strahlung
- + Kann auch für den Menschen geschaffene Merkmale erkennen
- + Mustererkennung möglich
 - o Objektgrößenerkennung nur mit Stereo möglich (sonst Schätzung)
 - o Abstandsmessung aufwändig und nur bis 30 m relativ genau
 - o Hoher Bedarf an Rechenleistung für Objekterkennung, jedoch aktuell hohe Wachstumsrate bei verfügbarer Prozessorleistung
- Geschwindigkeitsauflösung schwach
- Von Fremdlichtquelle abhängig
- Einbauabdeckung muss optisch durchsichtig, aber vor Verschmutzung geschützt sein

Sensorik / Wahrnehmung I

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Andreas Schimpe, M.Sc.)

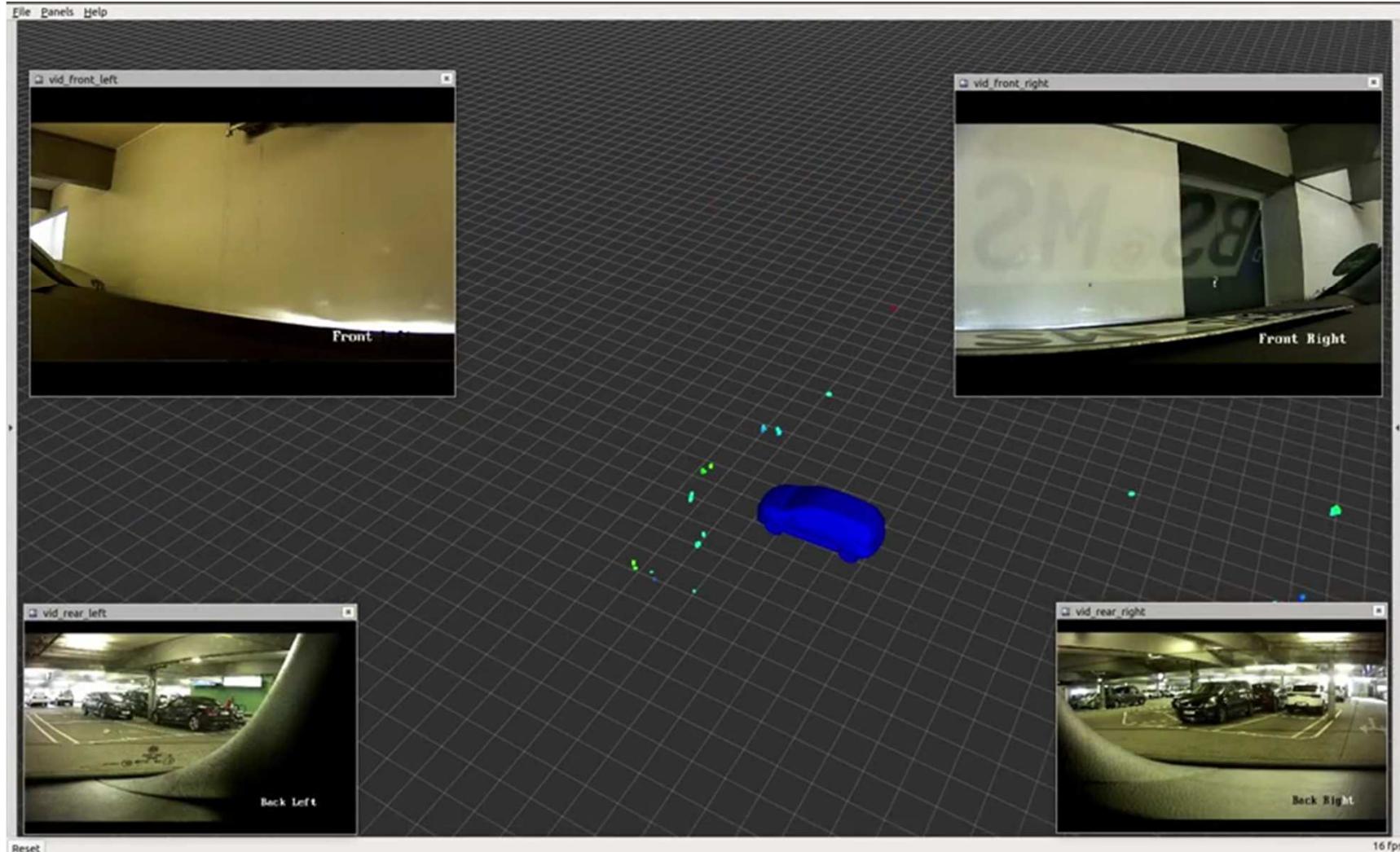
Agenda

2 Sensorik / Wahrnehmung I

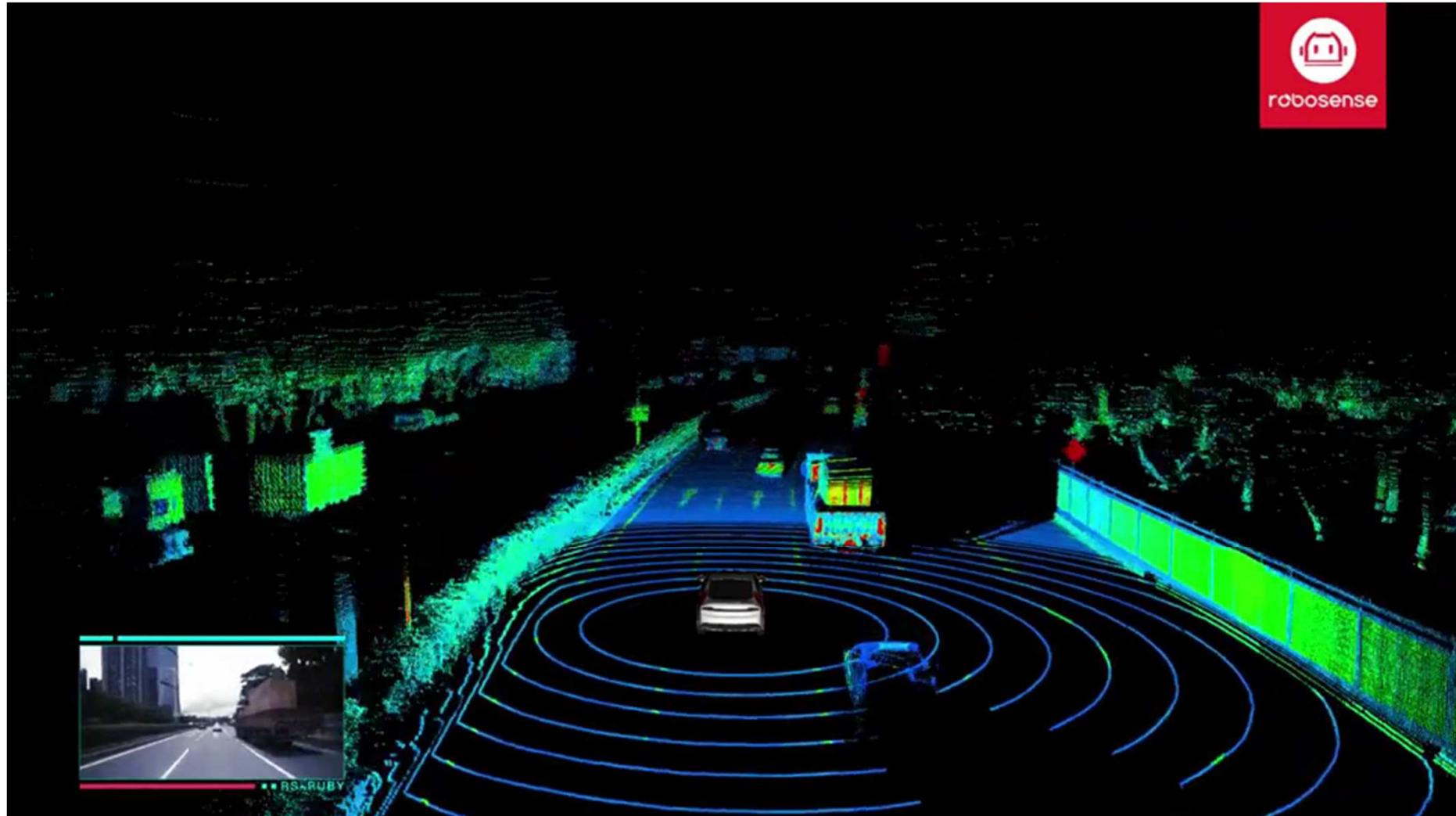
- 2.1 Sensorkategorien
- 2.2 Ultraschall
- 2.3 RADAR
- 2.4 LiDAR
- 2.5 Kamera
- 2.6 Vergleich



