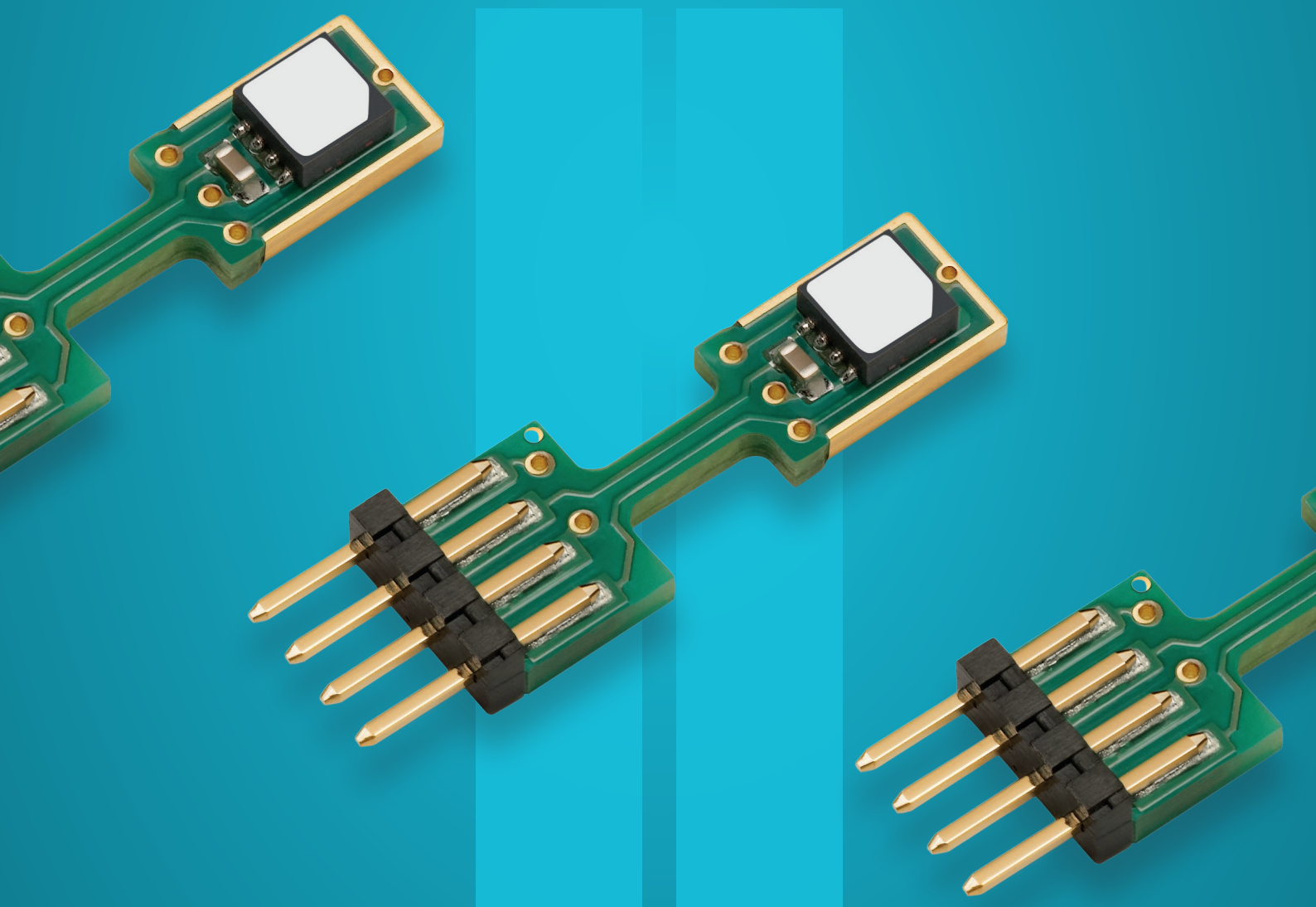
INDUSTRIAL IOT

SCHLÜSSELTECHNOLOGIE SENSOREN -
WIE SIE KOMMUNIZIEREN, WAS SIE LEISTEN

WHITE PAPER



at.rs-online.com

Wir sind an Ihrer Seite

Cover Bild: Sensirion

Schlüsseltechnologie Sensoren - Wie sie kommunizieren, was sie leisten

Sensorik ist für alle Bereiche des Lebens und der Wirtschaft zur Schlüsseltechnologie geworden. Ein wichtiges Element der vierten industrielle Revolution ist die Komponente IIoT (Industrial Internet of Things). Zentrale Komponenten sind hier Sensoren und die entsprechenden Kommunikationstechniken, die auch Anwendungen jenseits der reinen Produktion ermöglichen. Kern des IIoT ist die Digitalisierung der Sensorsignale und der standardisierte "Transport" von Roh- oder vorverarbeiteten Daten dortin, wo sie gebraucht werden. Wichtige "Sensor-Hochburgen" sind weiterhin die Automobilindustrie, die Medizintechnik, die Gebäudeautomatisierung und das Konsumer-Segment. Im Automotive-Bereich sind es insbesondere die Fahrerassistenzsysteme, die zu einer rasanten Weiterentwicklung der Radar-, Ultraschall-, Lidar und Video-Sensorik geführt haben. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt deshalb auf den Themen Sensorkommunikation im IIoT-Bereich und der Sensoreinsatz im Automobil.

Es existieren mehr als 100 Messgrößen, für die Sensoren angeboten werden. Das globale Marktvolumen für das Jahr 2020 wird mit etwa 200 Mrd. US$ prognostiziert (Bild 1). Dabei entwickeln sich Sensoren zunehmend zu eigenständigen Mikrosystemen, bestehend aus Sensorik und Elektronik für die Datenverarbeitung und Kommunikation. Diese Systeme sind vernetzt, autark und intelligent.

Eine der großen Herausforderungen für das IIoT ist die durchgängige standardisierte Kommunikation vom Sensor beziehungsweise Aktor in die Cloud. Im weiteren sollen die hierfür wichtigen Technologien - IO-Link und Single Pair Ethernet - vorgestellt werden. Anschließend wird eine der "schillerndsten" Anwendungen der Sensorik - die Vorausschauende Wartung - beleuchtet.

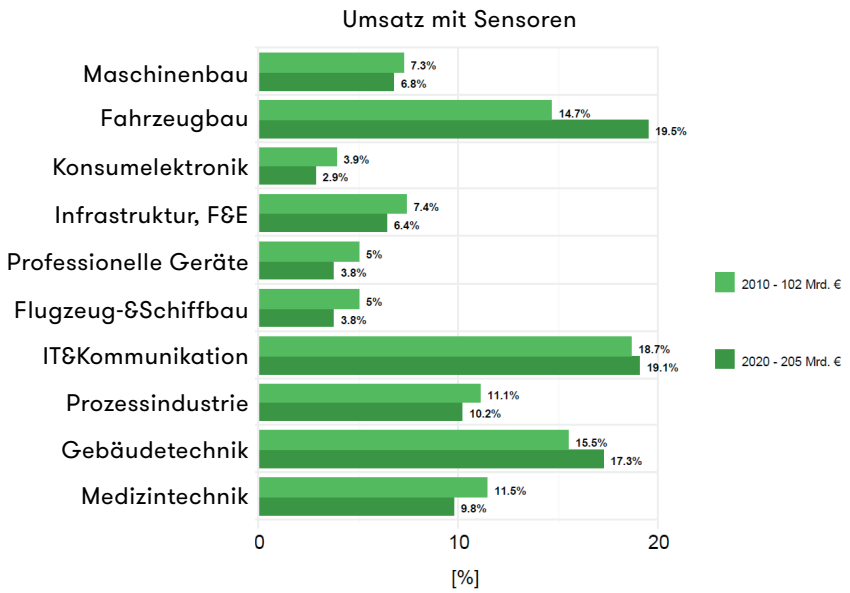


Bild 1. Das globale Marktvolumen ist für 2020 mit etwa 205 Mrd. US$ prognostiziert (Quelle: Intechno Consulting Basel)

IO-Link: Eine offene, rückwärts kompatible Sensor-/Aktor-Schnittstelle

IO-Link ist eine Punkt-zu-Punkt-Kommunikationsverbindung (IEC 61131-9) mit standardisierten Steckverbindern, Kabeln und Software-Protokollen. Das System ist so konzipiert, dass es innerhalb der industriellen 3-Draht-Sensor- und Aktor-Infrastruktur arbeitet und besteht aus den Komponenten „IO-Link Master“ und „IO-Link Device“ (Bild 2).

IO-Link verzeichnete 2019 den größten jährlichen Anstieg (40%) und erzielte die gleiche Wachstumsrate wie im Vorjahr. Die Gesamtzahl der installierten IO-Link-Geräte beträgt weltweit aktuell mehr als 16 Millionen.

Die Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen dem IO-Link-Master (Multi-Port-Controller oder Gateway) und der IO-Link-Geräte (Sensor oder Aktor) verwendet Standardstecker (normalerweise M12) und ein 3- oder 4-adriges Kabel mit einer Länge von bis zu 20 Metern (Bild 2). Der Master kann mehrere Ports haben (normalerweise vier oder acht). Jeder Port des Masters verbindet sich mit einem einzigen IO-Link-Gerät - das kann entweder im SIO-Modus oder mit bidirektionaler Kommunikation arbeiten.

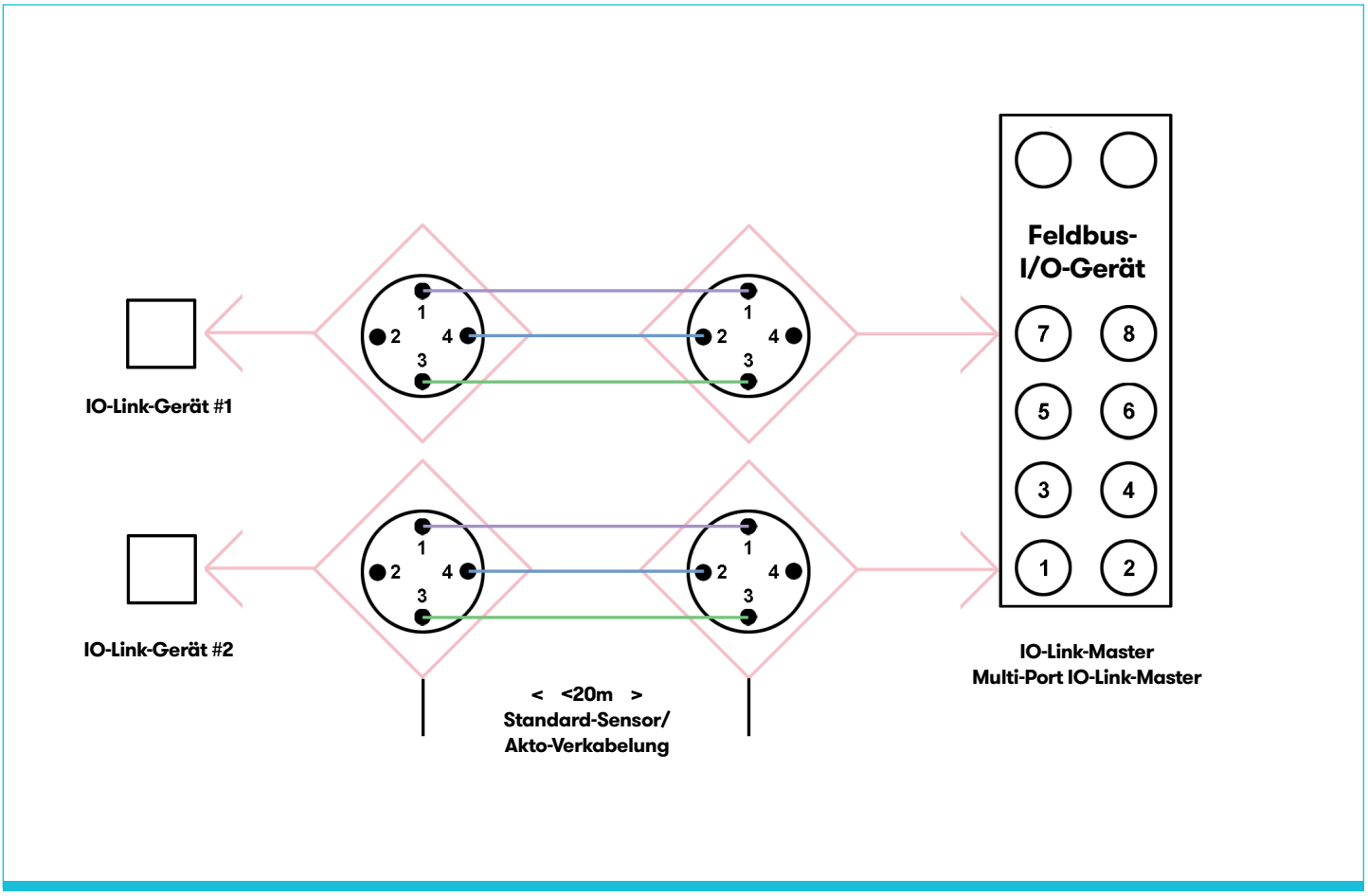


Bild 2. IO-Link Master/Device-Kopplung. (Bild: channel-e)

Zwei Kommunikations-Modi im Angebot

IO-Link ist ein Standard für Single-Drop-Kommunikationsschnittstellen (SDCI, Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators), die als IEC-61131-9 standardisiert wurde, wobei Abwärtskompatibilität mit binären Sensoren - wie in IEC 60974-5-2 (Bild 3 und Tabelle 1) festgelegt - sichergestellt ist. IO-Link-Sensoren haben Eigenschaften von binären Sensoren, es wurde aber eine bidirektionale Kommunikation hinzugefügt. IO-Link-Master können mit beiden Varianten Binär- und IO-Link-Sensoren verbunden werden, so dass IO-Link einfach zu einem bestehenden System hinzugefügt werden kann.

