

Duale Hochschule Baden-Württemberg
Mannheim

**Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Abstandssensoren am
Arduino anhand eines Ultraschall- und Infrarotsensors**

Studiengang Wirtschaftsinformatik

Studienrichtung Data Science

Verfasser/in:	Alina Buss, Phillip Lange, Lukas Benner, Ayman Madhour
Matrikelnummer:	4163246, 5920414, 6550912, 2148603
Kurs:	WWI19DSA, WWI19DSB
Vorlesung:	Integrationsseminar
Dozent:	Prof. Dr. Bernhard Drabant
Bearbeitungszeitraum:	15.11.2021 – 11.02.2022

Ehrenwörtliche Erklärung

Wir versichern hiermit, dass wir die vorliegende Arbeit mit dem Thema: „Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Abstandssensoren am Arduino anhand eines Ultraschall- und Infrarotsensors“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben.

Mannheim, 28.01.2022

Ort, Datum

Alina Buss



Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1.	Hinführung zur Thematik.....	1
2.	Grundlagen der Sensorik.....	2
2.1	Funktionsweise eines Sensors.....	2
2.1.1	Funktionsweise eines physikalischen Sensors.....	2
2.1.2	Funktionsweise einer Sensorfusion.....	5
2.1.3	Funktionsweise eines virtuellen Sensors.....	6
2.2	Einsatzgebiete von Sensoren.....	6
2.3	Anforderungen an Sensoren.....	7
2.4	Klassifikation von Sensoren.....	7
3.	Distanzsensoren.....	9
3.1	Ultraschall-Sensoren.....	9
3.1.1	Piezoelektrische Effekt.....	9
3.1.2	Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors.....	11
3.1.3	Objekt- und Umwelteinflüsse.....	14
3.1.4	Anwendungsgebiete.....	14
3.2	Optoelektronische Infrarot-Sensoren.....	15
3.2.1	Elektrolumineszenz- und fotoelektrische Effekt.....	15
3.2.2	Optoelektronische Bauteile.....	17
3.2.3	Funktionsweise optoelektronischer Abstandssensoren.....	20
3.2.4	Objekteinflüsse.....	24
3.2.5	Anwendungsgebiete.....	24
4.	Sensorschnittstellen.....	25
5.	Mikrocontroller-Technik.....	27
6.	Arduino.....	28
6.1	Arduino-Board.....	28
6.2	Arduino-IDE.....	30
7.	Praktische Anwendung.....	32
7.1	Implementierung eines Ultraschallsensors am Arduino.....	32
7.1.1	Implementierung eines PING-Sensors.....	32
7.1.2	Implementierung eines HC-SR04-Sensors.....	35
7.1.3	Praxisbeispiel: Abstandsmesser für die Garage mithilfe von Ultraschall-Sensoren.....	37
7.2	Implementierung eines Infrarotsensors am Arduino.....	39
7.2.1	Implementierung eines FC-51-Sensors.....	39
7.2.2	Implementierung eines GP2Y0A710K0F-Sensors.....	41
7.2.3	Praxisbeispiel: Abstandsmesser für die Garage mithilfe von Infrarot-Sensoren.....	43

8. Resümee.....	44
Literaturverzeichnis.....	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Wirkprinzips eines Sensor-Systems (4 p. 1).....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines direkten (links) und indirekten (rechts) Wandler (5 p. 21)	3
Abbildung 3: Grafische Darstellung der verschiedenen Kennlinienarten (5 p. 9)	3
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines intelligenten Sensors (5 p. 24)	4
Abbildung 5: Sensoren als Teil eines Regelungssystems (5 p. 4).....	5
Abbildung 6: Grundprinzip der zentralen (oben) und dezentralen (unten) Sensorfusion (5 p. 17)	5
Abbildung 7: Funktionsweise virtueller Sensoren (5 p. 16)	6
Abbildung 8: Grafische Darstellung des longitudinalen piezoelektrischen Effektes (5 p. 49)	10
Abbildung 9: Aufbau eines Ultraschall-Wandlers (5 p. 116)	11
Abbildung 10: Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors im Tastbetrieb (4 p. 178)	13
Abbildung 11: Einteilung der Schall-Keule eines Ultraschall-Sensors (4 p. 180)	13
Abbildung 12: Übersicht über die unterschiedlichen Messprinzipien der optoelektronischen Sensoren (4 p. 163)	15
Abbildung 13: Grafische Darstellung des äußeren fotoelektrischen Effektes (5 p. 53)	16
Abbildung 14: Grafische Darstellung des inneren fotoelektrischen Effektes (5 p. 53)	16
Abbildung 15: schematische Darstellung einer Laserdiode (4 p. 164)	17
Abbildung 16: Grafische Darstellung eines pn-Überganges mit Raumladungszone (10 p. 122).....	18
Abbildung 17: schematische Darstellung der Funktionsweise eines PSD-Elementes (4 p. 166).....	19
Abbildung 18: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer CCD-Zeile (4 p. 166)	19
Abbildung 19: Schema des Triangulations-, Puls-, Phasen- und Frequenzmessverfahrens (4 p. 167) ..	20
Abbildung 20: Schematische Darstellung der biaxialen Optik (links) und Autokollimationsoptik (rechts) (4 p. 168).....	21
Abbildung 21: Schematischer Aufbau eines Triangulationssensors (4 p. 170)	21
Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Pulslaufzeitsensors (4 p. 172)	22
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Phasenlaufzeitsensors (4 p. 173)	23
Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Frequenzlaufzeitsensors (4 p. 173)	24
Abbildung 25: OSI-Referenzmodell (5 p. 163)	26
Abbildung 26: Abgrenzung der Begriffe "Mikroprozessor", "Mikrorechner" und "Mikrorechnersystem" (15 p. 2)	27
Abbildung 27: Darstellung der wichtigsten Komponenten eines Arduino-Boards (17 Kap. 1).....	28
Abbildung 28: Auszug aus der Arduino-IDE (7 Kap. 1)	30
Abbildung 29: Verbindung eines PING-Ultraschallsensors mit einem Arduino (17 Kap. 5)	33
Abbildung 30: Verbindung eines HC-SR04-Ultraschallsensors mit einem Arduino (6 Kap. 4)	35
Abbildung 31: Arduino-Schaltung für einen Abstandsmelder mit LED-Anzeige (6 Kap. 4)	37
Abbildung 32: Schaltplan eines IR-FC-51-Sensors mit dem Arduino (18)	40
Abbildung 33: Schaltplan zwischen Arduino und GP2Y0A710K0F-Sensor (14).....	41
Abbildung 34: Normale Abstands-Spannungs-Kurve (links) und inverse Abstands-Spannungs-Kurve (rechts) (14).....	42

Abkürzungsverzeichnis

CAN	Controller Area Network
CCD	Charge coupled Device
COM	Communication
CPU	Central Processing Unit
I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IR	Infrarot
LED	Light-emitting diode
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MTBF	Mean-time between failure
OSI	Open System Interconnection
PLCD	Permanent-magnetic-Linear-Contactless-Displacement
PSD	Position-sensitive Device
PSI5	Peripheral Sensor Interface 5
SENT	Single Edge Nibble Transmission
USB	Universal Serial Bus

Glossar

Aktor	Bauelement, das elektrische Signale in mechanische Bewegung oder in andere physikalische Größen umsetzt
Absorption	Aufnehmen von Wellen oder Teilchen durch einen absorbierenden Stoff
Anionen	Negativ geladenes Ion
Asphärische Optik	Rotationssymmetrische Optik, deren Krümmungsradius sich radial mit dem Abstand vom Mittelpunkt ändert
Baudrate	Anzahl der übertragenen Symbole pro Zeitspanne
Bussystem	Gesamtheit aller Verbindungen zum Senden und Empfangen von Daten zwischen den einzelnen Bauteilen und Geräten (Funktionseinheiten) eines Computers
Cache	Schneller Zwischenspeicher
Compiler	Computerprogramm, das Quellcode einer bestimmten Programmiersprache in eine Form übersetzt, die von einem Computer (direkter) ausgeführt werden kann
Datalogger	Prozessorgesteuerte Speichereinheit, welche Daten in einem bestimmten Rhythmus über eine Schnittstelle aufnimmt und auf einem Speichermedium ablegt
Dehnungsmessstreifen	Messeinrichtungen zur Erfassung von dehnenden und stauchenden Verformungen
Diffusion	physikalischer Prozess, der zu einer gleichmäßigen Verteilung von Teilchen und somit vollständigen Durchmischung zweier Stoffe führt
Divergenz	Auseinanderstreben
Editor	Bearbeitungsprogramm zur Erstellung und Bearbeitung von digitalen Daten
Elektronen	Negativ geladenes, subatomares Teilchen
Emission	Aussendung von Teilchen, Stoffen, (Schall-)Wellen oder Strahlung
Ethernet	Technik für kabelgebundene Datennetze, die Software und/oder Hardware miteinander verbindet
Flash-Speicher	Digitale Speicherbausteine für eine nichtflüchtige Speicherung ohne Erhaltungs-Energieverbrauch

Hardware	Oberbegriff für die physischen Komponenten (die elektronischen und mechanischen Bestandteile) eines datenverarbeitenden Systems, als Komplement zu Software (den Programmen und Daten)
Impedanz	Wellenwiderstand des Mediums
Ionen	elektrisch geladenes Atom oder Molekül
Java	Programmiersprache
Jumper-Wire	Einfache Kabel mit Anschlussstiften an jedem Ende, mit denen zwei Punkte ohne Löten miteinander verbunden werden können
Justierung	Möglichst exakte Einstellen durch einen fachmännischen Eingriff
Kalibrierung	Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung gegenüber einem anderen Gerät oder einer anderen Maßverkörperung, die in diesem Fall als Normal bezeichnet werden
Kalman-Filter	Mathematisches Verfahren zur iterativen Schätzung von Parametern zur Beschreibung von Systemzuständen
Kationen	Positiv geladenes Ion
Kinetik	Teilgebiet der Mechanik, das die Lehre von den Bewegungen unter dem Einfluss innerer oder äußerer Kräfte umfasst
Kondensator	Passives elektrisches Bauelement mit der Fähigkeit, in einem Gleichstromkreis elektrische Ladung und die damit zusammenhängende Energie statisch in einem elektrischen Feld zu speichern
Konvektion	Transport physikalischer Zustandsgrößen in strömenden Gasen oder Flüssigkeiten
Konvergenz	Annäherung
Leistungsband	Energieband, das am absoluten Temperatur-Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$) über dem höchsten mit Elektronen besetzten Energieband (Valenzband) liegt.
Linux	Freie, unixähnliche Mehrbenutzer-Betriebssysteme, die auf dem Linux-Kernel und wesentlich auf GNU-Software basieren
Loader	Dienst eines Betriebssystems, ausführbare Programme in den Arbeitsspeicher zu laden und auszuführen
Mac	Betriebssystem des kalifornischen Hard- und Software-Unternehmens Apple für Laptop- und Desktop-Computer der Mac-Reihe

Peripherie-Komponente	Gerät, das sich außerhalb der Zentraleinheit eines Computers befindet
Photon	„Bausteine“ elektromagnetischer Strahlung, so etwas wie „Lichtteilchen“
Polarisation	Physikalische Größe aus der Elektrodynamik, die die Stärke des Dipolmoments in einem dielektrischen Material kennzeichnet
Port	Teil einer Netzwerk-Adresse, der die Zuordnung von TCP- und UDP-Verbindungen und -Datenpaketen zu Server- und Client-Programmen durch Betriebssysteme bewirkt
Rechenwerk	Schaltwerk zur Ausführung der Maschinenbefehle eines Computerprogramms
Reflexion	Zurückgeworfenwerden von Licht, Schall, Wärme o. Ä.
Rekombination	Wiedervereinigung der durch Dissoziation oder Ionisation gebildeten, entgegengesetzt elektrisch geladenen Teile eines Moleküls bzw. eines positiven Ions mit einem Elektron zu einem neutralen Gebilde
Shields	Selbstständiges Modul, welches passend zu den Pins auf das Arduino-Board gesteckt werden kann
Software	Programm oder eine Menge von Programmen, die dazu dienen, einen Computer zu betreiben
Steuerwerk	Funktionseinheit eines Prozessors, die den Ablauf der Befehlsverarbeitung steuert
Treiber	Computerprogramm oder Softwaremodul, das die Interaktion mit angeschlossenen, eingebauten (Hardware) oder virtuellen Geräten steuert
Valenzband	Höchste vollbesetzte Elektronen-Energieband am absoluten Nullpunkt
Windows	Ursprünglich eine von Microsoft entwickelte grafische Benutzeroberfläche, aus der später eine Reihe von eigenständigen Betriebssystemen entstanden ist

Quellcode-Verzeichnis

Quellcode 1: Variablendeklaration am PING-Sensor	33
Quellcode 2: Setup-Funktion am PING-Sensor.....	33
Quellcode 3: Loop-Funktion am PING-Sensor.....	34
Quellcode 4: Variablendeklaration am HC-SR04-Sensor.....	35
Quellcode 5: Setup-Funktion am HC-SR04-Sensor	35
Quellcode 6: Loop-Funktion am HC-SR04-Sensor.....	36
Quellcode 7: Variablendeklaration für zusätzliche LEDs	38
Quellcode 8: Setup-Funktion-Zusatz für LEDs.....	38
Quellcode 9: Loop-Funktion-Zusatz für LEDs	39
Quellcode 10: Programmcode für FC-51-Sensor.....	40
Quellcode 11: Programmcode für GP2Y0A710K0F-Sensors.....	42

1. Hinführung zur Thematik

Mithilfe von Sensoren können vielfältige Erscheinungen der physischen Welt wahrgenommen und gemessen werden. In Kombination mit einer Mikrocontroller-Platine, wie beispielsweise dem Arduino, können die Ergebnisse ausgewertet und darauf basierend automatische Aktionen ausgelöst werden. Dadurch können fast unbegrenzt viele Anwendungsfelder abgedeckt werden. (1 Vorwort)

In der folgenden Ausarbeitung werden primär die Grundlagen der Sensorik untersucht, um ein grundlegendes Verständnis über Sensor-System, bestehend aus Sensor-Elementen, Sensor-Schnittstellen und Auswerte-Elektronik, sicherzustellen. Davon ausgehend wird der Blick auf die Distanzsensoren gelegt mit einem besonderen Fokus auf die Abstandssensoren mit Ultraschall- und Infrarot-Technik. Nachdem die detaillierte Funktionsweise und die spezifischen Einsatzmöglichkeiten von Ultraschall- und Infrarot-Sensoren untersucht wurden, soll analysiert werden, über welche Möglichkeiten, die gemessenen Sensorwerte übertragen werden können. Hierfür werden die analogen und digitalen Sensorschnittstellen kurz betrachtet. Darauf folgend wird die Mikrocontroller-Technik für die Auswerte-Elektronik oberflächlich untersucht. Hierbei wird der Fokus insbesondere auf den Arduino gelegt, dessen Hard- und Software-Komponenten genauer betrachtet werden. Hierfür wird ein deskriptiver Ansatz auf Literaturbasis gewählt.

Abschließend wird praktisch untersucht, wie verschiedene Ultraschall- und Infrarot-Sensoren mit dem Arduino über analoge und digitale Pins verbunden werden können, um Abstandsmessungen zu realisieren. Hierbei soll für beide Sensortypen untersucht werden, wie man mithilfe dieser einen Abstandsmesser für die Garage implementieren kann. Hierfür wurde sich sowohl an praktischen Beispielen in der Literatur als auch an öffentlichen GitHub-Repositorien orientiert.

2. Grundlagen der Sensorik

Laut dem Duden versteht man unter der Sensorik ein „Teilgebiet der Messtechnik, das sich mit der Entwicklung und dem Einsatz von Sensoren befasst“. Der Sensor entspricht dabei einem „Messfühler“(2), welcher physikalische Messgrößen wahrnimmt und zu elektrischen Signalen umwandelt. Damit bilden die Sensoren den Startpunkt jeder elektrischen Messung von physikalischen Größen in der realen Welt.

Hierbei wird zwischen Sensorelementen und Sensorsystemen unterschieden. Das Sensorelement entspricht dem eigentlichen Messfühler, der die physikalischen Größen misst und in elektrische Signale umwandelt. Das Sensorsystem hingegen umfasst die einzelnen Sensorelemente, sowie einen Teil der Elektronik, der notwendig ist, um die elektrischen Signale aufzubereiten und zu konkreten Ausgangssignalen umzuwandeln. (3 p. 1)

Im Folgenden wird primär die Funktionsweise eines Sensorsystems betrachtet. Davon ausgehend werden die Einsatzgebiete und die Anforderungen untersucht, die an einen Sensor gestellt werden können. Abschließend wird die Klassifikation der verschiedenen Sensoren betrachtet.

2.1 Funktionsweise eines Sensors

Im Folgenden wird primär die Funktionsweise eines einfachen physikalischen Sensors innerhalb eines Sensorsystems betrachtet. Davon ausgehend wird die Kombination mehrerer physikalischer Sensoren innerhalb einer Sensorfusion untersucht. Abschließend wird die Funktionsweise eines virtuellen Sensors dargestellt.

2.1.1 Funktionsweise eines physikalischen Sensors

Ein gewöhnlicher, physikalischer Sensor respektive ein Sensorsystem besteht aus zwei Teilen: einem Sensor-Element respektive einem Wandler und der Auswerte-Elektronik. Eine grafische Darstellung eines Sensorsystems ist in Abbildung 1 erkennbar. (4 p. 1, 5 pp. 20–21)

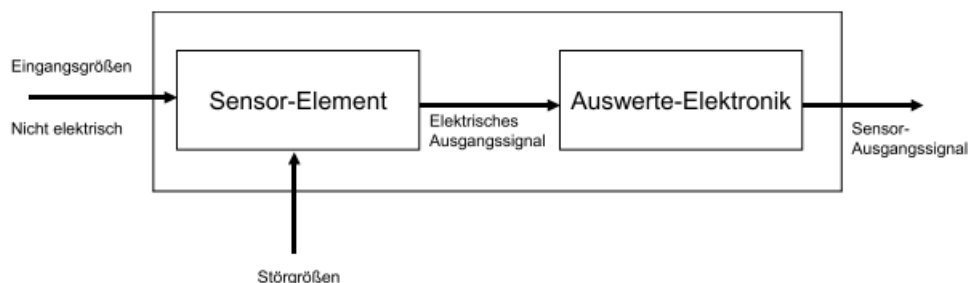


Abbildung 1: Darstellung des Wirkprinzips eines Sensor-Systems (4 p. 1)

Das Sensor-Element wandelt hierbei die technischen, meist nicht-elektrischen Eingangs-Messgrößen eines physikalischen Systems in ein elektrisches Ausgangssignal um. Die technischen Eingangsmessgrößen können hierbei grob in die Kategorien „chemischen/physikalisch“, „mechanisch“, „thermisch“ und „elektrisch/magnetisch“ klassifiziert werden. Für die Umwandlung der nicht-

elektrischen Eingangs-Messgrößen in die elektrischen Ausgangsmessgrößen, nutzen die Sensor-Elemente physikalische Effekte. (3 pp. 1–2, 5 pp. 3–4) Solche physikalischen Effekte sind beispielsweise der Piezoelektrische Effekt (siehe Kapitel 3.1.1.), der Gauß-Effekt, der Hall-Effekt und der Wirbelstrom-Effekt. Aber auch elektrooptische, elektrochemische, pyroelektrische, fotoelektrische (siehe Kapitel 3.2.1.) und akustische Effekte zählen dazu. (4 pp. 3–120)

Die Umwandlung der Eingangsgrößen in die primären elektrischen Ausgangsgrößen kann hierbei entweder direkt oder indirekt innerhalb des Wandlers erfolgen. Bei der direkten Umwandlung wird aus der nicht-elektrischen Eingangsgröße direkt die elektrische Ausgangsgröße ermittelt. Diese direkte Umwandlung ist allerdings bei vielen Sensoren nicht realisierbar. Daher müssen diese die nicht-elektrischen Eingangsgrößen indirekt über einen zusätzlichen Umformer primär in eine nicht-elektrische Zwischengröße umformen und daraufhin in die primäre elektrische Größe umwandeln. Ein solcher indirekter Wandler wird beispielsweise bei Kraftsensoren benötigt, da hierbei die Kraft als Eingangsgröße zuerst in die nicht-elektrische Zwischengröße „Verformung“ umgeformt wird, die daraufhin mithilfe eines Dehnungsmessstreifens in die primäre elektrische Ausgangsgröße „Spannung“ umgewandelt wird. Eine schematische Darstellung eines direkten und indirekten Wandler ist in Abbildung 2 erkennbar. (5 pp. 20–21)

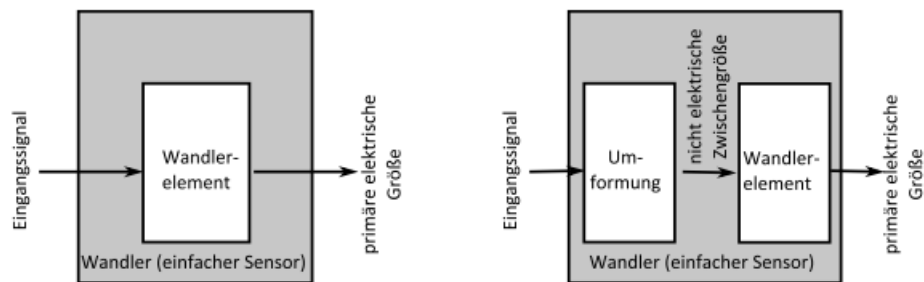


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines direkten (links) und indirekten (rechts) Wandler (5 p. 21)

