

LiDAR in Anwendung

Eric Voigt, Maria Kremsreiter, Chemnitz, Januar 2020

- Vorstellung IAV
- Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS)
- Radio Detection and Ranging (RADAR)
- Light Detection and Ranging (LiDAR)
- Verarbeitung von Punktwolken

IAV – Wir entwickeln, was bewegt.



- Pkw und Transporter
- Nutzfahrzeuge und Arbeitsmaschinen
- Bahn, Marine, Luftfahrt
- Energie- und Wasserwirtschaft
- Robotik





- Modernste Entwicklungsmethoden
- Alle Mobilitätsformen und Fahrzeuge
- Ganzheitliche Lösungen aus einer Hand
- System- und branchenübergreifend

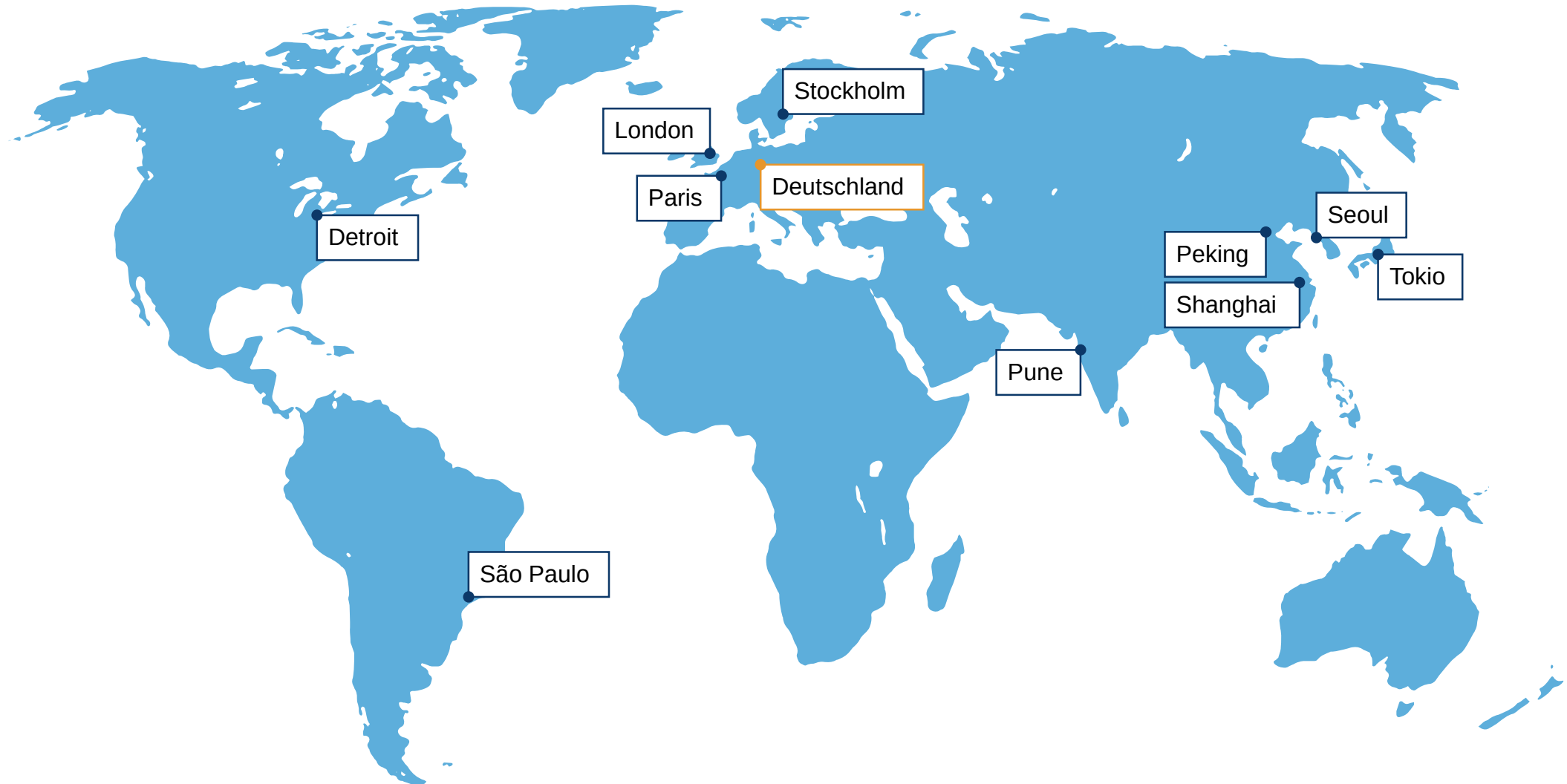
Zahlen und Fakten

Unternehmensstruktur und Kennzahlen IAV-Gruppe

Kundennähe in Deutschland

- IAV-Entwicklungszentren
- IAV-Standorte

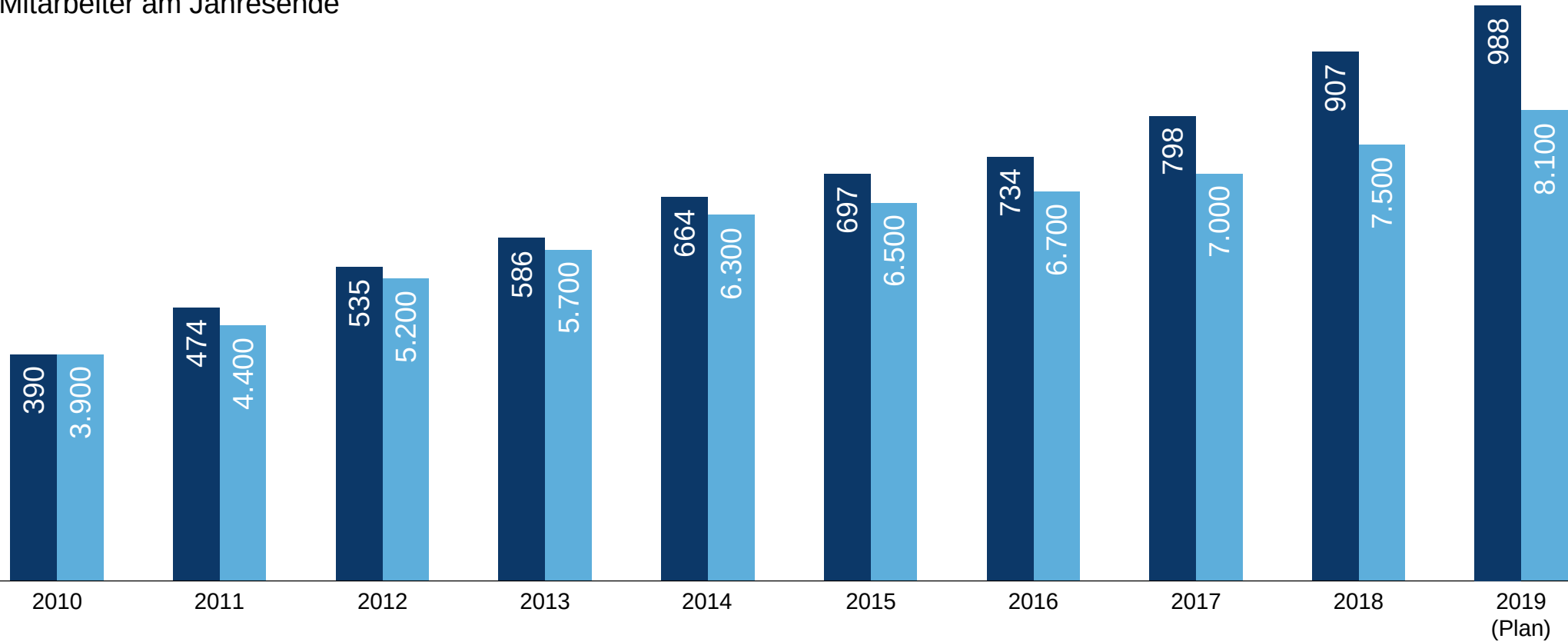


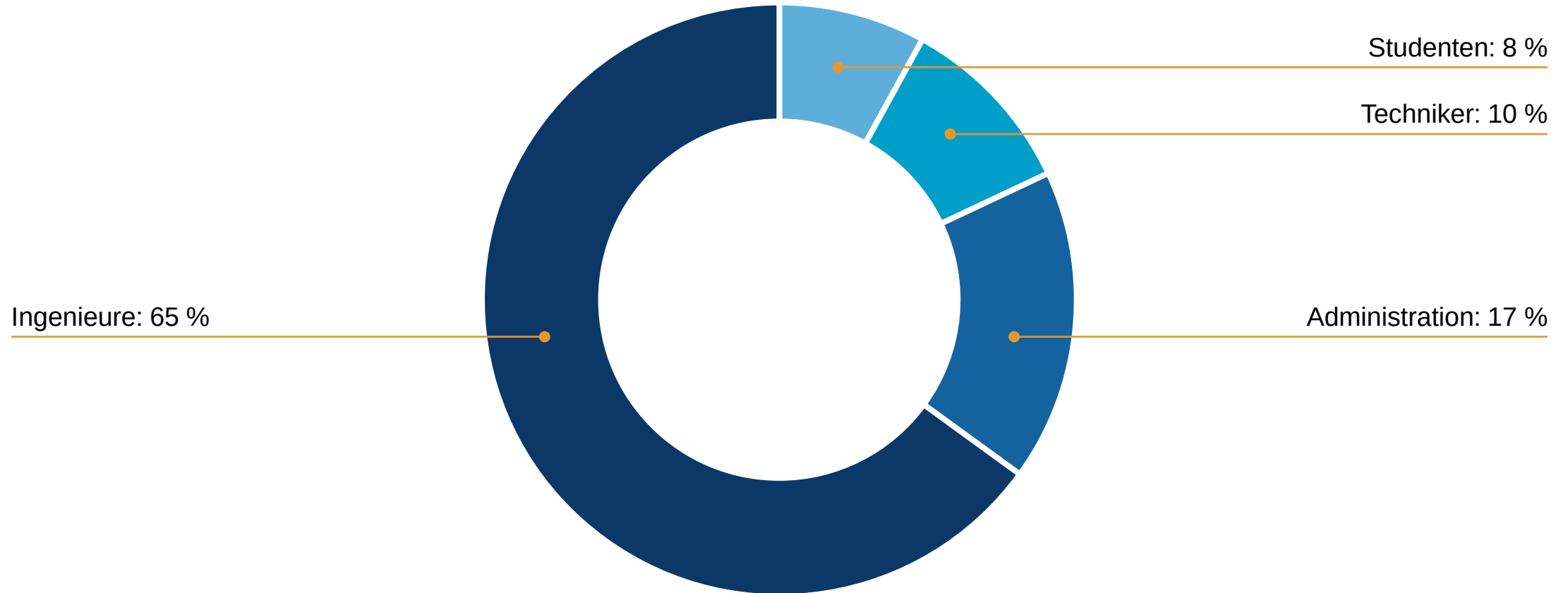


Umsatz- und Personalentwicklung

■ Umsatz (Mio. €)