Der IO-Link-Standard besagt, dass die Kommunikation auf einer Leitungslänge von 20 Metern mit ungeschirmtem Kabel mit industriellen Standardsteckern erfolgen muss. Am häufigsten werden M8- und M12-Steckverbinder verwendet. Die Kommunikation erfolgt Punkt-zu-Punkt und erfordert eine 3-Draht Schnittstelle (L +, C/Q und L-). Die Kommunikation zwischen Master und Slave-Geräten wird halbduplex mit drei Übertragungsraten realisiert: COM1 4800 Baud, COM2 38,4 kBaud, COM3 230,4 kBaud.

Der Versorgungsspannungsbereich in einem IO-Link-System beträgt 20V bis 30V für die Master und 18V bis 30V für das Gerät (Sensor oder Aktor).

Das IO-Link-Gerät muss innerhalb von 300ms, nachdem L+ 18V überschritten hat, funktionieren. Die beiden Kommunikationsmodi sind Standard-E/A (SIO) und SDCI (Single-Drop Communication Interface). Im SIO-Modus ist die Abwärtskompatibilität mit vorhandenen Sensoren im Feld gewährleistet, die 0V oder 24V zur Ein/Aus-Signalisierung an den IO-Link Master verwenden. Im IO-Link-Modus ist die Kommunikation mit einer der drei Datenraten bidirektional. Das IO-Link-Gerät unterstützt nur eine Datenrate, während der IO-Link-Master alle drei Datenraten beherrschen muss. Die Kommunikation erfolgt mit 24-V-Impulsen unter Verwendung von NRZ (nonreturn-to-zero) auf der C/Q-Leitung, wobei eine logische 0 zwischen CQ und L- 24V ist und eine logische 1 0V zwischen CQ und L-.

Im IO-Link-Modus kann sich Pin 2 im DI-Modus als digitaler Eingang oder DO-Modus als digitaler Ausgang befinden oder er ist nicht verbunden (NC).

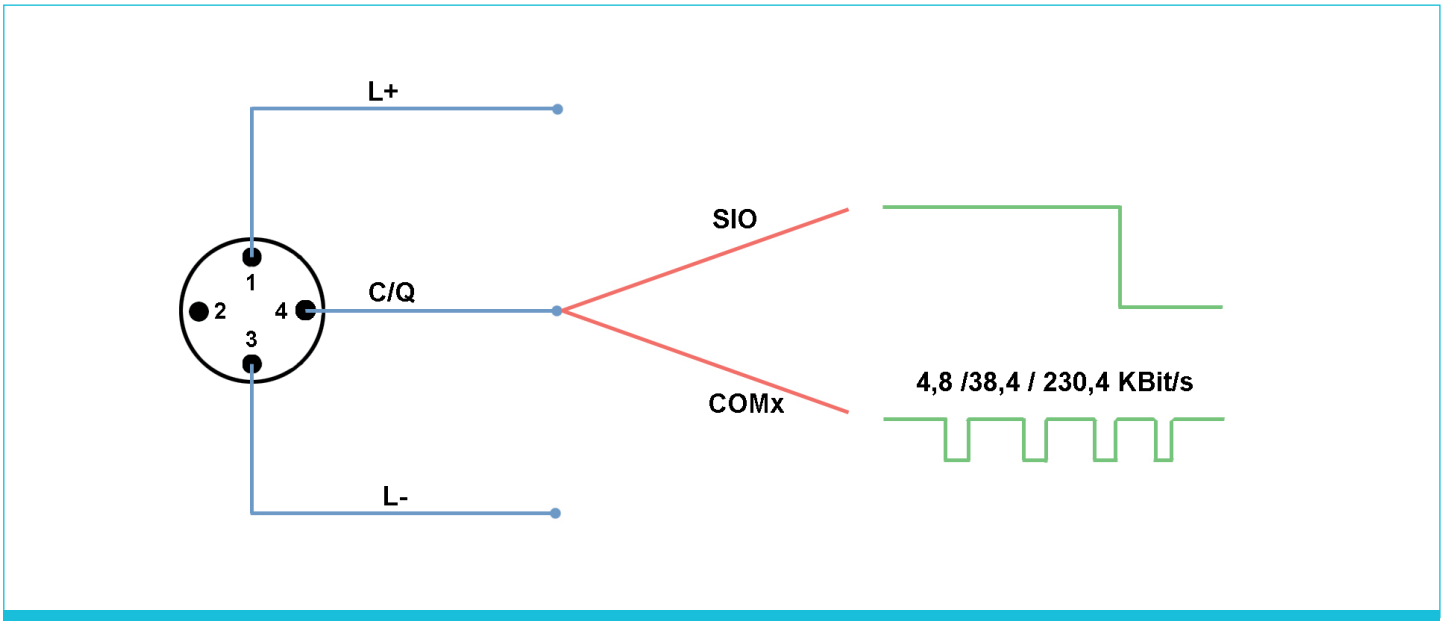


Bild 3. IO-Link-Pin-Definitionen. (Bild: channel-e)

Pin	Signal	Bezeichnung	Standard
1	L+	24V	IEC 61131-2
2	I/Q	Nicht angeschlossen, DI oder D0	IEC 61131-2
3	L-	0V	IEC 61131-2
4	Q	Schaltsignal (SIO)	IEC 61131-2
	C	Kodiertes Schalten (COM1, COM2, COM3)	IEC 61131-9

Tabelle 1. IO-Link-Pin-Definitionen

Spickzettel - Der IO-Link IODD

Alle IO-Link-Geräte (Sensoren oder Aktoren) müssen eine IO-Link-Gerätebeschreibungsdatei (IODD) zur Verfügung stellen. Dies wird vom IO-Link-Master zur Identifizierung, Dateninterpretation und Konfiguration verwendet.

Die IODD-Datei enthält:

- Alle notwendigen Informationen, um die Kommunikation herzustellen
- Geräteparameter
- Identifikationsinformationen
- Prozess- und Diagnoseinformationen
- Ein Bild des Geräts und das Herstellerlogo

IODD-Dateien sind XML-Dateien, deren Struktur in einem separaten Abschnitt der Norm IEC 61131-9 beschrieben wird. Das IO-Link-Konsortium unterhält auf seinem Webserver (www.io-link.com) eine zentrale Lieferanten-Datenbank mit IODD-Dateien.

Steckverbinder

Standardisierte Steckverbinder und Kabel werden wie in der IEC 61131-9 definiert verwendet. Port-Class A-Steckverbinder haben 4-Draht-Anschlüsse (maximal) zur Unterstützung des 3-Draht-Verbindungssystems (L+, L-, C/Q) mit einem vierten Anschluss, der als zusätzliche Signalleitung (DI oder DO) verwendet werden kann. Port-Class-B-Steckverbinder haben 5-Draht-Anschlüsse für Geräte, die eine zusätzliche Stromversorgung benötigen (Bild 4).

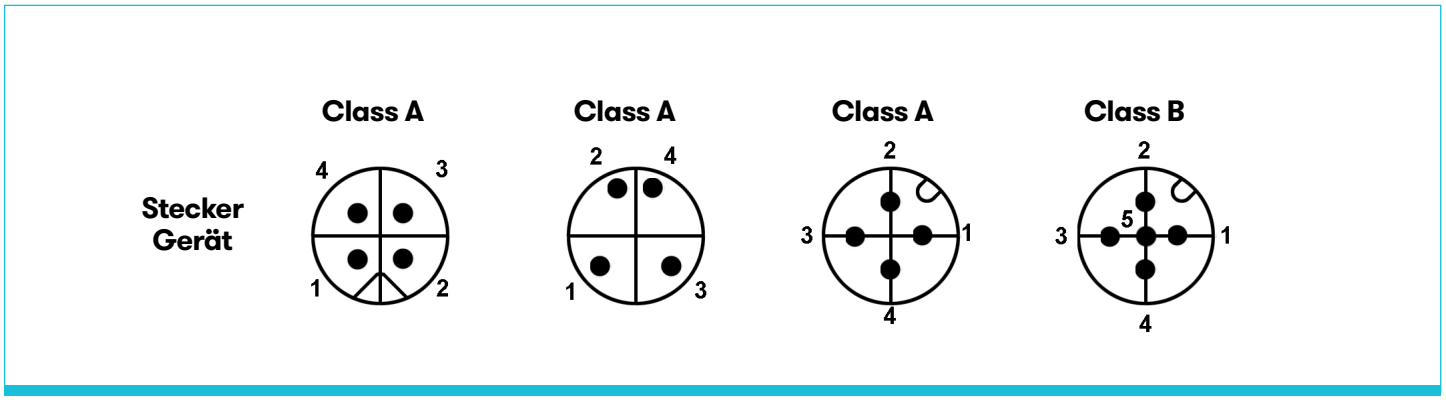


Bild 4. IO-Link Steckverbinder. M12-Varianten sind A-codiert. (Bild: channel-e)

IO-Link für Single Pair Ethernet fit machen

IO-Link ist als industrielle Kommunikationsschnittstelle für Feldgeräte, Sensoren und Aktoren entwickelt worden. Die Schnittstelle bietet drei verschiedene Übertragungsraten und eine maximale Kabellänge von 20m. Insgesamt sind die einfache Integration in Automatisierungssysteme sowie der hohe Standardisierungsgrad gemeinsamer Funktionen und die Endgeräte-Beschreibung zwei Hauptvorteile dieser Kommunikationstechnologie.

In der Konzeptstudie: “Extension of IO-Link for Single Pair Ethernet transmission”, wird vorgeschlagen, einen EtherType für I/O-Link einzuführen. EtherTypes gibt es z. B. schon für ProfiNet oder EtherCat. Es handelt sich um ein Feld in einem Ethernet-Frame, das zur Anzeige des verwendeten Protokolls in der “Nutzlast” des Rahmens eingesetzt wird. Der Studie zufolge ist dieses Verfahren mit sehr geringem Hard-und Software-Aufwand realisierbar.

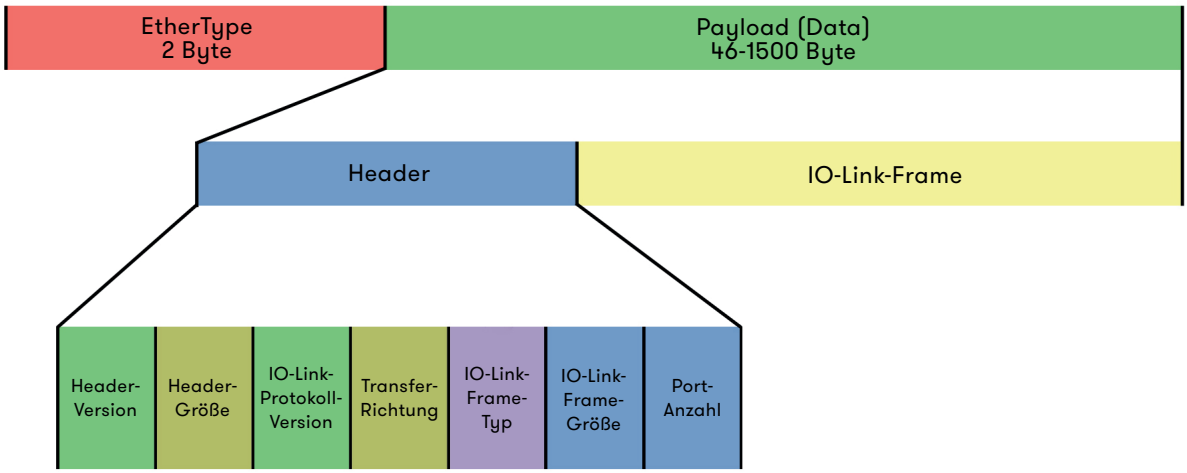


Bild 5. IO-Link-Pin-Definitionen. (Bild: channel-e)

Megatrend Single Pair Ethernet

Single Pair Ethernet (SPE) gilt als einer der Megatrends der industriellen Datenübertragung und als “Enabler” von IIoT und Industrie 4.0. Diese Technologie kann das “Industrielle Internet der Dinge” Realität werden lassen. Jeder Sensor oder Aktor ist per Internet-Protokoll erreichbar und kann seine Daten barrierefrei bis in die Cloud übertragen oder aus ihr empfangen.

Die Steuerungs- und Feldebene in der Automatisierungstechnik ist geprägt durch stark fragmentierte Feldbus-Infrastrukturen. Die daraus resultierenden Dateninseln erfordern komplexe Gateways, die den Zugriff auf die Daten der Geräte im Feld verkomplizieren. Durch den Wegfall dieser Gateways könnten die Kosten und die Komplexität dieser Installationen erheblich reduziert und die von ihnen geschaffenen Dateninseln entfernt werden (Tabelle 2).