Das elektrische Ausgangssignal hängt dabei hauptsächlich von den nicht-elektrischen Eingangsgrößen ab. (4 pp. 3–120) Der Zusammenhang zwischen einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße wird dabei als Kennlinie bezeichnet. Hierbei wird zwischen stetig linearen, stetig nicht-linearen und unstetigen Kennlinien unterschieden. In der Abbildung 3 wird von links nach rechts zuerst eine stetig lineare Kennlinie dargestellt, gefolgt von einer stetig nicht-linearen, einer unstetig mehrfach gestuften und einer unstetig zweistufigen Kennlinie mit Hysterese. (5 pp. 7–9)

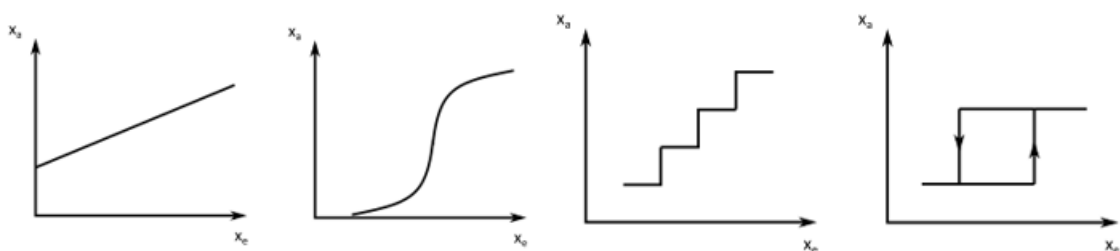


Abbildung 3: Grafische Darstellung der verschiedenen Kennlinienarten (5 p. 9)

Mithilfe der Kennlinien kann außerdem die Empfindlichkeit des Sensors ermittelt werden. Hierbei entspricht eine starke Steigung der Kennlinie einer hohen Empfindlichkeit des Messfühlers und vice versa. (5 pp. 7–8)

Allerdings unterliegt eine Messung auch immer einer Messabweichung, die durch Störgrößen beeinflusst wird. Bei diesen Störgrößen kann es sich beispielsweise um externe Faktoren handeln, aber

auch um Verzerrungen der Ergebnisse, die auf den Sensor selbst zurückzuführen sind. Hierbei wird zwischen zufälligen und systematischen Messabweichungen unterschieden. Da sich die zufälligen Messabweichungen gleichmäßig um den Mittelwert herumstreuen, können diese durch mehrmaliges Messen und anschließender Mittelung reduziert werden. Bei den systematischen Messabweichungen hingegen handelt es sich um Abweichungen mit einem konstanten Betrag, der keiner zeitlichen Veränderung unterliegt. Dieser kann durch Kalibrierung ermittelt werden. Hierbei wird ein Normal-Wert bestimmt, durch den mithilfe des Messwertes die Abweichung ermittelt werden kann. Diese Abweichung muss nun so gut wie möglich mithilfe von Justierung minimiert oder zumindest mit eingerechnet werden. (5 pp. 4–19)

Das elektrische Ausgangssignal wird daraufhin an die Auswerte-Elektronik weitergegeben. Dies kann über die verschiedenen Sensor-Schnittstellen erfolgen, die in Kapitel 4 genauer betrachtet werden. Innerhalb der Auswerte-Elektronik werden die elektrischen Ausgangssignale daraufhin durch Software-Programme oder eine Schaltungselektronik aufbereitet und in Sensor-Ausgangssignale umgewandelt. Für gewöhnlich ist die Auswerte-Elektronik hierbei in einem externen Mikroprozessor oder Mikrocontroller untergebracht. Der Unterschied zwischen einem Mikrocontroller und einem Mikroprozessor wird in Kapitel 5 genauer erläutert. Demzufolge kann die Auswerte-Elektronik aber auch in der Mikrocontroller-Platine des Arduinos umgesetzt werden, die in Kapitel 6 genauer betrachtet wird.

Allerdings erlaubt die fortschreitende Miniaturisierung ebenfalls eine Unterbringung eines Sensor-Elementes und der Auswerte-Elektronik innerhalb eines einzigen Sensors. (4 p. 1) Wird innerhalb eines Sensors ein Wandler und eine analoge Auswerte-Elektronik untergebracht, spricht man von einem „integrierten Sensor“. Wird zusätzlich zu der analogen Auswerte-Elektronik ebenfalls eine digitale Logik integriert, bezeichnet man diese Sorte von Sensor als „intelligenten Sensor“. (5 pp. 21–24) Eine schematische Darstellung der verschiedenen Integrationsarten ist in Abbildung 4 erkennbar.

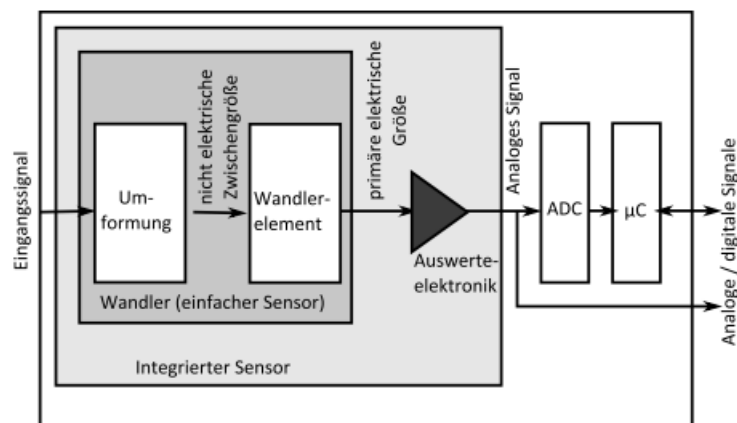


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines intelligenten Sensors (5 p. 24)

Die Sensor-Ausgangssignale können daraufhin für Steuerungs- und Auswertezwecke genutzt werden. (4 p. 1) Dadurch kann beispielsweise ein Aktor angesteuert werden, der eine bestimmte Aktion ausführt, die auf das physikalische System zurückwirkt. Dadurch wird der Sensor zu einem Bindeglied zwischen dem beobachteten physikalischen System und der Informationsverarbeitung und zu einem Teil eines Regelungssystems, wie man in Abbildung 5 erkennen kann. (5 p. 4)

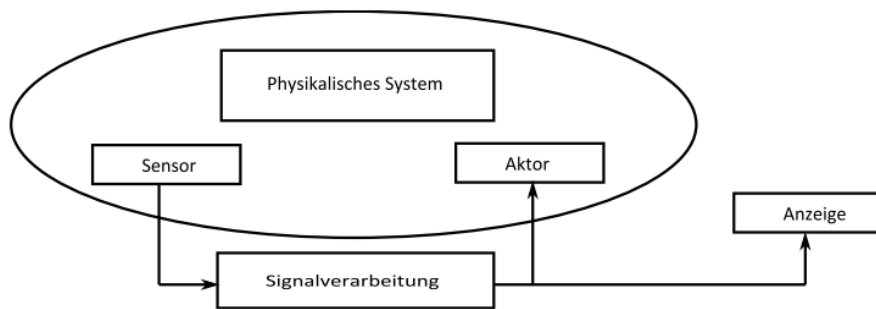


Abbildung 5: Sensoren als Teil eines Regelungssystems (5 p. 4)

2.1.2 Funktionsweise einer Sensorfusion

Innerhalb eines Sensorsystems können allerdings auch mehr als nur ein Sensor-Element verwendet werden. Sobald die Informationen und Daten von zwei oder mehr Sensor-Elementen zusammengeführt werden, spricht man von einer Sensorfusion. Hierfür werden die Sensor-Elemente zu Sensor-Clustern zusammengefasst. Dabei muss beachtet werden, dass die Messungen der einzelnen Sensor-Elemente synchron erfolgen und diese in Echtzeit übertragen werden müssen. Die erfassten Daten können daraufhin entweder zentral oder dezentral an die Auswerte-Elektronik weitergegeben werden. (5 p. 17) Eine grafische Darstellung der zentralen und dezentralen Sensorfusion ist in Abbildung 6 erkennbar.

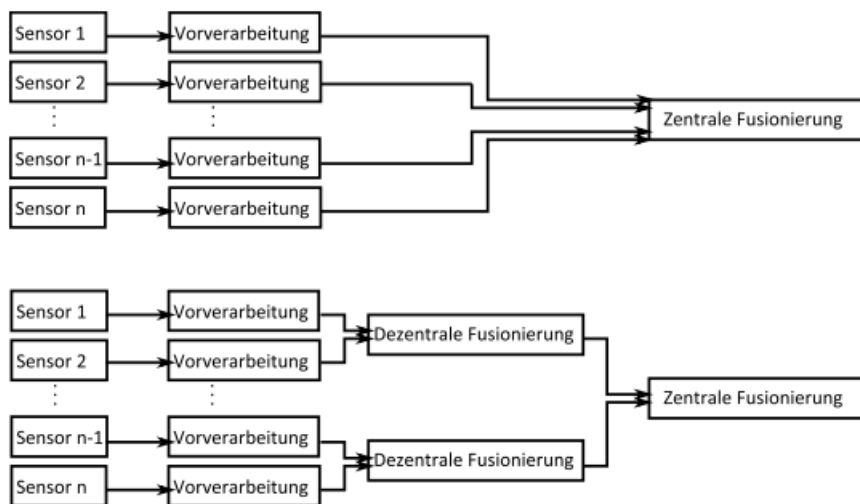


Abbildung 6: Grundprinzip der zentralen (oben) und dezentralen (unten) Sensorfusion (5 p. 17)

Innerhalb der Auswerte-Elektronik werden die Daten daraufhin in der Regel zuerst aufwendig gefiltert, beispielsweise mit einem Kalman-Filter, und danach in geeigneter Weise miteinander verknüpft. Dadurch können neue und weiterführende Informationen abgeleitet oder eine höhere Güte der Daten erreicht werden.

Die Datenfusion kann hierbei auf verschiedenen Abstraktionsebenen stattfinden – der Datenebene, der Eigenschaftsebene und der Entscheidungsebene. Auf der untersten Datenebene werden ausschließlich einfache Sensoren miteinander vernetzt und die reinen Messdaten verarbeitet. Dies kann beispielsweise in der Vernetzung von Temperatursensoren erfolgen. Auf der mittleren Eigenschaftsebene werden zusätzlich dazu die Daten der Sensoren derart verknüpft, dass neue Muster

erkannt und weitere Zusammenhänge daraus extrahiert werden können. Dadurch kann beispielsweise aus den Sensordaten „Temperatur“, „Luftdruck“ und „Luftfeuchtigkeit“ eine Wetterprognose gefolgert werden. Auf der obersten Entscheidungsebene werden die fusionierten Daten zur Entscheidungsfindung verwendet, wie es beispielsweise bei der künstlich Intelligenz und bei den Robotern der Fall ist. Hierfür werden die gemessenen Daten gefiltert, fusioniert und plausibilisiert, um auf Basis davon Entscheidungen und Aktionen abzuleiten. (5 pp. 16–18)

2.1.3 Funktionsweise eines virtuellen Sensors

Neben den physikalischen Sensoren existieren außerdem virtuelle Sensoren. Diese ermitteln die zu messende Größe indirekt mithilfe von Software. Hierfür wird auf andere, einfach zu messende Größen zurückgegriffen, die durch weitere physische Sensoren, bereits ermittelt wurden. Aus diesen einfachen Größen kann daraufhin mithilfe geeigneter Modelle die ursprünglich gewünschte Messgröße gefolgert werden. Das verwendete Modell ist hierbei stark abhängig von dem Anwendungsfall und dem Einsatzgebiet. (5 pp. 15–16) Eine grafische Darstellung der Funktionsweise virtueller Sensoren ist in Abbildung 7 erkennbar.

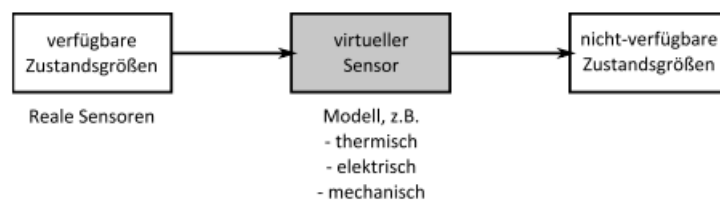


Abbildung 7: Funktionsweise virtueller Sensoren (5 p. 16)

Der Einsatz virtueller Sensoren ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn die benötigte Größe entweder schwer oder gar nicht messbar ist oder wenn die Verwendung realer Sensoren zu teuer ist. Allerdings muss das System hierfür in geeigneter Form modellierbar sein, um die Berechnungen korrekt durchführen zu können. Außerdem muss eine leistungsfähige Hardware vorliegen, die die Berechnung in Echtzeit ermöglicht. (5 pp. 15–16)

2.2 Einsatzgebiete von Sensoren

Die ersten Sensoren wurden bereits in den 30er Jahren verwendet. Hierbei wurden Licht- und Temperaturmessungen durchgeführt. Als in den 70er Jahren dann die ersten temperatur- und druckempfindlichen Halbleiterbauelemente entwickelt wurden, begann die Verbreitung der Sensoren. (3 p. 1)

Heute gibt es etwa 100.000 verschiedene Sensoren, die mithilfe von ungefähr 2000 unterschiedlichen grundlegenden Sensorverfahren die unterschiedlichsten Messgrößen wahrnehmen und verarbeiten können. Dadurch kann beispielsweise der Füllstand, der Druck, die Temperatur, der Durchfluss, die Drehzahl, die Kraft, die Beschleunigung und die Feuchtigkeit gemessen werden. Die größten Wachstumsraten haben dabei die Abstands-, Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, Drehzahl-, Bio- und optischen Sensoren.

Die Verwendung der verschiedenen Sensoren teilt sich dabei Stand 2014 in folgend Anwendungsgebiet auf: 49% in Automobilen, 27% im Haushalt, 14% für Messen, Steuern und Regeln, 5% in der Daten- und Nachrichtentechnik und 5% in der Unterhaltungselektronik. (3 pp. 2–6)

2.3 Anforderungen an Sensoren

Da es vielseitige Anwendungsgebiete für die Sensoren gibt, können auch viele verschiedene Anforderungen an diese gestellt werden. Diese können allerdings teilweise herausfordernd und konträr sein. Daher muss die Auswahl der passenden Sensoren immer anwendungsfallabhängig bestimmt werden.

Primär muss der Sensor die Funktionsanforderungen eines Messgerätes erfüllen. Dies bedeutet, dass er eine eindeutige und reproduzierbare Abbildung der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen realisieren muss. Hierbei sollen die Messabweichungen so weit wie möglich reduziert werden, um die Genauigkeit zu verbessern.

Neben der grundsätzlichen Funktionsweise können aber auch weitere Anforderungen an die Sensoren gestellt werden. Zu diesen zählen beispielsweise die Umwelanforderungen, die Schnittstellenanforderungen, die Signalverarbeitungsanforderungen, die Sicherheitsanforderungen, die Zuverlässigkeit, die Kalibrierung, die Testbarkeit, die gesetzlichen Normen und die Wirtschaftlichkeit. (5 pp. 18–20)

Bei den Umwelanforderungen müssen dabei die klimatischen, mechanischen und elektromagnetischen Anforderungen erfüllt werden, wie beispielsweise die benötigte Temperatur, die Beschleunigung und die Resistenz gegen Störungen.

Bei den Schnittstellenanforderungen werden insbesondere die elektrischen Schnittstellen betrachtet, die die elektrischen Ausgangsgrößen entweder über die Betriebsspannung oder über Signale weiterleiten. Bei der Weiterleitung über Signale können dabei analoge, digitale und mechanische Schnittstellen mit ihren entsprechenden Anforderungen betrachtet werden, wie beispielsweise die benötigte Spannung, Bitzahl und Busvereinbarung. Bei den Signalverarbeitungsanforderungen kann entsprechend die analoge und digitale Signalverarbeitung betrachtet werden, die eine bestimmte Verstärkung und Abtastrate benötigt.

Die Sicherheitsanforderungen umfassen die elektrische Sicherheit und die Systemsicherheit, während die Zuverlässigkeitsanforderungen die MTBF („Mean time between failure“) und die Redundanzen betrachten. Abschließend können für die Wirtschaftlichkeitsanforderungen verschiedene Technologien, sowie die optimale Stückzahl untersucht werden. (3 pp. 3–5)

2.4 Klassifikation von Sensoren

Aufgrund der Vielfalt an Sensoren, gibt es viele unterschiedliche Kriterien, nach denen diese klassifiziert werden können. Zu diesen zählen beispielsweise die betrachteten Messgrößen. Hierbei kann unter anderem nach mechanischen, thermischen, chemischen und elektrischen Messgrößen unterschieden werden. Alternativ kann aber auch nach dem Sensorprinzip differenziert werden. Hierbei wird untersucht, ob ein Sensor die Messgrößen berührungsfrei oder kontaktbasiert wahrnimmt. Auch eine Unterscheidung nach externen und internen Sensoren ist möglich. Bei externen

Sensoren handelt es sich hierbei um Sensoren, die die Umgebungsgrößen ermitteln, wie beispielsweise Licht und Wärme, während interne Sensoren innere Größen, wie Geschwindigkeit und Kraft, wahrnehmen. Zusätzlich kann ebenfalls eine Differenzierung nach aktiven und passiven Sensoren vorgenommen werden. Aktive Sensoren wandeln die gemessenen Größen dabei ohne externe Hilfsmittel direkt in ein elektrisches Signal um, während passive Sensoren mit einer Hilfsenergie versorgt werden müssen, um das elektrische Signal zu erzeugen. Neben diesen Kriterien kann aber auch eine Differenzierung der Sensoren nach Integrationsgrad, Kennlinienart, Technologie, Schnittstellen, Anwendungsbereich und Zuverlässigkeit erfolgen. (5 p. 15)

Am häufigsten wird allerdings die Klassifikation der Sensoren nach ihrer wahrgenommenen Messgröße verwendet. So kann beispielsweise zwischen Temperatur-, Optik-, Distanz-, Bewegungs-, Kraft-, Ort-, Gas- und Elektrosensoren unterschieden werden. (6 pp. 6–7) Im Folgenden wird der Fokus besonders auf die Distanzsensoren gelegt.

3. Distanzsensoren

Innerhalb der Distanzsensoren kann zwischen Weg- und Abstandssensoren differenziert werden. Wegsensoren besitzen dabei ein positionsgebendes Element, wie beispielsweise einem Magneten, der fest mit einem bewegten Teil verankert ist. Von diesem positionsgebenden Element soll daraufhin die lineare Verschiebung ermittelt werden. Im Gegensatz dazu messen die Abstandssensoren die Entfernung zwischen der aktiven Fläche eines Sensors und einem Target. Hierbei kann zwischen kooperativen und nicht kooperativen Targets unterschieden werden. Unter einem kooperativen Target versteht man einen Reflexionskörper mit definierten und optimierten Reflexionseigenschaften, da er die Abstandsmessung erleichtert und dadurch die Leistung und Reichweite des Sensors erhöht. Im Gegensatz dazu kann ein nicht kooperatives Target ein Objekt beliebiger Natur sein. Da dieses dem Sensor keine Rückmeldung über Reflexionen gibt, „kooperiert“ es nicht mit diesem. Aufgrund dessen gestaltet sich die Abstandsmessung zu nicht kooperativen Targets als schwieriger.

Die Abstands- und Wegsensoren können nach ihren genutzten Sensorprinzipien unterteilt werden. Hierbei kann zwischen induktiven, optoelektronischen, Ultraschall-, magnetischen und potenziometrischen Sensoren unterschieden werden. Unter die Wegsensoren fallen die magneto-induktiven, die magneto-striktiven, die magneto-elektrischen, die potenziometrischen, die optisch interferometrischen und fotoelektrischen Sensoren, sowie der induktive LVDT-, PLCD- und IWS-Sensor. Unter die Abstandssensoren fallen die induktiven IWS-Sensoren, die kapazitiven Sensoren und die Ultraschall-Sensoren, sowie die optische Triangulation und die optische Lichtlaufzeit. (4 pp. 127–128)

Am häufigsten werden hierbei die Entfernungen mithilfe von Echos von Schallsignalen und Lichtreflexionen gemessen. Um den Anwender hierbei nicht durch ständiges Piepen und Blinken zu beeinträchtigen, werden hoch-frequente Ultraschall- und niederfrequente Infrarot-Wellen genutzt, die der Mensch nicht wahrnehmen kann. (1Kap. 3) Aufgrund dessen werden im Folgenden die Ultraschall-Sensoren und die optoelektronischen Infrarot-Sensoren genauer betrachtet.