■ Mitarbeiter am Jahresende







Volkswagen AG
50 %



Continental
Automotive GmbH
20 %

SCHAEFFLER

Schaeffler
Technologies
AG & Co. KG
10 %



SABIC
Innovative
Plastics B.V.
10 %



IAV GmbH
10 %

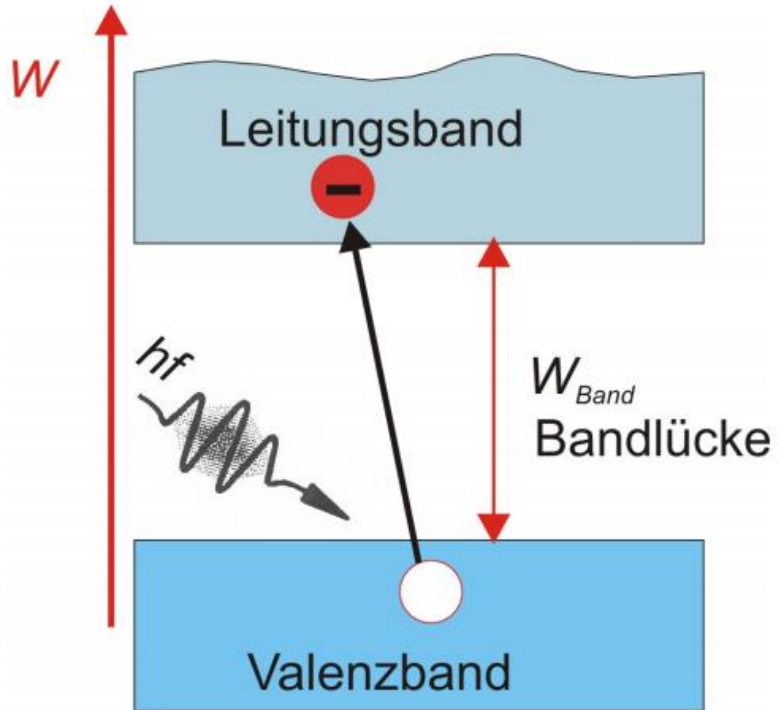
Auswahl Kundenreferenzen Automotive



Von Entwurf bis Erprobung:
Alle Entwicklungsschritte aus einer Hand



Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS)



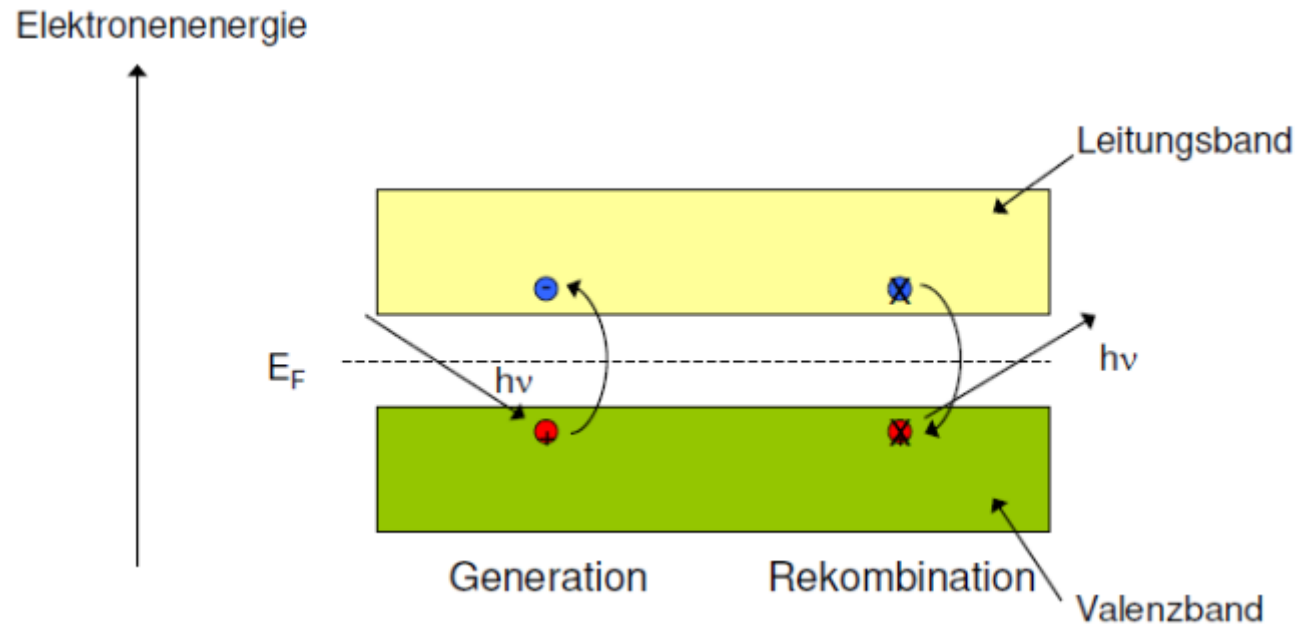
Quelle: https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktischephysik/AP/Versuche/Neue/A/D07a_Fotoeffekt.pdf, abgerufen am 20.01.2020

Allgemeine Funktionsweise

- CMOS ist eine Halbleiterkomponente, die einfallendes Licht in elektrische Ladung und weiter in Spannung (**innerer photoelektrischer Effekt**) umwandelt.

Prinzip des inneren Photoeffekts

- Bei diesem Effekt werden in einem Halbleiter durch Photonenabsorption Valenzelektronen in das Leitungsband angeregt.
 - Licht einer bestimmten Wellenlänge fällt ein
 - Photonen besitzen entsprechend der Wellenlänge Energie und können beim Auftreffen auf den Halbleiter Elektronen „befreien“
- Elektronen werden mittels der Energie der Photonen aus dem Valenzband in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben
- Es muss gelten: $W = h * f \geq W_{Band}$



Quelle: <https://www.repetico.de/card-64237579>, abgerufen am 20.01.2020

Freie Elektronen

- Aus freien Elektronen entsteht ein sogenannter **Photostrom**
- Strom ist proportional zu den einfallenden Photonen

Resümee

Wahl der Bandlücke bei einem Halbleiter muss so erfolgen, dass das verwendete Licht eine genau abgestimmte Wellenlänge hat, um die Energielücke E_F zu überwinden

→ CMOS kann anhand des Photostrom auf Intensitäten etc. pro Pixel schließen.

CMOS-Sensor mit 22 x 15 mm Chipgröße

Aufbau einer aktiven CMOS-Zelle

- Photodiode
- Kondensator für die Ladungsaufnahme
- Verstärkerelement
- Datenleitungen für das Auslesen und Rückstellen

→ Beim CMOS-Sensor werden die durch Photonen erzeugten Ladungen schon im Pixel in Spannungen umgewandelt.