Feldbus	Datenrate	Kabellänge
Profibus DP	9,6 kb/s bis 12 Mb/s	100m bis 1200m
Profibus PA	31,25 kb/s	1900m
CANopen	62,5 kb/s bis 1 Mb/s	30m bis 1000m
DeviceNet	125 kb/s bis 500 kb/s	100m bis 500m
AS-Interface	167 kb/s	100m
CC-Link	10 Mb/s	100m
IO-Link	230 kb/s	20m

Tabelle 2. Gebräuchliche Feldbus-Technologien (Quelle: Belden)

Ein Ansatz, um diese Fragmentierung zu beseitigen, ist die Weiterführung von Ethernet aus der Steuerungsebene bis in die Feldebene. Erschwert wurde dieser Ansatz jedoch durch die Begrenzung der Leitungslänge auf maximal 100m, den Einsatz von minimal zwei Adernpaaren und durch weniger brauchbare Steckverbinder.

Datenraten und Leitungslängen in der Norm

Single Pair Ethernet erlaubt es nun, über zweiadriges Kupferkabel Daten mit 10Mbps, 100Mbps und 1Gbps zu transportieren sowie gleichzeitig Endgeräte per Power over Data Line (PoDL) mit Strom zu versorgen. Die Datenraten und Leitungslängen sind im Einzelnen:

- 10 MB/s (duplex) bis 1000m, Übertragung mit einer Bandbreite von 20MHz (10Base-T1L)
- 10 MB/s (halbduplex) bis 40m, Übertragung mit einer Bandbreite von 20MHz (10Base-T1S)
- 100 MB/s (duplex) bis 15m, Übertragung mit einer Bandbreite von 66MHz (100Base-T1)
- 1000MB/s (duplex) bis 40m, Übertragung mit einer Bandbreite von 600MHz (1000Base-T1)

10Base-T1L ist (versehen mit dem Suffix L) die “Long-Range”-Version der im IEEE-Papier 802.3cg standardisierten Single-Pair-Ethernet-Variante für eine Kabellänge von 1000m. 10Base-T1L arbeitet vollduplex - das heißt, die Sende- und Empfangssignale werden gleichzeitig über ein Adernpaar übertragen. Per Echokompensation kann eine Station das eigene Sendesignal aus dem Gesamtsignal entfernen und das Empfangssignal isolieren. 10Base-T1L verwendet Twisted-Pair-Kabel mit 20MHz Bandbreite und einem Wellenwiderstand von 100Ω.

Zusätzliche Vorkehrungen für Anwendungen in der Prozessindustrie bietet Ethernet APL (Advanced Physical Layer). Es basiert auf 10BASE-T1L gemäß IEEE 802.3cg. Der Aufbau kann aus einem “Trunk”-Kabel (Kabel-Bündelung) mit einer Länge von maximal 1000m zwischen den Feld-Switches in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 1 und maximal 200m zwischen einem Feld-Switch und einem Feldgerät in Zone 0 bestehen. Ethernet APL enthält Erweiterungen, die speziell auf die Anforderungen der Prozessindustrie zugeschnitten sind - wie Eigensicherheit (IEC TS 60079-47) und Port-Profile für eine optionale Stromversorgung der Feldgeräte.

10Base-T1S ist (versehen mit dem Suffix S) die “Short-Range”-Version der im IEEE-Papier 802.3cg standardisierten Single-Pair-Ethernet-Variante. 10BaseT1S arbeitet im Halbduplex-Verfahren und kann sowohl in Point-to-Point- als auch in einer Multidrop-Technologie (Bild 6) betrieben werden. Letztere ist mit einer Buslänge von 25m mit 10cm langen Stichleitungen definiert. In dieser Topologie ist ein Switch entbehrlich, weil das Arbitrierungs-Schema PLCA (Physical Layer Collision Avoidance) eingesetzt wird, das dafür sorgt, dass es zu keinen Datenkollisionen kommt. Die Norm sieht mindestens acht Stichleitungen vor, es können aber weit mehr sein.

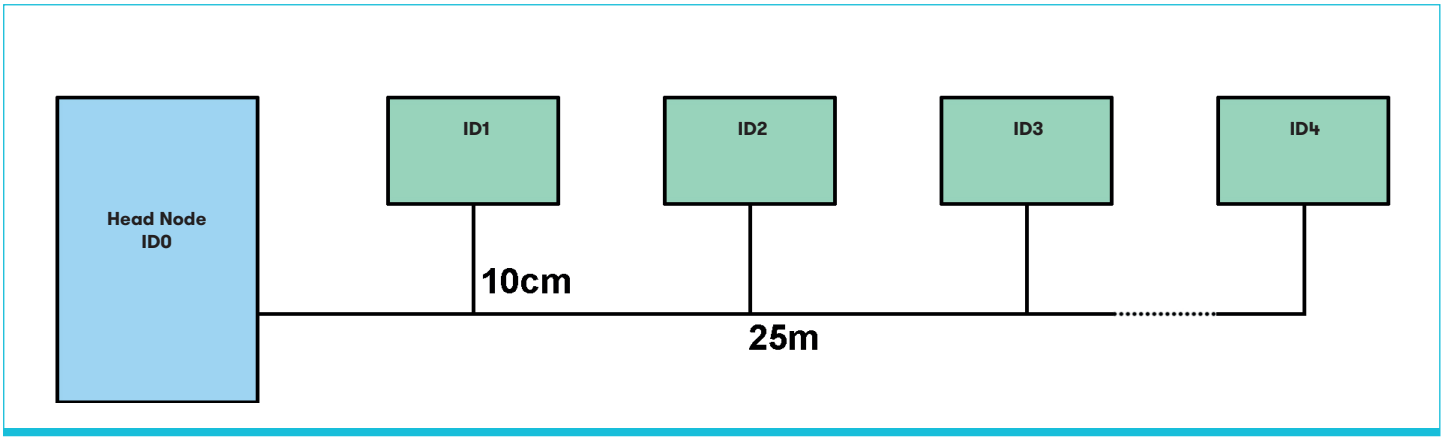


Bild 6. 10Base-T1S arbeitet im Halbduplex-Verfahren und wird in einer Multidrop-Technologie betrieben, die eine Buslänge von 25m mit 10cm langen Stichleitungen definiert. (Bild: channel-e)

10Base-T1S ist eine Topologie, die für Automotive-, Industrie- und Gebäude-Automatisierungs-Anwendungen für die Integration vieler Netzwerk-Teilnehmer auf engem Raum interessant ist. Sie kommt ohne Switches aus und benötigt zur Implementierung nur kleine Mikrocontroller und relativ unkomplizierte PHYs.

Die Struktur des 10Base-T1S-Netzes ist denkbar einfach: Alle Teilnehmer "hängen" an einem Draht, wobei einer der Teilnehmer, der aber auch Kommunikationsteilnehmer auf dem Bus ist, als Head Node mit der ID 0 definiert ist, alle anderen können dann fortlaufend durchnummeriert werde. Dem Head Node kommt die Aufgabe zu, Datenkollisionen auf dem Bus zu verhindern - das heißt, die Arbitrierung per PLCA zu organisieren. Dazu sendet er ein sogenanntes Beacon, ab diesem Moment "läuft die Uhr". Es öffnet sich ein Zeitfenster von typischerweise 25µs (ist aber frei einstellbar) für den ersten Teilnehmer (der Head Node selbst). Innerhalb dieses Fensters darf der Knoten anfangen zu "sprechen" (transmit opportunity). Lässt er die Zeitspanne verstreichen, bekommt der nächste Teilnehmer seine 25µs bis zum letzten Knoten.

Danach beginnt alles von vorne, der Head Node sendet ein Beacon und die Zeitfenster laufen von Knoten 0 bis Knoten N durch. Nimmt ein Teilnehmer innerhalb der 25µs sein Senderecht wahr, kann er einen Ethernet Frame auf den Bus legen. Da die Busteilnehmer unterschiedliche "Mitteilungsbedürfnisse" haben, kann keine feste Zykluszeit für ein solches Multidrop-Netz angegeben werden. Zumal sich ein Zyklus durch Ausnahmeregeln zeitlich noch weiter verändern kann. So wird einem Busteilnehmer mit langsamer MCU zugestanden, ein Idle-Signal zu geben, das ihm erlaubt, das Zeitfenster (hier 25µs) auszudehnen. Besonders wichtigen Knoten kann zugestanden werden, mehr als einen Frame auf den Bus zu legen.

100Base-T1 ist in der IEEE-Norm 802.3bw standardisiert. Es ist eine Single-Pair-Ethernet-Variante für eine Kabellänge von 40m und eine Übertragungsrate von 100MBit/s. 100Base-T1 arbeitet vollduplex und verwendet Twisted-Pair-Kabel mit 66MHz Bandbreite und einem Wellenwiderstand von 100Ω.

1000Base-T1 ist in der IEEE-Norm 802.3bp standardisiert. Es ist eine Single-Pair-Ethernet-Variante für eine Kabellänge von 15m bis 40m (abhängig von der Schirmung) und überträgt Daten mit einer Rate von 1GBit/s. 1000Base-T1 arbeitet vollduplex und verwendet Twisted-Pair-Kabel mit 600MHz Bandbreite und einem Wellenwiderstand von 100Ω.

MultiGigBase-T1, das in der Norm 802.3ch festgelegt werden soll, ist noch in der Standardisierungsphase. Es soll Single Pair Ethernet mit 2,5; 5 und 10GBit/s und überbrückbare Entfernungen von bis zu 15m erlauben.

PoDL - Daten und Strom auf einer Leitung

Eine der zentralen Fähigkeiten von Single Pair Ethernet ist die gleichzeitige Übertragung von Daten und Stromversorgung über das Leitungspaar - Power over Dataline (PoDL). In der Norm IEEE 802.3bu: "Physical Layer and Management Parameters for Power over Data Lines (PoDL) of Single Balanced Twisted-Pair Ethernet" wird analog zu Power over Ethernet (PoE) die Bereitstellung einer Fernspeisung über einpaarige Ethernet-Kanäle festgelegt (Bild 7).

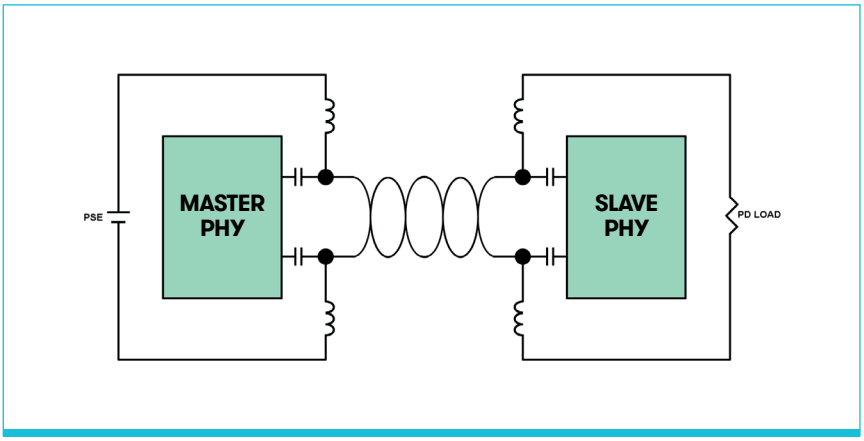


Bild 7. Gleichzeitige Übertragung von Daten und Stromversorgung über das Leitungspaar. (Bild: channel-e)

Ziele und Vorgaben für den PoDL-Betrieb sind unter anderem:

- Den Betrieb eines gespeisten Gerätes zuzulassen, auch wenn keine Daten vorhanden sind.
- Unterstützung von Spannungs- und Strompegeln für die Automobil-, Transport- und Automatisierungsindustrie.
- Unterstützung eines Schnellstart-Betriebs mit vorgegebenen Spannungs-/Stromkonfigurationen und optionalem Betrieb mit Laufzeit-Spannungs-/Stromkonfiguration.

Per PoDL kann elektrische Energie in 10 Spannungs/Strom-Klassen mit Leistungen zwischen 0,5W und 50W (Verbraucherleistung, Einspeiseleistung = 63,3W) übertragen werden. Der maximale Strom beträgt 1,6A (Tabelle 3). Eine Erweiterung um 5 zusätzliche Klassen ist in Arbeit (Tabelle 4).

Für diese Art der Spannungsversorgung sind zweiadrige Leitungen mit Kabeln nach IEC 61156 erforderlich. STP-Kabel der Kategorie 7 sind nicht geeignet.

Klasse	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spannung [V]	5,5-18	5,5-18	14-18	14-18	12-36	12-36	26-36	26-36	48-60	48-60
Strom [A]	0,1	0,22	0,25	0,47	0,1	0,34	0,21	0,46	0,73	1,3
PD Leistung [W]	0,5	1	3	5	1	3	5	10	30	50

Tabelle 3. PoDL-Klassen (PD= Powered Device)

Klasse	10	11	12	13	14	15
Spannung [V]	20-30	20-30	20-30	50-58	50-58	50-58
Strom [A]	0,092	0,240	0,632	0,231	0,6	1,579
PD Leistung [W]	1,32	3,2	8,4	7,7	20	52

Tabelle 4. Zusätzliche PoDL-Klassen (PD= Powered Device)

PoDL bietet sowohl zuverlässige Fehlerschutz- und Erkennungsfunktionen für die Identifizierung von Geräten als auch eine direkte Kommunikation mit Geräten, um eine fehlerfreie und sichere Spannungsversorgung zu gewährleisten.