3.1 Ultraschall-Sensoren

Die Ultraschall-Sensoren können sowohl für die Abstandsmessung als auch für die Objektdetektion verwendet werden. (4 p. 177) Die Funktionsweise der Sensoren orientiert sich hierbei an dem Echolot der Fledermäuse. (6 Kap. 4) Hierfür nutzen die Sensoren den piezoelektrischen Effekt und das Prinzip der Laufzeitmessung von Pulsen (Time-of-Flight). (5 p. 115) Dies bedeutet, dass ein Ultraschallsignal durch den Sensor ausgesendet, an einem Objekt reflektiert und das reflektierte Echo durch den Sensor wiederaufgenommen wird. Die Zeit zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des Ultraschall-Signals gibt hierbei Auskunft über die Entfernung zwischen dem Sensor und dem Target. (6 Kap 4, 7, Kap.5) Im Folgenden wird primär der piezoelektrische Effekt genauer betrachtet, um davon ausgehend die konkrete Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors zu untersuchen. Abschließend werden die verschiedenen Objekt- und Umwelteinflüsse betrachtet, die eine Auswirkung auf die Abstandsmessung haben können, sowie die unterschiedlichen Anwendungsgebiete.

3.1.1 Piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt beschreibt den Zusammenhang zwischen der Verformung eines nicht-leitenden Materials durch äußere Kräfte und dem Auftreten einer elektrischen Spannung. Für das Auftreten des piezoelektrischen Effektes wird eine nicht-zentrosymmetrische Kristallstruktur benötigt. Dies bedeutet, dass der Piezo-Kristall kein Symmetriezentrum besitzen darf, an dem eine Punktspiegelung den Kristall in sich selbst überführt. Ein mögliches Beispiel dafür sind Kristalle aus Quarz oder Turmalin mit einer trigonalen Symmetrie. (5 pp. 48–49) Es können aber auch piezoelektrische Keramiken wie Blei-Zirkonat-Titanate oder sonstige piezoelektrische Materialien wie Zinkoxide oder Aluminiumnitride verwendet werden. (4 p. 5)

Ein Piezo-Kristall besteht hierbei aus Anionen (negativen Ionen Q^-) und Kationen (positive Ionen Q^+). Die Ladungsschwerpunkte dieser Anionen und Kationen fallen im unbelasteten Zustand in einem Ladungsschwerpunkt zusammen. Sobald allerdings eine Kraft an den Kristall angelegt wird, die diesen zur Verformung zwingt, verschieben sich die Ladungen des Kristalles. Dadurch fallen die Schwerpunkte der positiven und negativen Ionen nicht mehr im Zentrum zusammen. Bei einer vertikalen Krafteinwirkung wandert der negative Ladungsschwerpunkt im longitudinalen piezoelektrischen Effekt hierbei nach oben, während sich der positive Ladungsschwerpunkt nach unten verschiebt. Dadurch entsteht eine Polarisation, die zu einer elektrischen Spannung auf der Ober- und Unterseite des Kristalles führt. Dies resultiert in einer elektrischen Spannung in Richtung der Kraft. Dieser longitudinale piezoelektrische Effekt ist in Abbildung 8 dargestellt. (5 pp. 48–49)

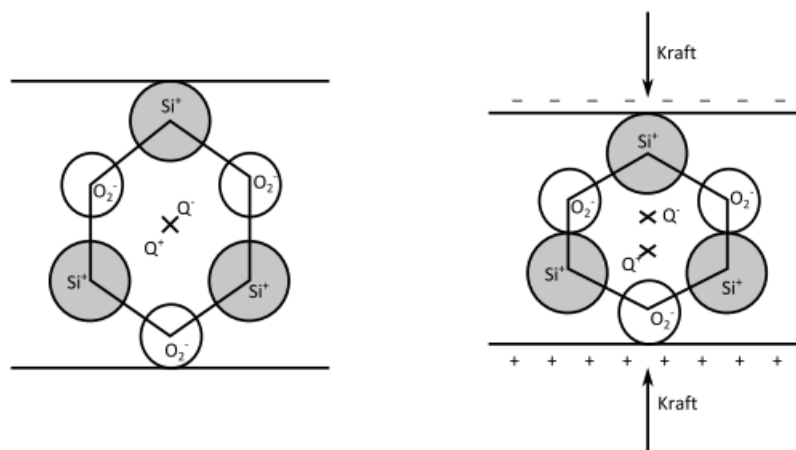


Abbildung 8: Grafische Darstellung des longitudinalen piezoelektrischen Effektes (5 p. 49)

Neben dem longitudinalen piezoelektrischen Effekt, der in einer Polarisationsrichtung parallel zu der Kraftrichtung resultiert, existiert außerdem der transversale piezoelektrische Effekt. Dieser führt zu einer Polarisationsrichtung, die senkrecht zu der Krafteinwirkung ist. Zusätzlich dazu existiert ebenfalls der Schereffekt. Dieser beschreibt eine Polarisationsrichtung, die senkrecht zu den Scherkräften ist, die an gegenüberliegenden Oberflächen-Seiten des Kristalles angelegt werden. Die letztendliche Richtung der Polarisation ist hierbei abhängig von den piezoelektronischen Eigenschaften des Piezo-Kristalles.

Mathematisch kann der piezoelektrische Effekt mithilfe von Matrizen und Vektoren dargestellt werden. Hierbei ergibt sich die folgende Formel (5 pp. 49–50):

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

Der Vektor \vec{P} beschreibt hierbei die Polarisation des Piezo-Kristalles, die durch den piezoelektrischen Tensor \mathbf{d} und dem Spannungstensor $\vec{\sigma}$ bedingt wird. Der Spannungstensor wird hierbei als Vektor und der piezoelektrische Tensor als Matrix dargestellt. Dadurch bestimmen die Komponenten einer Zeile der Matrix \mathbf{d} die Polarisationsrichtung. Zusätzlich dazu beschreiben die ersten drei Spalten der Matrix \mathbf{d} die Zug- und Druckkräfte auf den Körper und die letzten drei Spalten die Wirkung der Scherkräfte. (5 p. 49)

Während der piezoelektrische Effekt eine mechanische Kraft in eine elektrische Spannung umwandelt, wandelt der inverse respektive reziproke piezoelektrische Effekt umgekehrt eine elektrische Spannung in eine mechanische Kraft, in Form einer Verformung des Kristalles, um. (5 p. 50) Durch die Anlage einer Wechsellspannung kann hierbei eine mechanische Schwingung in Spannungsrichtung oder senkrecht zur Spannungsrichtung induziert werden. (4 p. 4) Der inverse piezoelektrische Effekt kann hierbei beispielsweise als Aktor für Ultraschallsender genutzt werden. (5 p. 50)

3.1.2 Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors

Innerhalb der Ultraschall-Sensoren kann zwischen dem Schrankenbetrieb mit einem Zwei-Kopf-System und dem Tastbetrieb mit einem Ein-Kopf-System differenziert werden. Sensoren im Schrankenbetrieb besitzen dabei einen Sender und einem Empfänger, die einander gegenüber angeordnet sind. Hierbei sendet der Sender ein Ultraschall-Signal aus, welches an dem Target reflektiert wird. Die reflektierten Wellen werden daraufhin durch den Empfänger wahrgenommen. Durch das Zwei-Kopf-System können dabei zwar lästige Umschaltzeiten, auch Blindzonen genannt, vermieden werden, allerdings eignet sich dieses Verfahren ausschließlich zur Objektdetektion und nicht zur Abstandsmessung. Aufgrund dessen werden im Folgenden ausschließlich Ultraschall-Sensoren mit Ein-Kopf-System im Tastbetrieb betrachtet, die eine Abstandsmessung ermöglichen.

Diese Ultraschall-Sensoren mit einem Ein-Kopf-System im Tastbetrieb nutzen einen Ultraschall-Wandler, der das Herzstück des Sensors repräsentiert, da er sowohl für die Ein- als auch Auskoppelung des Schalls zuständig ist. Ein solcher Ultraschall-Wandler ist in Abbildung 9 grafisch dargestellt. (4 pp. 177–178)

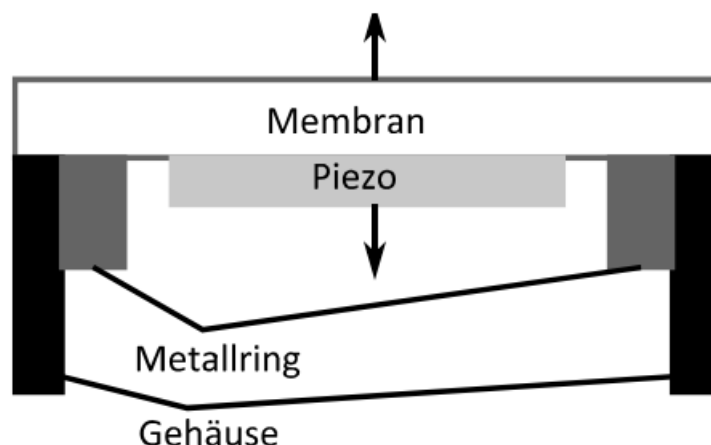


Abbildung 9: Aufbau eines Ultraschall-Wandlers (5 p. 116)

Zu Beginn fungiert der Ultraschall-Wandler wie ein Lautsprecher im Sendebetrieb. Hierfür wird der piezoelektrische Kristall über einen Leistungsverstärker periodisch angesteuert. Dabei legt der

Verstärker eine äußere Spannung an das Piezo-Element an, was dazu führt, dass dieses seine geometrischen Abmessungen ändert. Durch diese Änderung wird die Auskoppelmembran zum Schwingen im Frequenzbereich des Ultraschalls angeregt, was zur Folge hat, dass Schallwellen im Ultraschallbereich ausgesendet werden. Diese Ultraschall-Wellen liegen hierbei in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 1GHz und können aufgrund dessen nicht durch den Menschen wahrgenommen werden. Die konkrete Länge des abgestrahlten Ultraschallpulses ist hierbei abhängig von der Anregungsdauer des Kristalles und der Ausschwingzeit der Membran, während die Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig ist von dem umgebenden Medium. Im Folgenden wird von dem Medium „Luft“ ausgegangen. Die Impedanz-Differenz zwischen der Luft und dem Piezokeramik wird hierbei durch die Membran, die aus einem Gemisch aus Epoxidharz und Glashohlkugeln besteht, ausgeglichen. Dadurch wird eine optimale Anpassung des Schalls an das Medium „Luft“ erreicht. Mithilfe des inversen piezoelektrischen Effektes wurde dadurch elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt.

Die ausgesendeten Ultraschall-Wellen treffen daraufhin auf das zu messende Target, welches die Ultraschall-Wellen teilweise absorbiert und teilweise reflektiert. Währenddessen schaltet der Ultraschall-Sensor aus dem Sende-Betrieb in den Empfangs-Betrieb, indem er die Auskoppelungsmembran ausschwingen lässt. Die Zeit, die zum Ausschwingen benötigt wird, bezeichnet man dabei als „Blindzeit“, da in dieser Zeitspanne keine Echos empfangen werden könne. Auf Basis der Blindzeit kann dadurch der minimale Abstand bestimmt werden, den ein Objekt zu dem Sender aufweisen muss.

Nachdem die Membran ausgeschwungen ist, kann diese die reflektierten Echos wiederrum empfangen. Dadurch beginnt diese erneut im Frequenzbereich zu schwingen. Diese Schwingungen der Membran werden infolgedessen in Form von Kraft an das Piezo-Element übertragen. Diese äußere Kraft bewirkt hierbei eine Oberflächenladung, die als Spannung im mikrovolt-Bereich gemessen werden kann. Dadurch wird mechanische Energie wiederrum in elektrische Energie umgewandelt.

Diese Spannung wird daraufhin verstärkt und an den integrierten Controller des intelligenten Sensors weitergegeben. Innerhalb des Controller kann daraufhin mithilfe der folgenden Formel der Abstand berechnet werden:

$$d = \frac{1}{2} * \Delta t * c_{Luft}$$

Die Echolaufzeit Δt entspricht hierbei der Zeitdifferenz zwischen dem ausgesendeten und dem empfangenen Puls. Diese muss mit der spezifischen Schallgeschwindigkeit innerhalb von Luft verrechnet werden. Da diese temperaturabhängig ist, muss die Lufttemperatur für eine genaue Messung bekannt sein. Da der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Geschwindigkeit sehr klein ist, kann dieser vernachlässigt werden. Eine grafische Darstellung der Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors im Tastbetrieb ist in Abbildung 10 erkennbar. (4 pp. 177–179, 5 pp. 115–117)

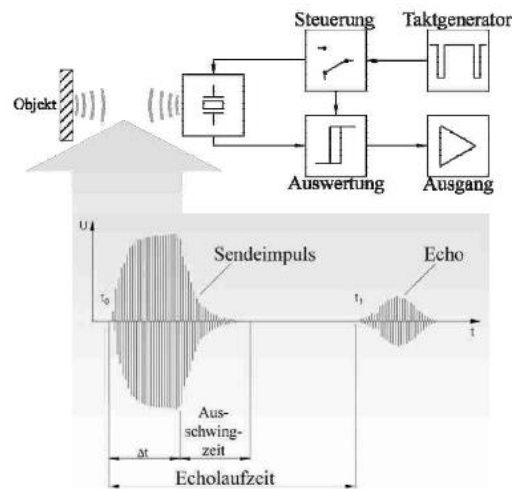


Abbildung 10: Funktionsweise eines Ultraschall-Sensors im Tastbetrieb (4 p. 178)

Nachdem der reflektierte Puls empfangen und ausgewertet wurde, kann ein neuer Puls gesendet werden. Hierfür beginnt der eben beschriebene Prozess von vorne. Die Zeit zwischen zwei ausgesendeten Pulsen und damit auch zwischen zwei Messungen, wird als die Zykluszeit bezeichnet. Diese hängt negativ von der verwendeten Ultraschallfrequenz ab. Dies bedeutet, dass umso größer die verwendete Frequenz ist, desto kleiner ist die Zykluszeit. Auf diese Weise können Zykluszeiten von unter 5ms realisiert werden. Allerdings sinkt mit der steigenden Frequenz auch der maximal messbare Abstand, da hierbei ebenfalls die Absorption der Wellen zunimmt. Zusätzlich dazu hängt der maximal messbare Abstand von den Reflexionseigenschaften des Messobjektes ab, da mit einer niedrigen Reflexionsaffinität ebenfalls der maximal messbare Abstand sinkt. Auf diese Weise können Abstände von bis zu 10m gemessen werden. (5 pp. 115–117)

Der Öffnungswinkel der ausgesendeten Ultraschall-Wellen beträgt für gewöhnliche zwischen 5 und 8 Grad und ist abhängig von der Geometrie des Sensors. Dieser gibt an in welchem Bereich Objekte detektiert werden können. In Kombination mit der Frequenz kann so zusätzlich der minimale und maximale Abstand eines Objektes zum Sensors ermittelt werden. Daraus kann daraufhin der Erfassungsbereich gefolgert werden, in welchem ein Ultraschall-Sensor den Abstand zu einem Objekt ermitteln kann. Eine solche Einteilung der Schallkeule in verschiedene Bereich ist in Abbildung 11 erkennbar. (4 pp. 179–180)

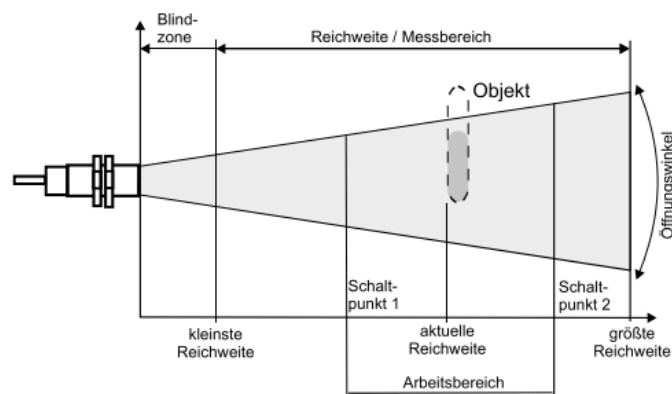


Abbildung 11: Einteilung der Schall-Keule eines Ultraschall-Sensors (4 p. 180)

3.1.3 Objekt- und Umwelteinflüsse

Verschiedene Objekt- und Umwelteinflüsse können die Genauigkeit der Messergebnisse und die Reichweite eines Ultraschall-Sensors beeinträchtigen. Einige Beispiele werden im Folgenden betrachtet.

Innerhalb der Objekteinflüsse wird das Material und die Beschaffenheit des Targets untersucht. Da fast alle festen, flüssigen und pulverförmigen Objekte Schall reflektieren können, können somit auch fast alle erfasst werden. Allerdings kann die Oberflächenbeschaffenheit, das Material und die Temperatur des Objektes die Messung negativ beeinflussen.

Auf diese Weise kann eine konvexe Oberfläche eines Körpers beispielsweise dazu führen, dass die reflektierte Schallkeule divergiert. Dies ist auf die verschiedenen Einfallswinkel der ursprünglichen Keulennachse auf den unterschiedlichen Flächenelementen zurückzuführen. Dadurch wird die reflektierte Schallenergie, die durch den Sensor wahrgenommen wird, verkleinert. Dementsprechend reduziert sich ebenfalls die maximale Reichweite, die gemessen werden kann. Derselbe Effekt lässt sich auch bei rauen Oberflächenstrukturen erkennen, da grobkörnige Schüttgüter den Ultraschall diffus reflektieren. Auch bei heißen Tastobjekten kann es zu einer Verzerrung der Schallkeule kommen. Diese ist auf die Wärmekonvektion zurückzuführen.

Die Härte eines Objektes kann ebenfalls Einfluss auf die Messung haben. So reflektiert hartes Material die Ultraschall-Wellen beispielsweise besser als weiches Material. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weiches Material einen Großteil der Wellen absorbiert, anstatt sie zu reflektieren. Aufgrund dessen wird die maximal messbare Reichweite reduziert. Dünnwandige Folien verhalten sich hierbei ebenfalls wie weiches Material, während sich Flüssigkeiten eher wie hartes Material verhalten. Schaum auf der Oberfläche von Flüssigkeiten, kann die Erkennung allerdings wiederum beeinträchtigen.

Innerhalb der Umwelteinflüsse werden insbesondere die Eigenschaften der Luft betrachtet, da die Ultraschall-Sensoren für eben diese konzipiert wurden. Ein Betrieb der Sensoren in anderen Gasen ist nicht möglich, da diese den Schall zu stark absorbieren. Dasselbe gilt für Flüssigkeiten, die Lösungsmittel ausdampfen, da diese die Sensorfunktionen ebenfalls zu stark beeinträchtigen.

Umwelteinflüsse wie Feuchte, Staub und Rauch beeinträchtigen die Messgenauigkeit nicht. Dasselbe gilt für Niederschläge wie Regen oder Schnee in normaler Dichte, solange diese die Wandler-Oberfläche nicht benetzen. Im Gegensatz dazu können starke Luftbewegungen und Turbulenzen zu einer Instabilität der Messung führen. Unter normalen Umständen können Strömungsgeschwindigkeiten bis zu einigen m/s allerdings verkraftet werden. (4 pp. 181–182)

3.1.4 Anwendungsgebiete

Die Ultraschall-Sensoren können in fast jeder Branche eingesetzt werden. Zu den häufigsten Anwendungsgebieten zählen die Auf- und Abwickelsteuerung/Durchmessererfassung, Durchhangregelung, Höhenmessung, Lageregelung, Kollisionsschutz, Füllstandserfassung und Objekterkennung. Hierbei können mehrere Sensoren ebenfalls miteinander synchronisiert werden. (4 pp. 181–184)

3.2 Optoelektronische Infrarot-Sensoren

Die optoelektronischen Distanzsensoren können Abstände und Wege mithilfe von sichtbarem und infrarotem Licht erfassen. Aufgrund der vielfältigen Eigenschaften des Lichtes gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, um die Abstände und Wege zu messen. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Messprinzipien ist in Abbildung 12 ersichtlich. (4 p. 162)

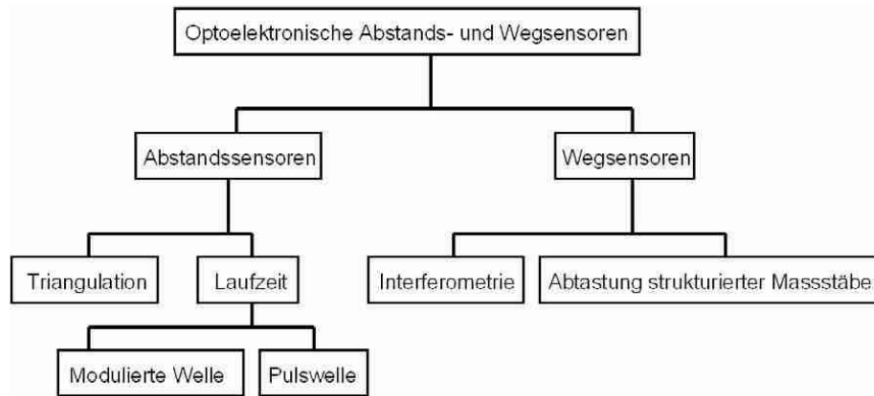


Abbildung 12: Übersicht über die unterschiedlichen Messprinzipien der optoelektronischen Sensoren (4 p. 163)

Im Folgenden wird der Fokus auf die Messprinzipien gelegt, die innerhalb der Abstandssensoren verwendet werden, um die Vergleichbarkeit zu den Ultraschall-Sensoren zu bewahren. Hierfür wird primär der Elektrolumineszenz- und der fotoelektrische Effekt betrachtet, die essenziell für die optoelektronischen Bauteile sind, sodass diese im Nachhinein untersucht werden können. Davon ausgehend wird die grundlegende Funktionsweise der optoelektronischen Abstandssensoren betrachtet mit einem Fokus auf die Messprinzipien Triangulation, Pulslaufzeitverfahren, Phasenlaufzeitverfahren und Frequenzlaufzeitverfahren. Abschließend werden die Objekteinflüsse und Anwendungsgebiete untersucht.