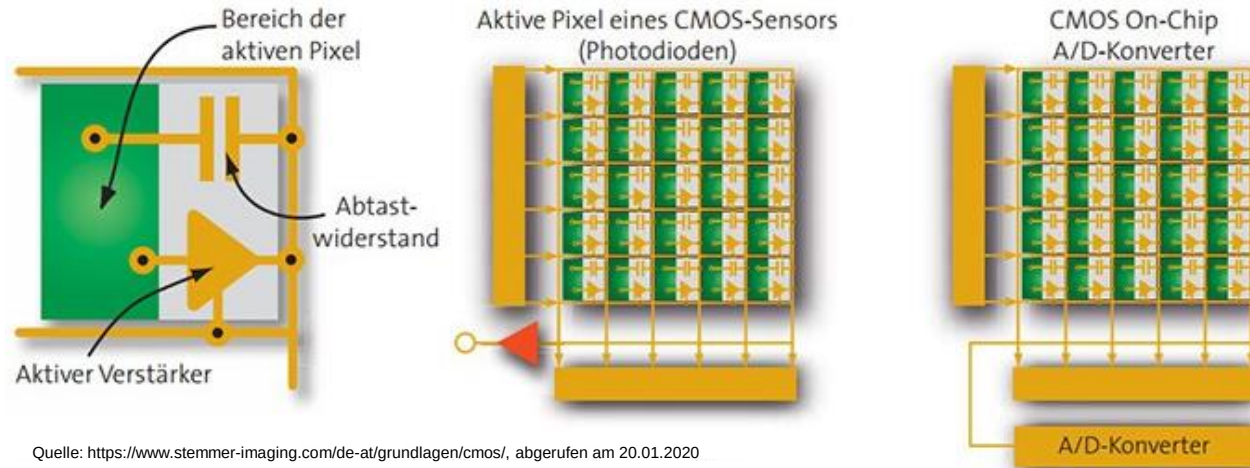
Active-Pixel-Technologie

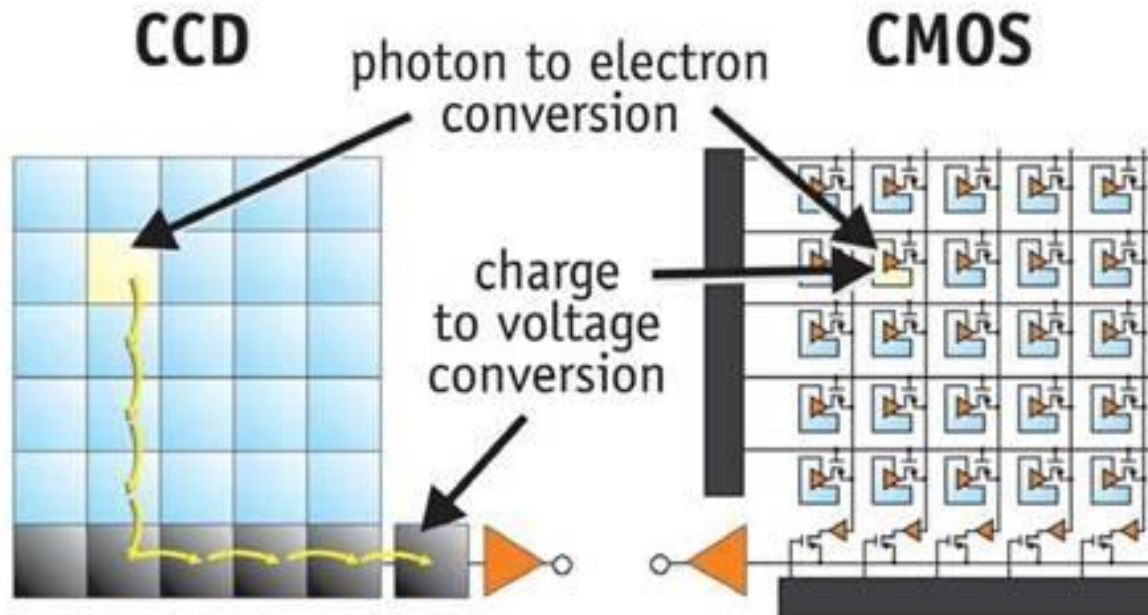
- Jede Zelle bzw. Pixel kann getrennt angesteuert werden (Global Shutter).

Passive-Pixel-Technologie

- Die Pixel einer Zeile teilen sich die Elektronik (Rolling Shutter).

A/D-Wandlung „On-Chip“ und „Off-Chip“





Quelle: https://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html, abgerufen am 20.01.2020

CCD-Sensoren

- Pixel sind in Reihe geschaltet
- Pixel geben elek. Ladungen an nächste Pixel weiter, bis die Ladung am Rand des Sensors abfließt und in Transistoren verstärkt und konvertiert wird

Unterschied zu CCD-Sensoren

- Verzicht auf Schieberegister
- Bildelemente verfügen über eigene Ausleseverstärker bzw. Transistoren

Vorteile

- Deutlich geringerer Stromverbrauch
- Geringere Baugröße, da die Auswertelogik auf demselben Chip integriert werden kann
- Sehr hohe Frameraten im Vergleich zu einem CCD-Sensor gleicher Größe
- Flexibles Auslesen durch direkte Adressierung der einzelnen Pixel
- Höhere Empfindlichkeit im NIR-Bereich (engl. „near infra-red“: kurzweilige Infrarotstrahlung)

Nachteile

- Größere Empfindlichkeitsunterschiede zwischen den Pixeln durch Fertigungstoleranzen (Farbrauschen)
- Insgesamt schlechtere Lichtempfindlichkeit (verstärktes Bildrauschen bei geringerer Helligkeit)

Radio Detection and Ranging (RADAR)

Arbeitsprinzip

- Radargeräte senden elektromagnetische Wellen gebündelt als Primärsignal aus und empfängt die von den Objekten reflektierten „Echos“ als Sekundärsignal

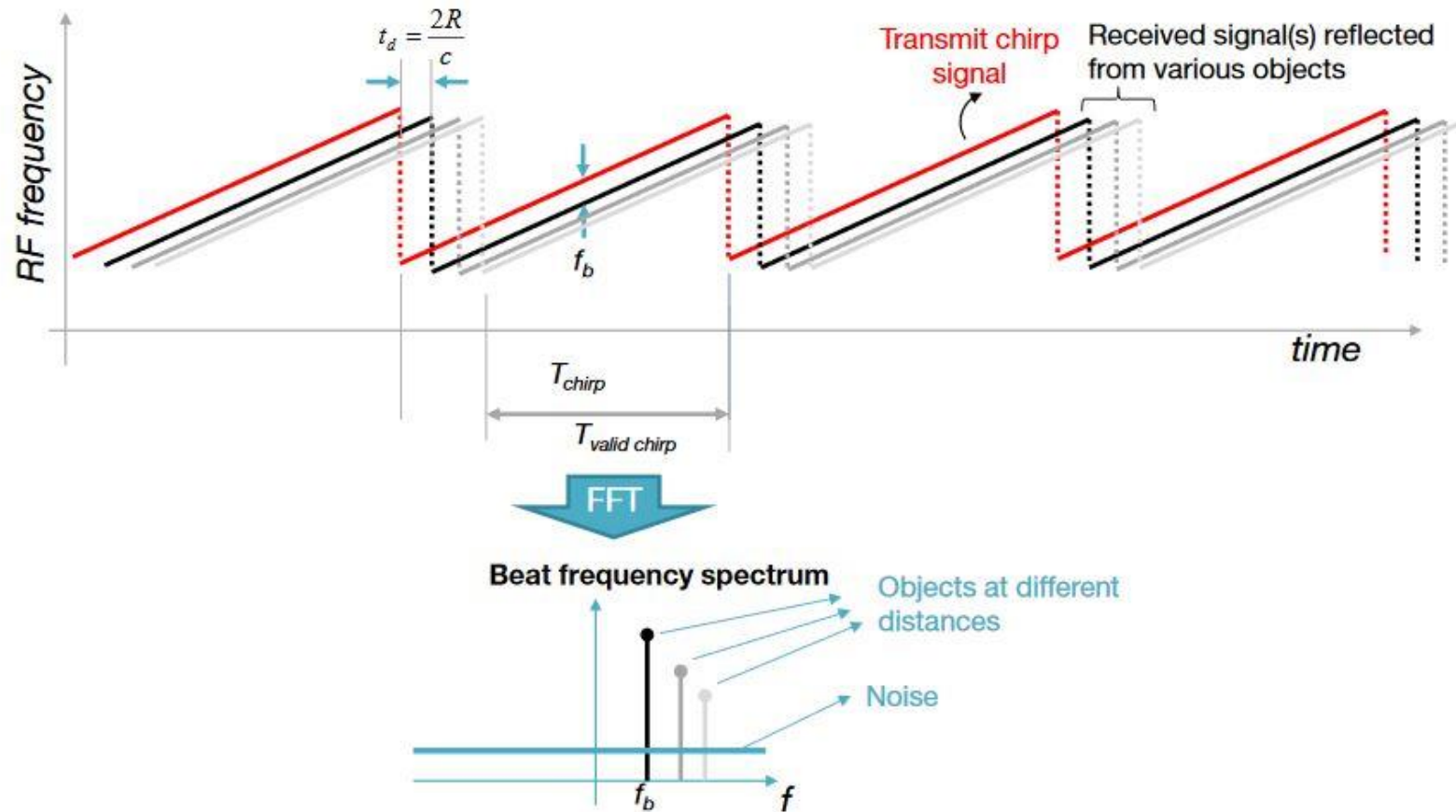
Grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten

- Reflexion, konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit, geradlinige Ausbreitung

Auswertung der Echos

- die Richtung zum Objekt
- die Entfernung zum Objekt (ergibt sich aus der Zeitverschiebung zwischen Senden und Empfangen des Signals)
- die Relativbewegung zwischen Sender und Objekt – sie kann durch den Doppler-Effekt aus der Verschiebung der Frequenz des reflektierten Signals berechnet werden
- das Aneinanderreihen einzelner Messungen (Pulsen) liefert die Wegstrecke und die Absolutgeschwindigkeit des Objektes
- bei guter Auflösung des Radars können Konturen des Objektes erkannt werden oder sogar Bilder gewonnen werden

Moduliertes Dauerstrichradar (FMCW-RADAR)

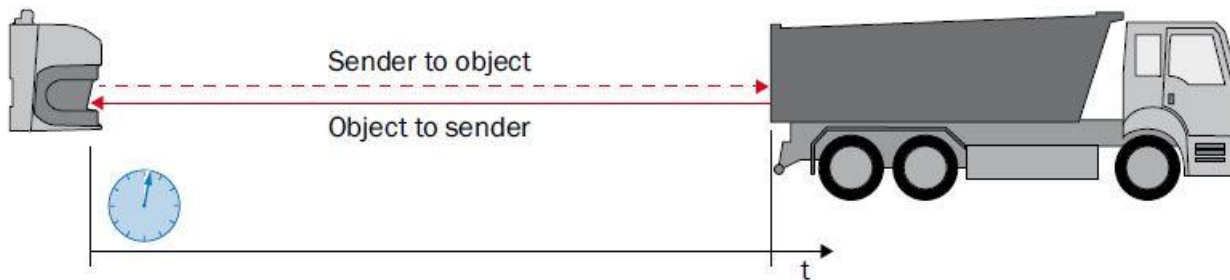


Quelle: https://pdfs.semanticscholar.org/24ca/fae4aab72f7962d8e844d68df42f8e681e26.pdf?_ga=2.143402423.326915640.1580292275-64761232.1567412754, abgerufen am 20.01.2020

Light Detection and Ranging (LiDAR)