Für die Ermittlung der benötigten Versorgungsklasse wird ein zusätzliches Kommunikationsprotokoll eingesetzt: SCCP (Serial Communication Classification Protocol). Über dieses Protokoll verhandeln PSD (Power Sourcing Equipment) und PD (Powered Device) den Versorgungsbedarf des PD. Das Vorhandensein eines Verbrauchers ermittelt das PSD, indem es eine Signaturprüfung auf das Vorhandensein einer 3-V-Zener-Diode am Eingang des PD durchführt.

Als maximale Fernspeise-Leistung beim PoE-Standard IEEE 802.3bt gilt für NEC-Class-2-Geräte 100W. Damit werden vermutlich auch zukünftige PoDL-Erweiterungen unterhalb 100W bleiben und für die in der industriellen Automation verwendete 24V-Versorgungsspannung ergibt sich gerundet ein maximaler Spitzenstrom von 4A.

Blick in die Zukunft: Vorausschauende Wartung

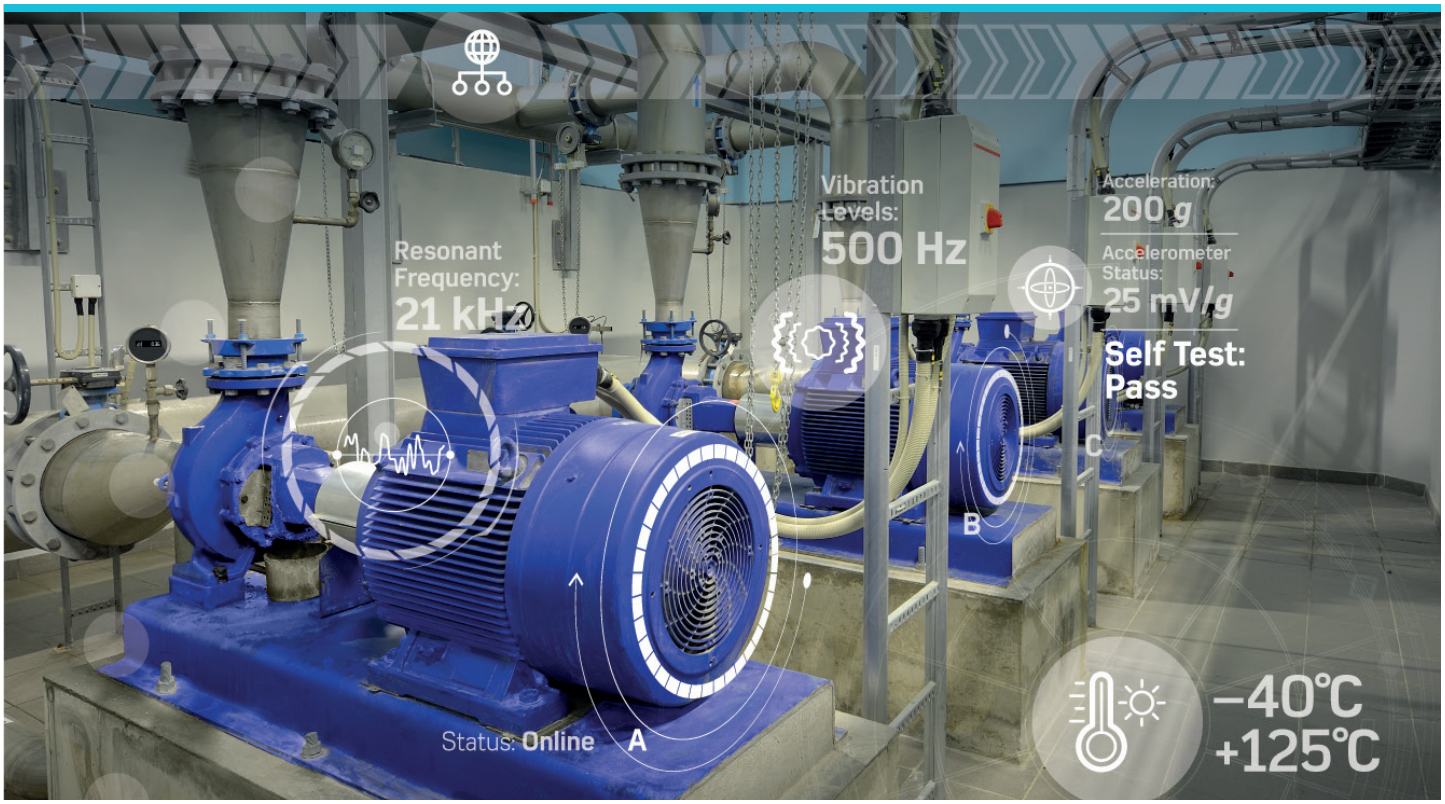


Bild 8: Die Realisierung einer Zustandsüberwachung, z.B. einer Hydraulik-Anlage erfordert primär eine weitergehende Verknüpfung der Sensoren und Komponenten. (Bild: Analog Devices)

Industrie 4.0 als Trend im Bereich der industriellen Produktion stellt einen Paradigmenwandel dar, der vor allem eine optimale Auslastung der Produktionsressourcen anstrebt. Um solche selbst organisierenden Prozesse zu realisieren, müssen nicht nur die Anforderungen von außen, z.B. was soll wann wie oft gemacht werden, klar definiert sein, sondern auch die Verfügbarkeit der Produktionsressourcen und -prozesse. Insofern muss - idealerweise über einen Zeitraum von mehreren Monaten - im Voraus bekannt sein, welche Wartungsarbeiten an einer Maschine bzw. einem Prozess erforderlich sind, um die Verfügbarkeit sicher planen zu können.

Aber auch weitergehende Optionen sind denkbar: Ist eine Maschine nicht mehr in ihrem Optimalzustand, erreicht z.B. eine Bearbeitungsmaschine nicht mehr die höchste Präzision, so kann diese dennoch für andere Arbeiten verplant werden, wenn die erzielte Präzision dafür noch ausreichend ist. Im Kern steht also eine Zustandsüberwachung jeder einzelnen Maschine bzw. jedes einzelnen Prozesses, um aus der Kenntnis dieses aktuellen Zustands heraus den Einsatz und die Wartung optimal und flexibel planen zu können. Die Realisierung einer Zustandsüberwachung, z.B. einer Hydraulik-Anlage, erfordert primär eine weitergehende Verknüpfung der Sensoren und Komponenten, bzw. einem Teilprozess und die Bereitstellung der in einem Gesamtprozess erfassten Daten für alle Komponenten und Subsysteme. Das erfordert vor allem die Digitalisierung der Sensorik, wobei neben den reinen Messdaten auch Metadaten bzw. weitere Merkmale auf Anforderung zur Verfügung gestellt werden müssen.

	Gestehungs- und Installationskosten	**Betriebskosten**	**Kosten infolge ungeplanter Stillstandszeiten**
Korrektive Instandhaltung			€€€€€€€€€€ Ungeplante Produktionsunterbrechungen
Präventive Instandhaltung		€€ Vor-Ort-Intervention nach Plan/ systematischer Austausch verschleißbehafteter Teile	€€€€ Da keine Maschinenüberwachung in Echtzeit erfolgt, kommt es zu ungeplanten Produktionsunterbrechungen
Vorausschauende Instandhaltung	€€ Installation von besonderen Vorrichtungen (Vibrationssensoren usw.)	€ Kenntnis des Maschinenzustands, Überwachung durch besondere Software oder mit KI	€ Dank Echtzeit-Maschinenüber-wachung lassen sich Produktionsunterbrechungen perfekt planen

Tabelle 5. Durch die Vorausschauende Instandhaltung können die Gesamtkosten minimiert werden.

Um festzustellen, wann der richtige Zeitpunkt für die Auslösung eines Wartungsvorgangs ist, werden Parameter wie Vibration, Geräusch und Temperatur verwendet. Unter den messbaren physikalischen Größen liefert die Messung des Schwingungsspektrums die meisten Informationen über den Ursprung eines Problems in einer rotierenden Maschine (Motor, Generator usw.). Eine abnormale Vibration kann ein Zeichen für ein fehlerhaftes Kugellager oder eine Achsunwucht sein. Jedes dieser Probleme manifestiert sich in einem bestimmten Symptom, wie z. B. Vibrationsquellen in rotierenden Maschinen.

Schwingungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Schwingungsmessungen können mit einem Beschleunigungssensor durchgeführt werden, der sich in der Nähe des zu überwachenden Elements befindet. Dieser Sensor kann ein piezoelektrischer Typ oder - vorteilhafter - ein MEMS-Typ sein, der nicht nur bei niedrigen Frequenzen ein besseres Ansprechverhalten bietet, sondern auch klein ist (Bild 9).

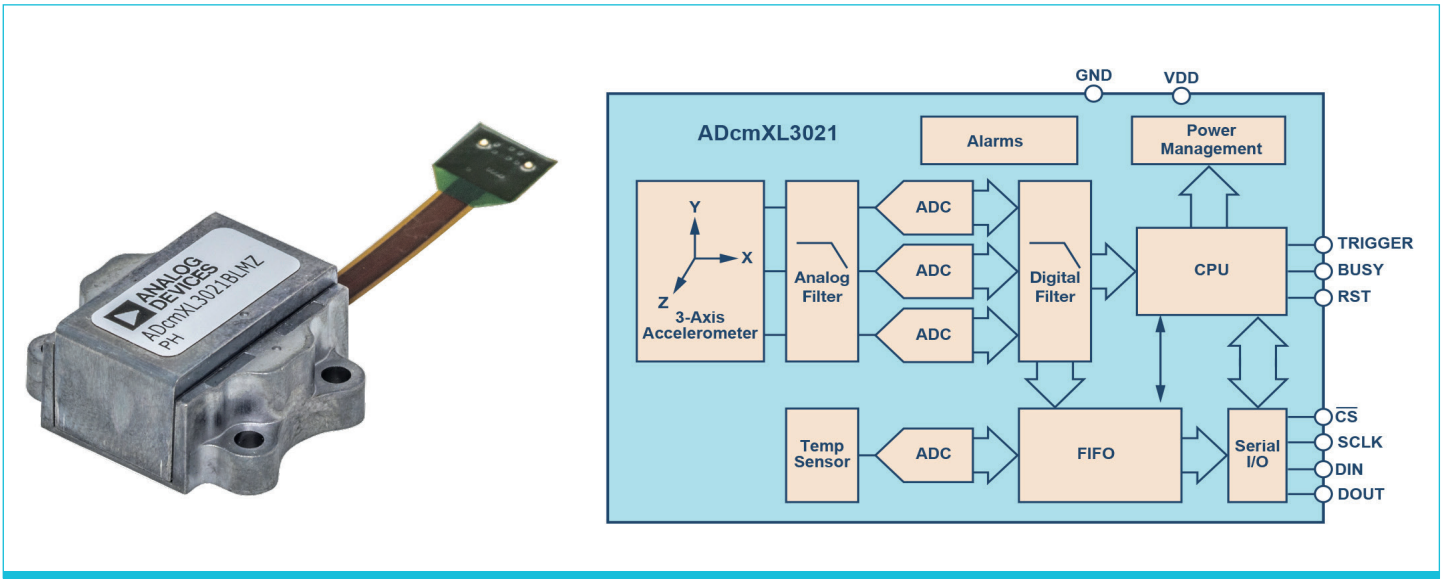


Bild 9. Das Modul ADcmXL3021 bietet die Sensorik-Voraussetzungen für die vorausschauende Instandhaltung (Bild: Analog Devices)

Bei einem fehlerhaften Kugellager tritt jedes Mal, wenn eine Kugel mit einem Riss oder einem Defekt des Innen- oder Außenrings in Kontakt kommt, ein Stoß auf, der eine Vibration oder eine leichte Verschiebung der Drehachse verursacht. Die Häufigkeit dieser Stöße hängt von der Drehzahl sowie der Anzahl und dem Durchmesser der Kugeln ab.

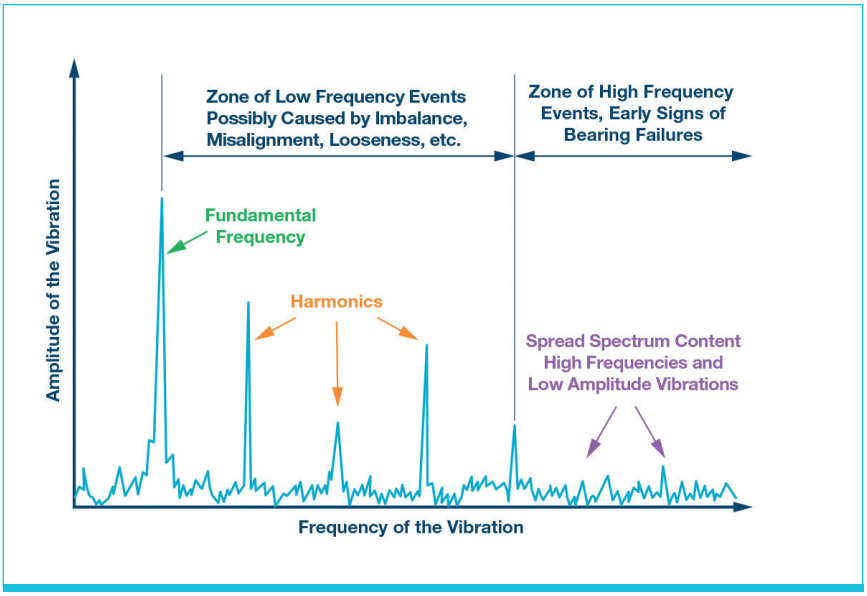


Bild 10. Die spektrale Signatur hängt von der Art des Problems ab. Die ersten Anzeichen für einen Lagerausfall sind bei hohen Frequenzen festzustellen. (Bild: Analog Devices)

Aber das ist nicht alles. Sobald der Fehler auftritt, erzeugen die zuvor erwähnten Stöße manchmal ein hörbares Geräusch - die Stoßwelle - das sich im Auftreten von Spektralkomponenten mit niedrigem Pegel und relativ hohen Frequenzen manifestiert, oft größer als 5kHz und immer weit über der Grundrotationsfrequenz.