3.2.1 Elektrolumineszenz- und fotoelektrische Effekt

Der Elektrolumineszenz-Effekt beschreibt die Erzeugung von Lumineszenz-Strahlung durch Anlage eines elektrischen Feldes an einen Phosphor. Dieser Effekt ist auf die, durch das elektrische Feld induzierte, Elektronenwanderung innerhalb des Phosphors zurückzuführen. (8 pp. 1–8) Da die Elektronen durch das elektrische Feld beschleunigt werden, kommt es zu Zusammenstößen, die die Elektronen in einen angeregten Zustand versetzen. Sobald die Elektronen in ihren ursprüngliche Zustand zurückkehren, wird Energie in Form von Licht-Photonen frei. (9)

Der fotoelektrische Effekt beschreibt ebenfalls die Wechselwirkung zwischen den Licht-Photonen und den Elektronen eines Festkörpers. Hierbei wird allerdings beschrieben, wie das Auftreffen der Photonen auf einer festen Materie dazu führt, dass die Elektronen sich aus ihren Bindungen lösen. Hierbei wird zwischen dem äußeren und inneren fotoelektrischen Effekt unterschieden. (5 pp. 50–53)

Bei dem äußeren Fotoeffekt führt die Bestrahlung einer Metalloberfläche mit kurzwelligem Licht dazu, dass Elektronen aus der Metalloberfläche herausgelöst werden. Damit die Elektronen ihre Bindungen lösen können, muss die Bindungsenergie überwunden werden. Hierfür wird die komplette kinetische Energie des aufgetroffenen Photons absorbiert und in Austrittsarbeit umgewandelt. Um das Elektron komplett aus seinen Bindungen lösen zu können, muss die kinetische Energie des Photons daher

mindestens genauso groß sein wie die Bindungsenergie des Elektrons. Der Rest der Photonenenergie bleibt dem Elektron nach vollbrachter Austrittsarbeit als kinetische Energie erhalten. Durch die Lösung der Elektronen aus ihren ursprünglichen Bindungen, werden neue Elektron-Loch-Paare gebildet. Die freien Elektronen können nun eine Elektronenwanderung antreten, die als Fotostrom gemessen werden kann. Während die kinetische Energie hierbei von der Frequenz der Lichtwellen und der damit verbundenen Energie abhängt, hängt der Fotostrom von der Intensität des Lichtes – ergo der Anzahl an auftreffenden Photonen – ab. Eine grafische Darstellung des äußeren fotoelektrischen Effektes ist in Abbildung 13 ersichtlich. (5 pp. 51–53, 4 pp. 76–77, 10 p. 123)

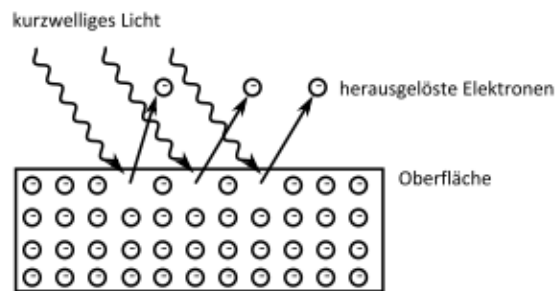


Abbildung 13: Grafische Darstellung des äußeren fotoelektrischen Effektes (5 p. 53)

Im Gegensatz zu dem äußeren Fotoelektrischen Effekt werden beim inneren Fotoelektrischen Effekt die Elektronen nach dem Auftreten nicht komplett aus ihrem Material gelöst, sondern nur auf ein anderes Energieniveau gehoben. Hierbei wird die kinetische Energie des auftreffenden Photons ebenfalls komplett durch das Elektron absorbiert. Mithilfe der absorbierten Energie kann das Elektron nun aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden, indem es die Energie aufwendet, die notwendig ist, um die Bandlücke zwischen Leitungsband und Valenzband zu überwinden. Dieses bedeutet wiederum, dass die kinetische Energie des Photons mindestens genauso groß sein muss wie die benötigte Bandlücken-Energie. Nachdem das Elektron in das Leitungsband gehoben wurde, bleibt ein positiv geladenes Loch im Valenzband zurück. Dadurch ist wiederum ein frei bewegliches Elektron-Loch-Paar entstanden. Dieses Elektron-Loch-Paar führt dazu, dass sich die Leitfähigkeit des Materiales erhöht. Der innere fotoelektrische Effekt kann in Abbildung 14 genauer untersucht werden. (5 pp. 53–54, 4 p. 77)

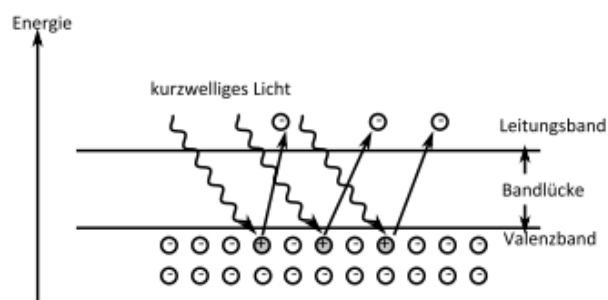


Abbildung 14: Grafische Darstellung des inneren fotoelektrischen Effektes (5 p. 53)

Der inverse innere fotoelektrische Effekt beschreibt hierbei, wie ein Elektron wiederum relaxiert, indem es vom Leitungsband zurück ins Valenzband fällt. Dabei kommt es zur Rekombination des Elektron-Loch-Paares. Die freigewordene Energie kann hierbei entweder in Form von Gitterschwingungen abgegeben werden oder in Form von Photonen. Die Freigabe der Photonen erfolgt hierbei nach den Erkenntnissen des Elektrolumineszenz-Effektes, da die Elektronen aus ihrem angeregten Zustand im Leitungsband wieder in ursprünglichen Zustand im Valenzband zurückfallen. Die emittierten Elektronen haben hierbei mindestens die Energie der Bandlücke. (5 p. 54)

3.2.2 Optoelektronische Bauteile

Innerhalb der optoelektronischen Bauteile der Infrarot-Sensoren unterscheidet man zwischen den Halbleiterbauelementen, mithilfe welcher man das Licht erzeugen kann, und den Halbleiterbauelementen, mithilfe welcher man das Licht empfangen kann. Im Folgenden werden daher primär die Infrarot-Sender betrachtet, gefolgt von den Infrarot-Empfänger.

3.2.2.1 Optoelektronische Sender

Um das infrarote Licht erzeugen zu können, werden Halbleiterbauelement wie beispielsweise Leucht- oder Laserdioden benötigt. Die Leuchtdioden (LED) werden hierbei überwiegend als Lichtquellen genutzt, die Licht in einem bestimmten Spektralbereich emittieren können. Dabei kann entweder sichtbares rotes Licht oder unsichtbares infrarotes Licht erzeugt werden. Da an die Abstandssensoren hohe Anforderungen gestellt werden, werden diese zunehmend mit Halbleiter-Laserdioden ausgestattet, um diesengerecht zu werden. Da das Licht mithilfe der Laserdioden zusätzlich gebündelt und fokussiert werden kann, können dadurch Objekte hochpräzise detektiert werden. Eine schematische Darstellung einer Laserdiode ist an Abbildung 15 ersichtlich. (4 p. 163)

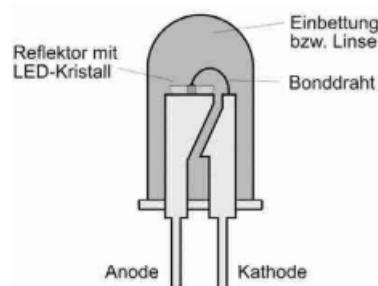


Abbildung 15: schematische Darstellung einer Laserdiode (4 p. 164)

Das Kernstück der Laserdiode ist ein Kristall mit unterschiedlich dotierten Schichten, der auch als Laserchip bezeichnet wird. (4 pp. 163–164) Innerhalb dieser Schichten wird zwischen einer p-Seite und einer n-Seite unterschieden, die über einen pn-Übergang verbunden sind. (11 p. 35) Auf der n-Seite ist hierbei ein Überschuss an Elektronen mit entsprechend vielen ortsfesten, positiven Donator-Atomrümpfen, während auf der p-Seite genauso viele Löcher existieren wie ortsfeste, negative Akzeptor-Atomrümpfe. Sobald die beiden Seiten miteinander verbunden werden, wandern an der Trennlinie zwischen den beiden Seiten ein paar freie Elektronen der n-Seite auf die p-Seite und umgekehrt ein paar Löcher von der p-Seite auf die n-Seite. Dieser Prozess wird als Diffusion bezeichnet. Aufgrund dieses kommt es zur Rekombination der freien Elektronen mit den Löchern. Dadurch entsteht an der Trennlinie zwischen p- und n-Seite eine Raumladungszone, auch Sperrschicht genannt, in der auf der p-Seite ausschließlich die ortsfesten negativen Akzeptor-Atomrümpfe übrigbleiben und auf der n-Seite nur die ortsfesten positiven Donator-Atomrümpfe. Da diese Atomrümpfe ortsfest sind wirken sie wie ein Isolator, da sie aufgrund der Abstoßungskräfte den weiteren Diffusionsprozess verhindern. Dadurch wird sichergestellt, dass die p- und n-Seite voneinander getrennt bleiben. (11 pp. 7–8) Eine grafische Darstellung eines solchen pn-Überganges mit Raumladungszone (RLZ) ist in Abbildung 16 ersichtlich.

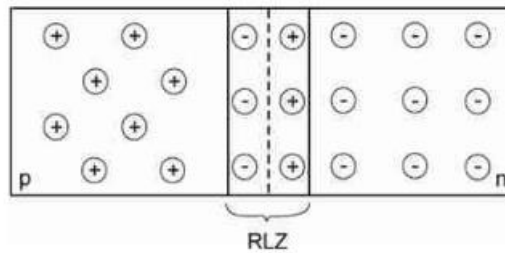


Abbildung 16: Grafische Darstellung eines pn-Überganges mit Raumladungszone (10 p. 122)

Der Laserchip ist auf einem Metallblock (Wärmesenke) angebracht, der die entstehende Wärme abführt. Der LED-Kristall liegt an der Anode an und wird über einen Bonddraht mit der Kathode verbunden. Auf diese Weise kann später ein Strom an den Laserchip angelegt werden. Die Diode ist in einem Kunststoffgehäuse gekapselt. Die Gehäuseoberfläche wirkt hierbei wie eine Linse, die das Licht in einen Abstrahlkegel bündelt. Auf diese Weise kann dem emittierten Licht eine Richtung gegeben werden.

Nun wird eine Vorwärtsspannung an die Diode angelegt. (4 pp. 163–164) Dies bedeutet, dass der Pluspol am p-Gebiet und der Minus-Pol am n-Gebiet des Laserchips angeschlossen wird. Mithilfe dieser zusätzlichen Spannung können die freien Elektronen und die Löcher nun die Sperrschicht überwinden, wodurch es zu einer erneuten Diffusion und daraus folgenden Rekombination der Ladungsträger kommt. Da hierbei Elektronen von der n-Seite zu der p-Seite fließen, spricht man von einem Durchlassstrom. (11 pp. 9–10) Da es sich bei der Leuchtdiode um einen Elektrolumineszenz-Strahler handelt, führt die Rekombination der Ladungsträger dazu, dass Energie in Form von Licht-Photonen frei wird. Dies ist auf den Elektrolumineszenz-Effekt zurückzuführen, der aufgrund der Art und Verteilung des Dotierstoffes innerhalb der Leuchtdiode Anwendung findet. (8, Kap.3, 11 p. 35, 12, 12, 12)

Wird hierbei ein spezifischer Stromschwellenwert überschritten, kommt es in der hoch dotierten Sperrschicht zu einer Lichtverstärkung, die auf eine stimulierte Emission zurückzuführen ist. Hierbei werden die Lichtwellen an den polierten und verspiegelten Enden teilweise reflektiert. Das reflektierte Licht wird in der Schicht infolgedessen wiederrum verstärkt. Dadurch entsteht das letztendliche Laserlicht, welches aus der Strahlung einer Wellenlänge und einer Phasenlänge besteht. Das generierte Laserlicht tritt an der Stirnfläche mit einer hohen Leuchtdichte aus. Die Stirnfläche besteht hierbei aus einem Glasfenster mit einem Öffnungswinkel zwischen 10 und 30 Grad. Mithilfe zusätzlicher asphärischer Optik kann dadurch ein fokussierter Laserstrahl justiert werden. In der Gegenrichtung trifft der Laserstrahl eine Monitordiode. Diese misst den Lichtstrom kontinuierlich und kann darauf basierend den Laserchipstrom regulieren. Dadurch kann die abgestrahlte Leistung konstant gehalten werden. (4 pp. 163–164)

3.2.2.2 Optoelektronische Empfänger

Zur Detektion des Lichtes werden ebenfalls Halbleiterbauelemente verwendet. Die einfachste Bauform ist hierbei eine Fotodiode. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen pn-Übergang, der allerdings in Sperrrichtung anstatt in Durchflussrichtung gepolt ist. Durch die angelegte Spannung wird hierbei allerdings nur die Raumladungszone verstärkt. Ein Stromfluss entsteht erst, wenn die Fotodiode von außen beleuchtet wird. Diese Umwandlung von Photonen in einen Fotostrom ist auf den äußeren fotoelektrischen Effekt zurückzuführen, da hierbei Elektron-Loch-Paare durch die auftreffenden Photonen voneinander getrennt werden und infolgedessen in Richtung des Antriebs fließen. (10 p.

123, 4 p. 164) Der entstehende Fotostrom wird daraufhin in eine proportionale Spannung umgewandelt, die verstärkt und ausgewertet werden kann.

Eine Sonderart der Fotodioden sind hierbei die Avalanche-Fotodioden. Diese sind besonders gut für höchst empfindliche Messungen bei hohen Modulationsfrequenzen geeignet, da sie eine hohe interne Verstärkung erreichen, die auf eine lawinenartige Erzeugung weiterer Elektron-Loch-Paare bei hohen Spannungen zurückzuführen ist. Dies ist insbesondere bei Lichtlaufzeitmessungen erforderlich. (4 p. 164)

Neben den Fotodioden existieren aber auch die PSD-Elemente (Position Sensitive Devices). Hierbei handelt es sich um Lateraleffektdioden, die eine ausgedehnte lichtempfindliche Fläche besitzen. Sobald ein Lichtstrahl auf diese Fläche trifft, erzeugt die Diode einen Gesamtstrom I . Dieser Gesamtstrom I wird in zwei Teilströme I_1 und I_2 aufgeteilt, wobei das Verhältnis der Teilströme durch die Lage x des Schwerpunktes der Lichtverteilung bedingt wird. Durch die Messung der Teilströme kann daraufhin die Position des Schwerpunktes bestimmt werden. Das Ergebnis ist hierbei unabhängig von der einfallenden Lichtintensität und dem Reflexionsvermögen der Objektoberfläche. Da die Lateraleffektdiode auf den Schwerpunkt des Lichtes reagiert, kann diese als Sensorelement des Triangulationssensors verwendet werden. Eine schematische Darstellung der Funktionsweise eines PSD-Elementes kann in Abbildung 17 betrachtet werden. (4 p. 166)

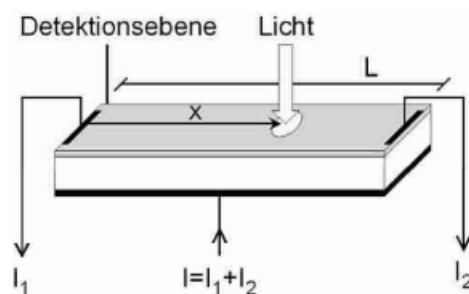


Abbildung 17: schematische Darstellung der Funktionsweise eines PSD-Elementes (4 p. 166)

Neben den PSD-Elementen werden in den Triangulationssensoren außerdem CCD-Zeilen (Charge Coupled Device) verwendet. Diese CCD-Zeilen bestehen aus einer Vielzahl von aneinandergereihten Fotodetektoren, wie sie in Abbildung 18 erkennbar sind. (4 p. 166)

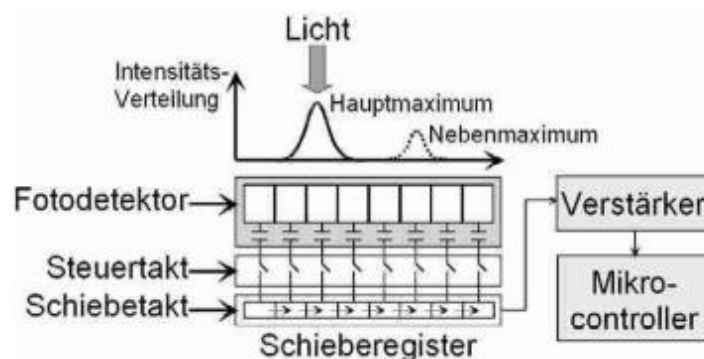


Abbildung 18: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer CCD-Zeile (4 p. 166)

Innerhalb der CCD-Zeile ist jedem Fotodetektor eine Kapazität zugeordnet. Sobald es zu einer Lichteinwirkung kommt, findet in den Fotodetektoren wiederum eine Ladungstrennung statt. Die zugeordneten Kapazitäten werden daraufhin durch die freigewordenen Elektronen aufgeladen. In Folge eines Steuerungsimpulses werden die Ladungspakete daraufhin in das analoge Schieberegister

transferiert. Die Ladungsverteilung im Schieberegister entspricht nun der ursprünglichen Intensitätsverteilung des eingefallenen Lichtes.

Mithilfe des Schiebetaktes werden die Ladungspakete nun schrittweise von einem Element zum nächsten transportiert, bis die Ladungsverteilung dem Ausgangsverstärker zugeführt wird. Nachdem die Ladungsverteilung innerhalb des Verstärkers verstärkt wurde, wird sie zu einem nachgeschalteten Mikrocontroller transportiert. Innerhalb des Mikrocontrollers kann die Lichtverteilung nun analysiert werden. Parallel dazu wurden die Detektoren durch das Steuersignal wieder entladen, um sie für eine erneute Belichtung vorzubereiten. (4 pp. 166–167)

3.2.3 Funktionsweise optoelektronischer Abstandssensoren

Die verschiedenen Messverfahren „Triangulation“, „Pulslaufzeit“ und „Phasen/Frequenzlaufzeit“ der optoelektronischen Sensoren lassen sich alle auf einen gemeinsamen Kern zurückführen. Dieses gemeinsame Schema wurde in der Abbildung 19 skizziert. (4 pp. 167–168)

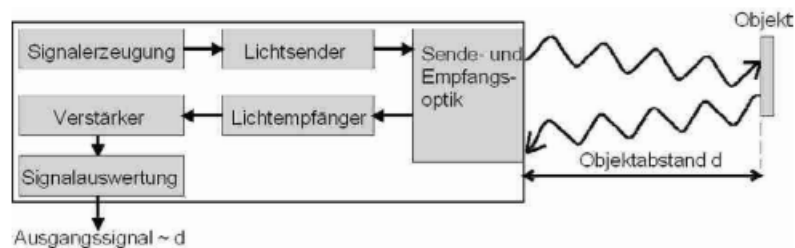


Abbildung 19: Schema des Triangulations-, Puls-, Phasen- und Frequenzmessverfahrens (4 p. 167)

Analog zu der Abstandsmessung mit Ultraschallwellen, wird in der Abstandsmessung mit Infrarot-Wellen ein Infrarot-Licht innerhalb einer Leucht- oder Laserdiode erzeugt und durch eine Sendeoptik gesendet. Die Infrarot-Wellen treffen daraufhin auf ein Objekt, welches diese Wellen teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Die reflektierten Wellen werden daraufhin durch eine Empfangsoptik mit einem Lichtempfänger in dem Sensor wiederrum wahrgenommen. Bei diesen Lichtempfängern kann es sich hierbei um einfache Fotodiode oder um kompliziertere PSD-Elemente oder CCD-Zeilen handeln. Die Signale werden daraufhin verstärkt und ausgewertet. Letztendlich kann aus diesen Signalen daraufhin der Abstand d gefolgert werden.