LiDAR basierend auf dem „Time of Flight“-Prinzip

- (Laser-) Licht wird ausgesandt
- Reflektion von Objekten über Photodetektor gemessen
- Distanzmessung anhand des Zeitunterschieds zwischen Aussenden und Empfangen des Lichts
- Klassifikation als *aktiver Sensor*, da das empfangene Signal zuvor selbst ausgesendet wurde

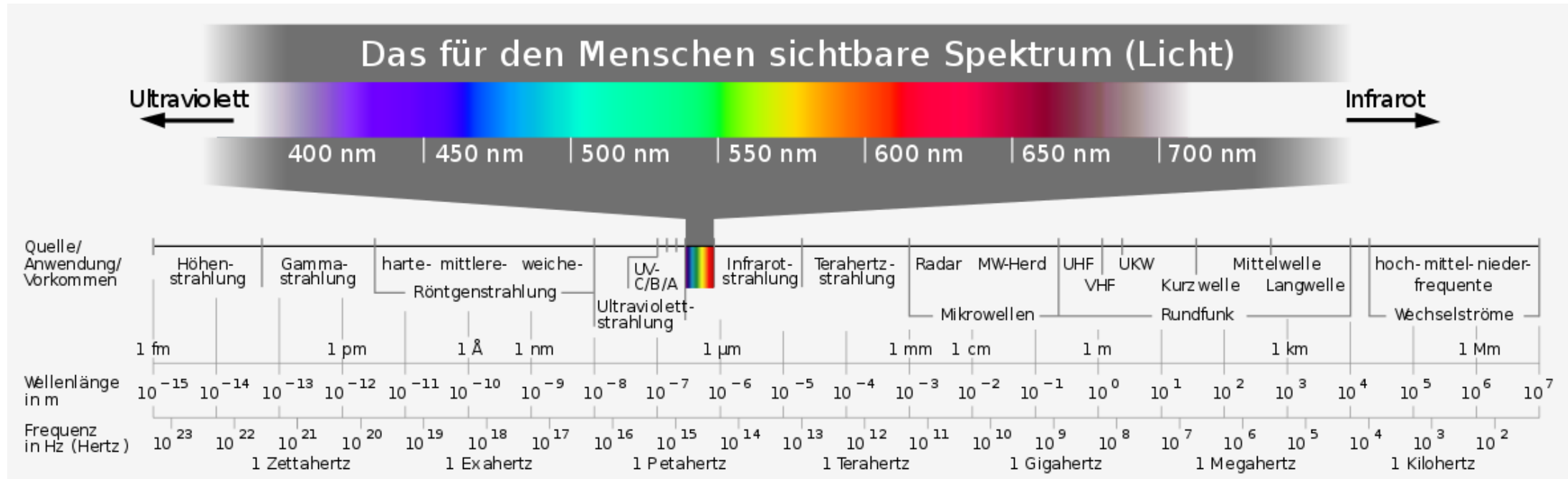


Quelle: https://cdn.sick.com/media/docs/5/25/425/Whitepaper_LiDAR_de_IM0079425.PDF, abgerufen am 20.01.2020

$$d = \frac{c_{Luft} \cdot \Delta t}{2}$$

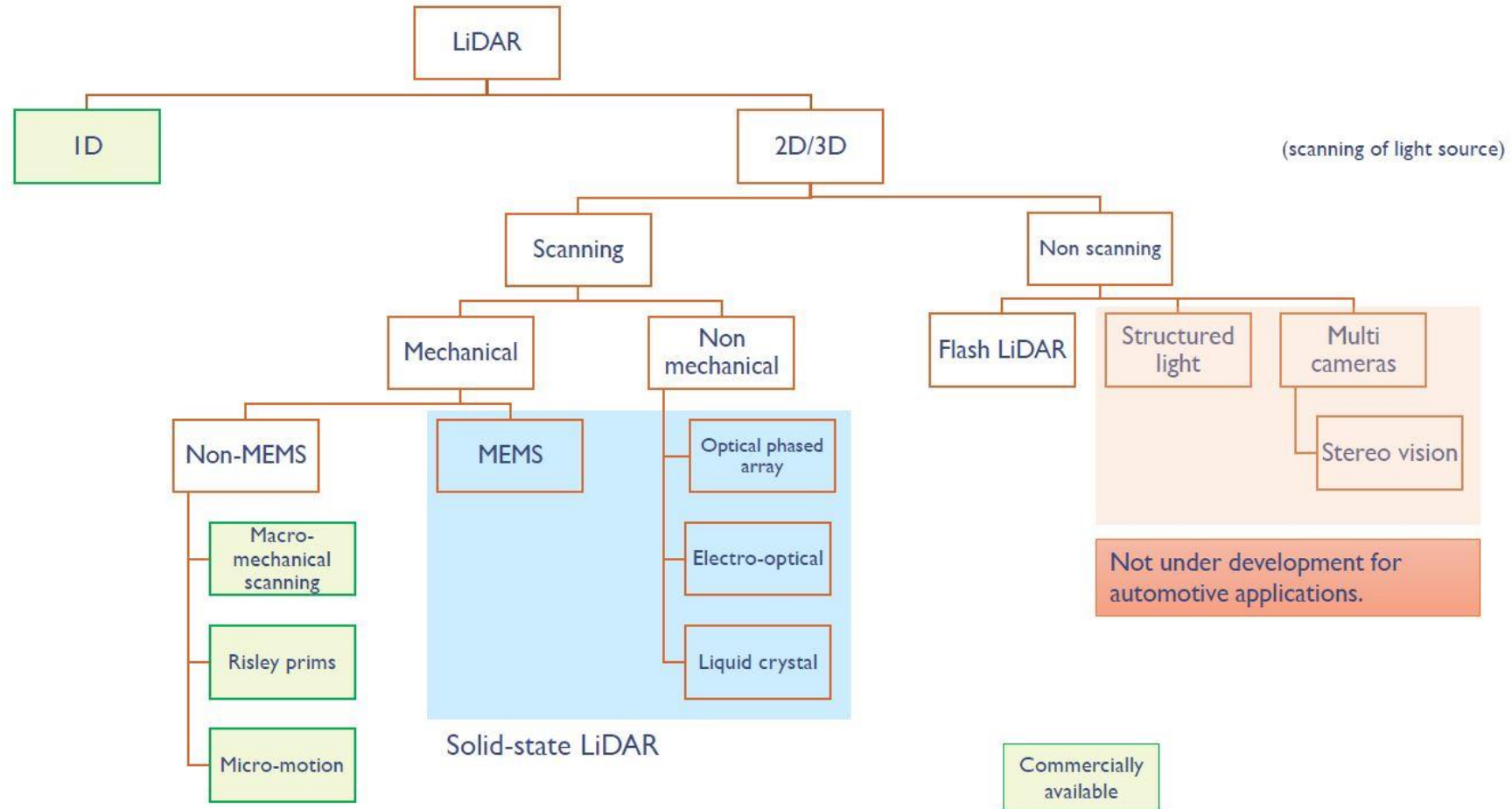
Quelle: <https://www.next-mobility.news/der-status-quo-von-lidar-in-selbstfahrenden-autos-a-836047/>, abgerufen am 20.01.2020

Übersicht des elektromagnetischen Spektrums



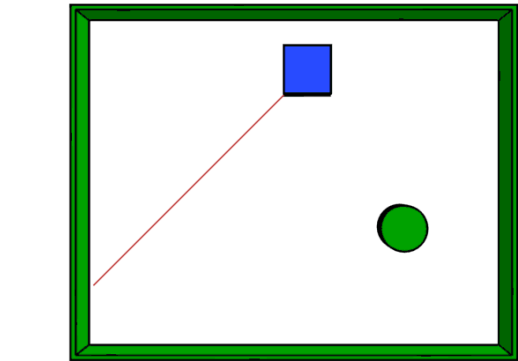
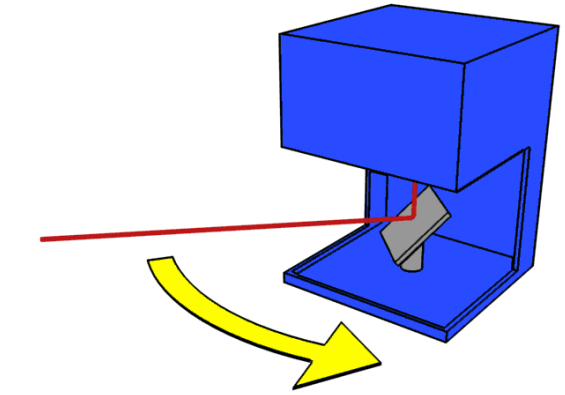
Quelle: https://www.mta-r.de/site/assets/files/7401/1176px-electromagnetic_spectrum_-de_c_svg.png, abgerufen am 20.01.2020

TAXONOMY OF LiDAR TECHNIQUES



Scanning LiDAR - mechanisch

- Am häufigsten mittels motorisierten Spiegeln gelenkt
- Leidet unter Abnutzung
- Ungenauigkeiten durch mechanische Bewegung
- Baugröße begrenzt das Einsatzgebiet
- Benötigte Mechanik erhöht Produktionskosten



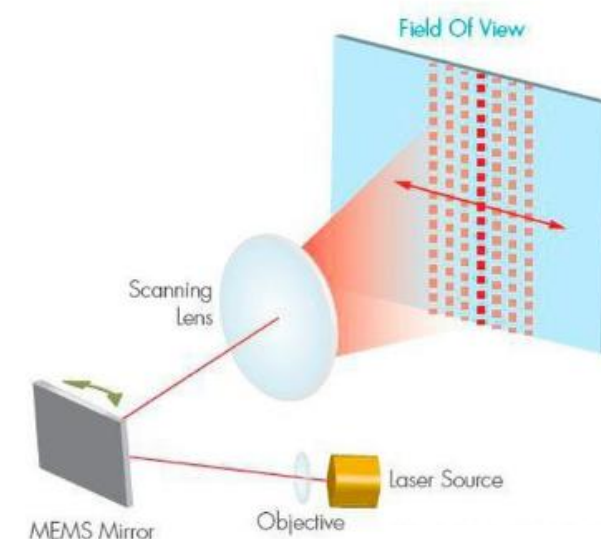
Quelle: <https://www.techinsights.com/featured-reports/velodyne-lidar-puck>, abgerufen am 20.01.2020

Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar#/media/File:LiDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif>, abgerufen am 20.01.2020

Scanning LiDAR – MEMS (Solid-State-LiDAR)

- Micro-Electro-Mechanical Systems
- Spiegel werden nicht motorisiert sondern elektromagnetisch bewegt
- Rekalibrierung v.a. bei starken Temperaturschwankungen nötig (Quelle: <https://www.digitaltrends.com/cars/solid-state-lidar-for-self-driving-cars/>, abgerufen am 20.01.2020)
- Entledigt sich aller mechanisch beweglichen Teile
- Erlaubt die Produktion von LiDAR-Systeme direkt auf dem Chip
- Dadurch geringere Kosten und Einbauhöhe

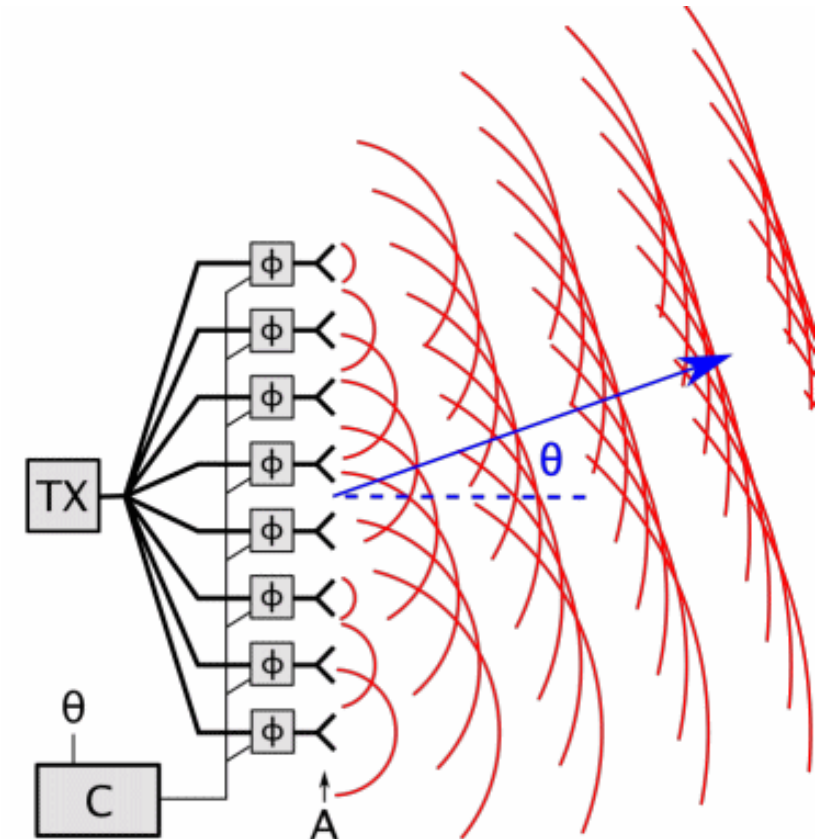
Quelle: <https://www.preciseley.com/mems-mirror-array.html>, abgerufen am 20.01.2020



Quelle: <https://www.next-mobility.news/der-status-quo-von-lidar-in-selbstfahrenden-autos-a-836047/>, abgerufen am 20.01.2020

Scanning LiDAR – Phasengesteuert (Solid-State-LiDAR)

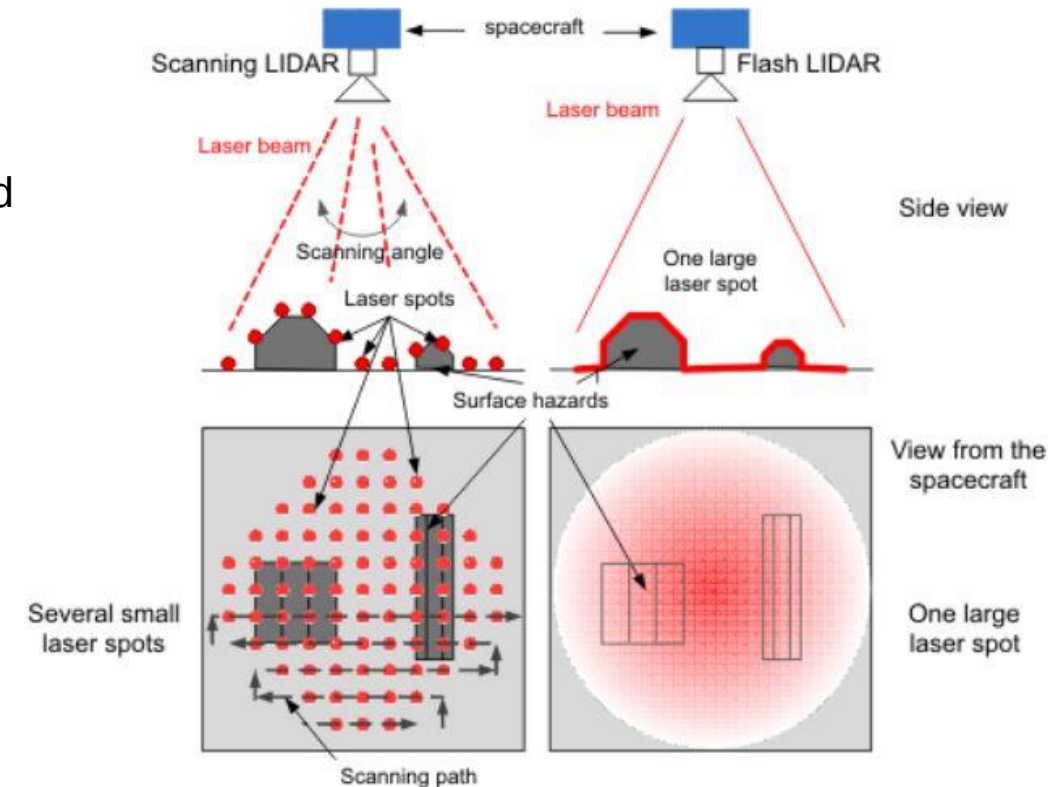
- Optical Phased Array (OPA)
 - Gleicher Ansatz wie beim phasengesteuerten RADAR
 - Vgl. „Focal Plane Array“ oftmals auch „Staring Array“ genannt
- Besondere Anforderungen an die Produktion
 - Kurze Wellenlänge des Lichts
 - Entsprechend präzise müssen die Antennen des Arrays gefertigt sein
 - Schon kleine Ausfälle können zu großen Verschiebungen führen, v.a. im nm-Bereich



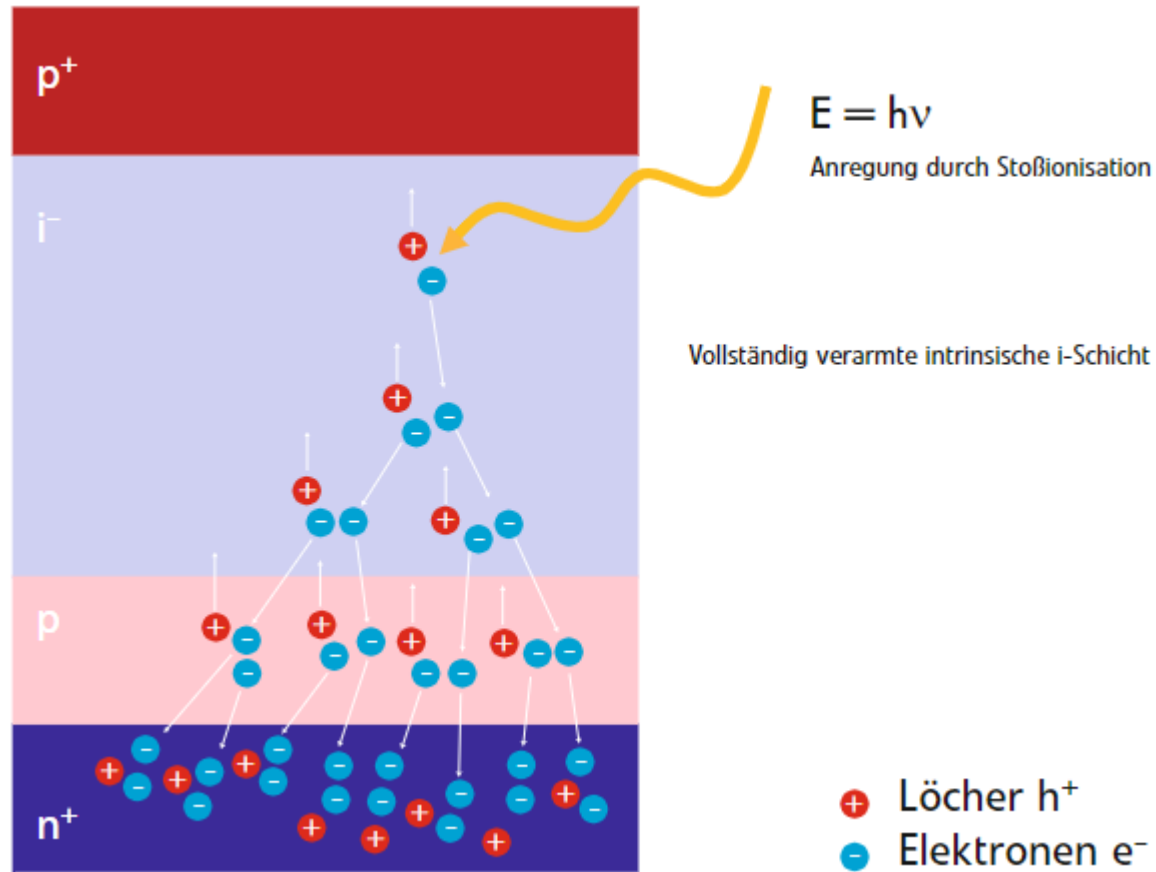
Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array, abgerufen am 20.01.2020

