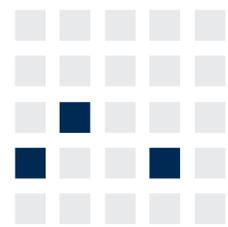




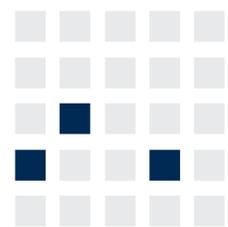
VL Internet of Things / Industrial Internet

Sensorik im Produktionskontext



Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Prozesse und Systeme

Universität Potsdam



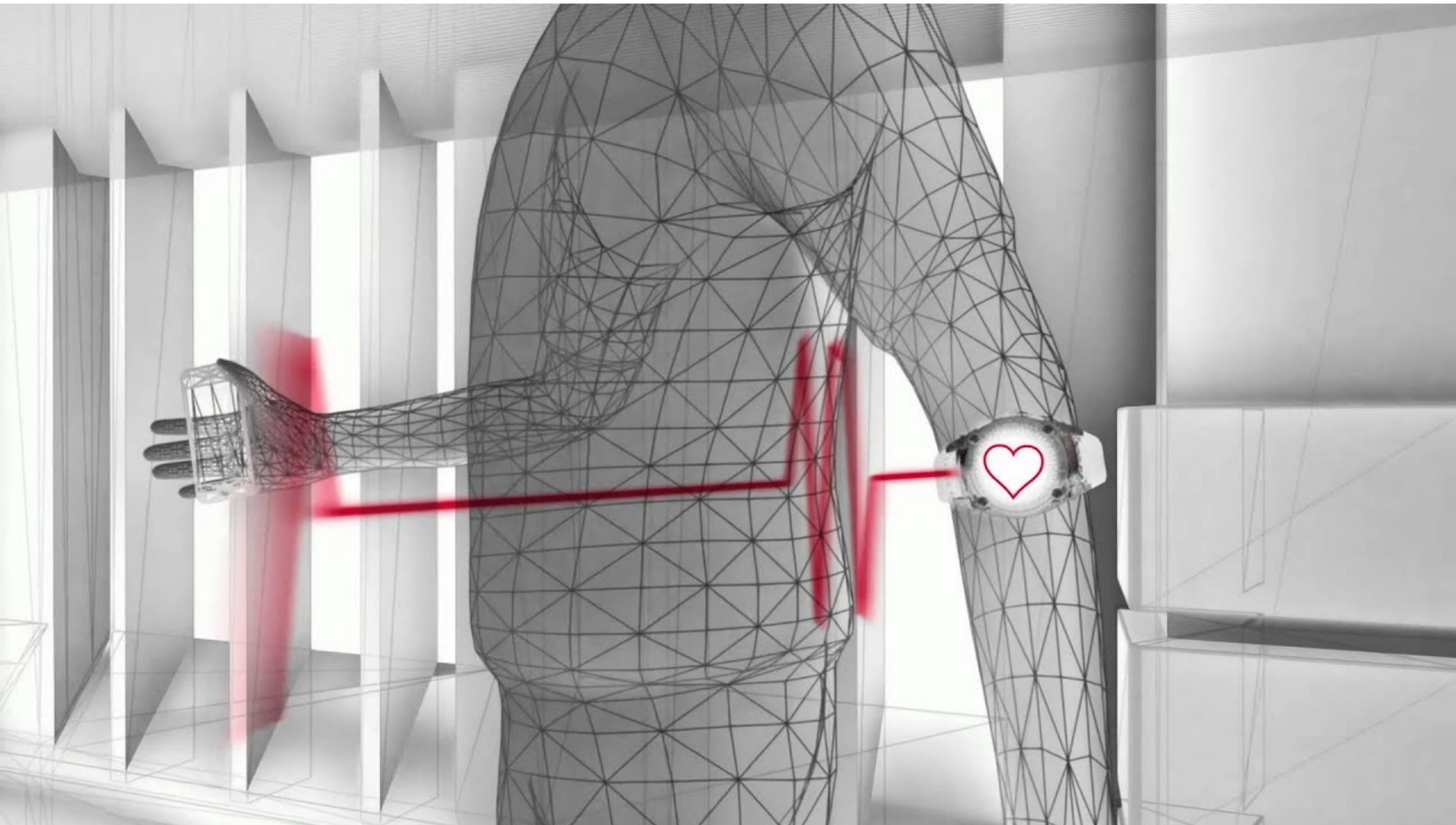
Chair of Business Informatics
Processes and Systems

University of Potsdam

M.Sc. Ravil Goetzke, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gronau
Wiss. Mit. | *Research A., Lehrstuhlinhaber | Chairholder*

Mail August-Bebel-Str. 89 | 14482 Potsdam | Germany
Visitors Digitalvilla am Hedy-Lamarr-Platz, 14482 Potsdam
Tel +49 331 977 3322

E-Mail ngronau@lswi.de
Web lswi.de



Lernziele

- Aus welchen grundlegenden Komponenten besteht ein Sensor?
- Welche drei Signalarten unterscheidet man?
- Wie funktioniert die Umwandlung eines akustischen Signals in ein binäres elektrisches Signal?
- Beschreiben Sie Anwendungsszenarien für Sensoren
- Welche Modelle sind im Programmcode umgesetzt und welche Funktion hat das jeweilige Modell?



Einführung in Sensorik

Potenziale und Herausforderungen

Anbindung an die Informationssysteme

Anwendungsszenarien

Ausblick

Begriffsverständnis Sensor

Sensorbegriff im wissenschaftlich- / technischen Kontext

- „Sensor“ aus dem Lateinischen (sensus: Sinn)
- Bedeutung: Fühler
- Aufnahme von quantitativen und qualitativen Messungen von physikalischen, chemischen, klimatischen, biologischen und medizinischen Größen
- Zusammensetzung aus Sensor-Element und Auswerte-Elektronik

Messtechnik (DIN 1319-1)

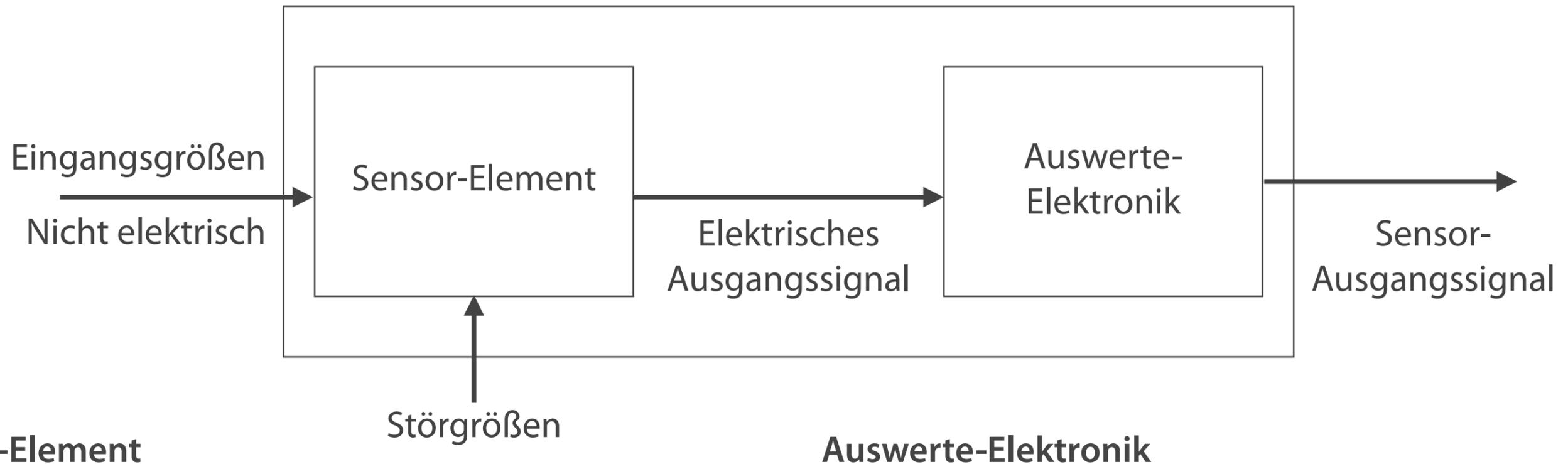
- Verwendung des Begriffes Aufnehmer (Messgrößen-Aufnehmer)
- Definition Aufnehmer als der Teil einer Messeinrichtung, der auf eine Messgröße unmittelbar anspricht
- Aufnehmer als erstes Element einer Messkette

Sensoren im Kontext der Automatisierung (Heinrich et al.)

- Steuerungs- und Regelungseinheit
- Zurverfügungstellung von Informationen über Veränderungen in technischen Systemen für nachgeordnete Baugruppen
- Aufgabe der Sensorik: Umwandlung von Informationen in elektrische Signale

Sensoren stellen messbare Eigenschaften in auswertbarer Form bereit.

Sensoraufbau (einfach)

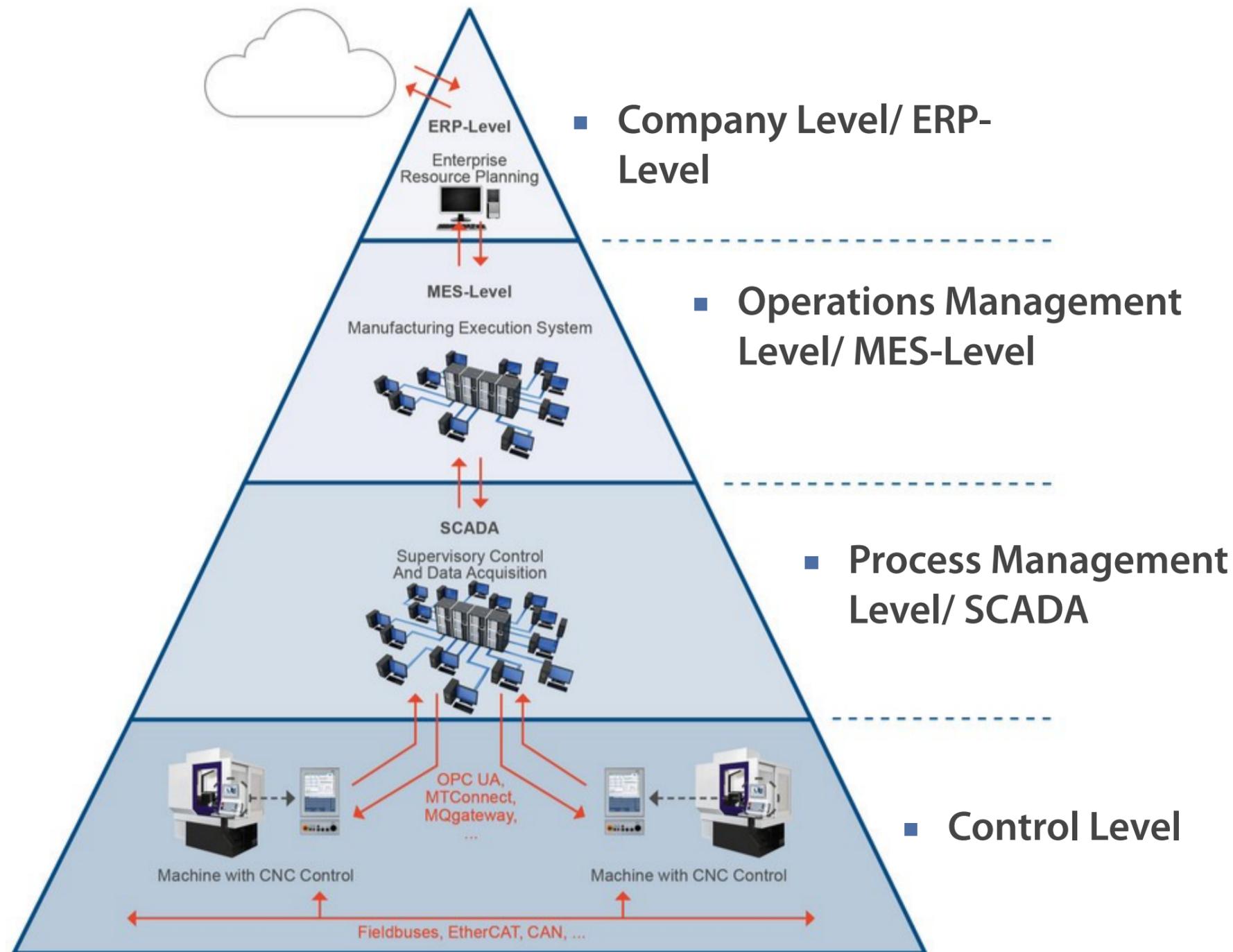


- Zu messende, nicht elektrische Eingangsgrößen werden im Sensor-Element durch naturwissenschaftliche Gesetze in ein elektrisches Ausgangs-Signal umgewandelt

- Bereitstellung der Ausgangssignale durch Schaltungselektronik oder auch Softwareprogramme, sodass ein Sensor-Ausgangssignal entsteht, das zu Steuerungs- oder Auswertezwecken genutzt werden kann
- Berücksichtigung von äußeren Störgrößen, die ein Sensor-Element beeinflussen

Der Sensorbegriff beinhaltet eine erste Signalaufbereitung.

