



Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2322-2**

M. Schmauder
K. Höhn
P. Jung
K. Lehmann
S. Paritschkow
P. Westfeld
H. Sardemann

**Sichere Personenerkennung in der
Mensch-Maschine-Interaktion**

Dortmund/Berlin/Dresden 2016

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Teilprojekt F 2322-2 „Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion“. Das Teilprojekt wurde im Rahmen des Forschungsprojektes F 2322 „Chancen und Risiken von Ambient Intelligence (AmI) und Industrie 4.0 aus sicherheitstechnischer Sicht“ im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin bearbeitet.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder, Dr.-Ing. Katrin Höhn,
Dr.-Ing. Philipp Jung, Dipl.-Ing. Kerstin Lehmann,
Dipl.-Ing. Silke Paritschkow
Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme

Dr.-Ing. Patrick Westfeld, Hannes Sardemann, M.Sc.
Technische Universität Dresden
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Fachliche Begleitung: Dr.-Ing. Andreas Richter
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: jian wang/iStock

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Druck & Verlag Kettler GmbH, Bönen

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 - 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon: 0231 9071-2071
Telefax: 0231 9071-2070
E-Mail: info-zentrum@buaa.bund.de
Internet: www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 - 42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



www.buaa.de/dok/8480166

DOI: 10.21934/buaa:bericht20161102

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Ausgangssituation und Zielstellung	7
1.1 Notwendigkeit der sicheren Personenerkennung	7
1.2 Bisherige Anwendungsgebiete und Messverfahren der sicheren und automatischen Personenerkennung	8
1.3 Ziel und Vorgehen im Projekt	9
2 Messverfahren zur Personenerkennung	11
2.1 Überwachung des gesamten Arbeitsbereichs	11
2.2 Überwachung einer Ebene im Arbeitsbereich	23
2.3 Maschinenzentrierte Überwachung	25
2.4 Aktive personenbezogene Systeme	28
2.5 Multisensorsysteme	31
2.6 Testszenario für einen Vergleich der Messverfahren	32
2.7 Vergleich der Messverfahren	32
3 Einsatzmöglichkeiten der Messverfahren zur sicheren Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion	34
3.1 Mögliche Anwendungsgebiete	34
3.2 Anwendungsgrenzen	35
3.3 Beschreibung der Anwendungs-Matrix	46
4 Zusammenfassung und Ausblick	48
4.1 Zusammenfassung	48
4.2 Ausblick	49
Literaturverzeichnis	50
Abbildungsverzeichnis	59
Tabellenverzeichnis	60
Anhang Anwendungs-Matrix	61

Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion

Kurzreferat

Die fortschreitende Digitalisierung von Produktionssystemen ermöglicht nicht nur eine höhere räumliche und zeitliche Flexibilität in der Produktion, sie führt auch zur Nutzung vernetzter und intelligenter technischer Systeme, in denen und mit denen Menschen auch weiterhin arbeiten werden. Insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Interaktion von Mensch und Roboter kommt Sensorsystemen und Messverfahren für eine automatische und sichere Personenerkennung eine besondere Bedeutung zu. Um eine gefahrlose Interaktion zwischen Mensch und Maschine im Arbeitsprozess gewährleisten zu können, muss stets sichergestellt sein, dass der menschliche Körper zuverlässig detektiert wird. Die Vielfalt an angebotenen Messverfahren und Sensorsystemen erfordert eine klar strukturierte Aufbereitung anhand von Anwendungsgebieten und –grenzen. Im Projekt „Sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion“ wurde deshalb eine Anwendungs-Matrix erarbeitet, die Messverfahren für eine sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion sowohl bestimmten Anwendungsgebieten zuordnet als auch die Grenzen der Anwendung definiert. Zur Erstellung der Anwendungs-Matrix wurden Literatur- und Marktrecherchen durchgeführt und es konnten 13 Messverfahren und fünf verschiedene Anwendungsgebiete herausgearbeitet werden.

Die Messverfahren werden im Bericht und in der Anwendungs-Matrix in vier Gruppen entsprechend ihres Überwachungsbereichs unterteilt: Überwachung des gesamten Arbeitsbereichs, Überwachung einer zweidimensionalen Ebene im Arbeitsbereich, maschinenzentrierte Überwachung und aktive personenbezogene Verfahren. Jeder Gruppe werden Sensoren zugeordnet, diese erläutert und Verfahren für die Personenerkennung vorgestellt. Weiterhin werden im Bericht Multisensorsysteme vorgestellt, die durch eine Fusion der Daten die Vorteile der einzelnen Verfahren kombinieren und die Nachteile reduzieren.

Die Anwendungsgebiete werden in Industrieroboter, Automaten und Handling-Systeme, Flurförderzeuge, Fahrzeuge und Verkehrsmittel unterteilt und sind in der Anwendungs-Matrix den Messverfahren zur Personenerkennung zugeordnet.

Die Messverfahren werden im Bericht anhand möglicher Einsatzzwecke (Anwesenheitserkennung, Positionsbestimmung, Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine und Aufnahme von Körperhaltungen), technischer Parameter und Umgebungsfaktoren bewertet.

Die Ergebnisse dieser Bewertungen werden in der Anwendungs-Matrix dargestellt.