Wenn sich der Defekt verschlimmert, steigt der Pegel der niederfrequenten Frequenzkomponenten. In einem fortgeschrittenen Stadium kann der Vibrationspegel von einem Beschleunigungssensor der Einstiegsklasse erfasst werden. Der Ausfall steht jedoch zu diesem Zeitpunkt unmittelbar bevor, und das Wartungsteam hat nur noch wenig Zeit, um zu reagieren. Um nicht überrascht zu werden, ist es deshalb wichtig, die ersten Anzeichen einer Anomalie mit einem rauscharmen Beschleunigungssensor mit hoher Bandbreite zu erkennen.

Schwingungsquellen in rotierenden Maschinen

Eines der Probleme, die bei einer rotierenden Maschine häufig auftreten, ist das Versagen eines Kugellagers. Die Spektralanalyse der Daten eines Beschleunigungsmessers in der Nähe des Lagers zeigt eine Reihe von Kennlinien, Amplituden und Frequenzen, die von der Drehzahl und der Ursache des Defekts abhängen.

Die charakteristischen Frequenzen des Systems, die erwähnt werden können, umfassen:

$$f_{cage} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{d}{D}\cos(\phi)\right) \times f_{axle}$$

Die Frequenz in Bezug auf einen Defekt am Außenring (fest):

$$f_{ext} = N \times f_{cage}$$

Die Frequenz in Bezug auf einen Defekt am Innenring (Achse)

$$f_{int} = N \times \left(f_{axle} - f_{cage}\right)$$

Über diese Frequenzeigenschaften hinaus verursacht die Stoßwelle, die durch die über den Defekt rollende Kugel (Riss, Abblättern usw.) erzeugt wird, eine Schwingung mit hoher Frequenz (>5kHz), die manchmal hörbar sein kann.

1. N: Anzahl der Bälle
2. Φ: Kontaktwinkel
3. *f*axle: Drehfrequenz der Achse
4. d: Kugeldurchmesser
5. D: Durchschnittlicher Durchmesser des Lagers

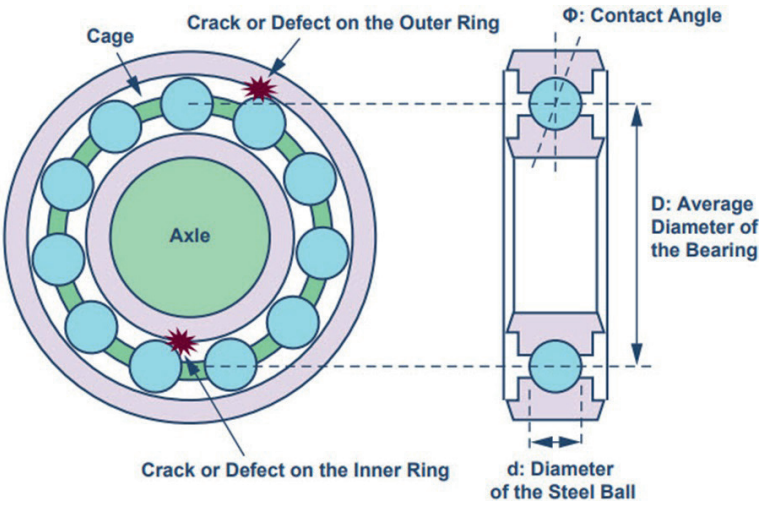


Bild 11: Kugellager-Defekt (Bild: Analog Devices)

Es gibt eine Reihe von Schwingungs-Analysetechniken. Zusätzlich zur digitalen Filterung zur Überwindung der parasitären Schwingungen, die durch den Prozess selbst oder durch andere Komponenten der Maschine verursacht werden, können häufig mathematische Werkzeuge wie die im ADcmXL3021 enthaltenen verwendet werden (Berechnung des Durchschnitts, der Standardabweichung, des Scheitelfaktors, Kurtosis usw.).
Die Analyse kann im Zeitbereich durchgeführt werden, aber es ist die Frequenzanalyse, die die meisten Informationen über eine Anomalie und ihren Ursprung liefert. Man kann sogar auf die Berechnung des Cepstrums zurückgreifen, das manchmal in das Spektrum des Signalspektrums aufgenommen wird (inverse Fourier-Transformation, die auf den Logarithmus der Fourier-Transformation des Signals angewendet wird). Unabhängig von der verwendeten Analysemethode besteht die Schwierigkeit darin, die optimale Alarmschwelle festzulegen, damit ein Wartungsvorgang weder zu früh noch zu spät erfolgt.

Eine Alternative zur herkömmlichen Konfiguration von Alarmschwellen besteht darin, künstliche Intelligenz in den Fehlererkennungs-Prozess einzuführen. Während der maschinellen Lernphase werden Cloud-Ressourcen verwendet, um repräsentative Modelle der Maschine (basierend auf Daten vom Vibrationssensor) zu erstellen. Sobald die Modelle erstellt wurden, können sie auf einen lokalen Prozessor heruntergeladen werden. Die Verwendung eingebetteter Software ermöglicht die Echtzeit-Identifizierung nicht nur laufender Ereignisse, sondern auch vorübergehender Ereignisse - somit können Anomalien erkannt werden.

Auf rasanter Fahrt - Sensoren im Automobil

Die Anzahl von Sensoren im Fahrzeug nimmt permanent zu, gleichzeitig steigt ihre Leistungsfähigkeit. Der Stromverbrauch wird laufend minimiert und intelligente Verarbeitungsfunktionen halten zunehmend Einzug. Die von den diversen Bauteilen gewonnenen Sensordaten lassen sich durch Sensorfusion redundant und kombiniert nutzen und sind für die Vernetzung auch außerhalb des Fahrzeugs (V2X) eine wichtige Voraussetzung.

Im Automobilbereich unterstützen Sensoren u.a. die Segmente Motorsteuerung, Abgasregelung, Fahrwerksfunktionen und Klimatisierung, Funktionen für das autonomes Fahren, Assistenzfunktionen, E-Mobilität, Bedienerkennung (z.B. Gestensteuerung), die aktive und passive Sicherheit sowie allgemeine Karosseriefunktionen. Die Sensoren erfassen und überwachen elektrische, magnetische, mechanische, elektromagnetische, thermische und chemische Prozesse im Fahrzeug und stellen die Informationen auf einem Display oder zur weiteren Verarbeitung in elektronischer Form zur Verfügung.

In Entwicklung ist das Konzept fahrerloser Autos (autonomes Fahren). Dafür sind neben einer vernetzten Infrastruktur viele Echtzeitdaten von Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-, Positions- und Näherungssensoren notwendig. Die Sensoren liefern Daten, die gesammelt, ausgewertet, zusammengeführt (Sensorfusion) und verarbeitet werden. Als Ergebnis wird ein Fahrzeug im besten Fall ohne Fahrereingriff gesteuert. Auf dem Weg dahin arbeiten Sensoren heute schon in Fahrerassistenzsystemen und sorgen für Sicherheit und Komfort. Auch das Konzept der vorausschauenden Instandhaltung wird dadurch unterstützt. Die Sensoren werden im Fahrzeug selbst und in der Fahrzeuginfrastruktur verwendet. So kümmern sich ca. 2/3 der Sensoren um Antriebsstrang und Motorsteuerung. Dazu erfassen sie Änderungen von Gewicht, Temperatur, Vibration, Massenstrom, Volumenstromrate, Drehmoment, Ventilposition und Drehbewegung und leiten diese Daten an Steuergeräte weiter.

Ausgewählte Sensoren für Fahrstabilität und Sicherheit:

- Drucksensoren
- Drehzahl- und Geschwindigkeitssensoren (z.B. Hall-Sensoren)
- Positionssensoren (Lenkwinkelsensoren)
- Beschleunigungssensoren
- Temperatursensoren
- Gassensoren
- Durchflussmesser
- Kraftsensoren
- Bildsensoren
- IMU (Inertial Measurement Unit) - bestehen aus Beschleunigungssensoren und Gyroskopen

Beschleunigungssensoren, Drehratensensoren und Drucksensoren für das Motormanagement, Gyroskope, IMUs und andere sind z.B. als MEMS-Sensoren (Mikro-Elektro-Mechanisches System) erhältlich. Sie enthalten auch künstliche Intelligenz und können z.B. personenabhängige Gesten erlernen. Laut Bosch befinden sich in aktuellen Automobilen bis zu 50 MEMS-Sensoren. Auch in neuen Entwicklungen wie Drohnen und Flugtaxis werden sie Aufgaben übernehmen.

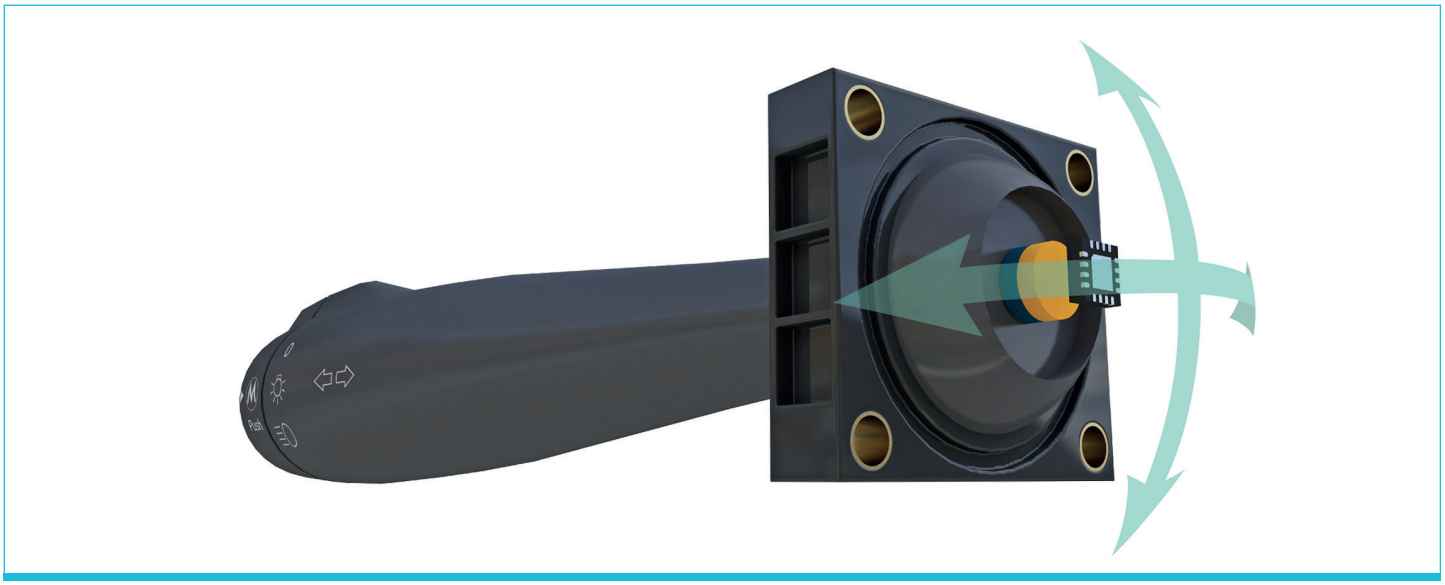


Bild 12. Der automotive-taugliche 3D-Hall-Effekt-Sensor MLX90395 (Triaxis Magnetometer Node) von Melexis nutzt den Hall-Effekt, um eine kontaktlose Erfassung in drei Dimensionen zu ermöglichen. Dabei sorgt die Dual-Die-Version zum Beispiel für Redundanz bei der Erfassung der Schalthebelposition in Fahrzeugen. (Bild: Pressebild Melexis)

Die Sicherheitsbeauftragten für die Umfelderfassung

Immer mehr Sensoren werden für Fahrerassistenzsysteme eingesetzt. Dabei werden mehrere Sensortypen redundant genutzt. Teil- oder vollautonome Systeme müssen das Umfeld erkennen und ihre Position bestimmen. Dabei helfen Ultraschallsensoren (erkennen Hindernisse in kurzer Distanz), Radarsensoren (detektieren Position und Geschwindigkeit von Objekten in größerer Entfernung). Lidarsensoren liefern ein 3D-Abbild und Kamera-Systeme erfassen Farbe und Kontur eines Objektes.

Je nach Ausstattungsvariante befinden sich zum Beispiel in einem modernen Volkswagen-Modell bis zu 24 Sensoren zur Umfelderkennung für Fahrerassistenzsysteme. Dazu gehören Radar- und Ultraschallsensoren, Kameras und Laserscanner. Im Zuge der Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme bis hin zum automatisierten Fahren ab Level 3 werden das noch einmal deutlich mehr.