Einordnung der Sensoren

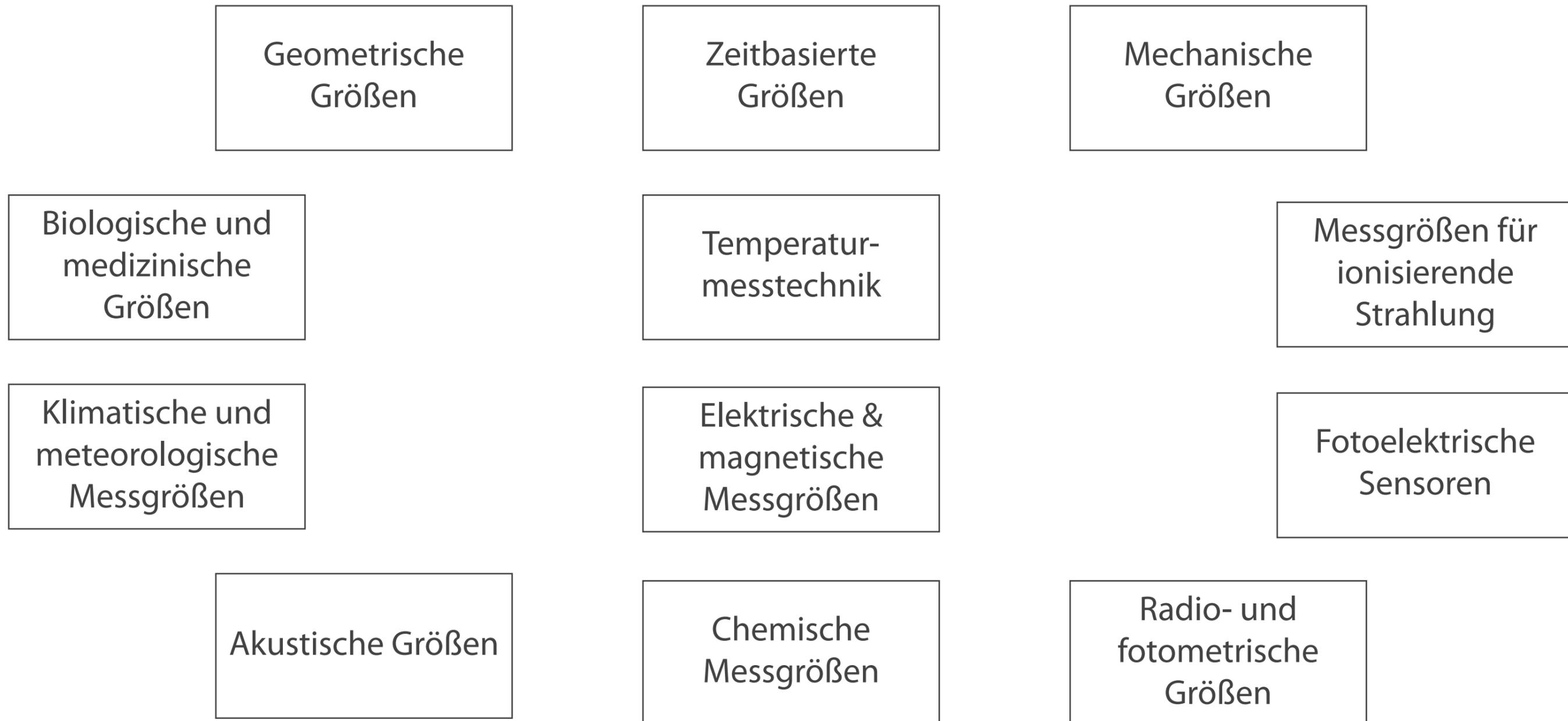


Kommunikationswege

- **Bottom-Up:** Operative Signale werden sukzessiv aggregiert; Weitergabe bis zur Unternehmensleitung
- **Top-Down:** Übersetzung der Vorgaben der Unternehmensleitung in konkrete Handlungen und steuern somit operativen Betrieb
- Erfassung der Sensorsignale auf der untersten Ebene

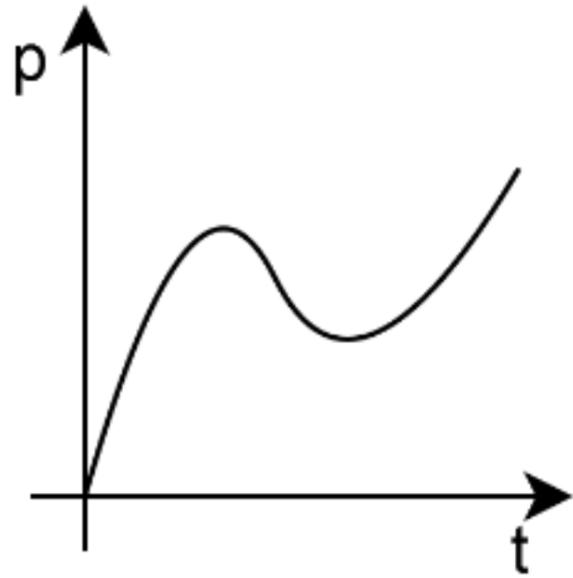
Sensorsignale haben einen direkten als auch indirekten Einfluss auf die Geschäftsprozesse.

Kategorisierung von Sensoren nach Messgrößen



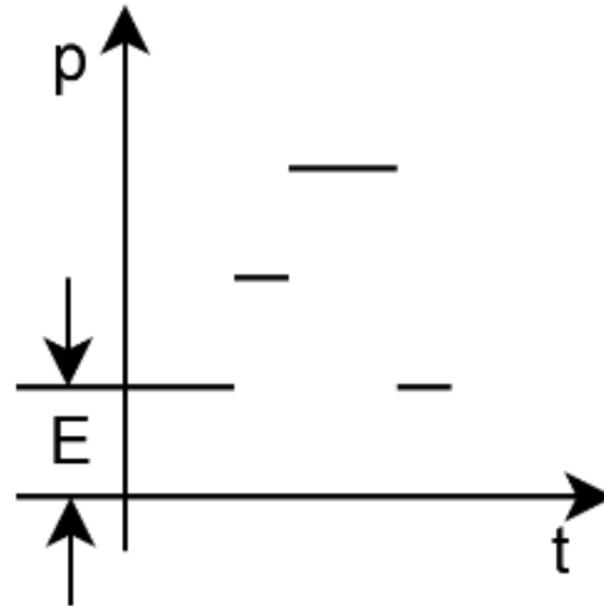
Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Kategorisierung von Sensormessgrößen und Sensoren.

Signalarten



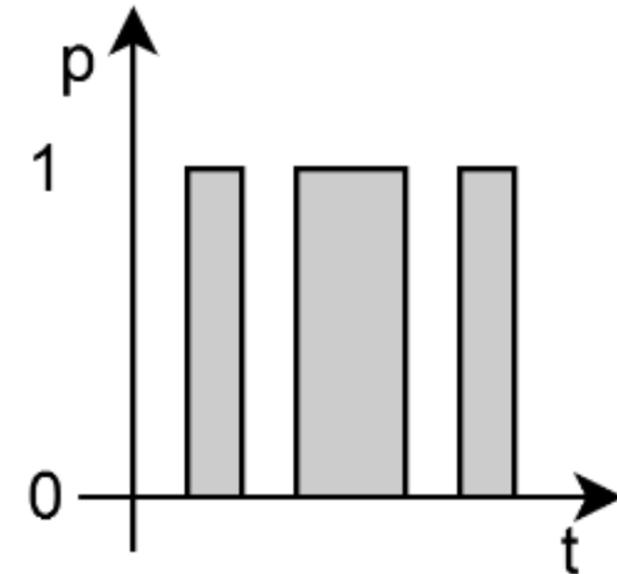
Analoges Signal

- Kontinuierlich veränderliche physikalische Größen (z.B. Druck, Lichtintensität, Temperatur)



Digitales Signal

- Diskrete Signale mit abgegrenztem Wertebereich
- Signale entsprechen ganzzahligem Vielfachen der kleinsten Einheit



Binäres Signal

- Binärsignale unterscheiden ausschließlich zwei Werte
- z.B. Licht an / aus, Tür offen / geschlossen

Im Wesentlichen sind drei unterschiedliche Arten von Signalen zu unterscheiden.



Einführung in Sensorik

Potenziale und Herausforderungen

Anbindung an die Informationssysteme

Anwendungsszenarien

Ausblick

Potenziale und Herausforderungen

Potenziale

- Detailreiche Zustandserfassung der Produktion
- Flexible und adaptive Produktion
- Autonome Steuerung
- Effizientere Produktion

Herausforderungen

- Beherrschung der Komplexität in der Produktion
- Effektive und effiziente Verarbeitung der Sensordaten
- Integration der Daten in verschiedene Systeme
- Automatisierte Entscheidungsfindung

Entwicklung der Bedeutung von Sensorik

Umsatz Sensorik und Messtechnik

Jahreswerte, Vergleich mit 2015 (Index 100%)



Quelle: AMA Verband für Sensorik und Messtechnik
Daten verarbeitet. Gewerbe: DESTATIS

Marktentwicklung

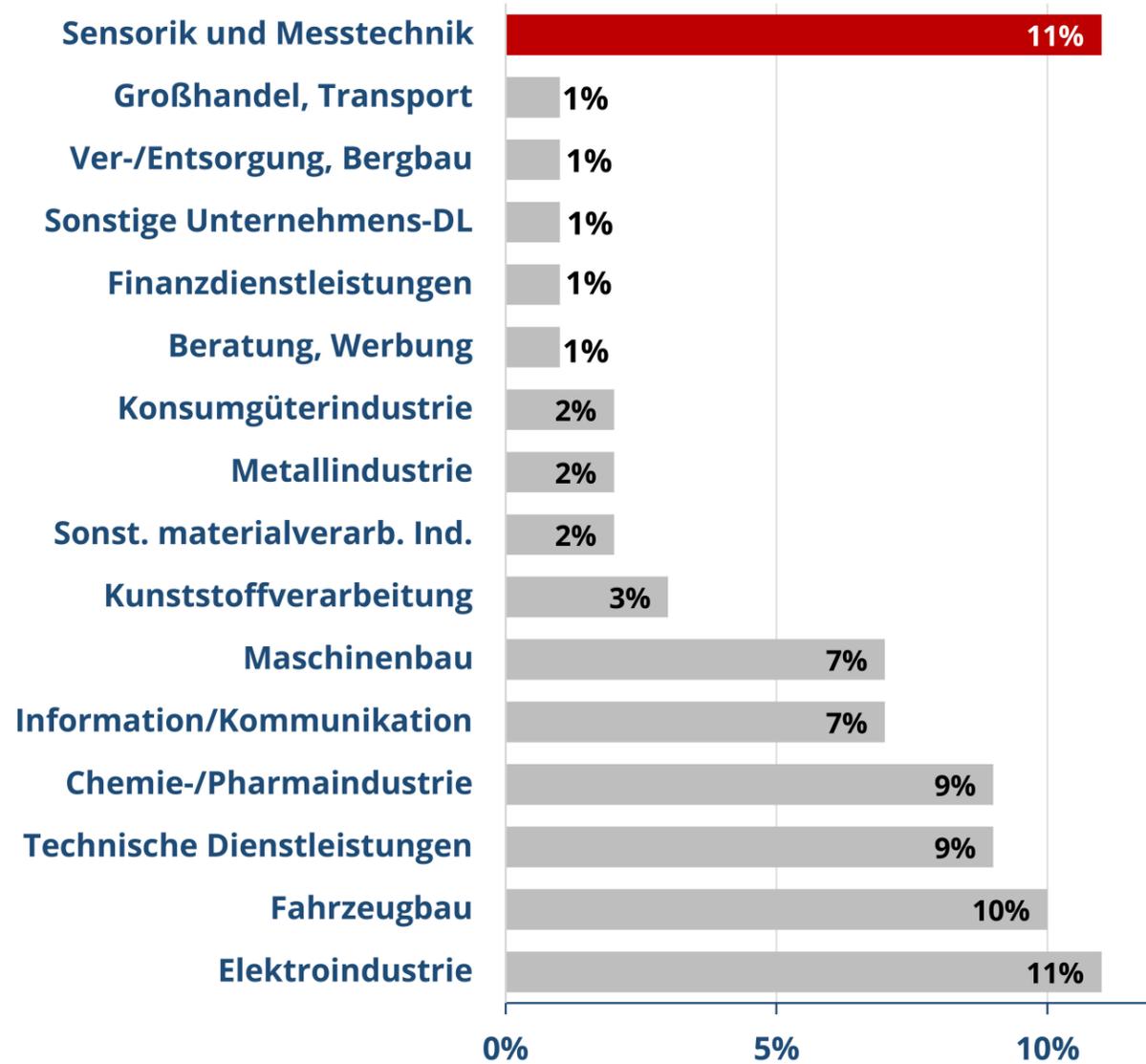
- Zunehmende wirtschaftliche Bedeutung von Sensorik in den vergangenen Jahren
- Viele Unternehmen planen zukünftigen Einsatz von Sensorik

Die Bedeutung von Sensoren ist in den vergangenen Jahren stark gestiegen.