Non-Scanning LiDAR - Flash

- Analog zum Blitz einer Kamera
- Erhellte die ganze Szene auf einmal
 - Laser-Flash muss für größere Reichweiten entsprechend stärker sein
 - Während die Wellenlänge nicht das menschliche Auge beschädigt (Quelle: <https://www.digitaltrends.com/cars/solid-state-lidar-for-self-driving-cars/>, abgerufen am 20.01.2020)
- Wahl zwischen stärkerem Flash und sensitiverem Photodetektor für eine augensichere Wellenlänge
 - Beeinflusst stark von der Kostenfrage
- Focal Plane Array (FPA) detektiert das reflektierte Licht der gesamten Szene
 - “[An FPA] is analogous to the film in a typical camera; it directly captures a 2-D image projected by the lens at the image plane” (Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Staring_array, abgerufen am 20.10.2020)



Quelle: Graham, L. "Focal Plane Array (Flash) LiDAR", GeoCue, 2014



Quelle: https://nanopdf.com/download/single-photon-avalanche-dioden_pdf, abgerufen am 20.01.2020

Funktionsprinzip Avalanche-Photodiode

- Ein einfallendes Photon erzeugt ein Elektron-Loch-Paar
- Das zur Multiplikationszone beschleunigte Elektron erzeugt durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare
- Entstehung des Lawineneffekts

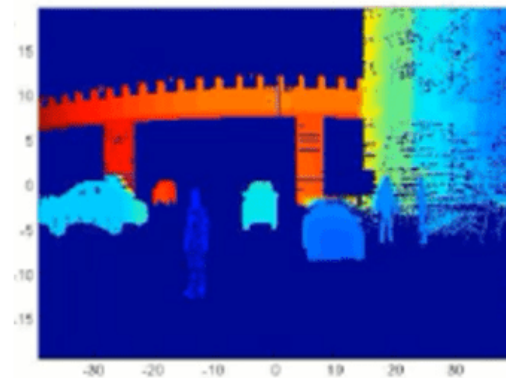
→ Single-Photon-Avalanche-Dioden (SPAD) werden oberhalb der Durchbruchspannung betrieben.

Erkennung große/kleine Objekte

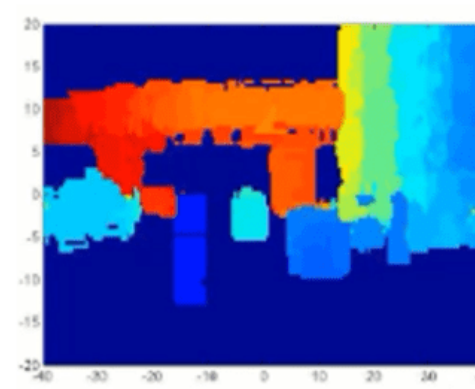
- Hohe Detailtreue und Auflösung
- Kürzere Wellenlänge (im Vergleich zu RADAR) ermöglicht das genauere Erkennen von kleinen Objekten

360° Abdeckung

- Möglich durch mehrere Sensoren oder Scanning-LiDAR mit motorisierten Spiegeln (z.B. *Velodyne VLP-16*)



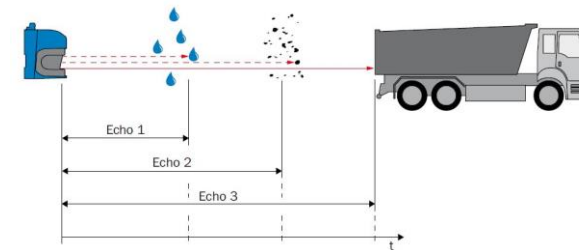
Lidar



High Resolution Radar

Quelle: <https://semiengineering.com/radar-versus-lidar/>, abgerufen am 20.01.2020

- **Teurer** als RADAR
 - *Velodyne VLP-16* kostet ca. \$4000
- Etablierte LiDAR-Systeme sind abhängig von **mechanischen Teilen**
 - Größe
 - Abnutzung
 - Produktionskosten
 - Ansatz für Solid-State- und Flash-LiDAR
- Geringere **Reichweite** als RADAR
- Höherer **Energieverbrauch**
- **Wetter** beeinflusst LiDAR Genauigkeit maßgeblich
 - Witterungsabhängige Dämpfung der Signale (Regen, Nebel, etc.)
 - Sonneneinstrahlung kann zu Übersättigung der Photodetektoren führen

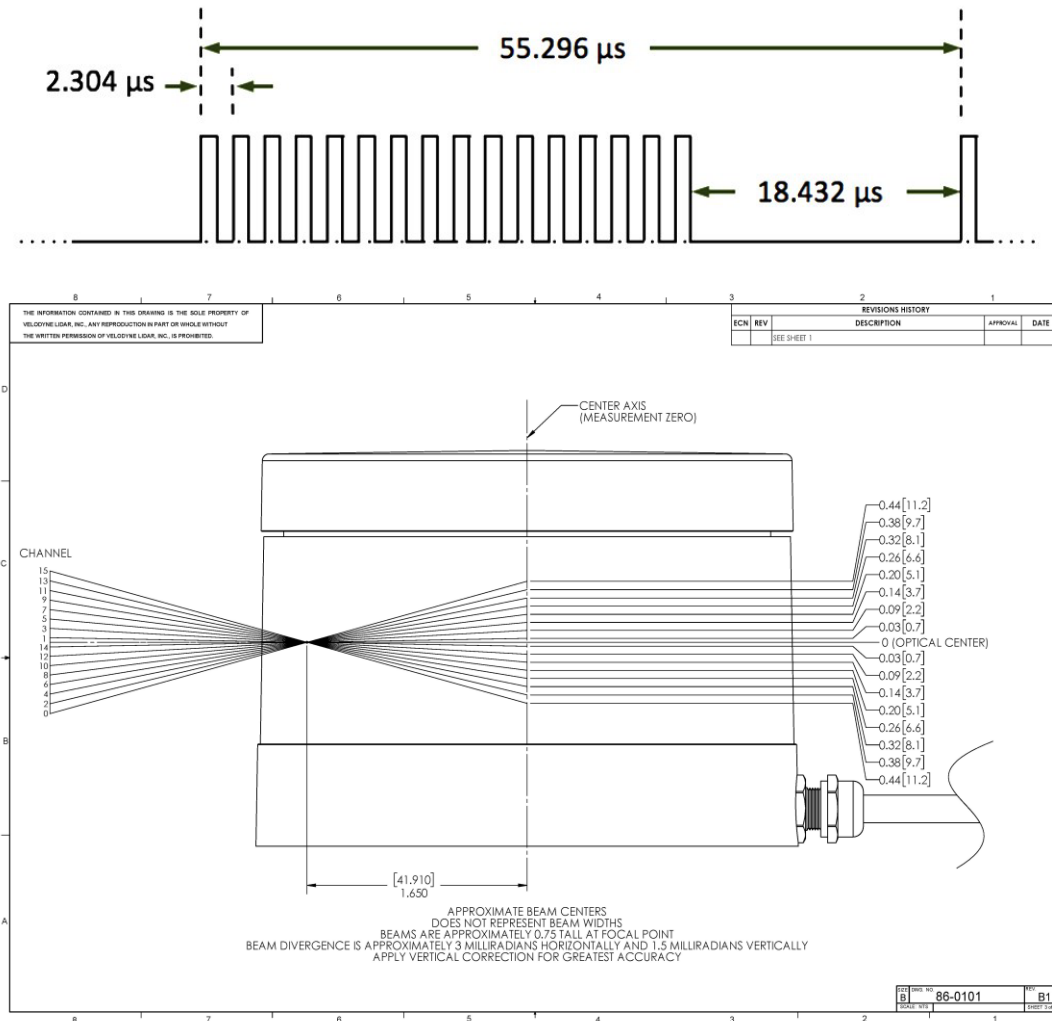


Quelle: Weber H., "SICK AG Whitepaper LiDAR Sensor Functionality and Variants", SICK AG, July 2018.

Technische Daten

- Wellenlänge: **903 nm**
- Reichweite: **100m**
 - Genauigkeit von **+/- 3cm**
- Rotationsraten: 5Hz und 20Hz
- Sichtbereiche (FOV):
 - Horizontal: 360°
 - Vertikal: 30° (-15° bis +15°)
- 16 Kanäle
- Ausgabe ist eine 3D-Punktwolke
 - Ca. 300.000 Punkte/Sekunde
- Kombinierbar mit GPS
- Class 1 **Eye-safe**
 - IEC 60825-1:2007 & 2014