	Kamera	Radar	Lidar	Utra-schall	Radar + Lidar	Kamera + Lidar	Kamera + Radar
Objekterkennung	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Objektklassifizierung	gut	schlecht	mittel	schlecht	mittel	gut	gut
Distanzmessung	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Objektkanten-Genauigkeit	gut	schlecht	gut	gut	gut	gut	gut
Spurverfolgung	gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	gut	gut
Sichtweite	mittel	gut	mittel	schlecht	gut	mittel	gut
Funktion bei schlechtem Wetter	schlecht	gut	mittel	gut	gut	mittel	gut
Funktion bei wenig Licht	mittel	gut	gut	gut	gut	gut	gut

Tabelle 6. Insbesondere für autonome Fahrfunktionen sind redundante Sensordaten erforderlich. Eine Kombination verschiedener Technologien hat Vorteile und Nachteile. (Datenquelle: McKinseyCompany)

Zukünftig werden mehr hybride Sensorlösungen (auch Multisensorik genannt) entstehen, um die Anzahl der Sensoren und die Kosten zu minimieren. Neben einer Kombilösung von Radar und Kamera benötigt das vollautonome Fahren zusätzlich Lidar, um Redundanz für die Objektanalyse und die Lokalisierung zu gewährleisten. Experten erwarten, dass im Jahr 2025 erste selbstfahrende Autos nach Level 5 serienreif sind. Tesla nutzt zur Zeit übrigens acht Kameras für 360°-Rundumüberwachung der Fahrzeugumgebung bis zu 250m Entfernung sowie zwölf Ultraschallsensoren und hat ein nach vorne gerichtetes Radar an Bord. Versionen mit Lidar sind bei Tesla zur Zeit nicht geplant.

Die Daten von Kamera-, Radar-, Lidar-, Infrarot –und Ultraschall-Sensoren werden mit diversen Algorithmen (Stichworte: künstliche Intelligenz und Deep Learning) weiterverarbeitet und dienen dem Steuersystem als Grundlage für seine Entscheidungen.

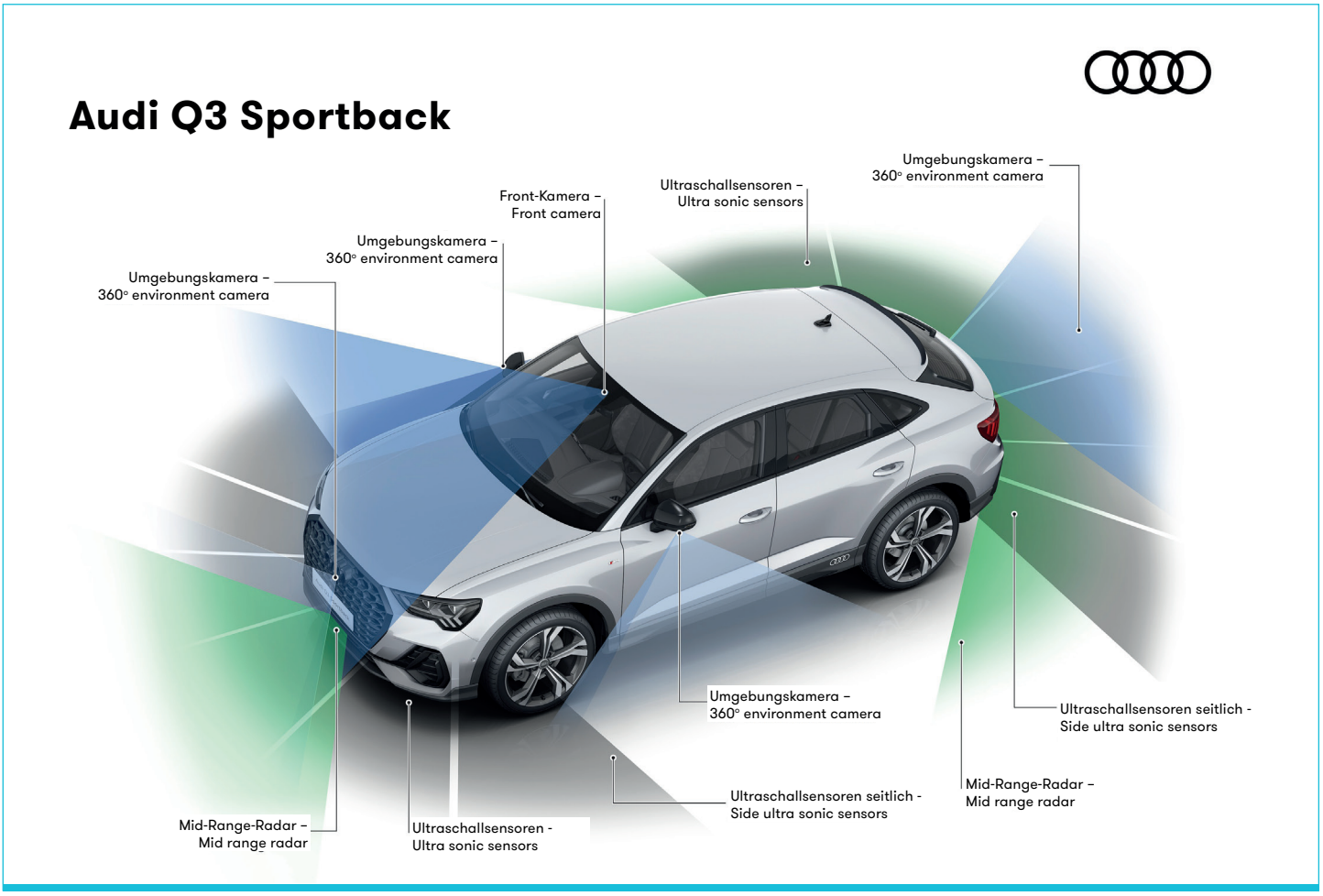


Bild 13. Die Sensorfelder der Umfeldüberwachung im Audi Q3 Sportback (Bild: Pressebild AUDI AG)

Kameras erkennen Markierungen, Verkehrszeichen, Ampeln, Personen und andere Fahrzeuge. Außerdem helfen sie beim Einparken und der Verkehrsüberwachung. Im Seitenspiegel zeigen sie den Bereich des toten Winkels. Kameras mit Nachtsichtfunktionen und Infrarot unterstützen den Fahrer im Dunkeln.

Es gibt Mono-Kameras, die ein zweidimensionales Bild zeigen. Dabei fehlt die Tiefe für Abstandsmessungen und Radar und Lidar müssen ergänzende Informationen liefern. Eine Stereokamera verfügt über zwei Linsen. Hiermit können Informationen und Veränderungen in der Tiefe angezeigt werden. Diese Modelle sind teurer als die Mono-Kameras.

Werden Bilder mehrerer Kameras zusammengeführt, entsteht eine dreidimensionale Darstellung. Frontkameras mit einer Reichweite von 100 bis 240 Metern zeigen Informationen wie Markierungen, Verkehrszeichen, Fußgänger und Fahrradfahrer. Sie dienen der Überprüfung von Abständen und erkennen Gefahren, die eine Notbremsung erfordern könnten.

3D-Kamerachips gibt es z.B. basierend auf dem Laufzeitprinzip (TOF-Prinzip; Time of Flight). Sie messen direkt den Tiefen- und Amplitudenwert pro Pixel. Dadurch stehen 3D-Daten zur Verfügung, die zuverlässig unter allen Umgebungslicht-Bedingungen (bei Sonnenlicht, in der Dunkelheit und bei sich ändernden Lichtverhältnissen) erfassbar sind.

Die verwendete Lichtquelle kann eine LED oder eine Laserdiode (VCSEL; Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) sein. TOF-Kameras werden als Fahrerassistenz- und Sicherheitssensoren im Automobilbereich eingesetzt. Dazu zählen Anwendungen wie der aktive Fußgängerschutz, der Notbremsassistent, aber auch im Innenraum, wie zur Überprüfung der korrekten Fahrposition.

Aktuelle Kameratechnik im Auto (z. B. von Bosch) verfügt schon über künstliche Intelligenz. Dadurch kann sie Objekte erkennen und in Klassen wie Fahrzeuge, Fußgänger oder Fahrräder einteilen und Bewegungen vermessen. Solch eine Kamera kann im unübersichtlichen Stadtverkehr auch teilweise verdeckte oder querende Fahrzeuge, Fußgänger und Radfahrer zuverlässiger erkennen und klassifizieren.

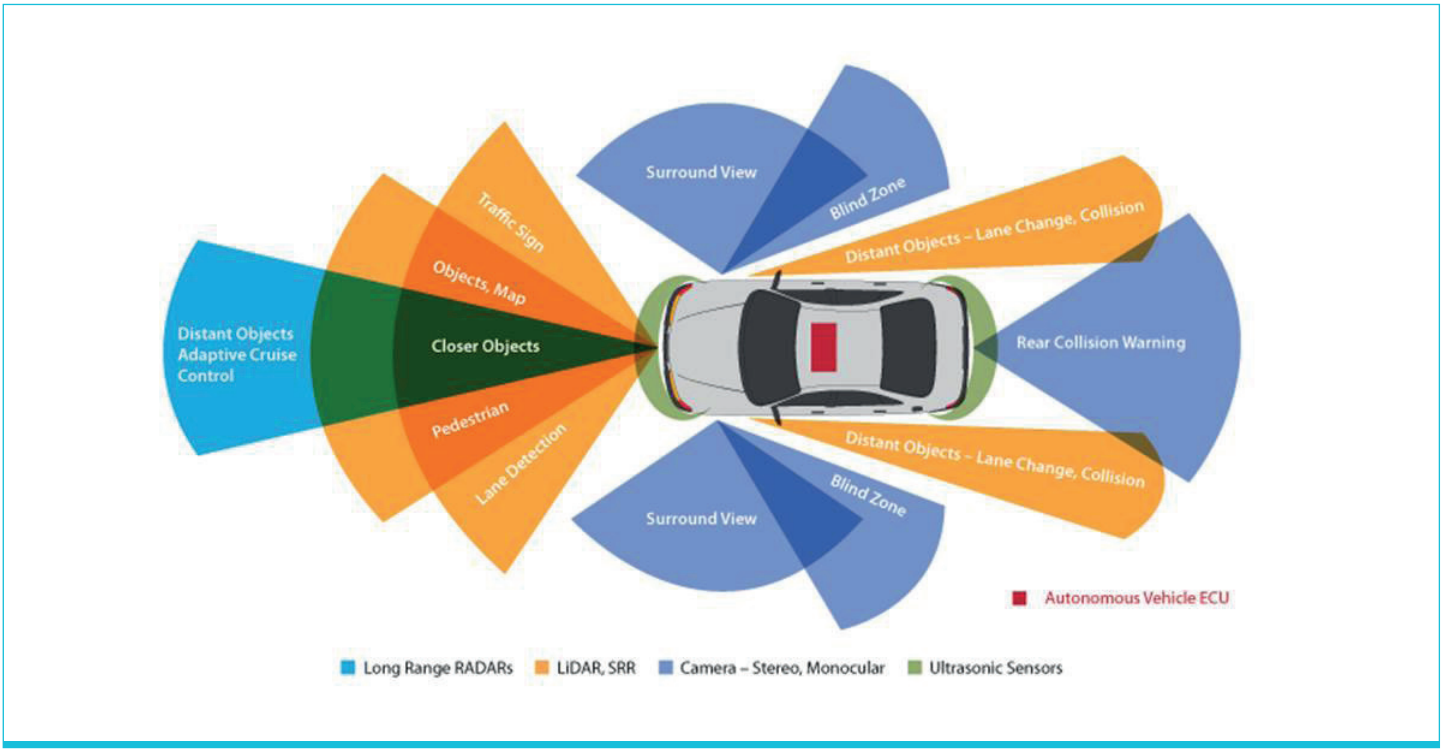


Bild 14 . Für L4- und L5-Lösungen werden Sensorkombinationen zur Erfassung der Verkehrssituation eingesetzt. (Bild: Pressebild KPIT Technologies GmbH)

Radarsensoren – Meister im Abstandsmessen

Radar ist eine Technologie für die Abstandsmessung. Die Radarsensoren im vorderen und hinteren Bereich eines Fahrzeugs erkennen andere Fahrzeuge oder Hindernisse. Der rückwärtige Sensor erfasst Verkehr, der sich von hinten nähert und überholende Fahrzeuge. Den vorausfahrenden Verkehr überwacht das Fernbereichsradar und der Nahbereichsradar behält das unmittelbare Umfeld unter Kontrolle. Das Radar misst Geschwindigkeit und Entfernung. Je schneller die ausgesendeten Radiowellen zurückkommen, desto näher ist das gemessene Objekt. Die Geschwindigkeit wird über die Annäherung gemessen.

Radar kann bei fast allen Witterungen eingesetzt werden. Sollte es stark regnen, wird das Signal aber gedämpft, Nebel ist unkritisch. Fortschrittliche Radarsensoren bieten eine hohe Erfassungsreichweite, einen breiten Öffnungswinkel und eine hohe Winkel-Trennfähigkeit.

Radarsensoren im 77-/79-GHz-Frequenzbereich mit Bandbreiten bis zu 4GHz können eine Entfernungsauflösung von wenigen Zentimetern liefern. Für eine bessere Objekterkennung werden schnelle Chirp-Signale verwendet, die empfindlicher auf Störungen reagieren als die langsameren frequenzmodulierten Dauerstrichsignale (FMCW). Das Nahbereichsradar erkennt Objekte bis zirka 30 Metern Entfernung, Long-Range-Systeme haben bis zu zirka 250 Metern Reichweite.