Bedeutung von Sensorik im Branchenvergleich

Innovationsintensität Sensorik und Messtechnik

Vergleich mit Branchengruppen



Quelle: AMA Verband für Sensorik und Messtechnik
Daten für Branchengruppen: ZEW

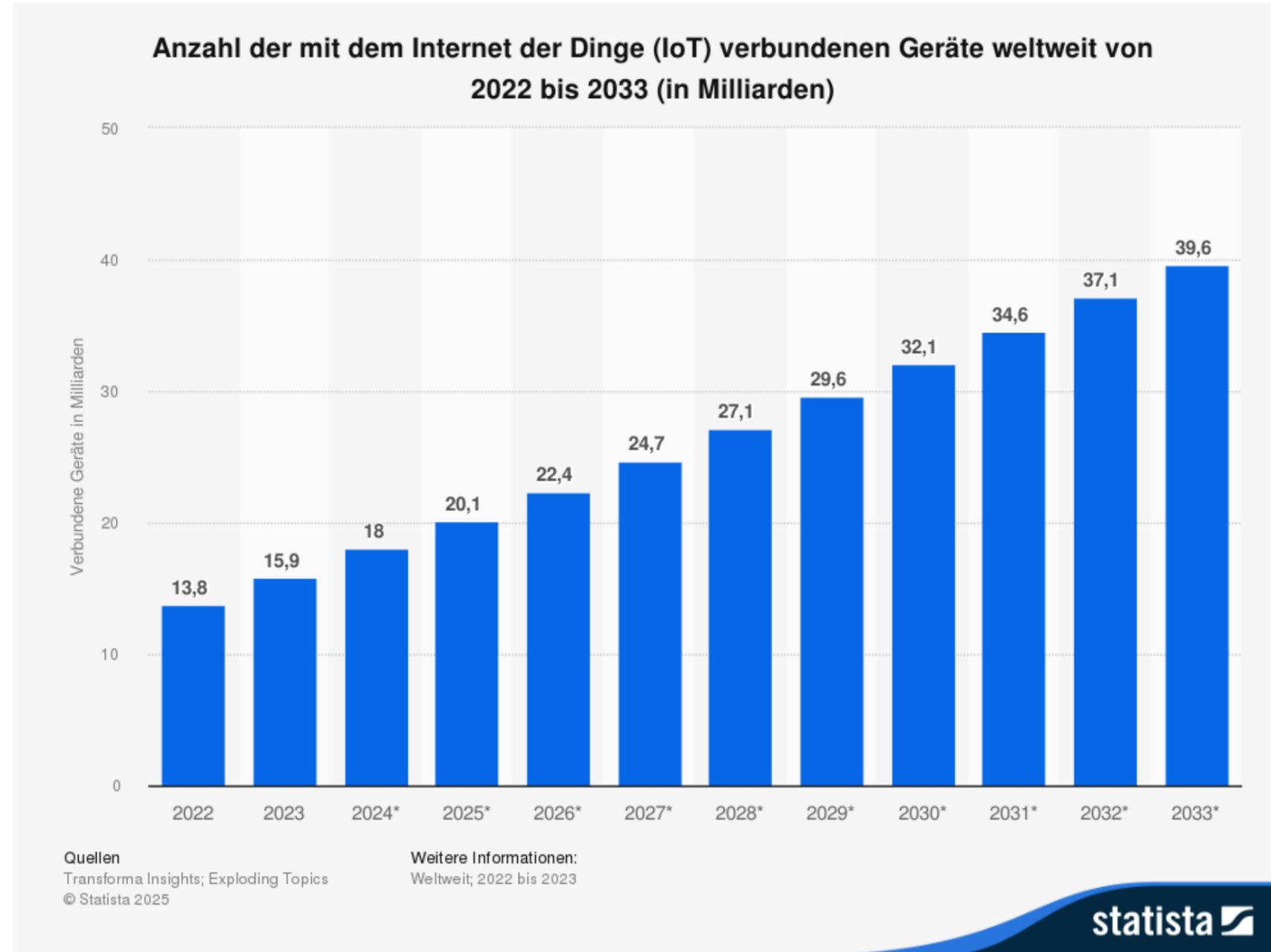
Marktentwicklung

- Branche investiert in Forschung und Entwicklung und stellt neue Mitarbeiter ein
- Branche in Aufbruchsstimmung

Die Branche zeigt sich wieder investitionsfreudig

Internet of Things (IoT)

Prognose zur Anzahl der vernetzten Geräte im Internet der Dinge (IoT) weltweit



Die Anzahl internetfähiger Geräte steigt stetig an. Die resultierende Infrastrukturkomplexität muss beherrscht werden.



Einführung in Sensorik

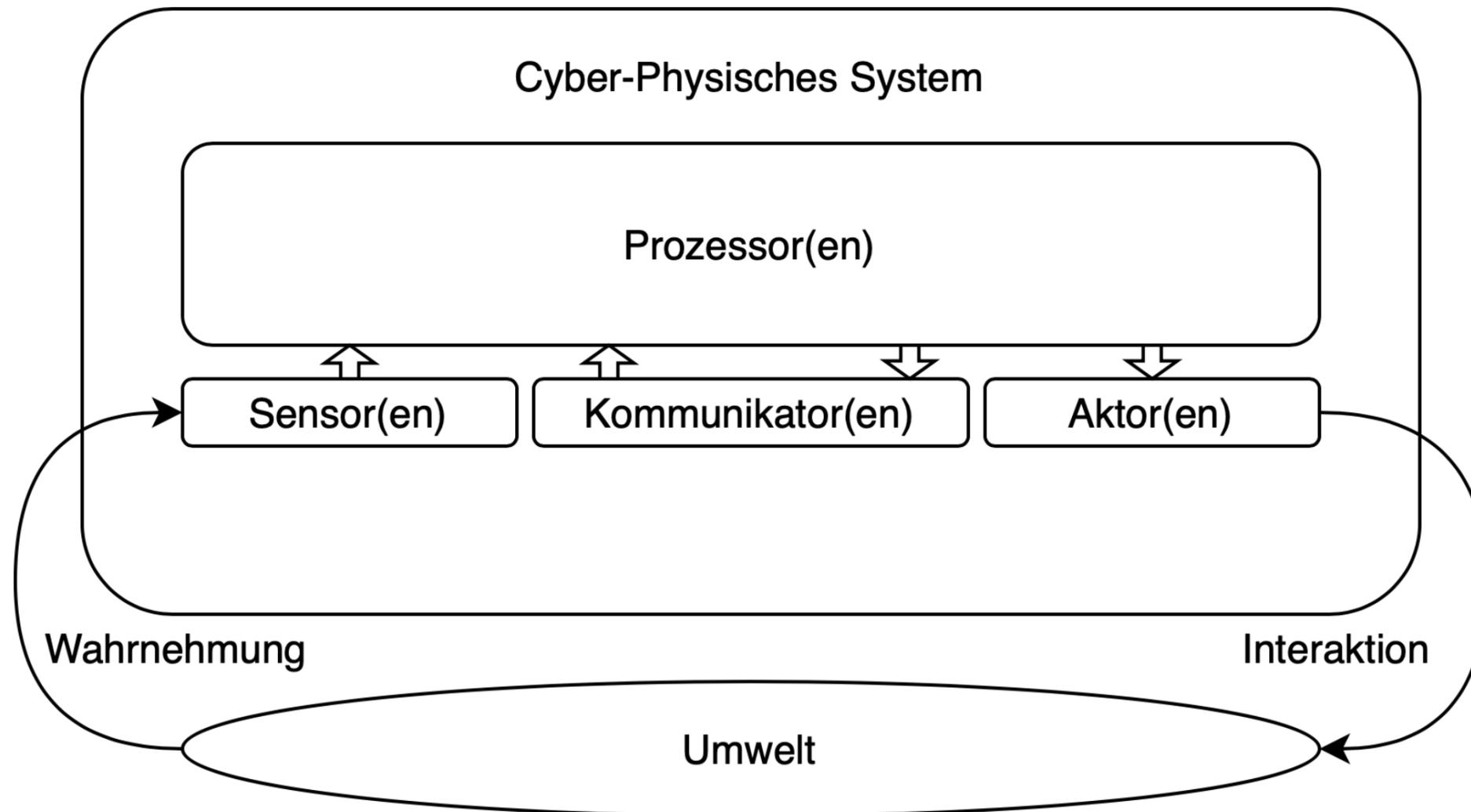
Potenziale und Herausforderungen

Anbindung an die Informationssysteme

Anwendungsszenarien

Ausblick

Sensoren als Teil von Cyber-Physischen Systemen

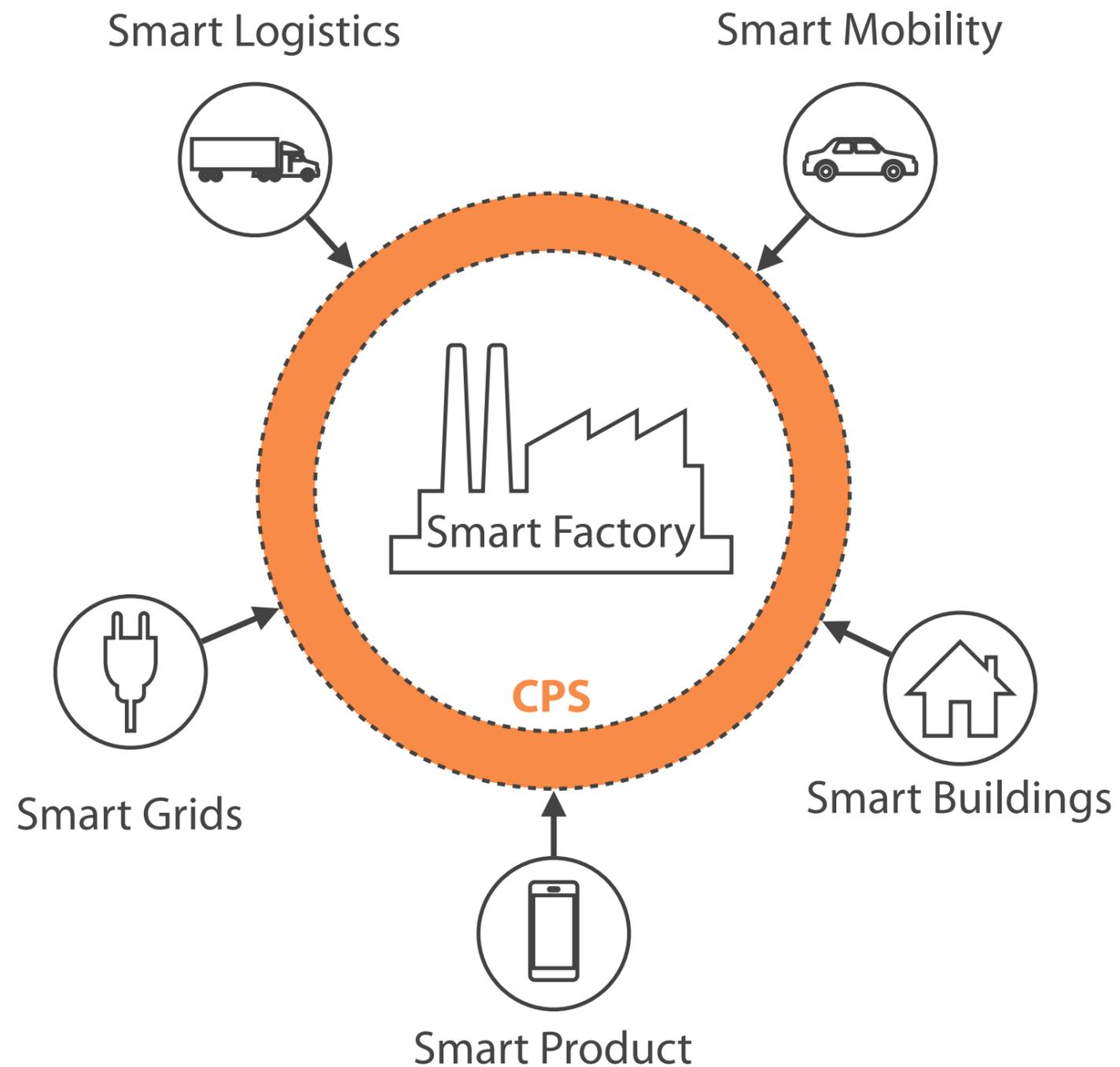


Sensoren als Element von CPS

- Sensoren zur unmittelbaren Erfassung physikalischer Daten
- Sensoren als Grundlage für die Erfassung der Umgebungssituation und somit für Adaptivität von CPS-Komponente
- Lokale Vorverarbeitung von Sensordaten durch CPS
- Treffen von Entscheidungen, Auslösen von Aktionen, Einwirken der CPS auf die Umwelt
- Verfügbarmachung der Sensordaten als Dienste
- Reduzierung der Komplexität durch lokale Vorverarbeitung

Sensoren sind ein wesentlicher Bestandteil von Cyber-Physischen Systemen.

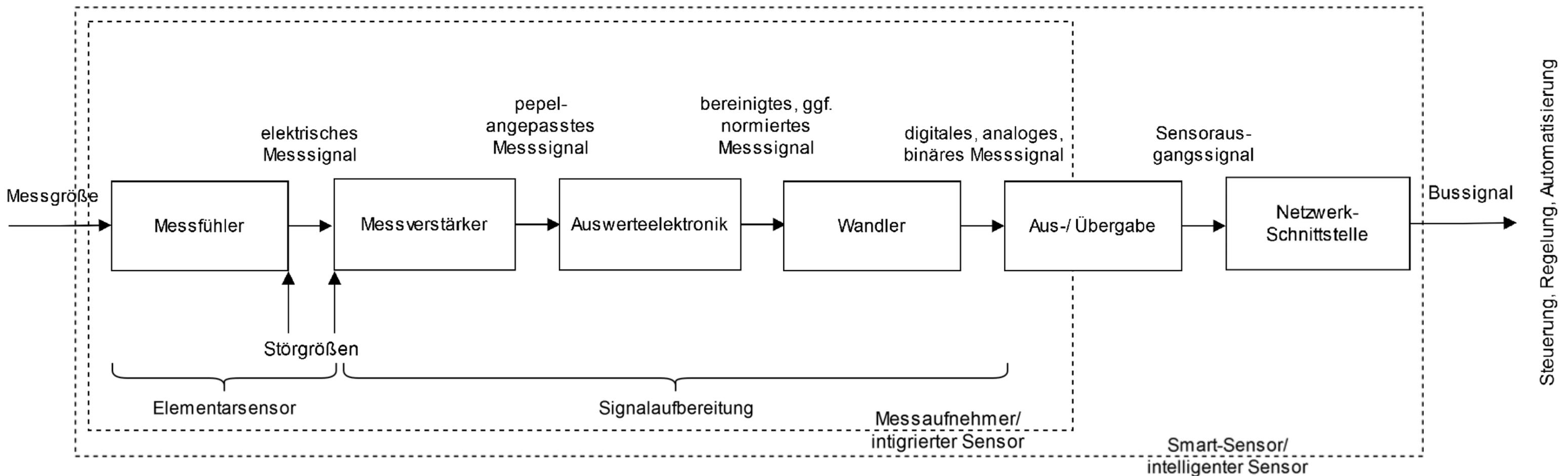
Sensoren als Teil von Smart Factory / Industrie 4.0



Smart Factory als Teil einer intelligenten Welt

- Beherrschung von Komplexität, geringere Störanfälligkeit, gesteigerte Effizienz der Produktion
- Kommunikation in der Smart Factory von Menschen, Maschinen und Ressourcen ebenso selbstverständlich wie in einem sozialen Netzwerk
- Smart Factory als Teil eines intelligenten Ökosystems aus Ressourcen, Logistik und Produkten
- Sensorelemente in allen Bestandteilen des „Smarten“ Ökosystems