Für die Sende- und Empfangsoptik kann hierbei entweder eine biaxiale Optik oder eine Autokollimationsoptik verwendet werden. Bei der biaxialen Optik sind die optischen Achsen des Sender- und Empfängerstrahls gegeneinander verkippt und um die Basis B voneinander getrennt. Im Gegensatz dazu sind die Sender- und Empfängerachse in der Autokollimationsoptik identisch. Hierbei bietet die biaxiale Optik eine hohe Reichweite, die durch eine Blindzeit eingeschränkt wird, während die Autokollimationsoptik die Blindzeiten zwar eliminiert, dafür aber in ihrer Reichweite beschränkt wird. Eine schematische Darstellung der beiden Optik-Sorten ist in Abbildung 20 ersichtlich. (4 pp. 167–168)

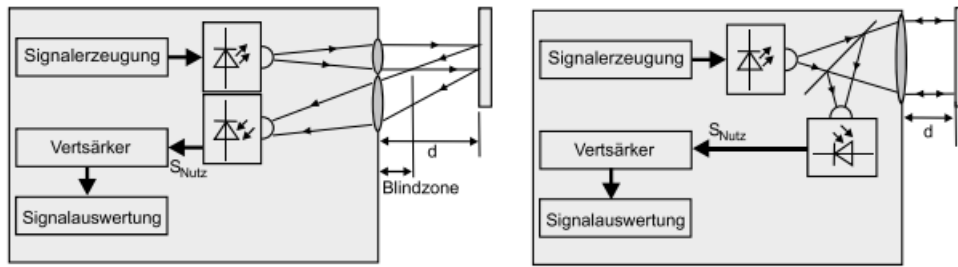


Abbildung 20: Schematische Darstellung der biaxialen Optik (links) und Autokollimationsoptik (rechts) (4 p. 168)

Allerdings muss bei den Infrarot-Sensoren beachtet werden, dass neben dem reinen Nutzsignal auch Fremdsignale und interne optische Übersprechsignale wahrgenommen werden. Diese drei Signaltypen zusammen werden daraufhin durch den Empfänger in das elektrische Signal umgewandelt. Aufgrund dessen besitzen Abstandssensoren häufig eine Verschmutzungsanzeige, die anzeigt, ob ein Nutzsignal auswertbar ist. (4 pp. 167–168)

Im Folgenden wird die konkrete Abstandsmessung mittels Triangulations-, Pulslaufzeit-, Phasenlaufzeit- und Frequenzlaufzeitverfahren untersucht.

3.2.3.1 Triangulation

Bei dem Triangulationsverfahren handelt es sich um ein rein geometrisches Messverfahren. Dieses nutzt positionsempfindliche Halbleiterbauelemente wie beispielsweise ein PSD-Element oder eine CCD-Zeile als Empfänger, um die Schwerpunkts-Position x des reflektierten Laserstrahls auf einer Detektionsebene unter einem bestimmten Winkel abzubilden. Da sich die Schwerpunkts-Position x mit dem Objektabstand d ändert, kann der Abstand d aus x gefolgert werden. Hierfür kann die folgende Formel genutzt werden:

$$x = \frac{B * F}{d}$$

Innerhalb dieser Formel entspricht B dem Basisabstand zwischen der optischen Achse der Sende- und Empfangsoptik und F dem Abstand zwischen der Detektionsebene und der Optik. Hierbei kann ein positiver Zusammenhang zwischen der Größe des Basisabstandes und der zu realisierenden Reichweite verzeichnet werden. Dadurch können für gewöhnlich Reichweiten zwischen 20 mm und 5.000 mm realisiert werden. In Ausnahmefällen sind aber auch Reichweiten zwischen 100 und 500 cm möglich. Ein schematischer Aufbau eines Triangulationssensors ist in Abbildung 21 ersichtlich. (4 pp. 170–171, 13 pp. 173–174, 14)

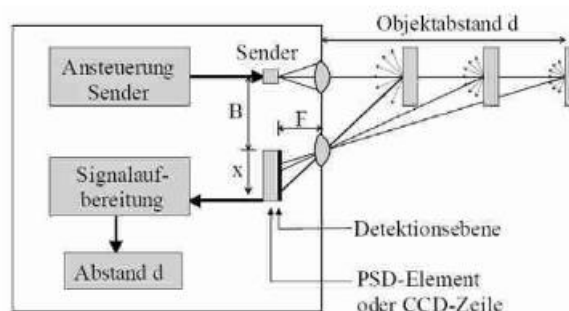


Abbildung 21: Schematischer Aufbau eines Triangulationssensors (4 p. 170)

3.2.3.2 Pulslaufzeitverfahren

Das Pulslaufzeitverfahren mit Infrarot-Wellen erfolgt äquivalent zu dem Time-of-Flight-Verfahren mit Ultraschallwellen, wie es in Kapitel 3.1.2 beschrieben wurde. Hierbei wird ebenfalls die Zeit Δt zwischen dem Aussenden und dem Empfangen der Lichtwellen gemessen. Für die Zeitmessung können digitale und analoge Verfahren wie beispielsweise eine elektronische Uhr mit einem internen Start- und End-Signal verwendet werden. (4 p. 171) Eine schematische Darstellung des Aufbaus eines Pulslaufzeitsensors ist in Abbildung 22 ersichtlich:

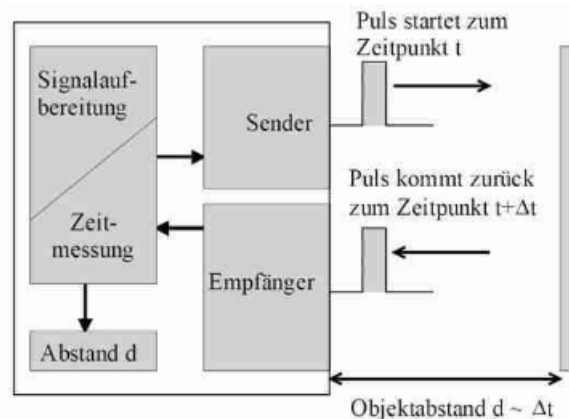


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Pulslaufzeitsensors (4 p. 172)

Mithilfe der Lichtgeschwindigkeit c und dem Brechungsindex n kann daraufhin aus der benötigten Zeit Δt der Abstand d gefolgert werden. Hierfür kann die folgende Formel verwendet werden:

$$d = \frac{c * \Delta t}{2 * n}$$

Falls der Sensor hierbei in dem Medium „Luft“ verwendet wird, kann mit einem Brechungsindex von $n=1$ gerechnet werden. Da eine gewisse Mindestlichtintensität am Empfänger notwendig ist, um eine korrekte Arbeitsweise sicherzustellen, ist die maximale Reichweite bei diffus reflektierenden Oberflächen auf 6m begrenzt und bei spiegelnden Oberflächen auf 100m. (4 p. 171)

3.2.3.3 Phasenlaufzeitverfahren

Innerhalb des Phasenlaufzeitverfahrens kann aus der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ der Objektstand d gefolgert werden, da sich die Phase periodisch mit dem Objektstand verschiebt. (4 pp. 172–173) Der schematische Aufbau des Phasenlaufzeitverfahrens kann in Abbildung 23 untersucht werden.

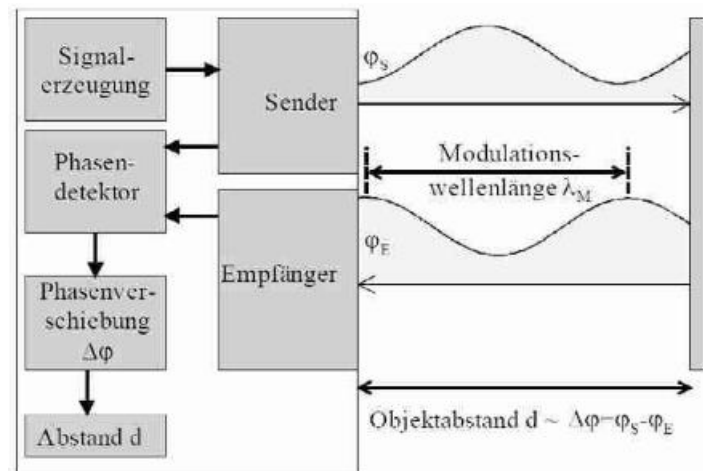


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Phasenlaufzeitsensors (4 p. 173)

Der Abstand d kann daraufhin aus der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ und der Modulationswellenlänge λ_m mithilfe der folgenden Formel gefolgert werden:

$$d = \frac{\Delta\varphi}{2 * \pi} * \frac{\lambda_m}{2} + i * \frac{\lambda_m}{2}, i = 1, 2, \dots$$

Innerhalb des Phasenlaufzeitverfahrens wird eine Messung umso genauer, desto kürzer die Wellenlänge ist. Die Eindeutigkeit bei einer Welle bleibt allerdings ausschließlich bei Entfernungen mit einem maximalen Abstand von einer halben Modulationswellenlänge erhalten. Mithilfe mehrerer Frequenzen können allerdings auch maximale Reichweiten von bis zu 10 m bei diffus reflektierenden Objekten realisiert werden. (4 pp. 171–173)

3.2.3.4 Frequenzlaufzeitverfahren

Innerhalb des Frequenzlaufzeitverfahrens kann äquivalent zu dem Puls- und Phasenlaufzeitverfahren der Objektabstand d aus der Frequenzdifferenz Δf gefolgert werden. Hierfür wird die Frequenz in einem Frequenzhub H konstant zwischen einem minimalen und maximalen Wert verändert. Die Frequenzdifferenz Δf entspricht daraufhin der Differenz zwischen der Sendefrequenz f_S und der Empfangsfrequenz f_E . (4 pp. 171–173) Eine schematische Darstellung des Frequenzlaufzeitverfahrens ist in Abbildung 24 ersichtlich.

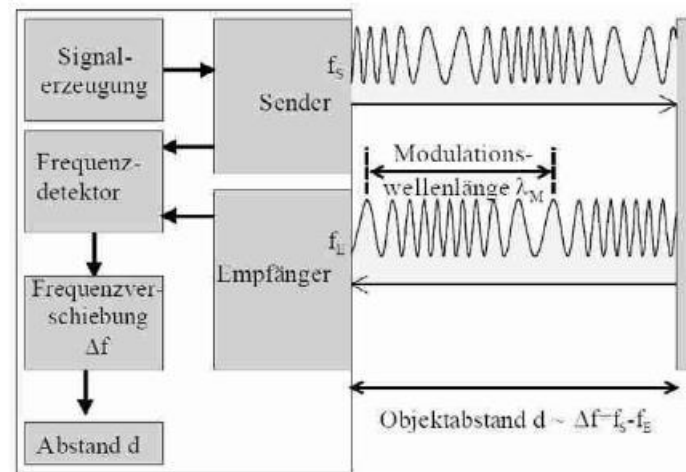


Abbildung 24: Schematische Darstellung eines Frequenzlaufzeitsensors (4 p. 173)

Aus der Frequenzdifferenz Δf , dem Frequenzhub H und der Modulationswellenlänge λ_m kann nun mithilfe der folgenden Formel der Abstand d gefolgert werden:

$$d = \frac{\Delta f}{2 * H} * \frac{\lambda_m}{2} + i * \frac{\lambda_m}{2}, i = 0, 1, 2, \dots$$

Allerdings treten hier auch äquivalent zu dem Phasenlauzeitverfahren Mehrdeutigkeitsprobleme auf. Diese können ebenfalls durch die Nutzung mehrerer Frequenzen behoben werden. Dadurch lassen sich auch bei diesem Verfahren maximale Reichweiten von 10m bei diffus reflektierenden Oberflächen realisieren. (4 pp. 171–173)

3.2.4 Objekteinflüsse

Die Größe, die Krümmung, die reflektierende Fläche, das Reflexionsverhalten, das Reflexionsvermögen und die Farbe eines Objektes können das Nutzsignal beeinflussen. Hierbei sollte insbesondere bei der Größe die Minimalfläche nicht unterschritten werden, um eine korrekte Messung sicherzustellen. Außerdem muss zwischen einem rein diffusen und einem spiegelnden Reflexionsverhalten unterschieden werden, da die maximal messbare Reichweite von diesem Verhalten abhängt. Um den Einfluss der Objektfarbe auf das Nutzsignal abschätzen zu können, muss das elektromagnetische Spektrum des Senders $S(\lambda)$, die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit $E(\lambda)$ und das elektromagnetische Reflexionsspektrum der Objektfarbe $R(\lambda)$ ermittelt werden. Mithilfe der folgenden Formel kann daraufhin der Einfluss auf das Nutzsignal abgeschätzt werden (4 p. 169):

$$S_{Nutz} \propto \int S(\lambda) * R(\lambda) * E(\lambda) d\lambda$$

3.2.5 Anwendungsgebiete

Mithilfe der optoelektronischen Abstandssensoren können Abstandsmessungen, Konturenbestimmungen, Dickenmessungen und Füllstandskontrollen durchgeführt werden. Diese Messungen sind insbesondere in den Branchen Maschinenbau, Produktion, Qualitätskontrolle, Holzverarbeitung, Umwelttechnik und Zellstoff-, Papier-, Papp-, Eisen- und Stahlerzeugung gefragt. (4 pp. 173–174)

4. Sensorschnittstellen

Nachdem die Daten von den Sensor-Elementen ermittelt wurden, müssen diese an die Auswerte-Elektronik transferiert werden. Bei der Auswerte- Elektronik kann es sich hierbei beispielsweise um einen Mikroprozessor oder um einen Mikrocontroller handeln. Der Unterschied zwischen einem Mikroprozessor und einem Mikrocontroller wird in Kapitel 5 genauer betrachtet.

Die Daten werden hierbei von einem Sensor über die Sensorschnittstelle gesendet und von einer entsprechenden Gegenschnittstelle der Auswerte- Elektronik empfangen. Um die Verbindung der Sensor-Elemente mit der Auswerte-Elektronik zu erleichtern, werden überwiegend Standard-Schnittstellen verwendet. Hierbei kann zwischen analogen Schnittstellen und digitalen Schnittstellen unterschieden werden. (5 p. 152)

Über eine analoge Schnittstelle können analoge Signale in Form von Spannung, Strom, Frequenz und Pulsweite übertragen werden. Hierbei werden die gemessenen Werte des Sensors eindeutig auf ein analoges Signal abgebildet. Dies kann beispielsweise mithilfe einer linearen Kennlinie erfolgen. Allerdings muss der Recheneinheit für die Auswertung des übertragenen Signals bekannt sein, um welchen Ausgangssensor es sich handelt, damit er das analoge Signal korrekt in die Ausgangsgröße umrechnen kann.

Da die Übertragung von analogen Signalen in Form von Spannung, Strom, Frequenz und Pulsweite sehr einfach ist, werden analoge Schnittstellen häufig in einfachen Wandlern und integrierten Sensoren verwendet. Hierbei wird zwischen dem Spannungsausgang, dem Stromausgang und der Pulsweitenmodulation unterschieden, wobei der Stromausgang über die Zweidraht, Dreidraht- und Vierdraht-Schnittstelle erfolgen kann. Allerdings muss die Auflösung und die maximale Reichweite beachtet werden, da es bei einer Spannungsübertragung beispielsweise zu einem Spannungsabfall kommen kann, der in einem Fehler resultiert. (5 pp. 152–159)

Über eine digitalen Schnittstelle können digitale Daten von dem Sensor-Element an die Auswerte-Elektronik übertragen werden. Dies ist insbesondere für die Verbindung einer Recheneinheit mit einem intelligenten Sensor-Element von Vorteil, da dieses die ursprünglich analogen Daten bereits im Voraus aufbereiten, digitalisieren und verarbeiten kann. Da die Daten dementsprechend bereits im digitalen Zustand vorliegen, sollten diese auch digital übertragen werden.

Die digitalen Schnittstellen besitzen viele verschiedene Ausprägungen, die nach den Kriterien „Komplexität“, „Bandbreite“ und „Übertragungsmedium“ differenziert werden können. Hierbei handelt es sich häufig um Bussysteme wie CAN und I2C, allerdings existieren auch Sensor-spezifische Schnittstellen wie SENT, PSI5 oder IO-Link. Die digitale Übertragung der Daten erfolgt hierbei in dem die Daten die verschiedenen Schichten des OSI-Referenzmodells durchlaufen. Diese Modell ist in Abbildung 25 ersichtlich. (5 pp. 159–163)

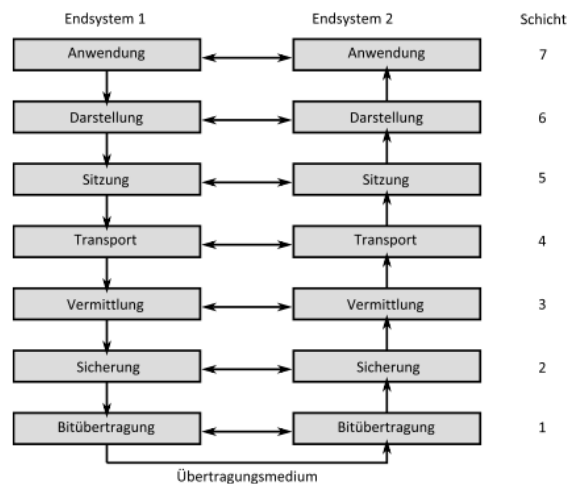


Abbildung 25: OSI-Referenzmodell (5 p. 163)

Ein Vorteil der digitalen Schnittstellen ist die Reduktion der Fehleranfälligkeit im Vergleich zu den analogen Schnittstellen. Außerdem können über die digitalen Schnittstellen auch weitere Parameter übertragen werden, die eine Diagnose über die korrekte Funktionalität des Sensors ermöglichen. Ein weiterer großer Vorteil der digitalen Schnittstellen gegenüber den analogen Schnittstellen ist die Bi-Direktionalität. Diese ermöglicht die Kommunikation zwischen Sensor und Recheneinheit in beide Richtungen anstatt nur in eine. Dadurch können die Sensor-Elemente von der Recheneinheit parametrisiert und programmiert werden. Außerdem können durch busfähige digitale Schnittstellen direkt mehrere Busteilnehmer gleichzeitig angesprochen werden, wodurch viele Sensoren zu ganzen Sensorsystemen verknüpft werden können.

Ein Nachteil der digitalen Schnittstellen gegenüber den analogen Schnittstellen hingegen ist der technische und kommerzielle Aufwand, da diese Übertragungssysteme häufig eine hohe Komplexität aufweisen. Zusätzlich dazu muss die Übertragungsgeschwindigkeit beachtet werden, da diese häufig geringer ist als bei analogen Schnittstellen. Dies hat zur Folge, dass bei zeitkritischen Anforderungen favorisiert analoge Schnittstellen verwendet werden, da die digitalen Schnittstellen zu langsam sind. (5 pp. 159–160)

5. Mikrocontroller-Technik

In der Mikrocontroller-Technik wird zwischen den Begriffen „Mikroprozessor“, „Mikrorechner“, „Mikrocontroller“ und „Mikrorechnersystem“ unterschieden.

Der Mikroprozessor entspricht der Zentraleinheit (CPU) eines Datenverarbeitungssystems. Hierfür umfasst er einen Prozesskern, der aus einem Steuerwerk und einem Rechenwerk besteht, und eine Schnittstelle zur Außenwelt. Diese Komponenten werden heute häufig auf einem Chip vereint. Zusätzlich dazu können abhängig von der Komplexität und Leistungsfähigkeit noch weitere Verarbeitungskomponenten wie eine Cache-Speicher oder eine virtuelle Speicherverwaltung hinzukommen. Der Mikroprozessor hat dabei die Aufgabe ein Programm, welches aus einer Reihe von Befehlen zur Bearbeitung einer Anwendung besteht, auszuführen. Hierbei steht die hohe Verarbeitungsleistung im Vordergrund.

Die Kombination von einem oder mehreren Mikroprozessoren in einer Zentraleinheit mit einem Speicher, einem Verbindungssystem und Ein- und Ausgabeschnittstellen, wird dabei als Mikrorechner bezeichnet. Der Speicher, das Verbindungssystem und die Ein- und Ausgabeschnittstellen werden ebenfalls durch den Mikroprozessor gesteuert.

Ein Mikrocontroller entspricht hierbei einem Mikrorechner, der auf einem Chip gekapselt ist. Die Mikrocontroller verfolgen hierbei das Ziel Steuerungs- und Kommunikationsaufgabe mit möglichst wenigen Bausteinen zu lösen. Hierbei steht die hohe funktionelle Integration im Vordergrund. Das Haupteinsatzgebiet der Mikrocontroller ist dabei die Steuerung eingebetteter Systeme. Aufgrund der Vielfalt verschiedener eingebetteter Systeme, existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Mikrocontrollern. Diese werden in Mikrocontrollerfamilien organisiert, die in der Regel den gleichen Prozessorkern, aber unterschiedliche Speicher und Ein- und Ausgabeschnittstellen besitzen. Solche Mikrocontroller mit gleichem Kern, aber unterschiedlichen Peripheriekomponenten, werden als Derivate bezeichnet.

Wird eine Mikrorechner oder ein Mikrocontroller nun über die Ein- und Ausgabeschnittstellen mit einem Peripherie-Gerät verbunden, spricht man von einem Mikrorechnersystem. Ein solches Peripherie-Gerät kann beispielsweise eine Tastatur oder eine Maus sein. Allerdings kann es sich bei einem Peripherie-Gerät ebenfalls um einen externen Sensor handeln, wie es die Sensor-Technik in Kapitel 2 beschreibt. Ein eingebettetes System ist in diesem Kontext ein System, welches durch einen Computer gesteuert wird, ohne dass dieser nach Außen in Erscheinung tritt. (15 pp. 1–2, 16 pp. 258–259) Eine grafische Darstellung der Begriffe „Mikroprozessor“, „Mikrorechner“ und „Mikrorechnersystem“ ist in Abbildung 26 ersichtlich.