Quelle: Velodyne LiDAR Inc., VLP-16 User Manual

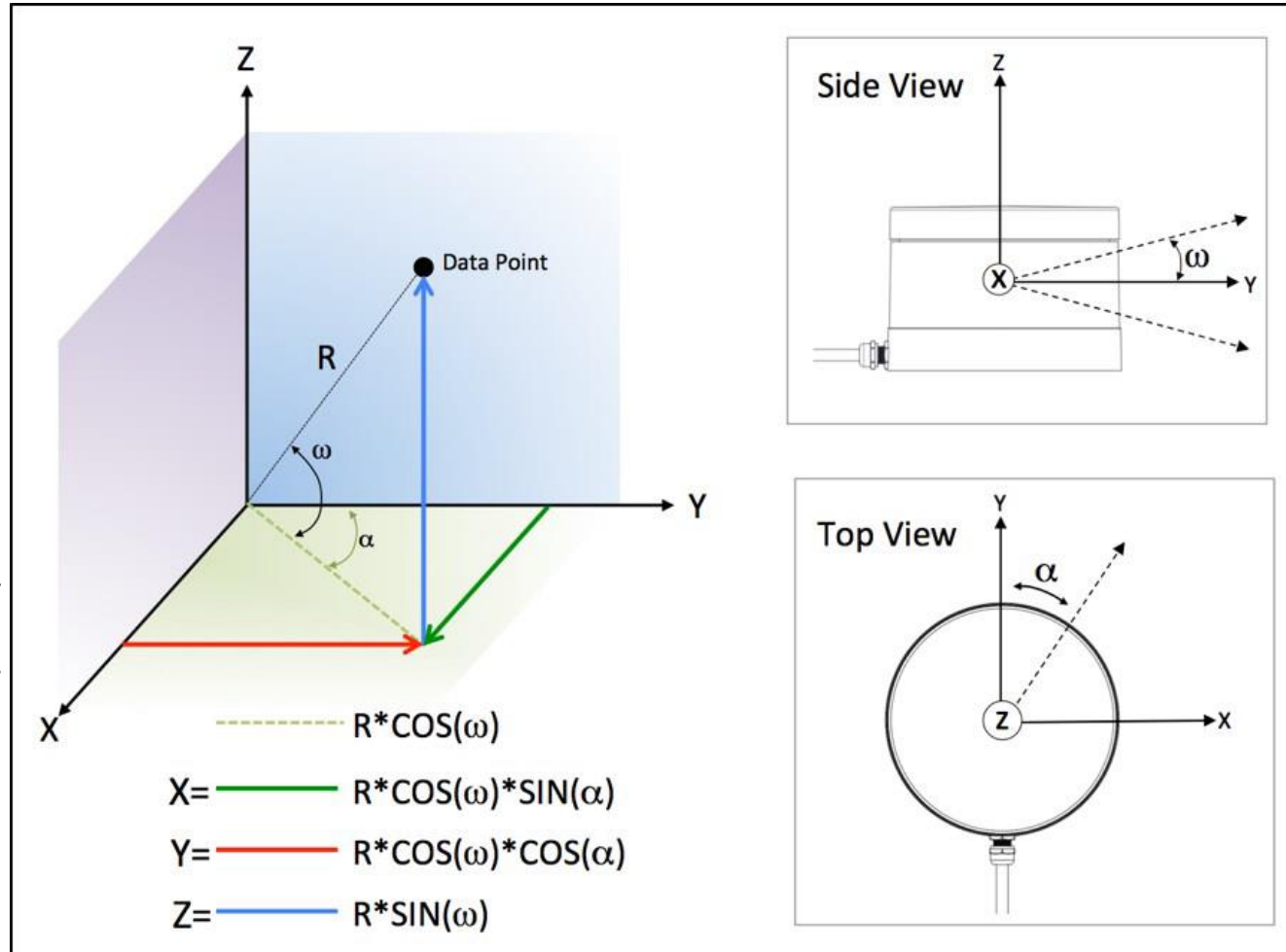


Funktionsprinzip

- 16 Laser werden innerhalb von 36,864 μs abgefeuert
 - 2,304 μs zwischen jedem „Schuss“
- „Re-Charge“-Periode von 18,432 μs
- Ein Datenpaket besteht aus 24 solcher „firing cycles“
 - 1.327 ms pro Paket
 - 753,5 Pakete/Sekunde

Visualisierung

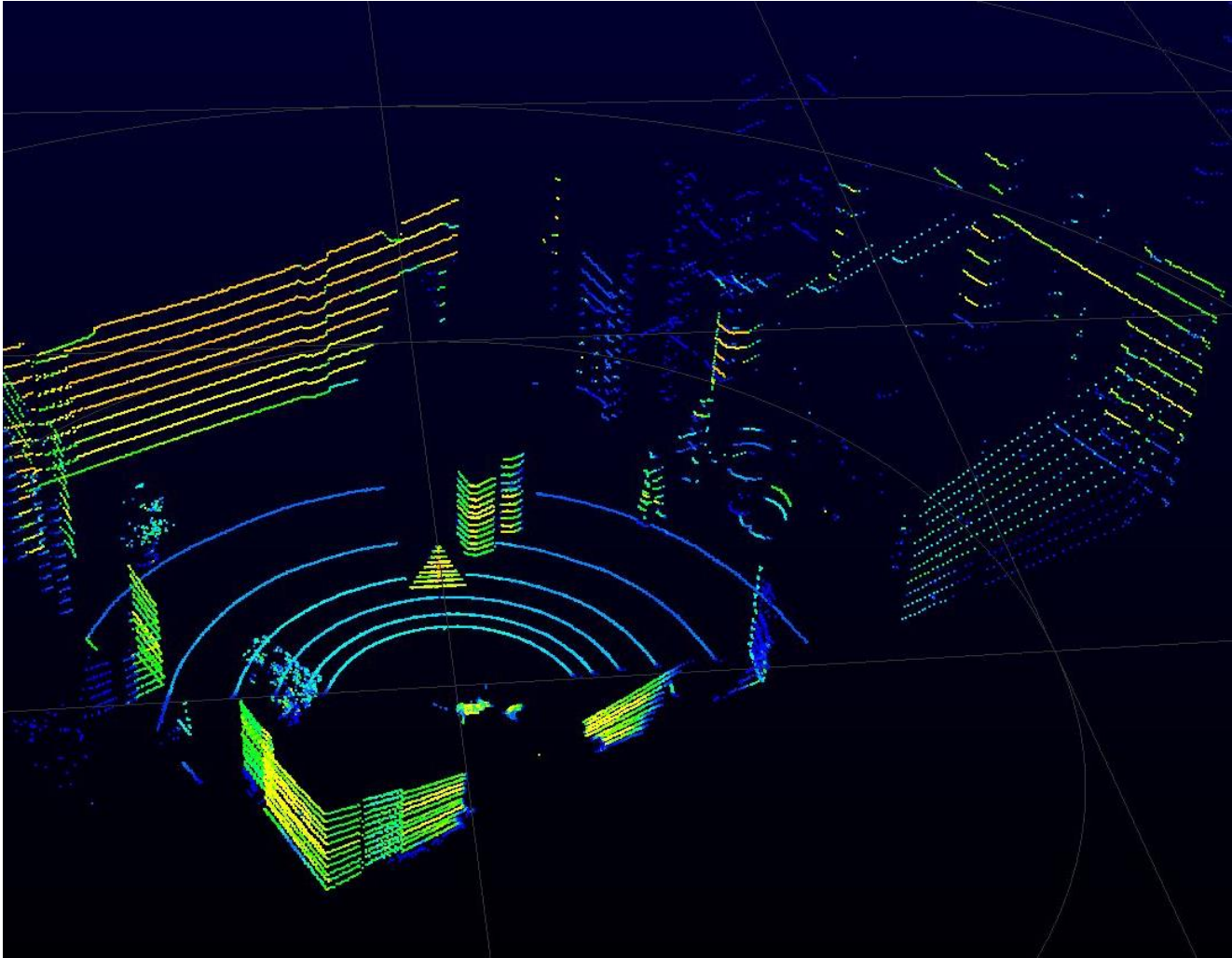
- *VeloView*
 - Ein „Frame“ entspricht einer 360°-Aufnahme



Sensor-Daten-Output

- Gibt die X-,Y-,Z-Koordinate für jeden „Treffer“ zurück
- Zusätzlich wird die **Reflektivität** zurückgegeben
- Jeder Kanal ist in einem bestimmten vertikalen Winkel festgesetzt

Verarbeitung von Punktwolken



LiDAR-Daten: Punktwolke

Ist eine Menge von Punkten eines Vektorraumes, die eine unorganisierte räumliche Struktur aufweist. Sie ist durch die enthaltenen Punkte beschrieben, die jeweils durch ihre Raumkoordinaten (x , y , z) erfasst sind.

Quelle: J. Otepka, S. Ghuffar, C. Waldhauser, R. Hochreiter, N. Pfeifer: Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. In: ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2, 2013, S. 1038 – 1065.

Allgemein

Algorithmus zur Schätzung eines Modells innerhalb einer Reihe von Messwerten mit Ausreißern und groben Fehlern.

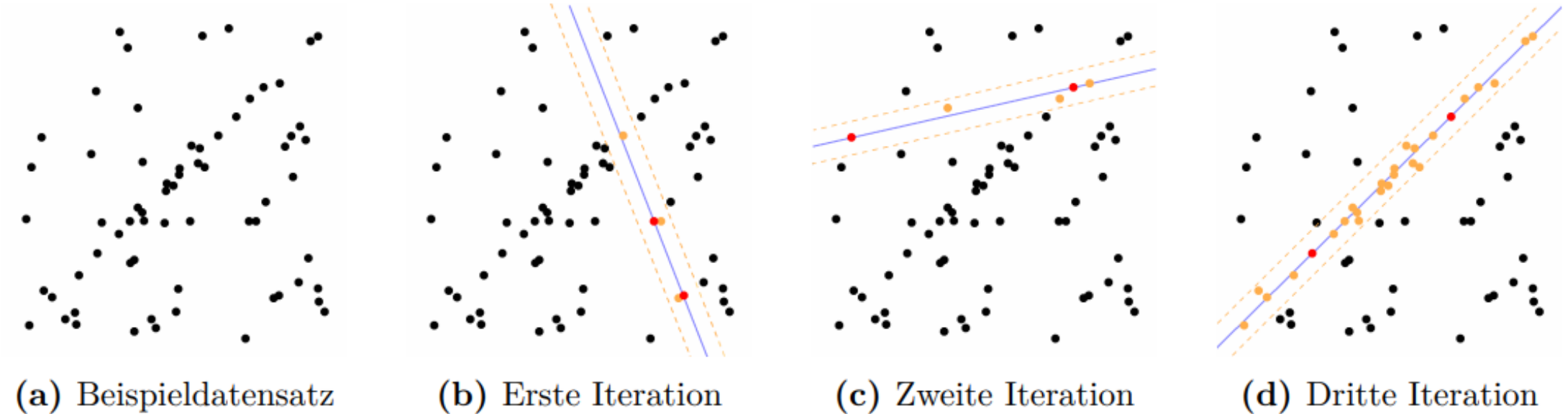
Voraussetzung

Es liegen mehr Datenpunkte vor, als zur Bestimmung der Modellparameter notwendig sind.