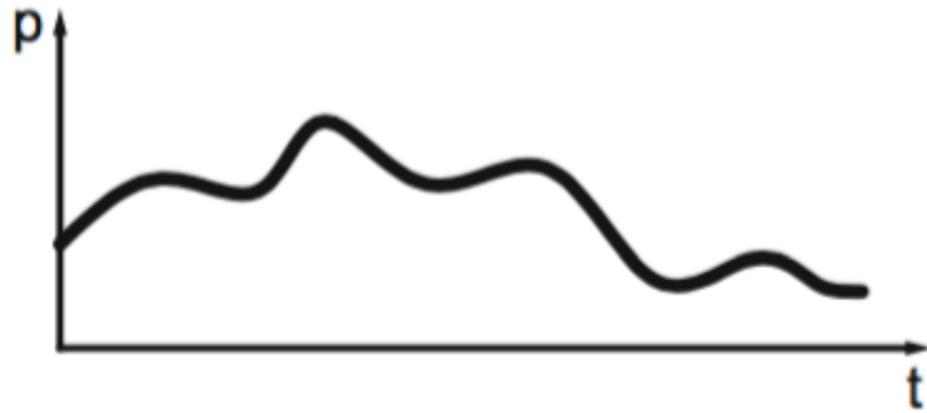
Sensoraufbau im Detail



Sensorbestandteile

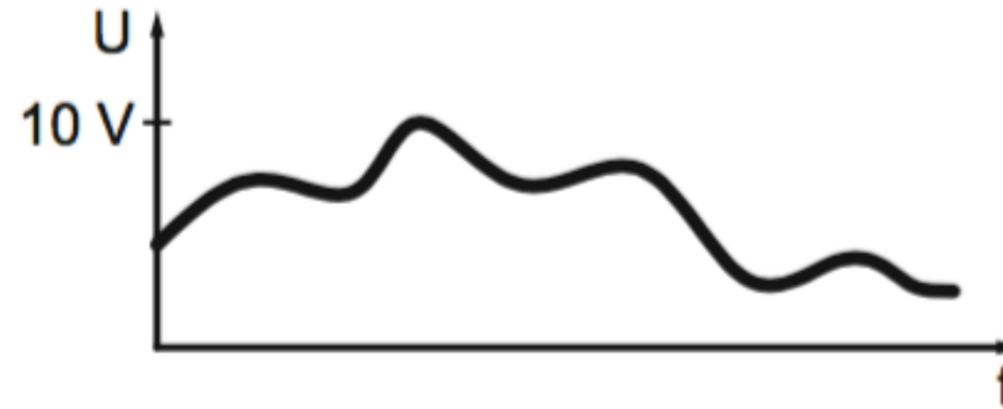
- Aufnahme der Messgröße durch Elementarsensor, Umwandlung in elektrisches Messsignal
- Signalaufbereitung, bestehend aus Verstärker, Auswerteelektronik und ggf. Wandler, Überführung des elektrischen Signals in ein normiertes, angepasstes Signal in gewünschter Signalart
- Netzwerkanbindung und ggf. lokale Vorverarbeitungsmöglichkeiten

Umwandlung eines akustischen Signals in ein binäres elektrisches (Teil 1)



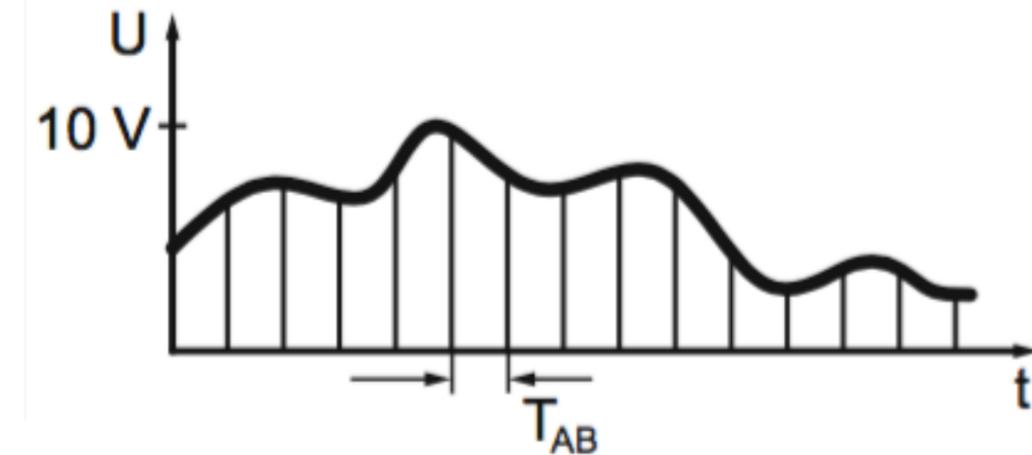
Messung des Drucks

- Erfassung der Lautstärke der akustischen Schwingung als Messgröße
- Druck als mögliche Messgröße



Umwandlung in analoges elektrisches Signal

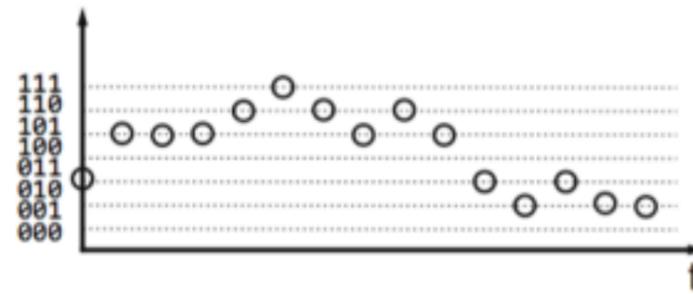
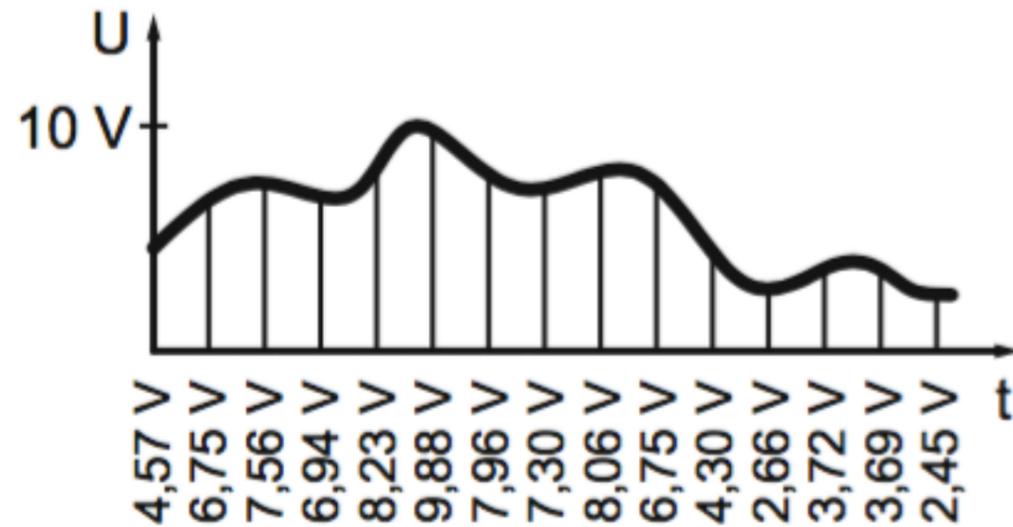
- Verstärkung oder Normierung (z.B. Spannungsbereich)



Festlegung der Abtasthäufigkeit

- Messung der Spannung mit festgelegter Häufigkeit im Zeitintervall
- Wahl der Abtasthäufigkeit entsprechend des Anwendungsgebiets

Umwandlung eines akustischen Signals in ein binäres elektrisches (Teil 2)



quantisierte Spannung in V	digitalisierter Wert (3 bit)
4,57	011
6,75	101
7,56	101
6,94	101
...	...



Spannung erfassen

- In den gewählten Zeitabständen

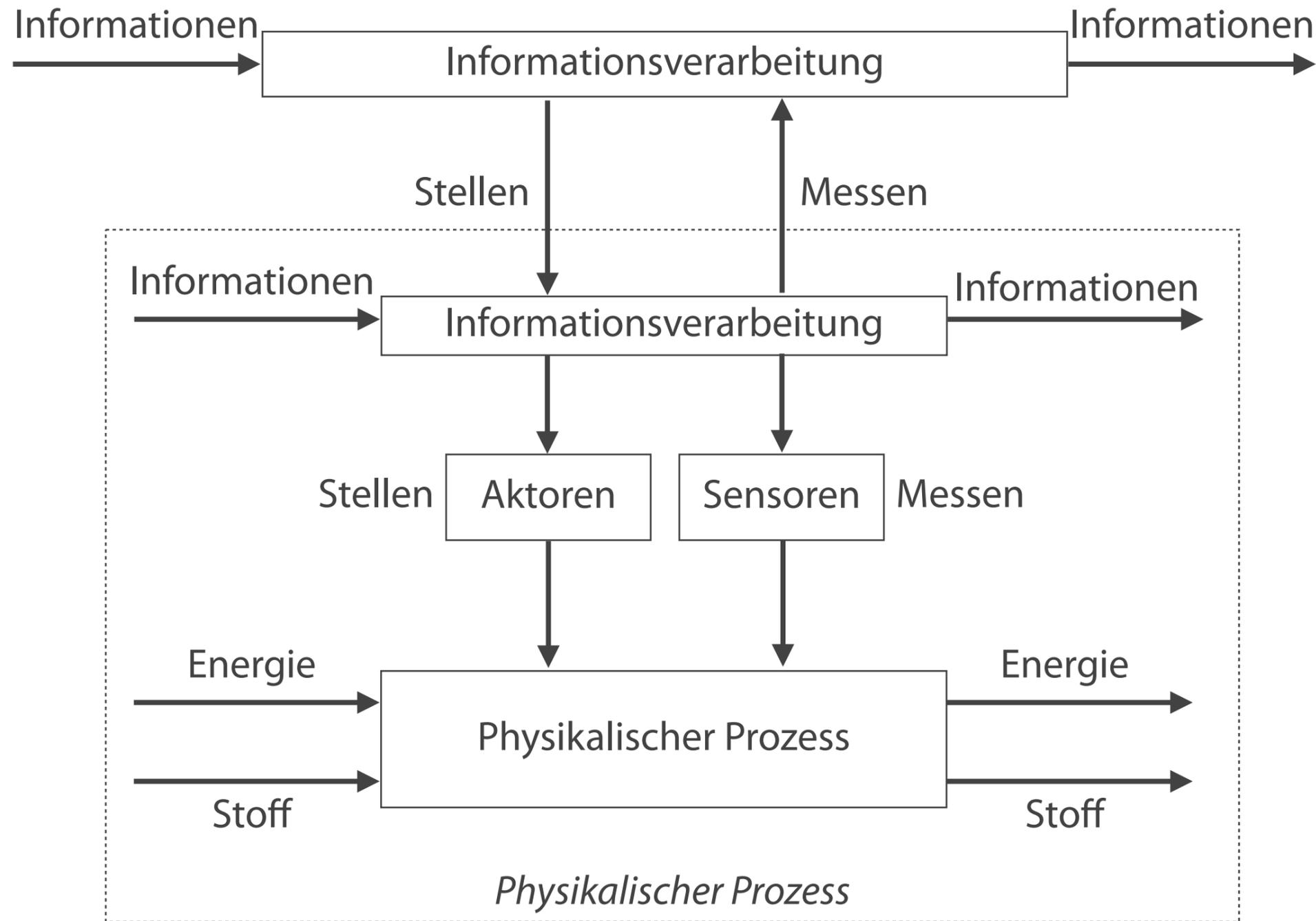
Diskretisierung und Zuordnung des digitalen Wertes

- Festlegung des Amplitudenwertes
- Festlegung der Quantifizierungsschritte (Genauigkeit)
- Zuordnung der quantisierten Spannung zu den digitalisierten Werten

Ausgabe der digitalen Werte als binäres Signal in zeitlicher Abfolge

- Digitale Werte können als binäre Signale in vorgegebener zeitlicher Abfolge gesendet werden