Radarsensoren (Radio Detection and Ranging) senden und empfangen also hochfrequente elektromagnetische Wellen, um die Entfernung und Relativgeschwindigkeit zu einem Objekt zu ermitteln. Impulsradare senden dabei kurze Impulse einer bestimmten Frequenz aus. Dauerstrichradare senden kontinuierliche Signale mit veränderten Frequenzen. 24-GHz-Radarsensoren werden für die Erfassung des Nahbereichs verwendet (Short Range Radar). Radarsensoren im 77-79-GHz-Frequenzbereich erlauben höhere Sendeleistungen und können größere Entfernungen abdecken. Sie werden für den Mittel- und Fernbereich (Mid Range Radar und Long Range Radar) eingesetzt. Millimeterwellen-Radarsensoren arbeiten berührungslos im Frequenzspektrum von 30 bis 300 GHz. Aufgrund der kurzen Wellenlängen liefern sie Auflösungen von unter einem Millimeter bei der Entfernungsmessung.

Lidarsensoren – und die Welt erscheint in 3D

Lidarsensoren funktionieren ähnlich wie Radar, benutzen aber statt Funkwellen die Laserstrahlen. Deren Reflexionen ergeben ein dreidimensionales Lichtbild von der Umgebung des Autos. Die Daten sind gegenüber Radar höher aufgelöst. Es werden Verkehrszeichen, Fahrbahnmarkierungen und Bewegungen erkannt – nachts funktioniert das sogar besser als bei Kameras.

Die Lidarsensoren werden z.B. auch für den Bremsassistenten genutzt. Die ausgesandten Laserstrahlen realisieren die Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. Wird ein Hindernis (Person, Fahrzeug etc.) erkannt, kann der Notfall-Bremsassistent eine Vollbremsung auslösen.

Lidar steht für „Light Detection and Ranging“, misst also Entfernungen zu ruhenden und bewegten Objekten und liefert dreidimensionale Bilder. Die großen und teuren Laserversionen (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission) mit rotierenden Spiegeln werden zunehmend durch „Solid State“-Lidar ersetzt. Ein digital gesteuertes Halbleiter-Dioden-Array ersetzt dabei die beweglichen Teile. Außerdem kommen MEMS-Spiegel zum Einsatz. Lidar-Systeme arbeiten mit Lichtpulsen aus den Bereichen des nicht sichtbaren Lichts (nahes Infrarot, typisch 905nm Wellenlänge). Sie haben unter guten Witterungsbedingungen eine Reichweite von 200 bis 300 Metern, bieten eine hohe Winkelauflösung und können bis 360 Grad (Dachversionen) abdecken. Die Ergebnisse von Lidar und Laserscannern werden durch Nebel beeinträchtigt.

Zu den Sensoren, die keine beweglichen Laserkomponenten nutzen, gehört das Velarray von Velodyne (Bild 15 Mitte), das Bereiche im horizontalen Winkel von 120 Grad, vertikal 35 Grad und mit einer Reichweite von 200 Metern erfasst. Durch eine hochauflösende Punktwolke erkennt der Sensor (wie auch die anderen Produkte des Herstellers) auch bei schlechten Lichtverhältnissen präzise Gehwege, Bordsteine, Fahrzeuge, Fußgänger, Fahrräder und anderen Hindernisse. Da er nicht rotierend ist, eignet er sich insbesondere für den integrierten (versenkten) Einbau in Chassis.

Bild 15. Das Produkt Alpha Prime (links) löst das Modell HDL-64 des Herstellers als Refe-renz/Benchmark-Sensor ab und zielt auf den Einsatz für RoboTaxis und L4/L5-LK-Ws. Das Produkt VelaDome (rechts) ist ein Sensor für autonome Fahrzeuge, der einen Halbkugel-Hemisphärenbereich erfasst.(Bild: Pressebild Velodyne Lidar)

Bild 16. ZF produziert das Solid-State-Lidar-System „ibeoNEXT“ samt Steuereinheit (im Auftrag der Ibeo Automotive Systems GmbH) und hat im Oktober 2020 mit der Auslieferung begonnen. Der Lidarsensor basiert auf einer Photonen-Lasermesstechnik und kommt ohne bewegliche Teile aus (Solid-State). (Bild: Pressebild ZF Friedrichshafen AG)

Bild 17. Von Blickfeld gibt es mit der Bezeichnung Cube Range einen Lidar-Sensor, der Hindernisse in bis zu 250 Metern Entfernung erkennt. Der 3D-Solid-State-Lidar verfügt über eine Reichweite von 150 Metern bei 10 Prozent Reflektivität; eine Reichweite von bis zu 250 Metern ist bei höherer Reflektivität möglich; die Auflösung beträgt 0,18°. Das Produkt nutzt einen MEMS-Spiegel aus Silizium. Die dichte 3D-Punktwolke wird per Software-Stack in Echtzeit verarbeitet. Der Sensor ist für Fahrten mit Autobahntempo geeignet. (Bild: Pressebild Blickfeld GmbH)

Die Integration von Lidar in Scheinwerfer ermöglicht auch die Echtzeit-3D-Kartierung und Objekterkennung, Klassifizierung sowie das Tracking. Auch beim HD Mapping kommt Lidar zum Einsatz, um die Topographie großer Flächen mit 3D-Mapping für die autonome Navigation von Fahrzeugen zu erfassen.

Das fertigungsreife 4D-Imaging-Radarsystem (ARS 540) von Continental nutzt die Zynq UltraScale+ MPSoC Plattform von Xilinx. Es bietet Funktionalitäten entsprechend SAE J3016 Level 2 und ist bis zu autonomen Fahrsystemen der Ebene 5 skalierbar. Das 4D Imaging Radar bestimmt den Ort eines Objekts in Bezug auf Reichweite, Azimut, Höhe und relativer Geschwindigkeit. Das ARS540 hat eine Reichweite von 300 Metern und ein Sichtfeld von ±60°. Es ermöglicht ein Tracking zur präzisen, durch mehrere Hypothesen gestützten Vorhersage während der Fahrt. Das ist entscheidend zur Bewältigung komplexer Verkehrsfluss-Szenarien, wie die Detektion von Staus unter Brücken. Zusätzlich ermöglicht das System die Erkennung potenziell gefährlicher Objekte auf der Fahrbahn und reagiert entsprechend.

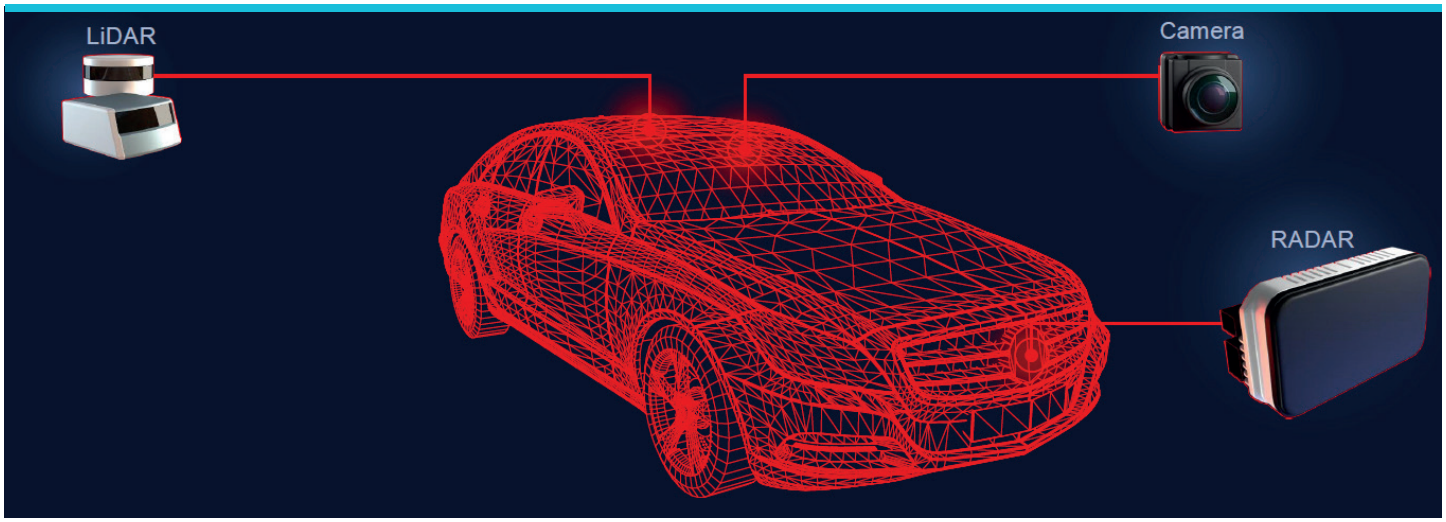


Bild 18. Durch die Xilinx-Plattform kann das Continental-Radar (rechts unten) systemneutral mit der jeweils vorliegenden Sensor-Plattform-Konfiguration arbeiten. Die Parallelverarbeitung in der programmierbaren Logik des Bausteins und zahlreiche DSP-Slices zur digitalen Signalverarbeitung ermöglichen die Hardware-Beschleunigung von Radar-Sensor-Eingangssignalen in Echtzeit. (Bild: Pressebild Xilinx)

Prognose

Die Analysten von Yole prognostizieren, dass der Lidar-Markt für Anwendungen in Automobilbereich und Industrie im Jahr 2020 zirka 1,7 Mrd.US$ groß sein wird. Das erwartete Wachstum liegt bei 19%. Für 2025 geht Yole von einem Umsatz von 3,8 Mrd.US$ aus. Automobilanwendungen könnten in den kommenden fünf Jahren der Hauptantrieb für Lidar sein - mit einem Wachstum von 1,8 Mrd.US$ - ermittelt zwischen 2019 und 2025. Da bereits Partnerschaften zwischen Lidar-und Fahrzeugherstellern aktiv sind, erwartet das Marktforschungs- und Strategieberatungsunternehmen Yole, dass bis 2025 in 3,2% der Pkw die Lidar-Technologie eingesetzt wird. Der Einfluss von Roboterfahrzeugen auf die Lidar-Enwicklung wird laut Yole moderater ausfallen, da die Anzahl der Roboterfahrzeuge nicht so stark wächst. Auch Lidar für Pkw wird jetzt kritischer gesehen, da Fahrzeughersteller durch die
COVID-19-Krise finanziell stark unter Druck geraten. Durch Verordnungen zur Reduktion der CO2-Emissionen könnten Investitionen laut Yole eher in den Bereich Elektrifizierung wandern. Außerdem sieht Yole einen großen Einfluss von Tesla, das autonome Fahrzeuge ohne Lidar entwickelt. (Quelle: Pressemitteilung vom 27.8.2020 “Lidar muss mit Hindernissen kämpfen: Ist Diversifikation die Lösung? - Yole Développement)

Weitere Umfeld-Sensoren

Infrarot-Sensoren erlauben die Nachtsicht. Ultraschallsensoren dienen als Einparkhilfe, können Parklücken während der Fahrt vermessen und Fahrzeuge auf der Nebenspur erkennen. Damit können sie den Toten Winkel überwachen. Ultraschallsensoren messen die Entfernung zum Objekt, indem sie die Laufzeit der reflektierten Schallimpulse messen. Sie sind kompakt und robust und arbeiten auch nachts oder bei Nebel. Schnee beeinträchtigt ihre Messergebnisse und die Distanzen liegen bei wenigen Metern. Zur Verbesserung der Umfelderfassung können mehrere Ultraschallsensoren eingesetzt und das Triangulationsverfahren verwendet werden. Durch speziell geformte Antennen erhalten die ausgesendeten Ultraschallimpulse eine Richtcharakteristik für eine direktionale Abstrahlung. Es bildet sich ein Nah- und ein Fernfeld aus.

Viele Matrosen und ein Steuermann

Die Sensoren können für voneinander unabhängige Funktionen verwendet werden. Verknüpft man alle Daten zeitgleich durch Sensorfusion, lässt sich eine neue Qualität für die Ansteuerung erreichen. Schwerpunkte sind dabei Funktionssicherheit, Redundanzen und Plausibilitätsprüfungen. Dazu werden die Signale der Fahrzeugsensoren untereinander verglichen. Eine fehlerhafte Interpretation der Daten wird vermieden und nur, wenn alle Daten geprüft sind, wird ein Steuersignal gegeben.

Wichtig ist die Zusammenführung der Sensordaten für autonome Fahrzeugkonzepte. Dazu werden Daten von allen Sensoren (Lidar, Radar, Ultraschall u.a.). in Echtzeit analysiert und abgeglichen. Erst dann wird eine Fahrzeugreaktion ausgelöst. Hierbei kann die Sensordaten-Verarbeitung komplett nach der Sensorfusion erfolgen (Bild 19) oder es wird in smarten Sensoren bereits eine Datenvorverarbeitung erledigt (Bild 20).