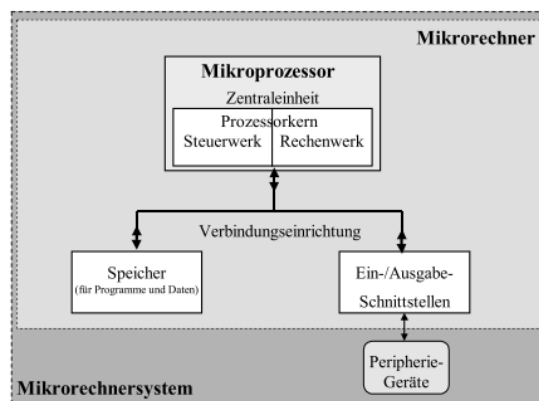


Abbildung 26: Abgrenzung der Begriffe "Mikroprozessor", "Mikrorechner" und "Mikrorechnersystem" (15 p. 2)

6. Arduino

Der Arduino ist eine Physical-Computing-Plattform, die aus einer Hardware-Komponente und aus einer Software-Komponente besteht. Bei der Hardware-Komponente handelt es sich um ein Arduino-Board mit einem integrierten Mikrocontroller. Bei der Software-Komponente hingegen handelt es sich um eine Arduino-IDE. (7 Kap. 1) Im Folgenden wird primär die Hardware-Komponente des Arduinos betrachtet und davon ausgehend die Software-Komponente.

6.1 Arduino-Board

Bei dem Arduino handelt es sich um ein Mikrocontroller-Board, welches aus verschiedenen Komponenten besteht, die auf eine Leiterplatte gelötet sind. Hierbei existieren verschiedene Varianten des Arduino-Boards, die sich in der Größe der Leiterplatte und dem mechanischen Aufbau unterscheiden. Dadurch haben sich Arduino-Varianten wie der Arduino Uno, der Arduino Duemilanove und der Arduino Diecimila entwickelt. Allerdings besitzen alle Arduino-Varianten eine identische elektronische Schaltung, die notwendig ist, um die Kompatibilität des Standardboards zu gewährleisten. Im Folgenden wird die Funktionsweise eines Arduinos an dem Standard-Arduino-Board Uno erläutert. Eine beschriftete Darstellung eines Arduino-Uno-Boards ist in Abbildung 27 ersichtlich. (7 Kap.1, 17 Kap.1, 6 Kap. 1)

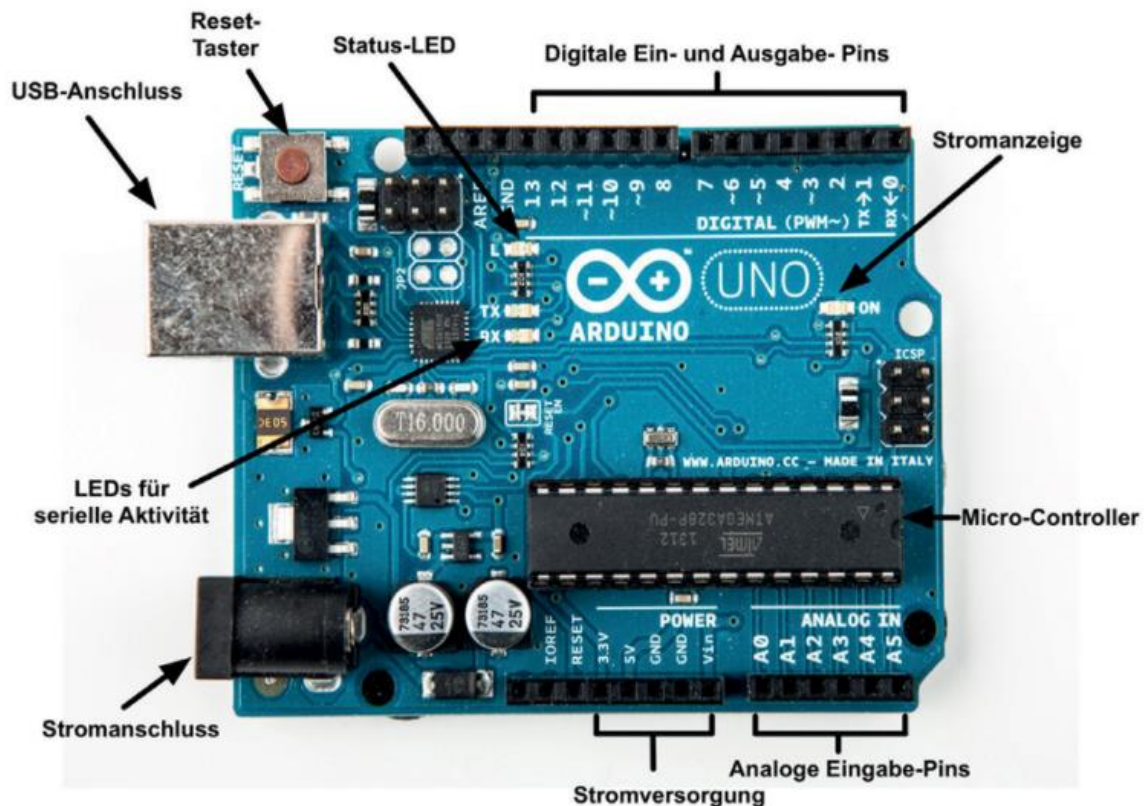


Abbildung 27: Darstellung der wichtigsten Komponenten eines Arduino-Boards (17 Kap. 1)

Da es sich bei dem Arduino um ein elektronisches Gerät handelt, muss dieses mit Strom versorgt werden. Dies kann mithilfe eines Netzteiles erfolgen, welches an den Stromanschluss angeschlossen

wird. Hierbei werden Netzteile mit einer Spannung zwischen 7 und 12V empfohlen. Alternativ kann die Stromversorgung aber auch über den USB-Anschluss erfolgen. Hierfür verbindet ein USB-Kabel das Arduino-Board über den USB-Anschluss mit einem Computer. Allerdings werden hierbei nur Spannungen im 5V-Bereich geliefert, die zu niedrig für manche Anwendungsfälle sind. Neben der reinen Energie-Versorgung kann der USB-Anschluss aber auch dafür genutzt werden, um neue Software auf den Arduino zu laden oder um eine grundsätzliche Kommunikation zwischen Arduino-Board und Computer zu ermöglichen. Die Stromversorgung des Arduino-Boards selbst und der externen Geräte erfolgt daraufhin über die Stromversorgungs-Pins 3.3V, 5V, Vin und den zwei Masse-Pins GND. Bei der Stromanzeige handelt es sich hierbei um eine LED, die Auskunft darüber gibt, ob die Stromversorgung erfolgreich war.

Das Herzstück des Arduino-Boards ist hierbei der Mikro-Controller. Dabei handelt es sich meistens um einen 8-Bit-Mikrocontroller, wie den ATmega328. Aber auch leistungsstärkere Mikrocontroller können mit dem Arduino-Board verbunden werden. Der Mikrocontroller kombiniert die CPU mit den Peripheriefunktionen, wie beispielsweise den I/O-Kanälen. Dieser hat die Aufgabe Programme, auch Sketche genannt, auszuführen, und Eingangs- und Ausgangssignale zu verarbeiten. Die Software-Programme können hierbei mithilfe eines Kabels von einem Computer auf den Mikrocontroller übertragen und in einem internen Flash-Speicher gespeichert werden. Sobald der Arduino an den Strom angeschlossen wird, führt er automatisch das aktuell gespeicherte Programm aus. Mithilfe der Reset-Taste kann das aktuelle Programm komplett neu gestartet werden. Dabei wird alles wieder auf Anfangszustand gebracht.

Bei den Peripheriefunktionen handelt es sich hierbei um die analogen Eingabe-Pins (unten rechts) und den digitalen Ein- und Ausgabe-Pins (oben rechts). Über die sechs analogen Eingabe-Pins A0-A5 können Analogsensoren an den Arduino angeschlossen werden. Diese nehmen Sensordaten entgegen und wandeln diese in Werte zwischen 0 und 1023 um. Die 14 digitalen I/O-Pins namens D0-D13 können für die digitale Ein- und Ausgabe verwendet werden. So kann beispielsweise entweder der Zustand eines Tasters abgefragt oder eine LED an- und ausgeschaltet werden. Die Digital-Pins fungieren hierbei wie ein Schalter, der sich in den zwei Zuständen „HIGH“ und „LOW“ befinden kann. Die sechs Pins D3, D5, D6, D9, D10 und D11 können ebenfalls als analoge Ausgabepins fungieren. Hierfür werden Werte zwischen 0 und 255 in eine Analogspannung umgewandelt.

Zusätzlich zu den Ein- und Ausgabepins besitzt das Arduino-Board auch bereits integrierte LEDs. Zu diesen LEDs zählen die bereits erwähnte Strom-Anzeige und die Status-LED, sowie die LED für serielle Kommunikation. Die Status-LED ist hierbei an den digitalen I/O-Pin 13 angeschlossen. Besitzt dieser den Zustand HIGH, werden 5V an diesen angelegt, die die LED-Lampe zum Leuchten bringen. In dem Zustand LOW wird die Stromzufuhr hingegen wieder gekappt, wodurch die LED erlischt. Die LEDs für serielle Kommunikation hingegen zeigen an, ob eine serielle Aktivität auf dem Arduino-Board besteht. Hierfür wurde die LED TX an den digitalen I/O-Pin D1 angeschlossen und die LED RX an den Pin D0. Die LED TX leuchtet hierbei auf, wenn Informationen gesendet werden, und die LED RX, wenn Bits empfangen werden. Da die Kommunikation und Bit-Übertragung sehr schnell erfolgt, kann das menschliche Auge das Aufblinken nur noch in Form von Flackern erkennen.

Die konkrete Verdrahtung der einzelnen elektronischen Komponenten kann einem Stromlaufplan entnommen werden. Hierbei wird jedes Bauteil, wie beispielsweise ein Widerstand, eine Leuchtdiode und ein Kondensator, als eigenes Symbol dargestellt.

Das reine Arduino-Board kann außerdem durch Shields erweitert werden. Bei den Shields handelt es sich um Erweiterungsplatinen, die Funktionserweiterungen durch Zusatzfunktionen und Schaltungen ermöglichen. Die Verbindung zwischen Arduino-Board und Shield erfolgt dabei über Stiftleisten, die an die Buchsenleisten des Arduino-Boards angeschlossen werden. Hierfür wird das Shield einfach auf den

Arduino aufgesteckt. Durch die „Sandwich-Montage“ können so mehrere Erweiterungsplatinen an den Arduino angeschlossen werden, unter der Prämisse, dass keine Signalleitungen mehrfach genutzt werden. Mögliche Shields sind hierbei das Ethernet-Shield, das Motor-Shield und das Datalogger-Shield.

Zusätzlich dazu werden in der Entwicklungs- und Testphase häufig Steckbretter verwendet. Bei den Steckbrettern handelt es sich um eine Leiterplatte mit Steckanschlüssen, die untereinander verbunden sind. In diese Steckanschlüsse kann man handelsübliche Bauelemente wie Widerstände, Leuchtdioden und integrierte Schaltungen stecken. Dadurch kann eine Schaltung schnell und ohne löten aufgebaut werden. Die Verbindung zwischen dem Steckbrett und dem Arduino-Board erfolgt hierbei mithilfe von Drahtverbindungen, die in die Steckbrettkontakte und in die Buchsen des Arduino-Boards gesteckt werden. Hierbei hat sich der Jumper-Wire durchgesetzt. Da diese mechanischen Verbindungen sehr empfindlich sind, werden in produktiven Anwendungen die Schaltungen meist auf einer Lochrasterplatine betrieben, die aus Leiterbahnen und Lötunkten besteht. (7 Kap.1, 17 Kap.1, 6 Kap. 1)

6.2 Arduino-IDE

Bei der Arduino-IDE handelt es sich um eine integrierte Programmierumgebung, die dem Anwender den Einstieg in den Arduino erleichtern soll, da diese das Erstellen, Testen und Hochladen von Sketches ermöglicht. Hierbei handelt es sich um ein Java-Programm. Dieses läuft auf vielen Betriebssystemen, wie beispielsweise Windows, Linux und Mac. Für deren Nutzung muss nur die IDE selbst sowie die nötigen Treiber auf dem Computer installiert werden.

Die IDE ist sehr simpel aufgebaut und besteht nur aus einem Editor, einem Compiler, einem Loader und einem Monitor für die serielle Schnittstelle. Ein Auszug aus der Arduino-IDE ist in Abbildung 28 erkennbar.

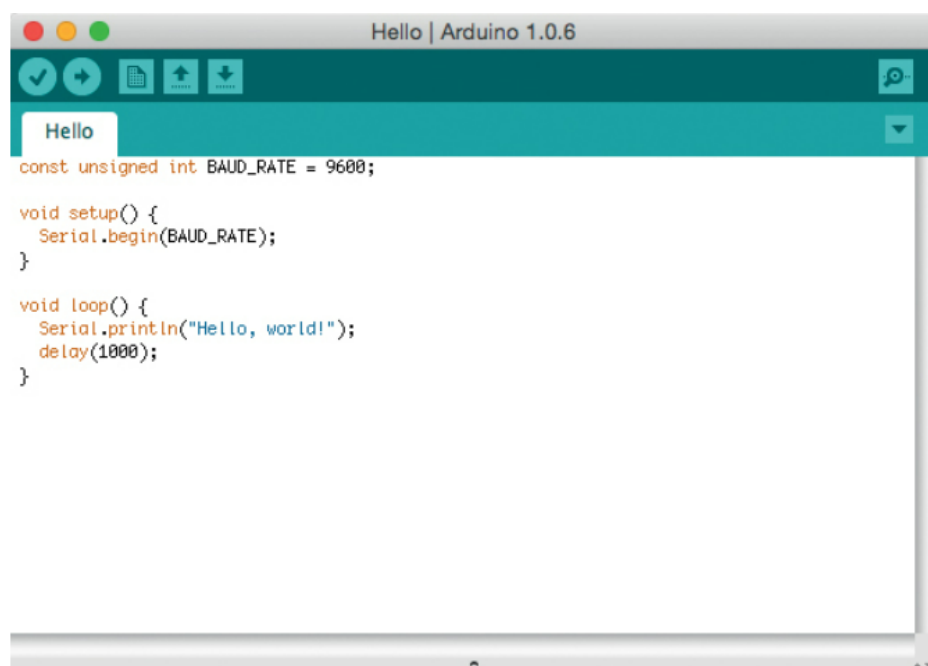


Abbildung 28: Auszug aus der Arduino-IDE (7 Kap. 1)

Nachdem der Computer über ein USB-Kabel mit dem Arduino-Board verbunden wurde, kann die Verbindung der IDE mit dem Arduino-Board erfolgen. Hierfür muss innerhalb der IDE das korrekte Arduino-Board und der richtige COM-Port ausgewählt werden. Nun kann Java-Source-Code innerhalb der IDE geschrieben werden.

Die grundsätzliche Programmstruktur eines Arduino-Programmes umfasst die Setup-Funktion `setup()` und das Hauptprogramm `loop()`. Die Setup-Funktion wird hierbei zu Beginn einmal aufgerufen. Diese definiert die Grundeinstellungen und nimmt die Variablendeklaration vor. Im Gegensatz zu der Setup-Funktion wird die Loop-Funktion daraufhin endlos wiederholt, bis eine Spannungsunterbrechung die Ausführung stoppt. Innerhalb der Loop-Funktion können so beispielsweise bestimmte Pins angesprochen und deren Zustand geändert werden. Durch den Wechsel des Zustandes des digitalen Pins D13 von HIGH zu LOW und wieder zurück, kann so beispielsweise die Status-LED zum Blinken gebracht werden. Umgekehrt können allerdings nicht nur Outputs erzeugt werden, sondern auch Inputs verarbeitet werden. Durch die Definition von Inputs und Outputs können nun komplizierte Logiken und Funktionen geschrieben werden.

Neben den Funktionen, die der Anwender selbst schreibt, kann aber auch auf bereits bestehende Funktionen zugegriffen werden, die in Bibliotheken hinterlegt sind. Diese Bibliotheken können entweder über die Entwicklungsumgebung oder über die Dateisysteme importiert werden.

Mithilfe der IDE-Schaltfläche „Verify“ kann das geschriebene Programm nun kompiliert werden. Über den Upload-Button wird das aktuelle Programm daraufhin auf das Arduino-Board transferiert. Zusätzlich dazu kann ein neues Programm geschrieben, gespeichert und wieder geöffnet werden. (7 Kap.1, 17 Kap.1, 6 Kap. 1)

7. Praktische Anwendung

Im Folgenden wird die praktische Anwendung von Ultraschall- und Infrarotsensoren am Arduino untersucht. Hierfür wird das Arduino-Board über ein Netzteil an den Strom angeschlossen und über ein USB-Kabel mit einem Computer verbunden. Zusätzlich dazu wird die Arduino-IDE sowie die notwendigen Treiber auf dem entsprechenden Betriebssystem des Computers installiert.

7.1 Implementierung eines Ultraschallsensors am Arduino

Innerhalb des Arduino-Umfeldes können viele verschiedene Typen von Ultraschall-Sensoren verwendet werden. Das Original ist hierbei der PING-Sensor des Herstellers Parallax. Da dieser mit Kosten von 30€ allerdings vergleichsweise teuer ist, werden häufig auch günstigere Nachfolgemodelle von anderen Herstellern verwendet. Am beliebtesten ist hierbei der HC-SR04-Sensor, der mit Kosten von 2-3€ deutlich günstiger ist. Beide Sensoren können über ein Steckbrett mit dem Arduino verbunden und mithilfe der Arduino IDE programmiert werden. Allerdings fällt hierbei auf, dass der PING-Sensor nur einen digitalen I/O-Pin benötigt, während es bei dem HC-SR04-Sensor zwei sind. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an I/O-Pins unterscheidet sich der Programmiercode der beiden Sensoren ein wenig, wenn auch nicht wesentlich, voneinander.

Die grundsätzliche Funktionsweise der beiden Ultraschall-Sensoren ist beinahe identisch. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, messen beide Sensoren die Zeitdifferenz zwischen dem Aussenden eines Ultraschallsignals und dem Empfangen seiner Reflexion und folgern daraus den Abstand. Hierfür kann vereinfacht eine Ultraschallgeschwindigkeit c von 340m/s angenommen werden. Daraus kann eine Laufzeit von 29 Mikrosekunden pro Zentimeter gefolgert werden. Der Abstand kann demzufolge mit der folgenden Formel ermittelt werden:

$$\text{Abstand in cm} = \frac{\text{gemessene Zeit}}{2} \cdot 29$$

(6 Kap. 4, 1 Kap. 3)

Im Folgenden wird primär eine mögliche Implementierung des PING-Sensors und eine mögliche Implementierung des HC-SR04-Sensors untersucht. Darauf aufbauend wird ein Praxisbeispiel umgesetzt, in welchem eine Abstandsmesser für die Garage implementiert wird.

7.1.1 Implementierung eines PING-Sensors

Bei dem PING)))-Ultrasonic-Sensor von Parallax handelt es sich vermutlich um den bekanntesten Ultraschallsensor in der Arduino-Welt. Dieser kann Objekte in einem Abstand von 2 bis 300 cm erkennen und den Abstand zu diesen messen. Hierfür muss der PING-Sensor mit dem Arduino über einen 5V-Stromversorgungs-Pin, einen Masse-GND-Pin und einen digitalen I/O-Pin verbunden werden. Die Verbindung der Pins mit dem Sensor kann hierbei über ein Steckbrett vereinfacht werden, wie in Abbildung 29 ersichtlich ist.