Sensoren als Grundlage für die Prozesssteuerung

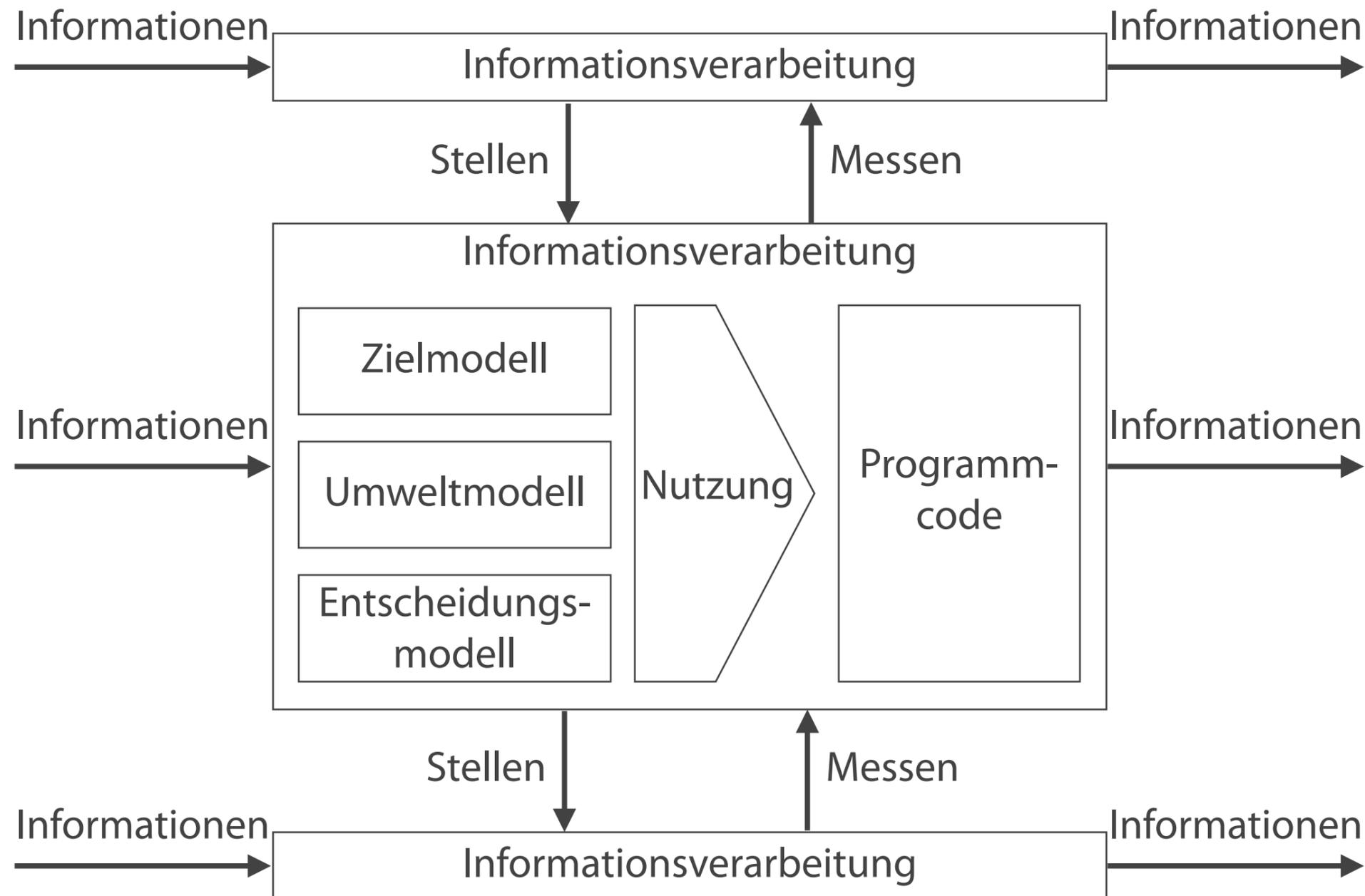


Prozesssteuerung in unterschiedlichen Ebenen

- Erfassung des Zustands des physikalischen Prozesses durch Sensoren
- Informationsverarbeitung zur Umsetzung der Automatisierungslogik, implementierte Entscheidungslogik für die Prozesssteuerung
- Beeinflussung des physikalischen Prozess durch Aktoren auf Basis der getroffenen Entscheidungen in der gewünschten Weise
- Stattfinden der Ursache-Wirkungskette an vielen Stellen im Prozess

Sensorsignale können direkten Einfluss auf das weitere Verfahren in Produktionsprozessen haben.

Informationsverarbeitung als Entscheidungselement für die Prozesssteuerung



Bestandteile der Informationsverarbeitung

- **Umweltmodell:** Verständnis der Umgebung (Zustand und Einwirkungsmöglichkeiten)
- **Zielmodell:** Zielstellung auf die das Verhalten ausgerichtet wird
- **Entscheidungsmodell:** Trifft Entscheidungen zur Zielerreichung auf Basis der anderen beiden Modelle

Die drei Bestandteile der Informationsverarbeitung sind im Programmcode umgesetzt.



Einführung in Sensorik

Potenziale und Herausforderungen

Anbindung an die Informationssysteme

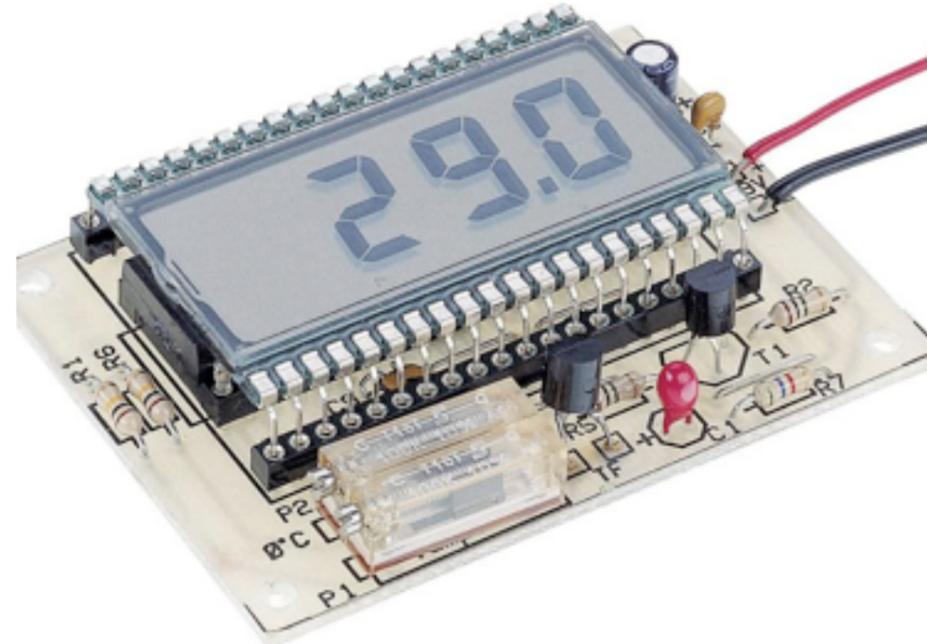
Anwendungsszenarien

Ausblick

Beispielanwendung für Sensoren



Bildquelle: BMW Group



Bildquelle: Conrad



Bildquelle: Conrad

Abstandsmessung mittels Ultraschall

- Einsatz im Automobilbereich
- Grundlage für Einparkassistenten

Temperaturmessung mittels Widerstand

- Einsatz in vielen industriellen Bereichen
- Grundlage für Steuerung von Heiz- und Kühlanlagen im industriellen wie auch privaten Umfeld (z.B. Smart Home)

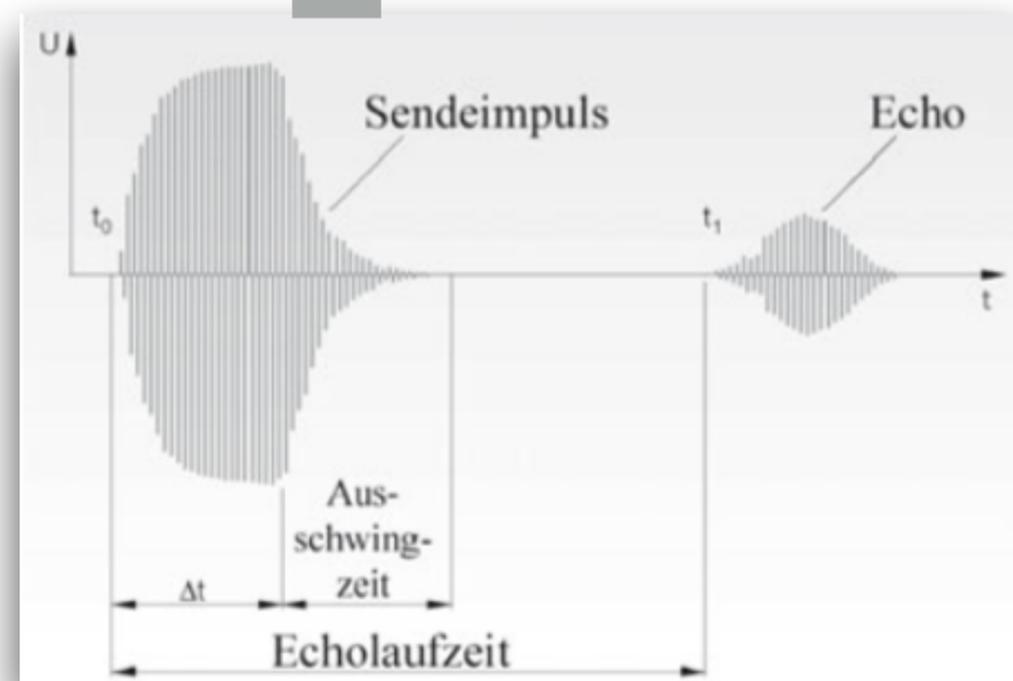
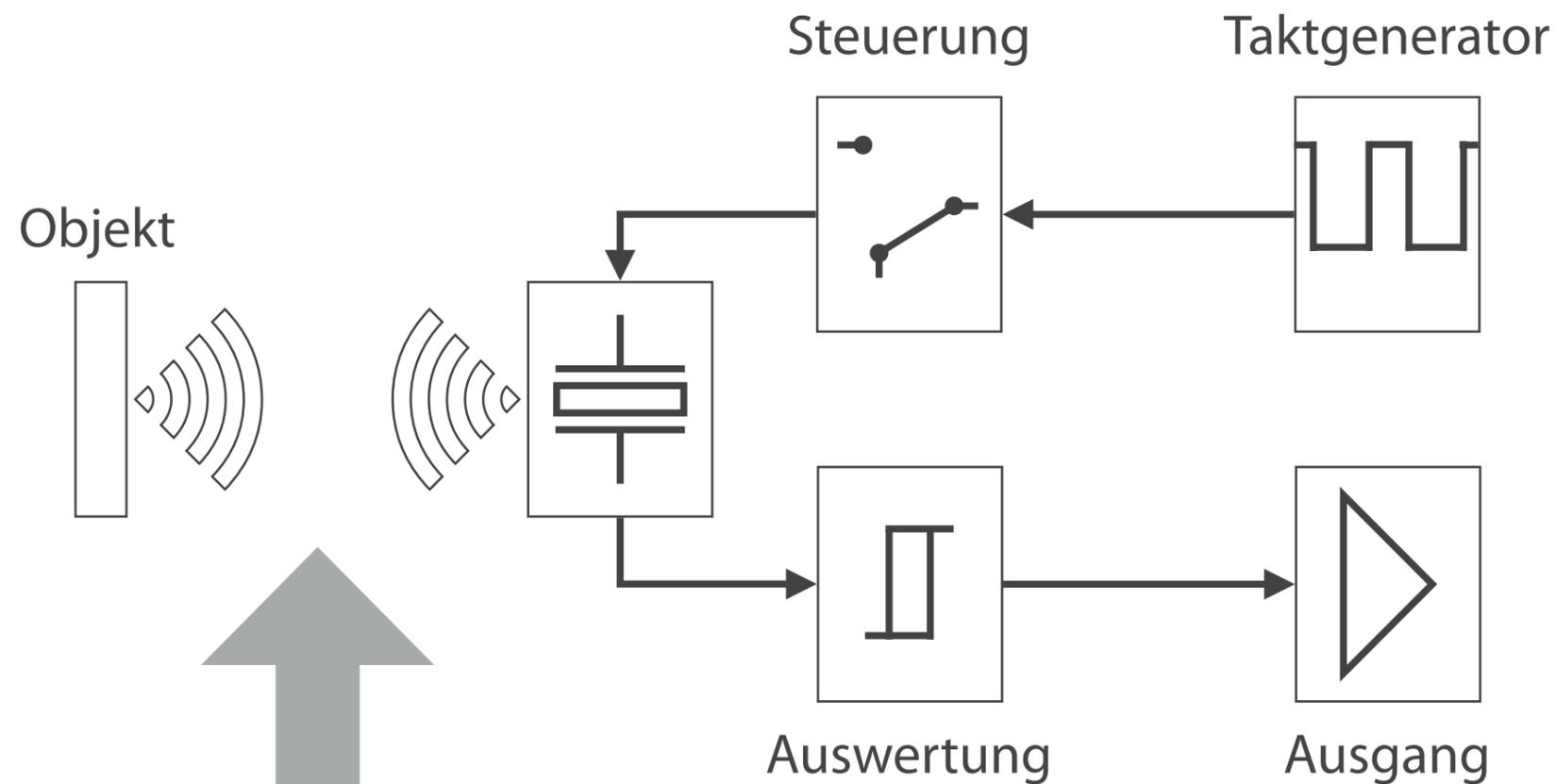
Identifikation auf Basis von RFID

- Einsatz im industriellen wie auch privaten Umfeld
- Grundlage für kontaktlose Identifikation von Objekten

Sensoren werden nicht nur im industriellen Umfeld eingesetzt.

Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

Grundprinzip

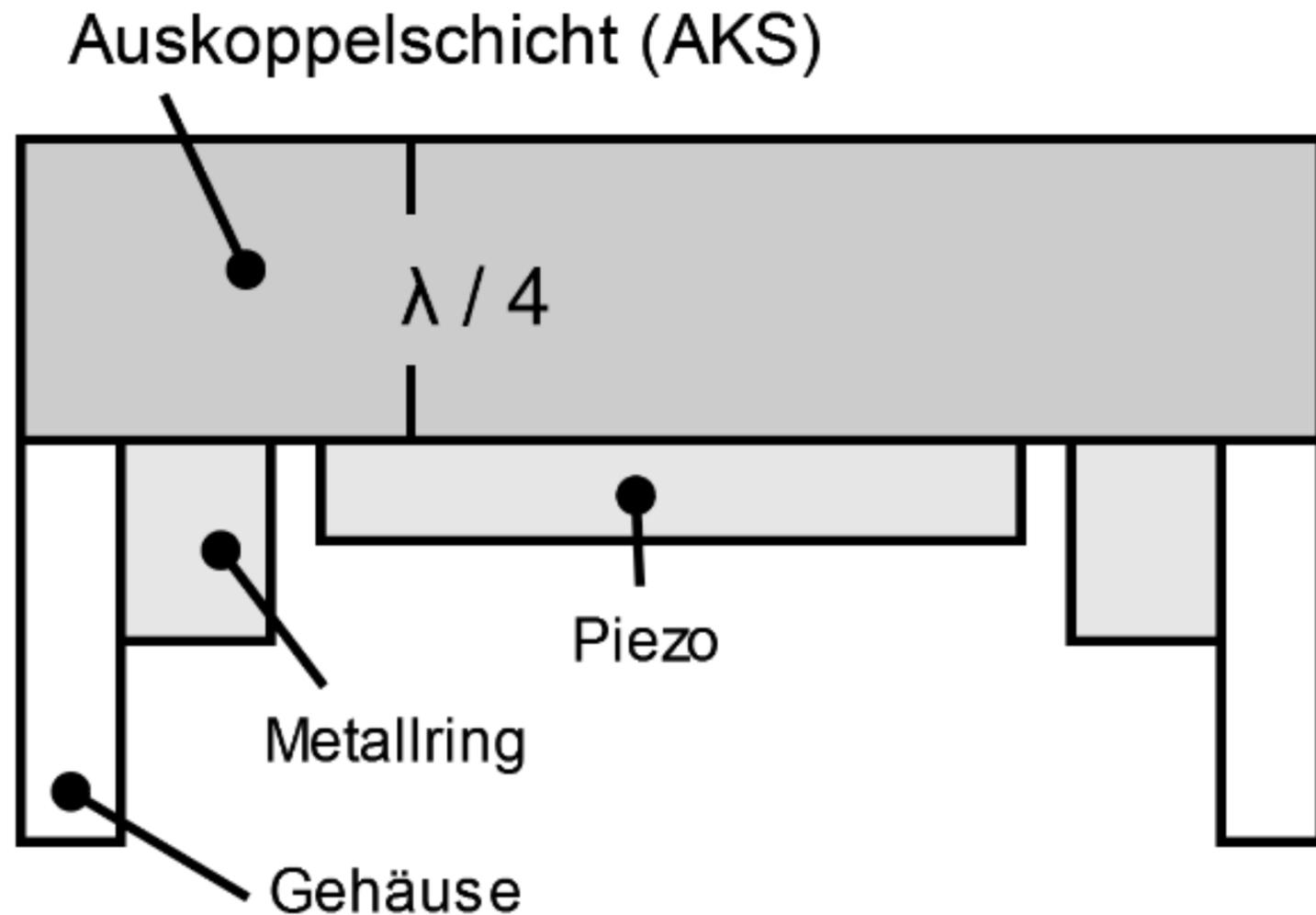


Funktionsweise

- Frequenzbereich von Ultraschall zwischen 20 kHz und 1 GHz
- Zuerst Aussendung eines Ultraschallsignals, welches zu einem späteren Zeitpunkt empfangen wird
- Grundprinzip der Abstandsmessung: Messung der Echolaufzeit von Ultraschallwellen
- Berechnung des Abstand zum reflektierenden Objektes auf Basis der Rücklaufzeit und der Ultraschallgeschwindigkeit

Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

Sensoraufbau



Sendebetrieb

- Umwandlung elektrischer in mechanische Energie
- Anlegen einer äußeren Spannung am Piezokristall
- Änderung in geometrischen Abmessung
- Anregung des Ultraschallwandlers zum Schwingen

Empfangsbetrieb

- Umwandlung mechanischer in elektrische Energie
- Oberflächenentladungen durch Echo im Empfangsbetrieb, die als Spannung messbar sind

Der im Sendebetrieb genutzte Effekt wird umgekehrt zum Empfang des Echos eingesetzt.

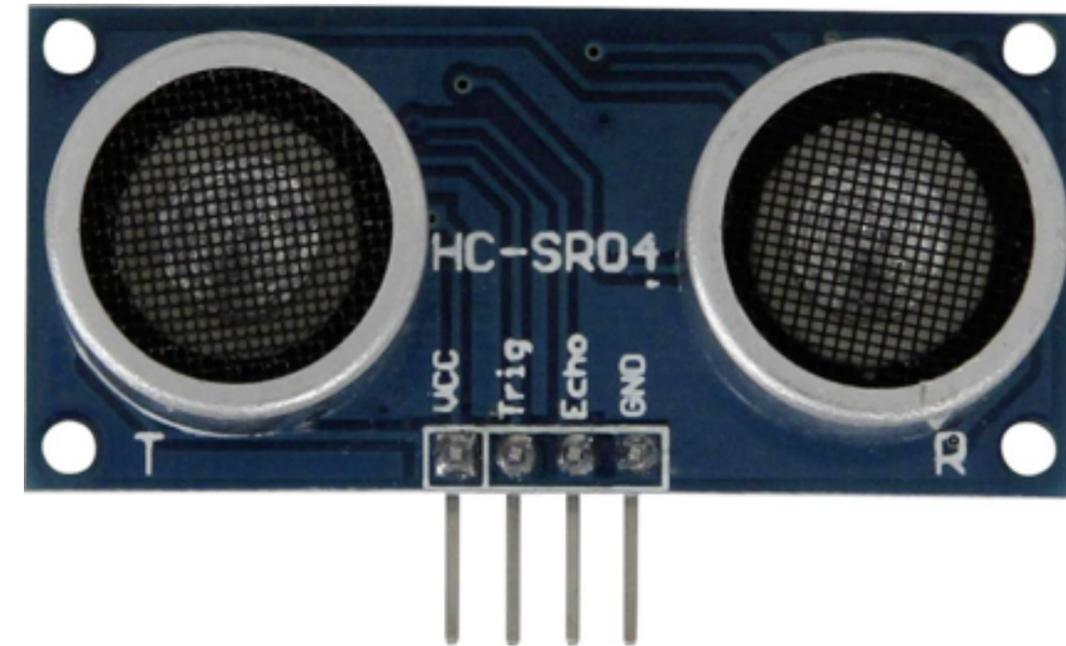
Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

Sensortypen



Tastbetrieb (Einkopfsystem)

- Sender und Empfänger in einer Komponente
- Einsatz im Automobilumfeld (Parkassistenzsysteme)
- Messung von Abstand ausschließlich im Messbereich möglich



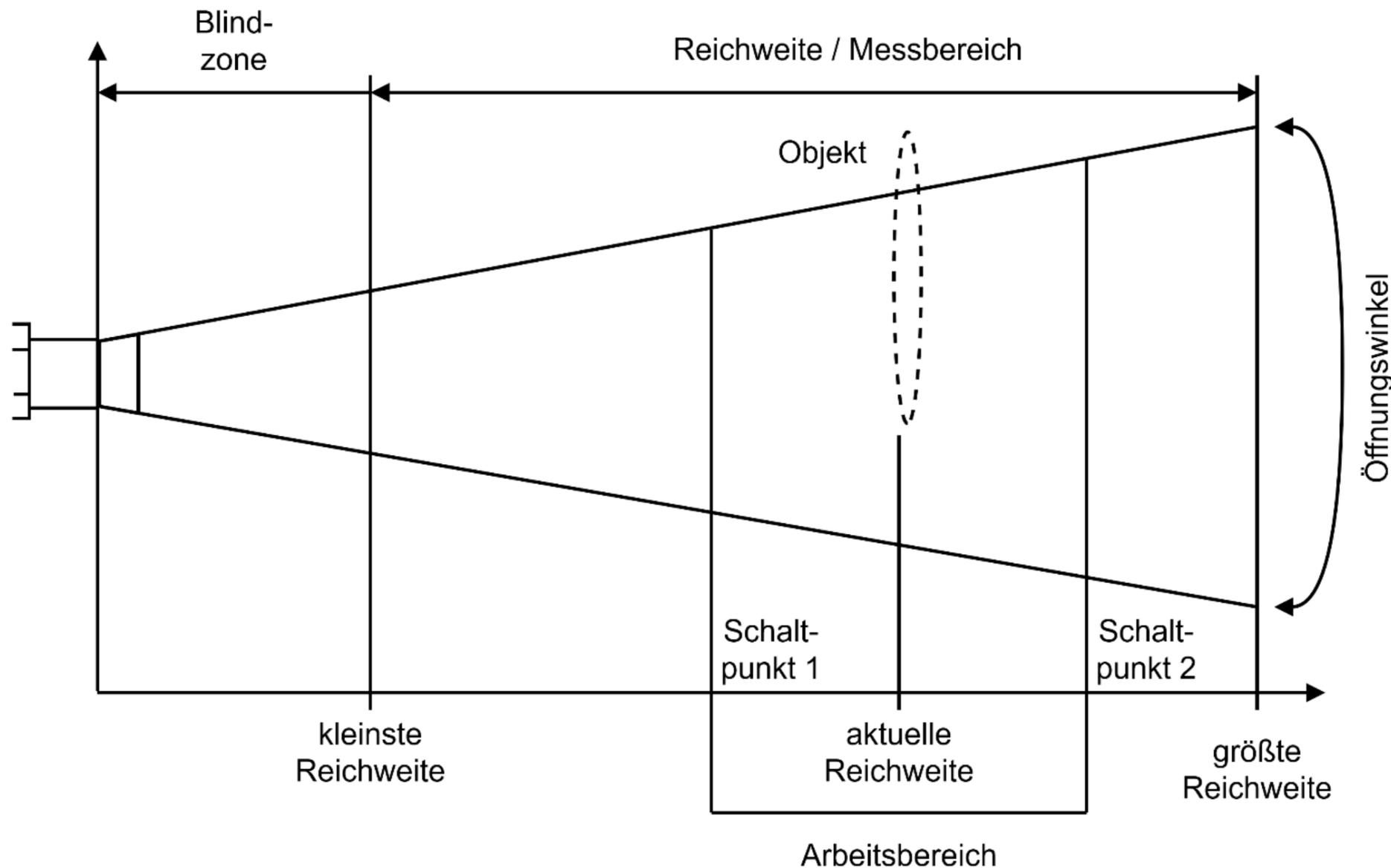
Schrankenbetrieb (Zweikopfsystem)

- Getrennter Sender und Empfänger
- Keine Blindzone
- Eignet sich nur zur Anwesenheitskontrolle nicht zur Abstandsmessung (bei kontinuierliches Signal)

Es existieren zwei grundlegende Typen von Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung. Die folgenden Ausführungen fokussieren Einkopfsysteme.

Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

Messbereich



Abstandsmessung

- Messung von Objekten nur im grau schattierten Bereich jenseits der Blindzone möglich
- Keine Erfassung von Objekten innerhalb der Blindzone, da die reflektierten Signale während des Sendeimpulses und der Ausschwingzeit nicht empfangen werden können
- Keine Erkennung von Objekten jenseits der Reichweite auf Grund der Absorption
- Beeinflussung der Reichweite durch die gewählte Ultraschallfrequenz

Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

Die Ultraschallfrequenz

Ultraschallfrequenz [kHz]	Maximale Messentfernung [mm]	Wellenlänge [mm]	Zykluszeit [ms]
80	6.000	4,1	64
130	3.500	2,5	20
180	2.000	1,8	16
220	1.500	1,5	12
300	600	1,1	8
360	300	0,9	4

Einfluss der Ultraschallfrequenz

- Je höher die Ultraschallfrequenz, desto höher die Absorption
- Je höher die Ultraschallfrequenz, desto frühere Aussendung des nächsten Schallsignals

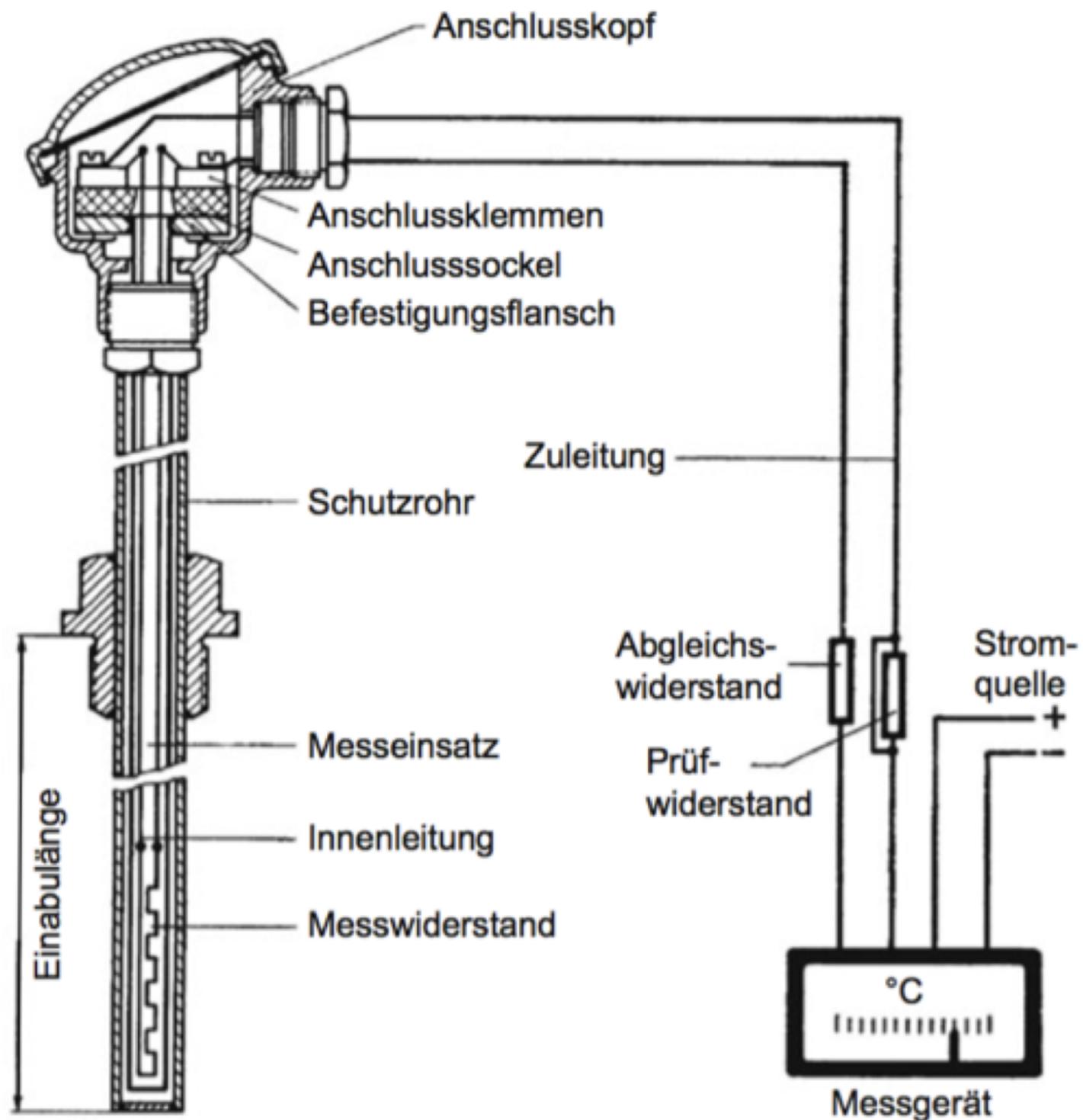
Schlussfolgerungen

- Je höher die Absorption, desto geringer die maximale Reichweite
- Je höher die Ultraschallfrequenz, desto kleiner Blindzone und Reichweite

Die Ultraschallfrequenz ist entsprechend des Anwendungskontextes auszuwählen.