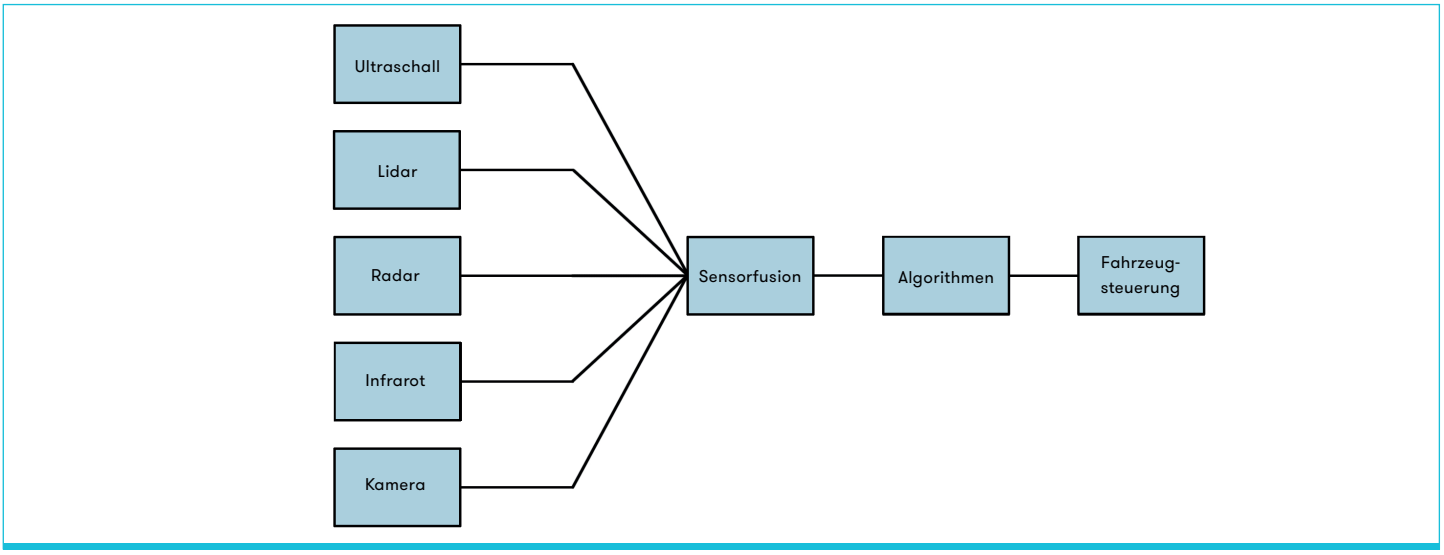


Bild 19. Das vereinfachte Schema zeigt links Sensoren, die ihre Daten an die Sensorfusion-Einheit liefern. Dort werden sie mit diversen Algorithmen verarbeitet und eine Reaktionsinformation wird an die Fahrzeugsteuerung gegeben (Bild: channel-e)

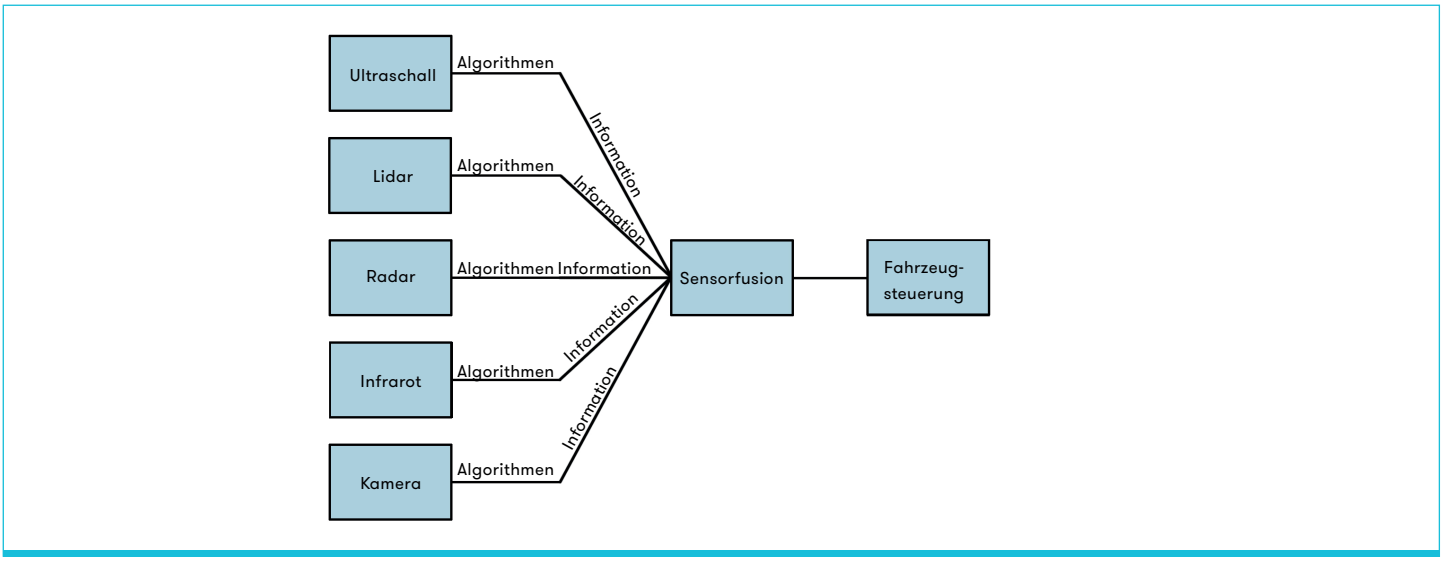


Bild 20. Das vereinfachte Schema zeigt links die Sensoren, die bereits intelligente Verarbeitungsfunktionen integrieren und an die Sensorfusion-Einheit bereits vorverarbeitete Daten liefern. Dort werden Abgleich-Funktionen ausgeführt, ein Umgebungs-modell berechnet und eine Reaktionsinformation an die Fahrzeugsteuerung gegeben (Bild: channel-e)

Zur Umfelderfassung autonomer Fahrzeuge werden also Informationen von Radar, Ultraschall, Lidar und Kamera kombiniert. Die Messwerte werden asynchron erzeugt und das Fusions-Steuergerät berechnet jeweils ein aktuelles Umgebungsmodell in Echtzeit und steuert dann Lenk-, Antriebs-, und Bremssysteme an.

Rein formal gibt es komplementäre, konkurrierende und kooperative Fusionen. Die komplementäre Fusion kombiniert die Daten mehrerer unabhängiger Sensoren. Die Datenmenge ist hier sehr groß und die Informationen von einzelnen Sensoren können sich hinsichtlich Erfassungsbereich und Messgröße ergänzen (Beispiel: mehrere Kameras erzeugen ein 360°-Bild).

Die konkurrierende Fusion benutzt identische Informationen von mehreren Sensoren zur Erhöhung der Messgenauigkeit und zur Gewährleistung der Redundanz (Beispiel: Verknüpfung von Front-Radar und Front-Lidar). Die kooperative Fusion benötigt Informationen von diversen unabhängigen Sensoren, die jeweils einen Teilaspekt messen. Hier ist keine Redundanz gegeben (Beispiel: Stereokamera nutzt Daten von zwei Kameras).

Welche Datenmengen sind zu verarbeiten

Von allen Sensoren fallen hohe Datenmengen an. Experten von Infineon schätzen das so ein:

HD-Kamera: liefert Rohdaten mit 1280 × 960 (Farbkamera) mit 25 Frames/s = 1,2 GBit/s Minimum. In manchen Systemen wird dieses Rohbild zum Zentralrechner verschickt und dort verarbeitet, meistens sind mehrere Kameras angeschlossen und es gibt auch Systeme mit höherer Auflösung als HD, deswegen werden die Kameradaten mit 2 bis 6 GBit/s veranschlagt.

Aber: In vielen Kamerasystemen werden die Videodaten schon „vorverarbeitet“ und in die Objektlisten umgewandelt und weitergeschickt – deswegen kommen diese Kamerasensoren heute mit Übertragungsraten von 100 MBit/s bis 1 GBit/s aus. Sie übertragen also kein Bild sondern nur dynamische Objektlisten.

Radar: Beim Radar entstehen im Sensor heute Rohdaten mit 500 MBit/s bis 2 GBit/s, diese werden aber auch im Sensor in die Detektionen und Objektlisten umgewandelt und dann per CAN-Bus oder Ethernet (d.h. mit 5 MBit/s, 10 MBit/s oder 100 MBit/s) weitergesendet. In Zukunft will die Autoindustrie aber eher Rohdaten von hochauflösenden Radaren zum Zentralrechner schicken, es könnten also bald bis 48 GBit/s werden.

Lidar: Bei Lidar entstehen im Sensor – abhängig von der Auflösung, Field-of-View und Framerate schon heute Rohdaten mit 10 bis 100 GBit/s – allerdings werden auch dort die Daten schon im Sensor in die Objektlisten verarbeitet und höchstens mit 1 GBit/s weitergeschickt. Da in naher Zukunft auch da die Rohdaten-Verarbeitung im Zentralrechner Vorteile für die Sensorfusion bringt, rechnet man mit Datenraten bis 48 GBit/s.

Der Zeitfaktor bei der Sensorfusion

Bei der Fusion auf Signalebene werden Rohdaten oder wenig vorverarbeitete Daten verknüpft. Der Vorteil ist, das kein Informationsverlust auftritt, der Nachteil liegt darin, dass die Datenmenge groß ist. Bei der Fusion auf Merkmalsebene werden die Daten der Sensoren unabhängig voneinander vorverarbeitet. Die extrahierten Merkmale werden dann in einem höheren Abstraktionsgrad fusioniert. Dadurch lassen sich unterschiedliche Messgrößen verknüpfen und die Datenmenge wird reduziert. Bei der Fusion auf Objektebene werden die Daten der einzelnen Sensoren unabhängig voneinander verarbeitet und erst zum Schluss fusioniert. Die zu verarbeitende Datenmenge wird dabei minimiert, aber es treten Informationsverluste auf.

Großer Bruder - Sensorüberwachung im Innenraum

Sensoren sorgen auch für Sicherheit durch eine Innenraum-Überwachung. Die fahrende Person wird durch diverse Sensoren beobachtet und unter die Lupe genommen. Das Ziel ist, z.B. Übermüdung und Ablenkung (Stichwort Sekundenschlaf) zu erkennen.

- Zum einen kann hier das Lenkverhalten des Fahrers überwacht werden. Drive-by-Wire-Systeme erfassen z.B. Winkelstellung und Drehraten. Die Daten kommen von den Sensoren und werden über eine Schnittstelle an einen Mikrocontroller gesendet. Dort werden die Daten verarbeitet. Auch hier wird das Prinzip des intelligenten Sensors genutzt und Sensordaten der integrierten Vorverarbeitung unterzogen und der Mikrocontroller damit entlastet. Kombiniert mit Informationen wie Länge der Fahrt, Dauer und Uhrzeit kann die wahrscheinliche Ermüdung vorausgesagt werden und der Fahrer wird an eine Pause erinnert.

- 3D-Bildsensoren können Kopf- und Augenbewegungen sowie Atmung und Herzfrequenz (nichtinvasiv) kontrollieren.

- Durch Technologien zur 2D-Erkennung können in das Lenkrad Berührungssensoren integriert werden, die Gesten erkennen. Das können z.B. ein Ein-Finger-Tippen oder -Wischen oder das Zusammenführen und Rotieren mit zwei Fingern sein. Der Fahrer kann damit Einstellungen auslösen, ohne die Hände vom Lenkrad zu nehmen. Mit 3D-Erkennung können größere Gesten in der Luft genutzt werden. Knifflig ist dabei, unwichtige Handbewegungen und bewusste Gestenbefehle zu unterscheiden. Dafür lässt sich z.B. Software mit stochastischen Modellen nutzen.

- Visuelle Sensoren: Im Innenraum des Fahrzeugs kommen Farb-, Infrarotkameras sowie RGB-D-Kameras zum Einsatz. Dabei werden physische Parameter überwacht wie die Position des Kopfes in Relation zu Sitz und Frontscheibe, Winkel der Kopfdrehung, Augenbewegung, Veränderungen an den Augenbrauen und Blickmuster. Daraus werden Schlussfolgerungen über den Stresspegel der Personen gezogen.

- Haptische Sensoren: Auf dem Fahrersitz integrierte Sensoren messen die Druckverteilung des Fahrergewichts. Eine Schnittstelle gibt die gemessenen Werte aus, deren zeitlicher Verlauf gespeichert wird. Diese Matte ist an verschiedene Fahrzeugsitze, unterschiedliche Körpergrößen und Gewichte adaptierbar.

Fazit

Die Weiterentwicklung der Sensorik in den Bereichen IIoT, Automobilindustrie, Medizintechnik, Gebäudeautomatisierung, für die Gaming-Branche, die Umwelttechnik, für Wearables, die allgemeine Kommunikation, Smart Cities, Smart-Metering und alle anderen Einsatzbereiche wird immer intelligentere, energieeffizientere und zunehmend vernetzte Sensortechnologien hervorbringen. Selbst vermeintliche Markt-Killer wie die COVID-19-Situation können hier zu neuen Anwendungen führen. Zur Zeit sieht man z.B. Angebote wie Luftgüte-Messer, Distanzmelder und natürlich viele medizintechnische Einsatzfälle. Je schneller, genauer und sinnvoller verarbeitet (Stichwort künstliche Intelligenz) die von den Sensoren gelieferten Daten sind, umso größer ist der wirtschaftliche, technische und humanitäre Nutzen, der sich daraus ziehen lässt.