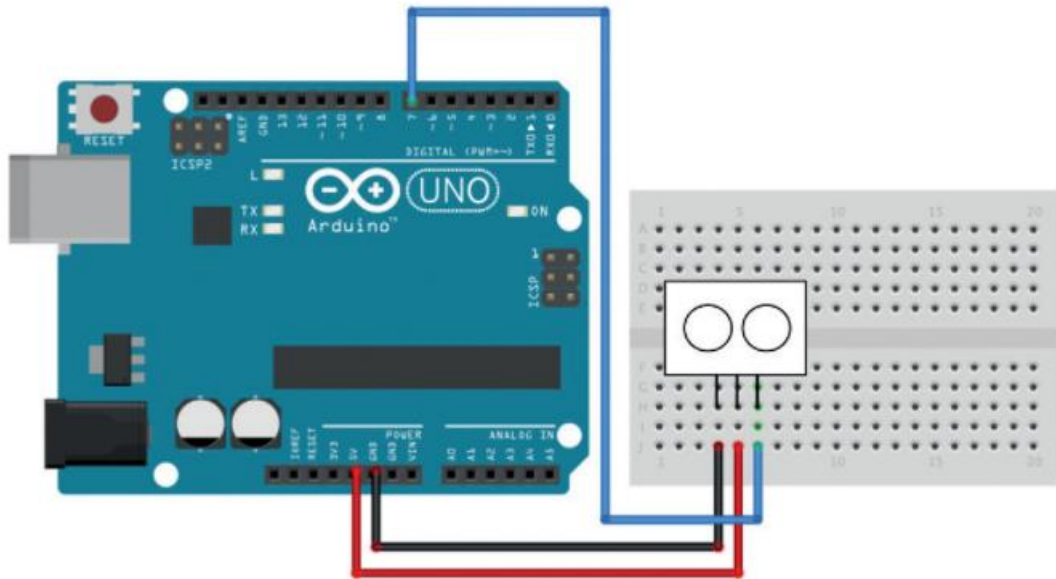


Abbildung 29: Verbindung eines PING-Ultraschallsensors mit einem Arduino (17 Kap. 5)

Nun kann innerhalb der Arduino-IDE ein Programmcode geschrieben werden, der die Kommunikation zwischen Arduino und Sensor ermöglicht. Innerhalb dieses Codes werden primär die Konstanten deklariert. Hierbei kann auch bereits die Funktion „microseconds_to_cm“ implementiert werden, die die Zeitdifferenz Δt in den Abstand in cm umrechnet. Hierbei wird die vereinfachte Schallgeschwindigkeit von 340 m/s unterstellt.

```
const unsigned int PING_SENSOR_IO_PIN = 7;
const unsigned int BAUD_RATE = 9600;

unsigned long microseconds_to_cm(const unsigned long microseconds)
{return microseconds / 29 / 2;}
```

Quellcode 1: Variablendeklaration am PING-Sensor

Daraufhin kann die Setup-Funktion definiert werden. Innerhalb dieser wird der Sensor mit dem seriellen Monitor verbunden und die Baudrate des seriellen Ports auf 9600 festgelegt. Dies ermöglicht die spätere Ausgabe der Sensordaten auf dem seriellen Monitor.

```
void setup() {
    Serial.begin(BAUD_RATE);
}
```

Quellcode 2: Setup-Funktion am PING-Sensor

Nun folgt das Hauptprogramm. Innerhalb der Loop-Funktion wird der digitale Pin zunächst in den Output-Modus gesetzt. Dies bedeutet, dass der Sensor in diesem Moment ein Ultraschall-Signal aussenden kann. Hierfür wird der Signal-Pin für zwei Mikrosekunden auf LOW gesetzt, um einen sauberen Zustand zu garantieren. Dadurch können infolgedessen klare HIGH-Impulse gesendet werden. Der HIGH-Impuls wird nun 5 Mikrosekunden lang an das Signal-Pin gesendet, um die Messung zu starten. Der Sensor wandelt diesen HIGH-Impuls infolgedessen in einen 40-kHz-Ton um. Nach Ablauf

der 5 Mikrosekunden, wird der digitale Pin wiederum auf LOW gesetzt und der Ton wird unterbrochen.

Nun wird der digitale Pin aus dem Output-Modus in den Input-Modus umgeschaltet. Der Wechsel zwischen dem Input- und Output-Modus ist notwendig, da der PING-Sensor nur über einen digitalen I/O-Pin mit dem Arduino verbunden ist. Dieser I/O-Pin muss daher sowohl die Input- als auch Output-Funktion des Sensors übernehmen. Der Input-Modus bedeutet nun, dass der Sensor ein Ultraschall-Signal empfangen kann. Mithilfe der „pulseIn“-Funktion kann nun die Zeitdifferenz zwischen Aussenden und Empfangen des Ultraschall-Signales ermittelt werden. Aus dieser kann daraufhin mithilfe der „microseconds_to_cm“-Funktion der Abstand gefolgert und über die serielle Schnittstelle ausgegeben werden. Ein möglicher Programmcode kann wie folgt aussehen:

```
void loop() {
    pinMode(PING_SENSOR_IO_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(PING_SENSOR_IO_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(2);

    digitalWrite(PING_SENSOR_IO_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(PING_SENSOR_IO_PIN, LOW);

    pinMode(PING_SENSOR_IO_PIN, INPUT);
    const unsigned long duration = pulseIn(PING_SENSOR_IO_PIN, HIGH);
    if (duration == 0) {
        Serial.println("Warning: We did not get a pulse from sensor.");
    } else {
        Serial.print("Distance to nearest object: ");
        Serial.print(microseconds_to_cm(duration));
        Serial.println(" cm");
    }

    delay(100);
}
```

Quellcode 3: Loop-Funktion am PING-Sensor

Nachdem der vollständige Programmcode in der Arduino IDE kompiliert und hochgeladen wurde, kann die Abstandsmessung beginnen. Hierfür kann der serielle Monitor über „Arduino IDE > Tools > Serial Monitor“ geöffnet werden. Nun erscheint eine Anzeige über den Abstand zum nächsten Objekt in Zentimeter auf dem seriellen Monitor. Falls hierbei jedes Mal derselbe Messwert erscheint, muss die Platzierung des Sensors überprüft werden, da eine unvorhergesehene Reflexion des Schallkegels am Tisch oder am Steckbrett möglich ist. Mithilfe eines Servo-Verlängerungskabels kann der Sensor problemlos weiter entfernt vom Arduino platziert werden.

Da der Abstand aktuell in Zentimeter ausgegeben wird, kann die Genauigkeit der Ausgabe mit Fließkommazahlen erhöht werden. Hierfür muss zusätzlicher Programmcode implementiert und kompiliert werden. Außerdem muss beachtet werden, dass dem ausgesendeten Schallsignal eine konkrete Schallgeschwindigkeit von 340 m/s unterstellt wurde. Diese ist zwar im Durchschnitt sehr üblich, kann aber in Abhängigkeit von der Temperatur schwanken. Daher kann die Genauigkeit der Messung durch einen zusätzlichen Temperatursensor ebenfalls weiter erhöht werden. (6 Kap. 3, 17 Kap. 5)

7.1.2 Implementierung eines HC-SR04-Sensors

Der HC-SR04-Sensor ist eine günstigere Abwandlung des PING-Sensors und besonders für Projekte mit mehreren Ultraschallsensoren gut geeignet. Im Gegensatz zum PING-Sensor verwendet der HC-SR04-Sensor zwei digitale I/O-Pins, weshalb ein Wechsel zwischen Input- und Output-Modus überflüssig wird. Allerdings benötigt er ebenfalls eine Spannung von 5V und muss dementsprechend auch mit einem 5V-Spannungs-Pin und einem Masse-GND-Pin verbunden werden. Der HC-SR04-Sensor umfasst hierbei einen Messbereich von 3 bis 400 cm. Eine mögliche Verbindung des HC-SR04-Sensors mit dem Arduino über ein Steckbrett ist in Abbildung 30 ersichtlich. (6 Kap. 4)

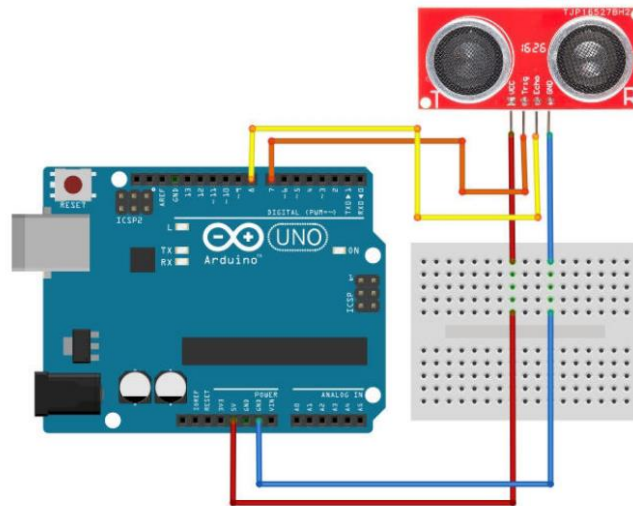


Abbildung 30: Verbindung eines HC-SR04-Ultraschallsensors mit einem Arduino (6 Kap. 4)

Analog zum PING-Sensor, können nun die Variablen innerhalb der Arduino IDE deklariert werden. Allerdings übernimmt hierbei der I/O-Pin 7 die Rolle des Output-Pins und der I/O-Pin 8 die Rolle des Input-Pins. Zusätzlich dazu kann die maximale Pulsdifferenzen von 23.200 Mikrosekunden definiert werden, da sonst die maximale Entfernung von 400 cm überschritten wird. Hierfür kann der folgende Beispiel-Code verwendet werden:

```
const int TRIG_PIN = 7;
const int ECHO_PIN = 8;
const unsigned int MAX_DIST = 23200;
```

Quellcode 4: Variablendeklaration am HC-SR04-Sensor

Nun muss auch hier die Setup-Funktion definiert werden. In dieser wird der Trigger-Ausgang gesetzt und die serielle Schnittstelle gestartet.

```
void setup()
{
    // Trigger für den Start der Messung
    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

    // Serielle Schnittstelle
    Serial.begin(9600);
}
```

Quellcode 5: Setup-Funktion am HC-SR04-Sensor

Im Hauptprogramm kann daraufhin die Logik implementiert werden. Hierfür werden primär lokale Variablen definiert, die für die Zeitmessung und Berechnung nützlich sind. Daraufhin wird der Triggerpuls definiert. Dieser muss mindestens 10 Sekunden lang sein, um den Messvorgang zu starten. Die Zeitdifferenz Δt zwischen dem ausgehenden und eingehenden Signal wird nun gemessen, indem die Startzeit t_1 gesetzt wird, wenn der Echo-Pin auf LOW steht und die Endzeit t_2 , wenn der Echo-Pin auf HIGH wechselt. Die Differenz zwischen t_1 und t_2 entspricht nun der Pulsbreite Δt . Aus der Pulsbreite kann daraufhin der Abstand in cm gefolgert werden. Im letzten Schritt kann nun überprüft werden, ob die Pulsbreite größer ist als die maximale Messung es erlaubt. Falls dies der Fall ist, kann eine Fehlermeldung ausgegeben werden. Liegt die Pulsbreite hingegen im akzeptablen Bereich, wird der Abstandswert über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Der Quellcode zu der eben beschriebenen Logik kann hierbei wie folgt aussehen:

```
void loop()
{
    unsigned long t1;
    unsigned long t2;
    unsigned long pulse_width;
    float cm;
    float inches;

    // Trigger auf HIGH für min. 10 Mikrosekunden
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    // Warten auf Signal an Echo-Pin
    while ( digitalRead(ECHO_PIN) == 0 );

    // Note: the micros() counter will overflow after ~70 min
    // Messung von Pulslänge an Echo-Pin
    t1 = micros();
    while ( digitalRead(ECHO_PIN) == 1 );
    t2 = micros();
    pulse_width = t2 - t1;

    // Berechnung von Distanz in cm und inch
    cm = pulse_width / 58.0;

    // Ausgabe auf serielle Schnittstelle
    if ( pulse_width > MAX_DIST )
    {
        Serial.println("ERROR: Out of range");
    }
    else
    {
        Serial.print("Abstand: ");
        Serial.print(cm);
        Serial.print(" cm");
    }
    // warten bis nächste Messung
    delay(60);
}
```

Quellcode 6: Loop-Funktion am HC-SR04-Sensor

Sobald der Programmcode vollständig kompiliert und hochgeladen wurde, kann auch beim HC-SR04 die Messung beginnen. Die Ergebnisse der Messung werden analog zum PING-Sensor auf dem seriellen Monitor der Arduino IDE ausgegeben. (6 Kap. 4)

7.1.3 Praxisbeispiel: Abstandsmesser für die Garage mithilfe von Ultraschall-Sensoren

Eine automatische Abstandsmessung mithilfe von Ultraschallsensoren ist in vielen Situationen praktisch. So kann die Kombination aus Arduino und Ultraschallsensor beispielsweise in einen Roboter eingebaut werden, damit sich dieser besser auf seinem Weg orientieren kann. Alternativ kann sie aber auch als Alarmanlage genutzt werden, die eine Sirene auslöst, sobald sich jemand einem wertvollen Gemälde zu sehr nähert. (17 Kap. 5)

Im Folgenden wird nun genauer betrachtet, wie man den HC-SR04-Abstandssensor nutzen kann, um eine Abstandsmessung in der Garage zu implementieren. Hierfür werden zusätzlich zum Ultraschall-Sensor sechs LEDs mit dem Arduino verbunden und der Code aus Kapitel 7.1.2 so erweitert, dass die Ansteuerung der LEDs realisiert werden kann. Das Ziel ist es hierbei, den Abstand des Autos zu der Garagenwand über LEDs zu visualisieren, anstatt den Abstand ausschließlich auf dem seriellen Monitor auszugeben. Eine mögliche Verbindungsschaltung zwischen dem Arduino, dem Ultraschall-Sensor und den LEDs ist in Abbildung 31 ersichtlich.

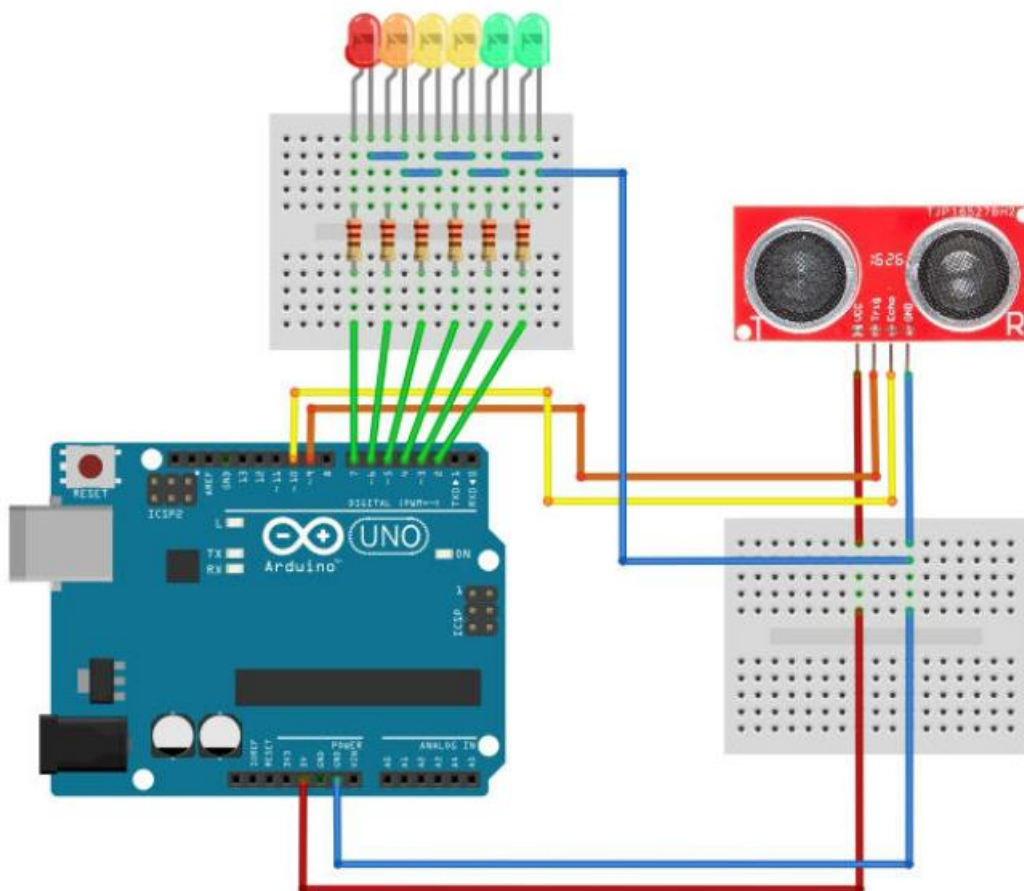


Abbildung 31: Arduino-Schaltung für einen Abstandsmelder mit LED-Anzeige (6 Kap. 4)

Hierbei können die sechs LEDs den digitalen I/O-Pins D2 bis D7 zugeordnet werden, während der HC-SR04 über die digitalen I/O-Pins 9 und 10 mit dem Arduino verbunden ist. Nun können den

Leuchtdioden verschiedene Abstände zugeordnet werden, wobei die LED am Pin D2 beispielsweise einem Abstand von über 50cm entspricht und grün leuchtet, während die LED am Pin D7 einem Abstand von 1 bis 9 cm entspricht und rot leuchtet. Auf diese Weise kann eine Visualisierung des Abstandes in 10 cm Schritten realisiert werden.

Innerhalb des Programmcodes müssen dafür zu Beginn zusätzlich die neuen Variablen für die Pins deklariert werden. Dies kann wie folgt aussehen:

```
// LED-Pins
int PinLED1 = 7;
int PinLED10 = 6;
int PinLED20 = 5;
int PinLED30 = 4;
int PinLED40 = 3;
int PinLED50 = 2;
```

Quellcode 7: Variablendeklaration für zusätzliche LEDs

Daraufhin müssen diese neu deklarierten Variablen innerhalb der Setup-Funktion dem Output zugeordnet werden:

```
// LED für Abstandsanzeige
pinMode(PinLED1, OUTPUT);
pinMode(PinLED10, OUTPUT);
pinMode(PinLED20, OUTPUT);
pinMode(PinLED30, OUTPUT);
pinMode(PinLED40, OUTPUT);
pinMode(PinLED50, OUTPUT);
```

Quellcode 8: Setup-Funktion-Zusatz für LEDs

Abschließend muss nun auch das Hauptprogramm so angepasst werden, dass die LEDs in Abhängigkeit vom Abstand beginnen zu leuchten. Hierfür wird in dem else-Teil der Loop-Funktion die Ansteuerungslogik der einzelnen LEDs implementiert. Die Ansteuerung erfolgt hierbei mithilfe von Portmanipulation, wodurch der Pin D7 beispielsweise über den PortD=B10000000 angesprochen werden kann und der Pin D6 über den PortD=B11000000. Mithilfe der Portmanipulation kann das Hauptprogramm des HC-SR04 nun um den folgenden Code erweitert werden:

```
else
{
    Serial.print("Abstand: ");
    Serial.print(cm);
    Serial.print(" cm ");

    // Ansteuerung der Abstands-LED
    if (cm >= 1)
    {PORTD = B10000000;}
    if (cm >= 10)
    {PORTD = B11000000;}
    if (cm >= 20)
    {PORTD = B11100000;}
    if (cm >= 30)
    {PORTD = B11110000;}
    if (cm >= 40)
    {PORTD = B11111000;}
```



```
    if (cm >= 50)
    {PORTD = B11111100;}
}
```

Quellcode 9: Loop-Funktion-Zusatz für LEDs

Sobald nun ein Pin angesprochen wird, wird dieses auf HIGH gesetzt, während die anderen auf LOW bleiben. Dies bedeutet infolgedessen, dass die angesprochenen Pins aufleuchten, während die anderen dunkel bleiben. Auf diese Weise ist für den Autofahrer direkt ersichtlich, wie weit er noch von den Garagenwand entfernt ist. (6 Kap. 4)

7.2 Implementierung eines Infrarotsensors am Arduino

Auch bei den Infrarot-Sensoren gibt es viele verschiedene Typen, die in Kombination mit dem Arduino implementiert werden können, wie beispielsweise den GP2Y0A710K0F von Sharp oder den FC-51. Manche dieser Infrarot-Sensoren sind ausschließlich dafür geeignet Objekte zu erkennen, während mit anderen auch konkrete Abstände gemessen werden können. Hierfür emittieren beide Sorten von Sensoren infrarote Lichtwellen, wie Kapitel 3.2.3 beschrieben, und nehmen die Reflexion der Lichtwellen wieder auf.