Temperaturmessungen mittels Widerstandsthermometer

Grundlegender Aufbau

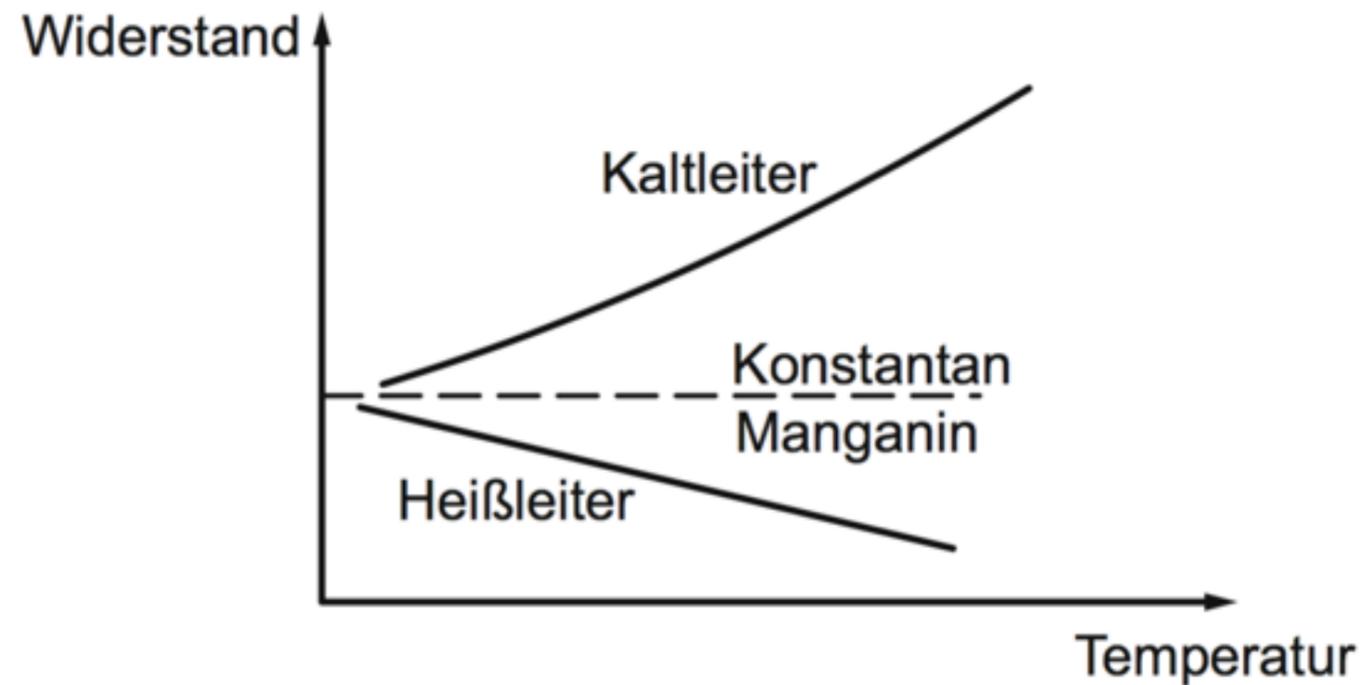


Funktionsweise

- Messung der Temperatur mittels Widerstandsthermometer über die Veränderung des Widerstands eines Materials in Abhängigkeit von dessen Temperatur
- Messwiderstand zum Schutz vor Außeneinwirkungen von einem Schutzrohr umgeben
- Nutzung auch von thermoelektrischen oder strahlungsbasierten Verfahren zur Temperaturmessung

Temperaturmessungen mittels Widerstandsthermometer

Widerstandssensortypen



Kaltleiter

- Positiver Temperaturkoeffizient
- Geeignete Kaltleiterstoffe sind z.B. Konstantan (Legierung aus 60% Kupfer und 40% Nickel)

Heißleiter

- Negativer Temperaturkoeffizient
- Geeignete Heißleiterstoffe sind z.B. Manganin (Legierung aus 58% Kupfer und 42% Nickel)

Der Sensorauswahl ist dem Temperaturbereich, dem Druck sowie der Aggressivität des zu messenden Mediums anzupassen.

Temperaturmessungen mittels Widerstandsthermometer

Widerstandssensortypen



Kaltleiter

- Werden auch als PTC-Widerstände bezeichnet
- Einsatz z.B. im Heimbereich für die Überwachung von Temperaturen für Heizungen

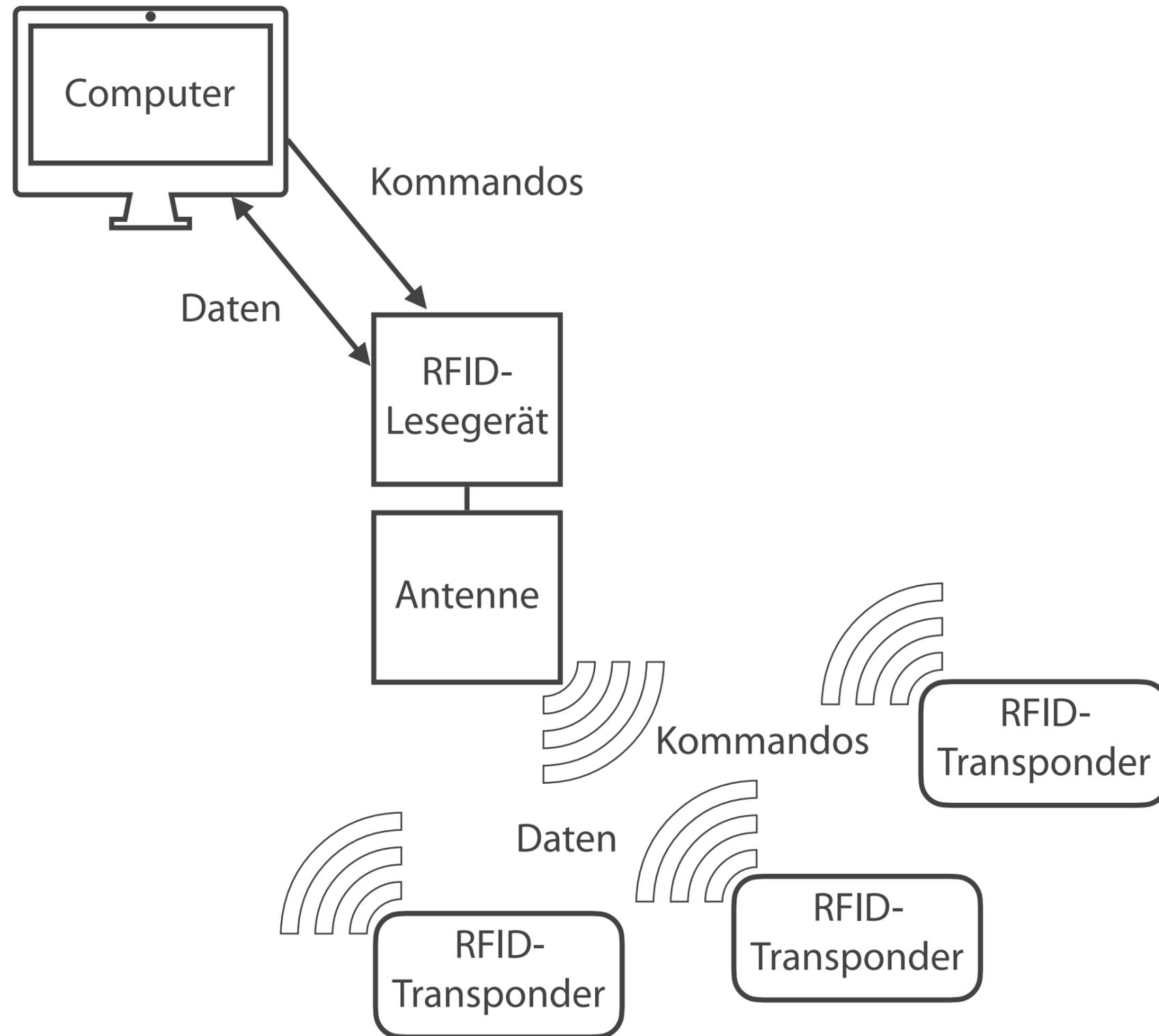


Heißleiter

- Werden auch als NTC-Widerstände bezeichnet
- Einsatz z.B. im Automobilbereich zur Messung der Kühlwassertemperatur

Komponenten eines RFID-Systems

Überblick

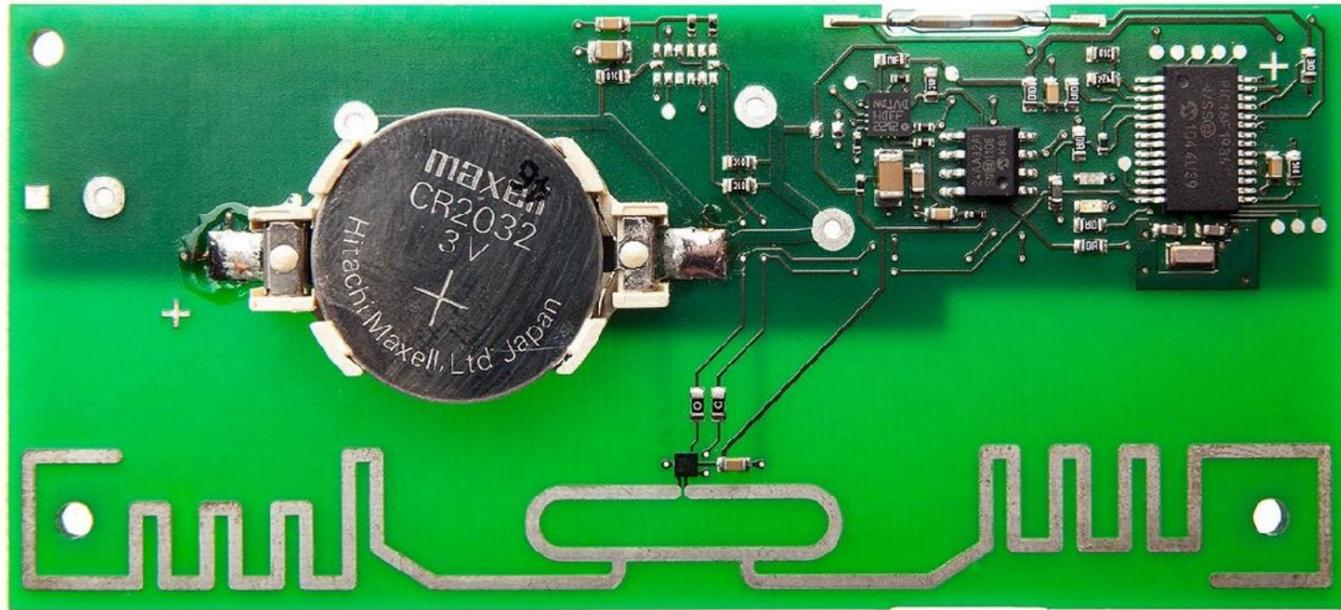


Wesentliche Komponenten

- **RFID-Transponder:** Informationsträger
- **Lesegerät mit Kopplungseinheit:** Funktion des Schreib- / Lesegeräts, Versorgung der Transponder mit der notwendigen Energie
- **Rechner:** Weiterverarbeitung der Informationen