Funktionalität RADAR



Funktionalität LiDAR

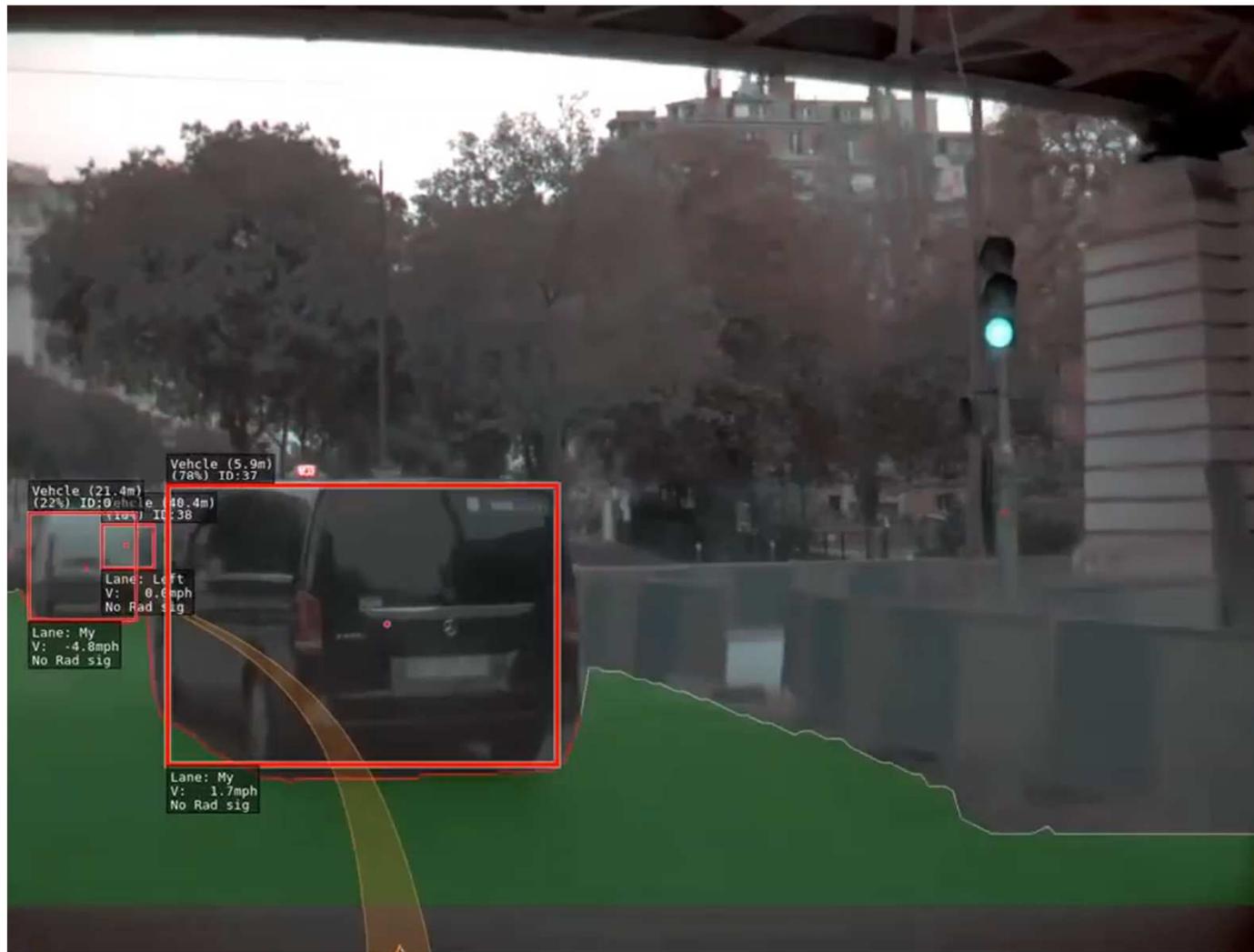


2 Sensorik/Wahrnehmung I → 2.6 Vergleich

Quelle: RoboSense LiDAR
<https://www.youtube.com/watch?v=INSSIo-tWTY>

VL 2- 162

Funktionalität Kamera (Tesla Autopilot)



Vergleich und Bewertung der Sensorsysteme

Sensor	Ultraschall	Radar	Laser	Bildverarbeitung
Reichweite	-	++	0	+
Öffnungswinkel	++	-	++	+
Genauigkeit Objektabstand	+	+	++	0
Genauigkeit Objekt- geschwindigkeit	Nicht messbar	++	Nicht messbar	Nicht messbar
Objektbreite	Nicht messbar	-	++	++
Objektlänge	Nicht messbar	-	+	+
Objekthöhe	Nicht messbar	Nicht messbar	++	+