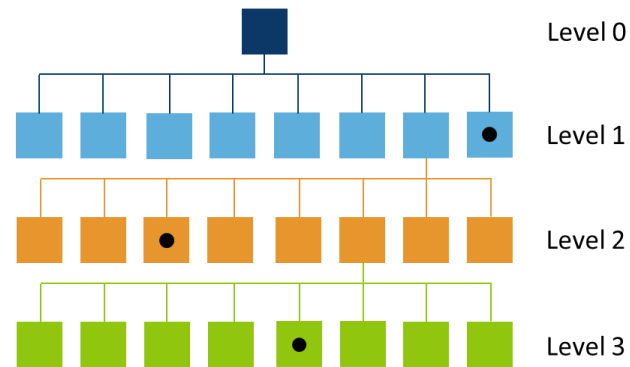
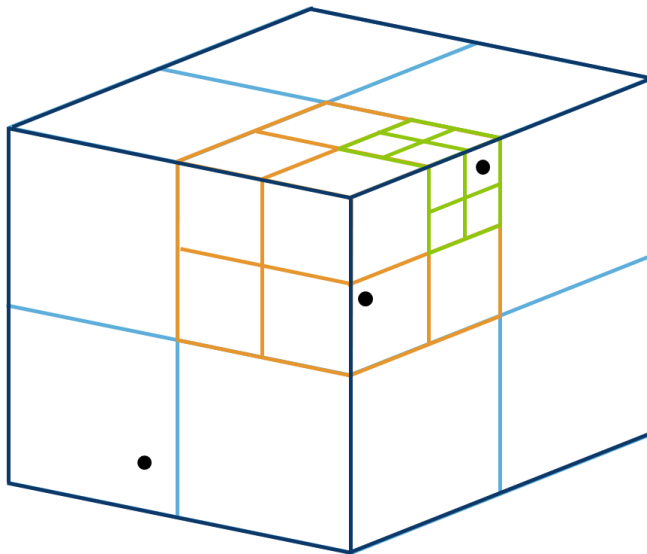
Funktionsweise

1. Zufällige Auswahl von Datenpunkten (Anzahl abhängig vom gesuchten Modell, z. B. für Linie 2 Punkte).
2. Ermittlung der Modellparameter mit den gewählten Punkten.
3. Bestimmung von Datenpunkte, deren Abstand zum Modell kleiner als ein bestimmter Grenzwert ist (*Consensus Set bzw. Inliers/Outliers*).
4. Wiederholung der Schritte 1 bis 3.
5. Auswahl des Modells mit dem größten *Consensus Set*.
6. (Optional) Verbesserung des gewählten Modells, indem es unter Verwendung des *Consensus Set* erneut geschätzt wird (z. B. Lineare Regression).

Beispiel einiger RANSAC-Iterationen



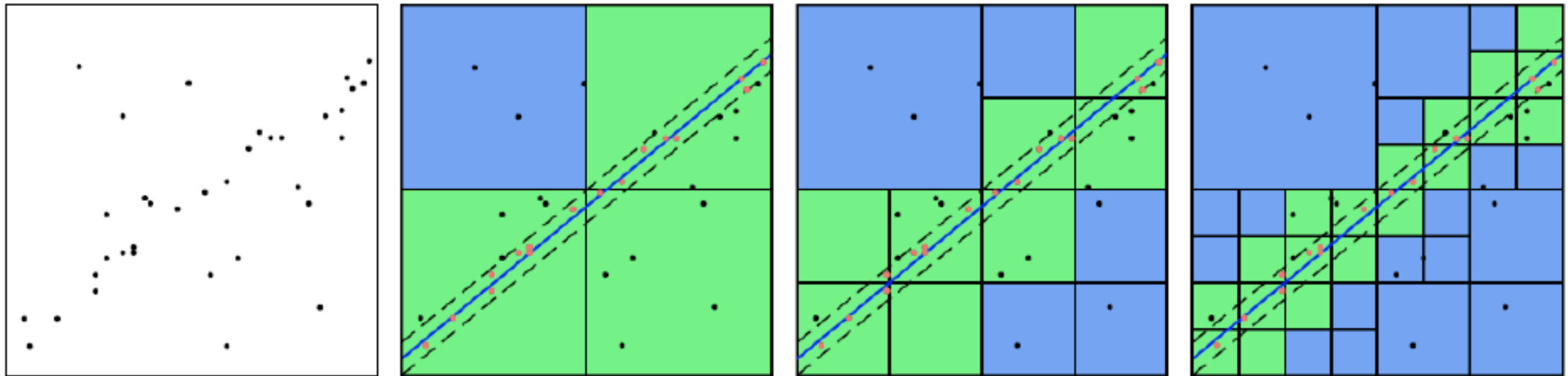
Quelle: T. Herrmann. Bachelorarbeit: Finden von Ebenen in 3D-Punktwolken mithilfe von RANSAC und Hough-Transformation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.



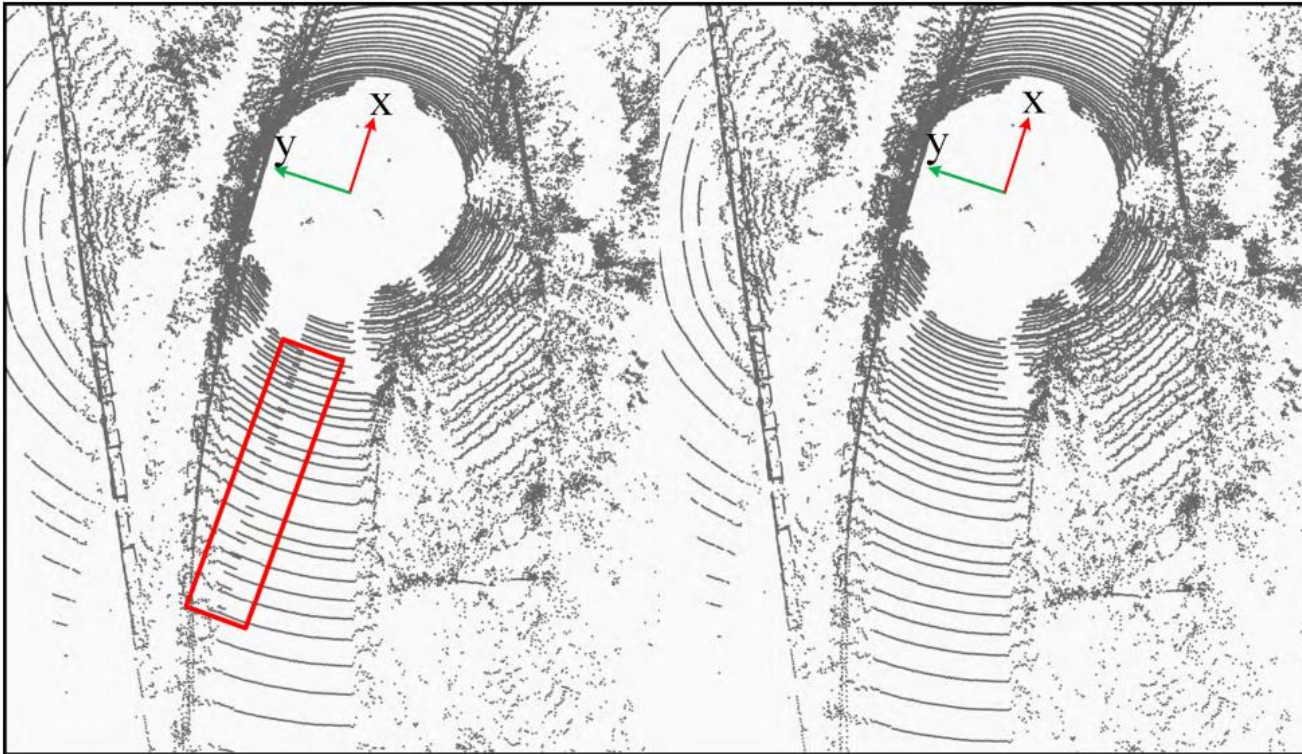
Beschreibung

- Datenstruktur der Informatik
- (Gewurzelter) Baum, dessen Knoten jeweils 8 oder keine Nachfolger besitzen

→ Vereinfachung der Suche nach Punkten innerhalb der Punktwolke



Quelle: T. Herrmann. Bachelorarbeit: Finden von Ebenen in 3D-Punktwolken mithilfe von RANSAC und Hough-Transformation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.



Links: Beispiel einer verzerrten Punktwolke; **Rechts:** Korrigierte Punktwolke

Problembeschreibung

- Bei Laserscannern ist das Scannen zeitlich ausgedehnt, sodass eine Relativbewegung zwischen Sensor und Objekt während des Scans zu einer bewegungsbedingten Unschärfe führt.
- In Folge dieses Effekts wird das Entfernungsbild des Scanners verfälscht, was zu verzerrten Punktwolken führt.

→ Iterative Closest Point Algorithm (ICP) zwischen 2 aufeinanderfolgenden Frames gibt Rückschluss auf die Geschwindigkeit und damit die Möglichkeit der Interpolation.

Kontakt

Eric Voigt

IAV GmbH

Kauffahrtei 25, 09120 Chemnitz

Telefon +49 172 4410152

eric.voigt@iav.de

www.iav.com

Maria Kremsreiter

IAV GmbH

Kauffahrtei 25, 09120 Chemnitz

Telefon +49 15222672083

eric.voigt@iav.de

www.iav.com