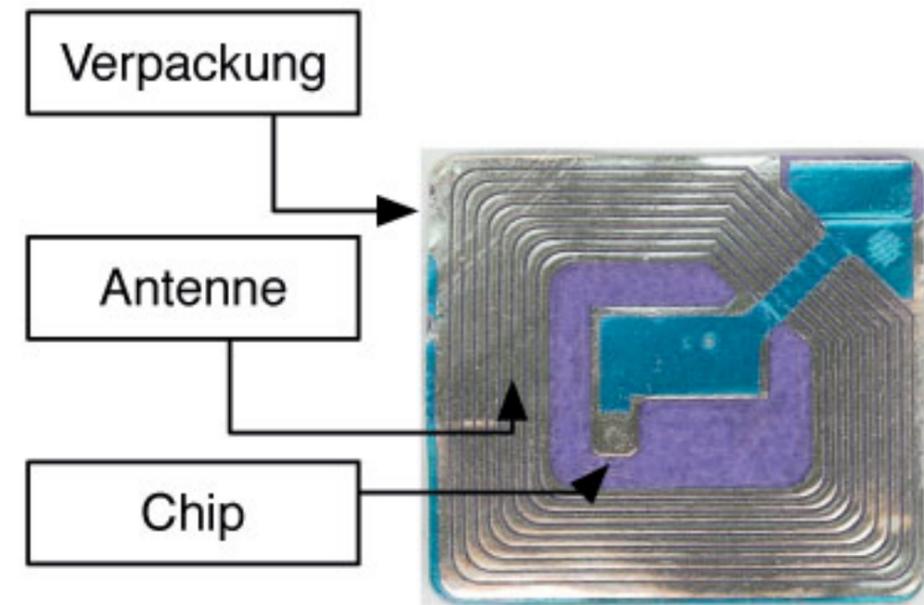
Komponenten eines RFID-Systems

RFID-Transponder



Aktive Transponder

- Interne Batterie für das Betreiben des Mikrochips und zum Senden der Daten

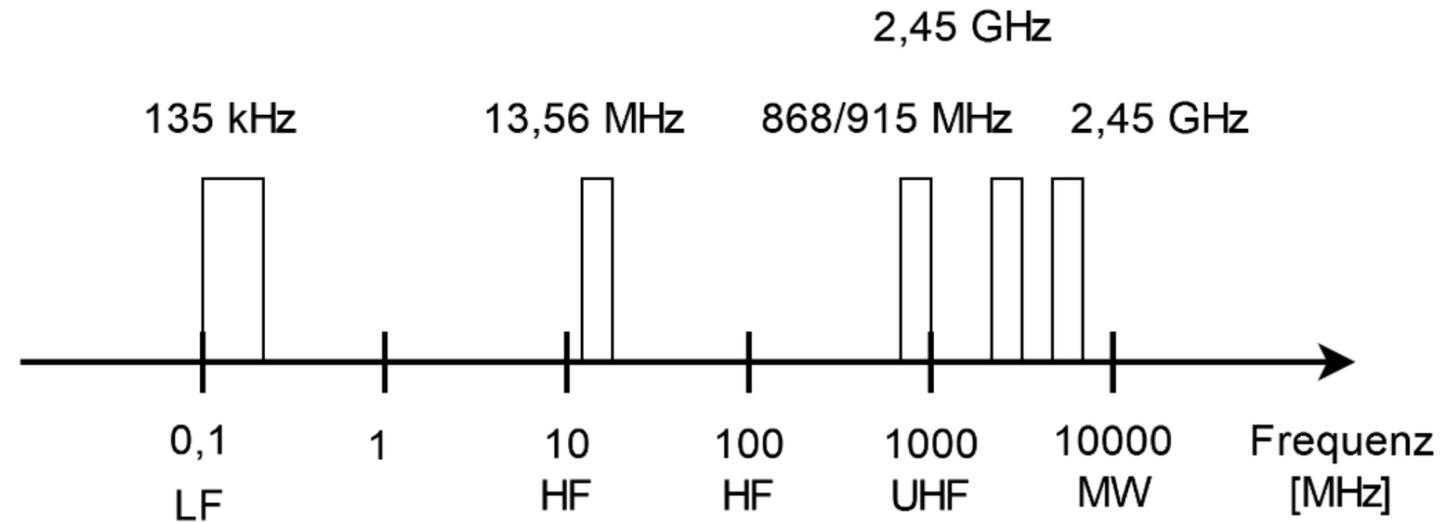


Passive Transponder

- Nutzung der Energie des Feldes, welches vom Lesegerät erzeugt wird

Die Transponder existieren in vielen unterschiedlichen Formen und Arten.

RFID Frequenzbereiche und Eigenschaften

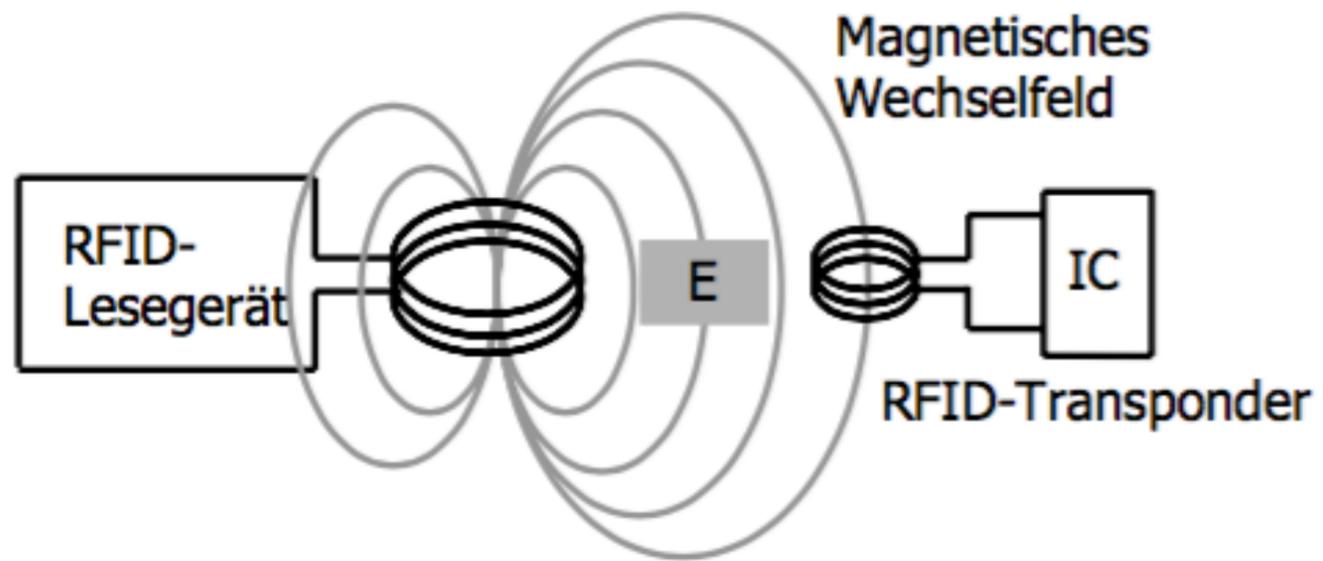


	Niederfrequenz (LF)	Hochfrequenz (HF)	Ultrahochfrequenz (UHF)	Mikrowelle (MW)
Frequenzbereich	0-135 kHz	3-30 MHz	200 MHz - 2 GHz	> 2 GHz
Typische Frequenz	134,2 kHz	13,56 MHz	868 MHz (EU) 915 MHz (USA)	2,45 GHz 5,8 GHz
Kopplungsart	Induktive Kopplung		Elektromagnetische Kopplung	
Typische Reichweite	< 1,5 m	< 1 m	Bei passiven Transponder abhängig von Sendeleistung: <3 bis 7 m	

Viele RFID-Frequenzbereiche liegen innerhalb des internationalen Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Band. Sie sind weltweit reserviert.

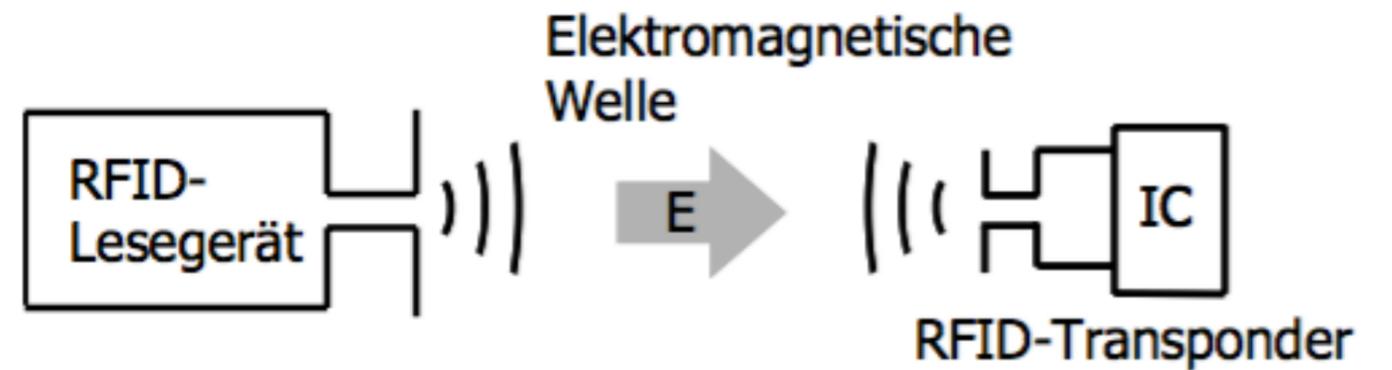
Komponenten eines RFID-Systems

Kopplungsverfahren



Induktive Kopplung

- Einsatz im Nahfeld
- Bei LF und HF erfolgt induktive Kopplung durch ein Magnetfeld



Elektromagnetische Kopplung

- Einsatz im Fernfeld
- Bei UHF und MW erfolgt Kopplung durch elektromagnetische Welle

Das Kopplungsverfahren ist abhängig von der Senderfrequenz.

RFID Anwendungsbeispiel

Warenidentifikation



Warenidentifikation mit EAN

- Ermöglicht Identifikation einer Produktgruppe
- Erfordert Sichtverbindung
- Nahezu kostenlos
- Einsatz u.a. im Einzelhandel

Die Warenidentifikation mittels RFID bietet zahlreiche Vorteile der allerdings für die Anschaffung erhöhte Kosten gegenüberstehen.



Warenidentifikation mit RFID

- Ermöglicht Identifikation des einzelnen Produkts
- Keine Sichtverbindung erforderlich, Bulk-Reading
- Kosten für RFID-Chip nicht vernachlässigbar
- Einsatz u.a. in Diebstahlsicherungen

RFID Anwendungsbeispiel

Anwendungen in der Produktion I



Warenerkennung

- Warenidentifikation durch RFID-Labels auf den Transport-/ Lagerbehältern
- Nahtlose Anbindung durch WLAN-Infrastruktur



Abbildung von Lagerbewegungen

- Ultraschall-Abstandssensor zwischen den Gabelzinken schaltet RFID-Lesegeräte ein
- Erfassung der Transponder mittels UHF-Antennen
- Buchung der entsprechenden Bewegungen im System

RFID ermöglicht die automatische Erfassung und somit die Grundlage für die automatisierte Buchung von Warenbewegungen.

RFID Anwendungsbeispiel

Anwendungen in der Produktion II



Einsatz von RFID-Tags zur

- Steuerung des Materialflusses
- Steuerung der Fertigungsschritte
- Sicherstellung der Produktqualität

Informationen auf den Tags

- Merkmale zur Identifikation
- Fertigungsschritte
- Qualitätsparameter

Der Einsatz von RFID Tags bildet eine wesentliche Grundlage für eine dezentrale Produktionssteuerung.

Plagiatschutz mittels RFID-Tags

Problemstellung

- Umsatzverluste
- Imageverluste durch vermeintliche Originalprodukte
- Produkthaftungsfälle als Folge des Einsatzes von Produkten mit mangelnder Qualität

Online-Verfahren

- Abfrage von eindeutiger Identifikationsnummer an einer zentralen Datenbank
- Nachvollziehbarkeit der Produkthistorie erschwert die Einschleusung von Plagiaten erheblich

Einsatz von RFID zur

- Unterscheidung von Originalprodukten und Produktfälschungen

Offline-Verfahren

- Nutzung von Verschlüsselungsverfahren
- Tag enthält privaten, nicht auslesbaren Schlüssel womit Zeichenkette verschlüsselt wird
- Entschlüsselung mittels öffentlichem Schlüssel liefert Aufschluss über die Echtheit des Produktes

RFID-Plagiatsschutzverfahren werden zur Echtheitsprüfung von Ersatzteilen in Druckern eingesetzt.



Einführung in Sensorik

Potenziale und Herausforderungen

Anbindung an die Informationssysteme

Anwendungsszenarien

Ausblick

Ausblick: Unternehmensübergreifende Kommunikation und Integration



Vertikale Integration

- Ankopplung der Produktionseinrichtungen an übergeordnete Managementsysteme (Produktionssteuerung)
- Fragestellung: Wie können Produktionssysteme unter Nutzung von cyber-physischen Systemen flexibel und rekonfigurierbar gestaltet werden

Horizontale Integration

- Kommunikation zwischen Anlageaggregaten zur Verkettung von Fertigungsabläufen
- Fragestellung: Wie können die Geschäftsstrategie eines Unternehmens, neue Wertschöpfungsnetze sowie neue Geschäftsmodelle nachhaltig auf Basis von CPS umgesetzt werden

Die vollständige Umsetzung erfordert vertikale als auch horizontale Integration.

Quellen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. (2022). Sensorik und Messtechnik wächst stabil auf hohem Niveau und investiert wieder. <https://www.ama-sensorik.de/presse/ama-pressemitteilungen-2022/>

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. (2024). Sensorik und Messtechnik: Umsatz stagniert, Auftragseingänge leicht rückläufig <https://www.ama-sensorik.de/verband/brancheninformationen/branchenstatistik-2024/>

Fw:Thinking. (2013). What is The Internet of Things?. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=LVI4sX6uVs&t=1s>

Hartmann, Thomas. (2009). RFID-Technik automatisiert die Warenbuchung in der Produktion. Maschinenmarkt 46/2009.

Hering, Ekbert & Schönfelder, Gert. (2018). Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete. 10.1007/978-3-658-12562-2.

Heinrich, Berthold, Linke, Petra & Glöckler, Michael. (2020). Grundlagen Automatisierung, Erfassen - Steuern - Regeln. 10.1007/978-3-658-27323-1.

Klaas, Volker & Vollmuth, Jan. (2008). Flexible Produktionsabläufe durch den Einsatz von RFID. <https://www.elektronikpraxis.de/flexible-produktionsablaeufe-durch-den-einsatz-von-rfid-a-109174/>

Lampe, Matthias, Flörkemeier, Christian & Haller, Stephan. (2005). Einführung in die RFID-Technologie. Springer.

Lüder, Arndt. (2014). Integration des Menschen in Szenarien der Industrie 4.0. Springer.

Naumann, Martin, Dietz, Thomas & Kuss, Alexander. (2017). Mensch-Maschine-Interaktion. Springer.

Pepperl+Fuchs Vertrieb Deutschland GmbH. (2012). Überlistungssichere Erkennung von Original-Ersatzteilen mit RFID.

PLCopen und OPC Foundation. (2014). Joint PLCopen and OPC Foundation Technical Working Group Releases Next Step in Transparent Communication. <https://opcfoundation.org/news/press-releases/joint-plcopen-opc-foundation-technical-working-group-releases-next-step-transparent-communication/>

Schöning, Harald & Dorchain, Marc (2014). Data Mining und Analyse. Springer.

Statista (2024) <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1420315/umfrage/anzahl-der-iot-geraete-weltweit/>

Veigt, M., Lappe, D. & Hribernik, K. (2013). Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. Industrie Management 1/2013, 15–18.

Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, A. & TenHompel, M. (2017). Handbuch Industrie 4.0. Springer.

Vogel-Heuser, B., Bayrak, G. & Frank, U. (2012). Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“. In: acatech MATERIALIEN, München.