Im Folgenden wird zuerst der FC-51-Sensor betrachtet, der die Objekterkennung ermöglicht, und darauffolgend der GP2Y0A710K0F, der zusätzlich dazu den Abstand zu dem Objekt messen kann. Abschließend wird betrachtet, inwieweit das Praxisbeispiel aus Kapitel 7.1.3 auch mit Infrarot-Sensoren umgesetzt werden kann. (7 Kap. 5, 18, 14)

7.2.1 Implementierung eines FC-51-Sensors

Der FC-51-Infrarot-Sensor besteht aus einer IR-LED, die das infrarote Licht emittiert und aus einer einfachen Fotodiode, die das reflektierte, infrarote Licht wiederrum aufnimmt. Um die korrekte Funktionsweise und Kommunikation zwischen dem Sensor und dem Arduino zu ermöglichen, muss der Sensor über den 5V-Stromversorgungs-Pin, den Masse-GND-Pin und einem digitalen I/O-Pin mit dem Arduino verbunden werden. Ein möglicher Schaltplan kann in Abbildung 32 betrachtet werden:

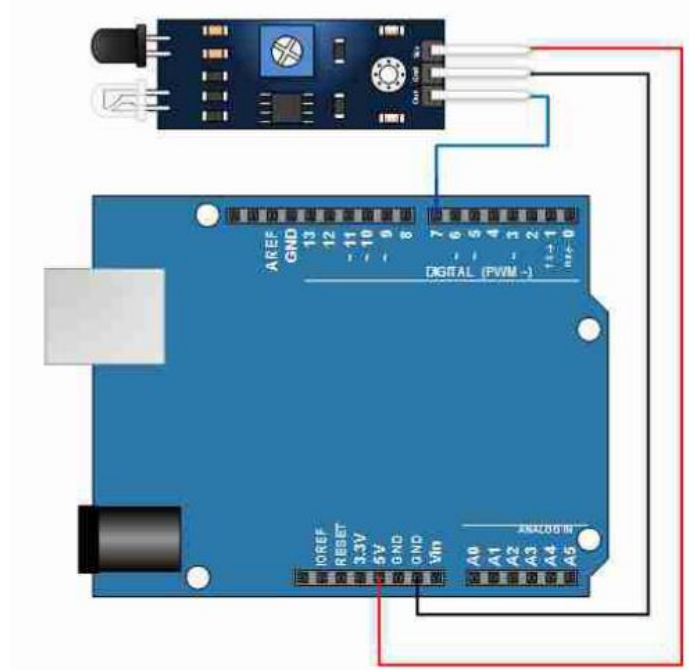


Abbildung 32: Schaltplan eines IR-FC-51-Sensors mit dem Arduino (18)

Nun kann der Programmcode für den Sensor in der Arduino IDE implementiert und kompiliert werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Fotodiode ein LOW/0-Signal sendet, wenn sie reflektierte Infrarot-Wellen aufnimmt und demzufolge ein Objekt detektiert hat, und auf HIGH bleibt, wenn sie keine Reflexionen empfängt. Ein möglicher Programmcode kann daher wie folgt aussehen:

```
int IRSensor = 7; // connect ir sensor to arduino pin 7

void setup()
{
  pinMode (IRSensor, INPUT); // sensor pin INPUT
  Serial.begin(9600); // open the serial port at 9600 bps:
}

void loop()
{
  int statusSensor = digitalRead (IRSensor);

  if (statusSensor == 1)
    Serial.print("HIGH-    No Obstacle/Black Surface\n");
  else
    Serial.print("LOW-     Obstacle Detected/White Surface\n");
}
```

Quellcode 10: Programmcode für FC-51-Sensor

Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass helle Oberflächen das Licht besser reflektieren als dunkle Oberflächen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dunkle Oberflächen einen großen Teil des Lichtes absorbieren, während helle Oberflächen beinahe das komplette Licht reflektieren. Daher kann es passieren, dass Objekte mit einer dunklen Oberfläche grundsätzlich nicht erkannt werden. (18)

7.2.2 Implementierung eines GP2Y0A710K0F-Sensors

Im Gegensatz zum FC-51-Sensor kann der GP2Y0A710K0F-Sensor Objekte nicht nur erkennen, sondern auch den konkreten Abstand zu diesem ermitteln. Der Sensor kann hierbei den Abstand zu Objekten in einer Reichweite von 100 bis 500 cm ermitteln. Hierfür nutzt er das Triangulationsverfahren, das in Kapitel 3.2.3.1 beschrieben ist, und ein PSD-Element als IR-Empfänger anstatt einer einfachen Fotodiode. Der IR-Emitter bleibt nichtsdestotrotz eine einfache IR-LED.

Der GP2Y0A710K0F-Sensor besitzt zwei 5V-Stromversorgungspins (schwarz, gelb), zwei Masse-GND-Pins (Rot, Blau) und ein analoges Ausgabe-Pin A0 (Grün). Da diese Sorte von Abstandssensor dazu neigt, sehr laut zu werden, wird empfohlen, einen Kondensator von mindestens 10 µF zwischen die Stromversorgungs- und Masse-Pins zu schalten. Ein möglicher Schaltplan zwischen Arduino und Sensor kann nun wie folgt aussehen:

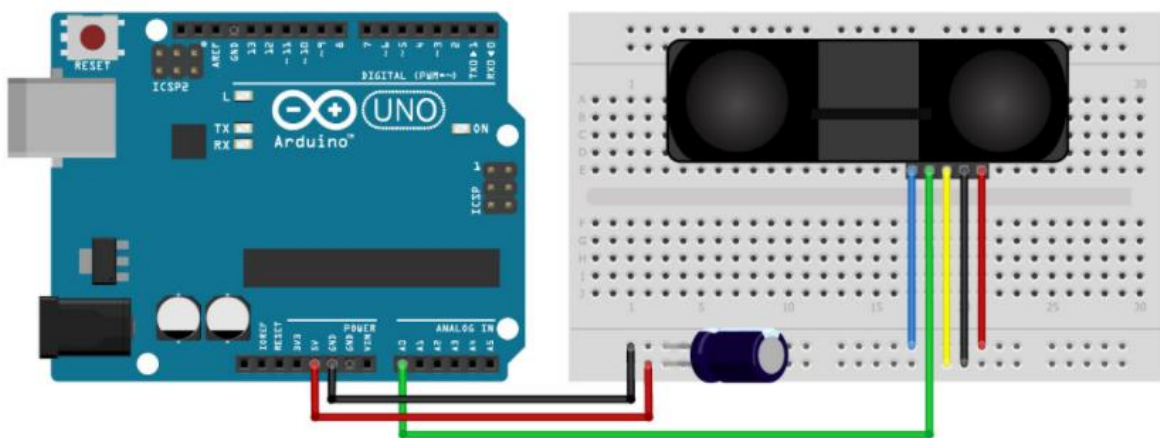


Abbildung 33: Schaltplan zwischen Arduino und GP2Y0A710K0F-Sensor (14)

Die Abstandsermittlung erfolgt hierbei über die Ausgabe einer analogen Spannung, die induziert wird, wenn das PSD-Element eine infrarote Lichtwelle in einem bestimmten Winkel wahrnimmt. Die Spannung variiert hierbei in einem Bereich von 2,5V bei 100 cm Entfernung und 1,4 V bei 500 cm Entfernung. Falls die Spannung hierbei unter 1,4V oder über 3,3V fällt, wird ein Abstand von 0 cm ausgegeben. Allerdings ist hierbei kein linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung und dem Abstand zu erkennen. Rechnet man hingegen die Ausgangsspannung gegen den inversen Abstand, lässt sich eine annähernd lineare Kurve ermitteln, die mit der Funktion $y = 137500x + 1125$ beschrieben werden kann. Hierbei entspricht y der Ausgangsspannung in mV und x dem inversen Abstand $\frac{1}{\text{Abstand in cm}}$. Daraus lässt sich die folgende Formel für den Abstand in cm folgern:

$$\text{Abstand} = \frac{1}{\left(\frac{\text{Ausgangsspannung} - 1125}{137500}\right)}$$

In der Abbildung 34 kann links die normale Abstands-Spannungs-Kurve betrachtet werden und rechts die inverse Abstands-Spannungs-Kurve. Anhand der normalen Abstands-Spannungs-Kurve kann nun auch ermittelt werden, warum ausschließlich Objekte in einem Abstand von 100 bis 500 cm zuverlässig erkannt werden können.

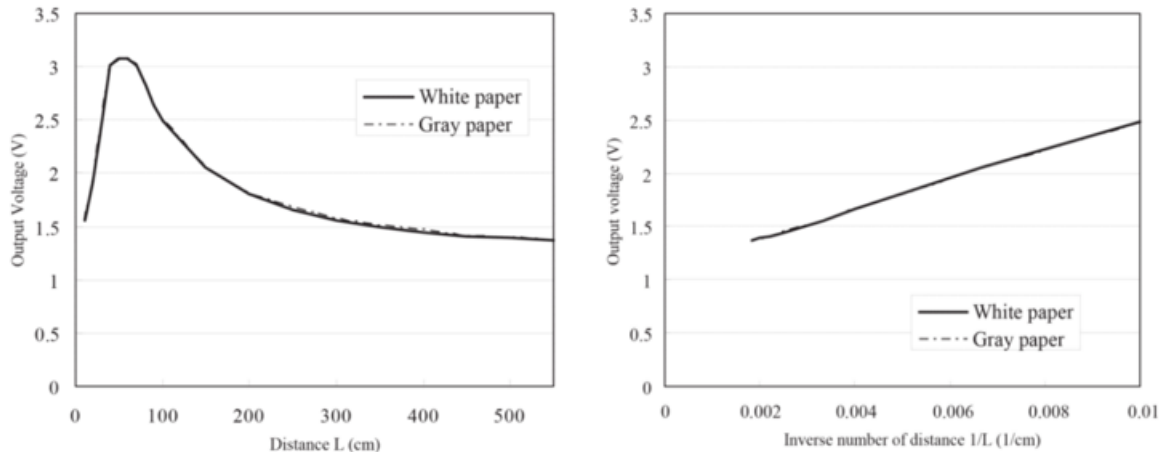


Abbildung 34: Normale Abstands-Spannungs-Kurve (links) und inverse Abstands-Spannungs-Kurve (rechts) (14)

Um diese Logik nun auch im Programmcode abzubilden, kann die SharpIR-Bibliothek importiert werden, die die eben ermittelte Formel bereits enthält. Ein möglicher Programmcode kann nun wie folgt aussehen:

```
// Include the library:
#include <SharpIR.h>

// Define model and input pin:
#define IRPin A0
#define model 100500

// Create variable to store the distance:
int distance_cm;

// Create a new instance of the SharpIR class:
SharpIR mySensor = SharpIR(IRPin, model);

void setup() {
  // Begin serial communication at a baud rate of 9600:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Get a distance measurement and store it as distance_cm:
  distance_cm = mySensor.distance();
  // Print the measured distance to the serial monitor:
  Serial.print("Mean distance: ");
  Serial.print(distance_cm);
  Serial.println(" cm");
  delay(1000);
}
```

Quellcode 11: Programmcode für GP2Y0A710K0F-Sensors

In diesem Beispiel wurde nur ein IR-Sensor mit dem Arduino verbunden. Da die Messwerte des Sensors sehr stark schwanken können, werden pro Ausgabe 25 Messwerte ermittelt, Ausreißer verworfen und der Mittelwert gebildet, um einen stabileren Abstandwert zu erhalten. Diese Berechnung dauert ungefähr 53 Millisekunden.

Um die Genauigkeit der Messung weiter zu verbessern, können allerdings auch mehrere Sensoren verwendet werden. Hierfür können die weiteren Sensoren über andere analoge Pins ebenfalls mit dem Arduino verbunden werden. Sobald alle Sensoren mit dem Arduino verbunden sind, kann pro Sensor ein neues Sensor-Objekt im Programmcode definiert und auf deren Output zugegriffen werden. (14)

7.2.3 Praxisbeispiel: Abstandsmesser für die Garage mithilfe von Infrarot-Sensoren

Die Infrarot-Sensoren können ebenfalls in Robotern eingebaut werden, damit diese Hindernisse detektieren und Abstände ermitteln können. (1) Sie können aber auch als Einpark-Hilfe in Form eines Abstandsmessers in der Garage genutzt werden.

Um mithilfe von Infrarot-Sensoren einen Abstandsmesser für die Garage zu implementieren, muss allerdings primär ein IR-Sensor ausgewählt werden, der auch dazu fähig ist, Abstände zu messen, und nicht nur Objekte zu detektieren. Demzufolge ist der FC-51-IR-Sensor für diesen Anwendungsfall unbrauchbar. Im Gegensatz zum FC-51-Sensor, ist der GP2Y0A710K0F-Sensor von Sharp hingegen tatsächlich in der Lage Abstände zu ermitteln. Allerdings ermittelt dieser ausschließlich Objektabstände in einer Reichweite zwischen 100 und 500 cm zuverlässig, was für diesen Anwendungsfall ebenfalls unbrauchbar ist.

Der GP2Y0A21YK0F-Sensor von Sharp hingegen ist explizit auf Distanzen zwischen 10 und 80 cm ausgelegt. Hierbei entspricht eine Ausgangsspannung von 2,6V etwa einem Abstand von 10 cm und eine Spannung von 0,4V einem Abstand von 80 cm. (19) In Kombination mit dem Infrarot-Sensor GP2Y0A41SK0F von SHARP, der eine Reichweite von 4 cm (ungefähr 3V) bis 30 cm (ungefähr 0,4V) realisiert (20), kann dadurch die Abstandsmessung für die Garage mit Infrarot-Sensoren genauso genau durchgeführt werden wie mit dem Ultraschall-Sensor in Kapitel 7.1.3.

Hierfür kann der Programm-Code aus Kapitel 7.2.2 so angepasst werden, dass zwei Sensor-Objekte implementiert werden, wobei das erste Sensor-Objekt dem 10-80cm-Sensor von SHARP entspricht und das zweite Sensor-Objekt dem 4-30cm-Sensor von SHARP. Nun kann im Hauptprogramm definiert werden, dass für Distanzen über 30cm der Messwert von Sensor-Objekt 1 genommen werden soll, für Distanzen unter 10 cm der Messwert von Sensor-Objekt 2 und für Distanzen zwischen 10 und 30 cm der Mittelwert aus den beiden Sensor-Objekten. Auf diese Weise lassen sich Abstände im Bereich von 4 bis 80 cm zuverlässig bestimmen.

Sobald die Entfernungen zuverlässig bestimmt wurden, kann der Programmcode um den Code in Kapitel 7.1.3 erweitert werden, der die Ansteuerung der LEDs definiert. Auf diese Weise kann auch mit Infrarot-Sensoren eine visuelle Darstellung des Abstandes des Autos von der Garagenwand realisiert werden.

8. Resümee

In der zurückliegenden Ausarbeitung wurden primär die Grundlagen der Sensorik genauer betrachtet. Hierbei wurde die grundsätzliche Funktionsweise eines Sensor-Systems bestehend aus Sensor-Element, Sensor-Schnittstelle und Auswerte-Elektronik identifiziert. Daraufhin wurden die Einsatzgebiete von Sensoren allgemein, sowie die Anforderungen an diese betrachtet. Daraufhin wurden die verschiedenen Sensor-Typen nach ihrer Messgröße klassifiziert. Hierbei wurde der Fokus auf die Distanzsensoren gelegt, wobei diese wiederum in Abstands- und Wegesensoren unterteilt werden können.

Innerhalb der Abstandssensoren wurden die Ultraschall-Sensoren und die optoelektronischen Infrarot-Sensoren als die wichtigsten Vertreter identifiziert und aufgrund dessen genauer betrachtet. Hierbei wurden die zugrundeliegenden physikalischen Effekte, die Bauteile, die Funktionsweise, die Einflüsse und die konkreten Anwendungsgebiete untersucht. Dabei ergab sich, dass die Ultraschall-Sensoren auf den piezoelektrischen Effekt zurückgreifen und die Infrarot-Sensoren auf den Elektrolumineszenz- und fotoelektrischen Effekt. Beide Sensor-Typen senden hierbei Wellen aus, empfangen deren Reflexionen und folgern daraus den Abstand. Die Ultraschall-Sensoren greifen hierbei auf das Pulslaufzeit-Verfahren zurück, während die Infrarot-Sensoren zusätzlich dazu auch das Triangulations-, Frequenzlaufzeit- und Phasenlaufzeit-Verfahren nutzen können.

Nachdem die Sensor-Elemente „Ultraschall-Sensor“ und „Infrarot-Sensor“ untersucht wurden, werden die Sensorschnittstellen genauer betrachtet. Hierbei wird zwischen den analogen und digitalen Sensorschnittstellen unterschieden.

Auf die Sensor-Schnittstellen folgt die Auswerte-Elektronik in Form eines Mikrocontrollers. Hierbei wird die Mikrocontroller-Technik genauer betrachtet und der Arduino als geeignetes Mikrocontroller-Board identifiziert. Aufgrund dessen wurden die Eigenschaften des Arduino-Boards und der Arduino-IDE genauer betrachtet.

Nachdem alle Elemente eines Sensor-Systems identifiziert und konkrete Beispiele dieser vollumfänglich analysiert wurden, wurde die praktische Anwendung dieser betrachtet. Hierfür wurden die Ultraschall-Sensoren PING und HC-SR04 und die Infrarot-Sensoren FC-51 und GP2Y0A710K0F mit dem Arduino über ein Steckbrett verbunden und über ein USB-Kabel an einen Computer angeschlossen. Im nächsten Schritt wurde der Programm-Code betrachtet, der in der Arduino IDE implementiert und kompiliert wurde, um die korrekte Funktionsweise der Sensoren als Abstandsmesser und Objektdetektoren zu realisieren. Zusätzlich dazu wurde in einem Praxisbeispiel ein Abstandsmelder für die Garage mit einer LED-Anzeige implementiert. Hierbei wurde ermittelt, dass das Praxisbeispiel sowohl mit dem Ultraschall-Sensor als auch mit den Infrarot-Sensoren realisiert werden kann.

Zusammengefasst liefert die zurückliegende Ausarbeitung dem Leser einen Gesamtüberblick über die Funktionsweise und Anwendungsfelder eines Sensor-System mit Fokus auf die Abstandssensoren mit Ultraschall- und Infrarot-Technik. Hierbei wurden die Einsatzgebiete von Sensoren im Allgemeinen und Ultraschall- und Infrarot-Abstandssensoren im Speziellen theoretisch betrachtet. Diese theoretische Betrachtung wurde daraufhin um eine praktische Implementierung der Ultraschall- und Infrarot-Sensoren an einem Arduino erweitert. Hierbei ergibt sich, dass sich mithilfe von Ultraschall- und Infrarot-Sensoren beinahe alle Anwendungsfelder der Abstandssensoren realisieren lassen.

Literaturverzeichnis

- [1] KARVINEN, Kimmo, Tero KARVINEN, and Ville VALTOKARI. *Sensoren - messen und experimentieren mit Arduino und Raspberry Pi*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2015. Hardware Hacks Edition. 9783864916014.
- [2] SCHOLZE-STUBENRECHT, Werner, and Matthias WERMKE, eds. *Duden - die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk] auf der Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln ; [rund 130 000 Stichwörter mit über 500 000 Beispielen, Bedeutungserklärungen und Angaben zu Worttrennung, Aussprache, Grammatik, Stilebenen und Etymologie*. 24., völlig neu bearb. und erw. Aufl., [Ausg. mit Korrektursoftware]. Mannheim: Dudenverl., 2009. Der Duden. Bd. 1. 3411040149.
- [3] BERNSTEIN, Herbert. *Messelektronik und Sensoren. Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. Springer eBook Collection. 9783658005498.
- [4] HERING, Ekbert. *Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 2nd ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018. 9783658125622.
- [5] HÜNING, Felix. *Sensoren und Sensorschnittstellen*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2016. De Gruyter Studium. 978-3-11-043854-3.
- [6] BRÜHLMANN, Thomas. *Sensoren im Einsatz mit Arduino*. 1. Auflage. Frechen: mitp, 2017. 978-3-95845-152-0.
- [7] BRÜHLMANN, Thomas. *Arduino Praxiseinstieg*. 4. Auflage. Frechen: mitp Verlags, 2019. 9783747500569.
- [8] MATOSSI, Frank. *Elektrolumineszenz und Elektrophotolumineszenz*. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 1957. 9783322991348.
- [9] MAUCH, Reiner H. Electroluminescence in thin films [online]. *Applied Surface Science*. 1996, **92**, 589-597. Available from: 10.1016/0169-4332(95)00301-0.
- [10] LÖFFLER-MANG, Martin. Photodiode. In: Martin Löffler-Mang, ed. *Optische Sensorik. Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, pp. 122-126.
- [11] STINY, Leonhard. *Schnelleinführung Elektronik. Zusammenfassung zur Vorbereitung auf eine Prüfung in Elektronik*. 1st ed. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2021. Springer eBook Collection. 9783658334628.
- [12] HEIKO HENN. *Die Einführung von LED-Technologie in Groß- und Mittelstandsunternehmen*, 2011.
- [13] LÖFFLER-MANG, Martin. Triangulation. In: Martin Löffler-Mang, ed. *Optische Sensorik. Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, pp. 172-177.
- [14] MAKERGUIDES. *How to use a SHARP GP2Y0A710K0F IR Distance Sensor with Arduino* [online] [viewed 19 January 2022]. Available from: <https://www.makerguides.com/sharp-gp2y0a710k0f-ir-distance-sensor-arduino-tutorial/>.
- [15] UNGERER, Theo. *Mikrocontroller und Mikroprozessoren*. 3. Aufl. 2010. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. eXamen.press. 9783642053986.
- [16] WÜST, Klaus. *Mikroprozessortechnik. Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern ; mit 44 Tabellen*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. Studium. 978-3-8348-0906-3.

- [17] SCHMIDT, Maik. *Arduino. Ein schneller Einstieg in die Microcontroller-Entwicklung*. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2015. Edition Make. 9783864916458.
- [18] MARIAM MANZOOR. *Arduino with Infrared Sensor* [online]. *Beginners guide to Arduino Project with IR Sensor* [viewed 18 January 2022]. Available from: <https://medium.com/illumination/arduino-with-infrared-sensor-48ad4415f320>.
- [19] SHARP. *GP2Y0A21YK0F* [online]. *Datenblatt* [viewed 19 January 2022]. Available from: <https://www.mikrocontroller-elektronik.de/wp-content/uploads/delightful-downloads/2015/04/gp2y0a21yk0f.pdf>.
- [20] SHARP. *GP2Y0A41SK0F* [online]. *Datenblatt* [viewed 19 January 2022]. Available from: <https://www.farnell.com/datasheets/2364614.pdf>.