Zusammenfassung der Leitfragen

- Wie funktionieren die verschiedenen Sensortypen?
 - Ultraschall: piezoelektrischer Effekt, Aussenden und Empfangen von Ultraschallwellen
 - Radar: Modulation von Mikrowellenstrahlung, Vergleich von Ein- und Ausgangssignal
 - LiDAR: ähnlich wie Radar, aber mit UV-, IR- oder sichtbarer Strahlung
 - Kamera: Abbildung von einfallendem Licht auf Messwerte
- Welche Vor- und Nachteile besitzen die Sensortypen (u.a.)?
 - Ultraschall: günstig, **aber nur kleiner Messbereich**
 - Radar: **hohe Reichweite und Robustheit, aber geringere Auflösung**
 - LiDAR: **hohe Auflösung und Genauigkeit, aber teuer und teilweise weniger robust**
 - Kamera: **günstig, aber starke Witterungs- und Beleuchtungsabhängigkeit**

Zusammenfassung der Leitfragen

- Für welche Anwendungsfälle sind die Sensoren jeweils geeignet?
 - Ultraschall: Parkassistenz
 - Radar: ACC, Emergency Brake Assist
 - Lidar: Lokalisierung und Mapping
 - Kamera: Verkehrszeichenerkennung, Objektklassifikation
- Welche Faktoren beeinflussen die Objekt-Erkennungsgüte von aktiven und passiven Sensoren?
 - Aktive Sensoren: Verschmutzung des Gehäuses, Störsignale, Stärke der Reflektion, ...
 - Passive Sensoren: Intensität und Kontrast der einfallenden Strahlung, ...

Die üblicherweise in der Fahrzeugtechnik verwendeten Sensoren zur maschinellen Anwendung erfüllen sehr unterschiedliche Anforderungen. Je nach Funktion sind unterschiedliche Sensoren sinnvoll.

Für die Entfernungsmessung auf lange Distanzen eignet sich nach wie vor der Radar am besten. Lasersysteme sind theoretisch ähnlich leistungsstark, aber zumeist deutlich teurer. Daher werden Lidarsensoren häufig für die Erfassung des nahen Umfelds verwendet, vor allem mit dem Vorteil, dass der Öffnungswinkel sehr viel größer als beim Radar ist. Ultraschallsensoren eignen sich eigentlich nur für Parkierungsvorgänge. Auf die Reichenweite gesehen, haben Kamerasyteme ein großes Potential, auch wenn sie im Monobetrieb keine direkte Entfernungsmessung zulassen. Kamerasyteme haben generell das größte Potential für zukünftige Anwendungen, weil sie sich mit Stereo-Technologie auch für die direkte Entfernungsmessung verwenden lassen und darüber hinaus auch weitere visuelle Aspekte des Straßenverkehrs erfassen können (Ampeln, Fahrstreifen, ...). Es ist dabei zu bedenken, dass der Straßenverkehr auf die visuelle Wahrnehmung des Menschen ausgerichtet ist, der drei Viertel seiner Informationen bei der Fahrzeugführung visuell aufnimmt.

Referenzen I

[Winner, TUD] Vorlesung Prof. Winner, TU Darmstadt.

[Rohde & Schwarz] <https://www.youtube.com/watch?v=8qaCSQ83ZyU>

[Velodyne] <https://velodynelidar.com/>

Bilder:

[Bosch] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/left-turn-assist/long-range-radar-sensor/>

[Continental] <https://www.continental-automotive.com/Landing-Pages/Industrial-Sensors/Products/ARS-408-21>

[Ibeo] <https://www.ibeo-as.com/aboutibeo/lidar/>
<https://autonomoustuff.com/product/ibeo-scala/>

[Cnet]

Referenzen II

[Yole]

[Auto-Medienportal]

<https://www.auto-medienportal.net/artikel/detail/34008>

[Flir]

[Neumann jr.]

[Uhnder, 2020]

https://www.uhnder.com/images/data/DCM_Radar_for_Automotive_Application_Final.pdf

[ZF]

[Hamamatsu]

https://press.zf.com/press/de/media/media_25728.html
<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-components/memsmirror/Structure%20and%20principle/index.html>

[Velodyne]

<https://velodyneldar.com/products/velarray-h800/#downloads>

[ibeo]

<https://www.ibeo-as.com/en/products/sensors/ibeoNEXTgeneric>