Schlagwörter:

Mensch-Maschine-Interaktion, Personenerkennung, Industrie 4.0, Ambient Intelligence, Schutzzaun, Arbeitssicherheit, Roboter, Sensorsysteme

Safe person detection for human-machine-interaction

Abstract

The ongoing digitalization of production systems leads to higher temporal and spatial flexibility in production. It furthermore causes an intensified interaction between intelligent technical systems and human beings. Especially the advancing interaction between robots and humans requires sensor systems and measurement methods for automatic and reliable person detection. To guarantee a safe interaction between humans and machines, a reliable detection of the human body has to be assured.

The diversity of sensors and methods requires a well-structured listing concerning fields of application and limits. In the project "Reliable Person Detection in Human-Machine Interaction" an application-matrix was developed, which assigns methods for human detection to fields of application and shows their limits.

To develop the matrix, research in literature and on the market was conducted. From that research, 13 measurement methods and five fields of application have been derived.

In the report and the application-matrix the measurement methods are divided in four groups due to the area they are monitoring: monitoring the whole workplace, monitoring a two dimensional plane, machine-centered monitoring and active person-centered monitoring. For each of the four groups appropriate sensors are mentioned. The principles of all sensors are outlined and methods for person detection presented. Additionally, multi-sensor systems are mentioned in the report, which combine the advantages of different sensor types by data fusion.

The applications are categorized into five fields: industrial robots, automata and handling devices, industrial trucks, vehicles and other transport systems (on rails and in the air). These fields of application are then assigned to the methods of person detection.

Finally, the measurement methods are evaluated due to possible purposes of application (presence detection, positioning, motion coordination between machine and human, reconstruction of body postures), technical parameters and environmental factors. The evaluation is discussed in the report and the results are represented in the application-matrix.

Key words:

human-machine-interaction, human detection, person detection, industry 4.0, ambient intelligence, safety fence, work safety, robot, sensors

1 Ausgangssituation und Zielstellung

1.1 Notwendigkeit der sicheren Personenerkennung

Die fortschreitende Digitalisierung von Produktionssystemen ermöglicht nicht nur eine höhere räumliche und zeitliche Flexibilität in der Produktion, sie führt auch zur Nutzung vernetzter und intelligenter technischer Systeme, in denen und mit denen Menschen auch weiterhin arbeiten werden. In diesem Zusammenhang wird vor allem im Rahmen von Industrie 4.0 und „Ambient Intelligence“ vermehrt über gute Arbeitsbedingungen und Sicherheit für den Menschen diskutiert (BOTTHOF, 2014, S. 4).

CERNAVIN (2014) zeigt sich beispielsweise davon überzeugt, dass in der Industrie 4.0 „der Faktor präventive Gestaltung von optimalen Arbeitsbedingungen“ (S. 21) an Bedeutung gewinnt und führt als ein Beispiel für die präventive Arbeitsgestaltung eine „kontinuierliche in Prozesse integrierte Störungs- und Gefährdungsanalyse von Arbeitsmitteln“ (S. 21) auf. Spath und seine Kollegen betonen in ihrer Studie zur Produktionsarbeit der Zukunft, dass Sicherheitsaspekte schon beim Design intelligenter Produktionsanlagen berücksichtigt werden müssen (SPATH, 2013, S.7).

In diesem Zusammenhang spielen die unter dem Begriff „Ambient Intelligence“ subsumierten intelligenten Funktionen der Arbeitsumgebung eine wichtige Rolle. Systeme und Produktionsobjekte nutzen intelligente Sensoren zur Umgebungserfassung und verwenden die aufgenommenen Daten anschließend für ihre Entscheidungsfindung (VEIGT et al., 2013; LASS et al., 2014).

Insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Interaktion von Mensch und Roboter kommt Sensorsystemen für eine automatische und sichere Personenerkennung eine besondere Bedeutung zu. Um eine gefahrlose Interaktion zwischen Mensch und vernetzten und sensor- bzw. computergesteuerten Maschinen bzw. Anlagen im Arbeitsprozess gewährleisten zu können, muss stets sichergestellt sein, dass die betreffenden Personenerkennungssysteme den menschlichen Körper zuverlässig detektieren und die Detektionsergebnisse in Form von Steuerungsparametern in die Planung und Steuerung der Bewegungsabläufe der Maschine integriert werden.

Das bearbeitete Projekt widmet sich der sicheren Personenerkennung im Zusammenhang mit der Mensch-Maschine-Interaktion. Unter Mensch-Maschine-Interaktion werden alle Interaktionen zwischen technischen Systemen (z.B. Maschinen, Maschinensysteme, Fahrzeuge, Computer oder Roboter) auf der einen Seite und Menschen (Einzelpersonen oder Personengruppen) auf der anderen Seite verstanden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der sicheren Gestaltung von Arbeitssystemen. Zusätzlich mögliche Anwendungsgebiete, wie beispielsweise die ergonomische Gestaltung von Arbeit oder die Überwachung von Innenräumen von öffentlichen Verkehrsmitteln werden jedoch ebenfalls mit aufgeführt.

1.2 Bisherige Anwendungsgebiete und Messverfahren der sicheren und automatischen Personenerkennung

Die Anwendungsgebiete der automatischen Personenerkennung sind sehr breit und reichen vom Einsatz in der Öffentlichkeit bis hin zu Fahrerassistenzsystemen.

In der Industrie wurden sie bisher häufig zur Überwachung von Gefahrenbereichen bei Maschinen und Anlagen oder bei Industrierobotern angewandt. Mittlerweile werden aber Roboter nicht mehr nur hinter Schutzzäunen eingesetzt, sondern auch zur direkten Zusammenarbeit mit dem Menschen bzw. zur Unterstützung des Menschen. Aus dem Einsatz von autonomen Robotern in Service- oder Assistenzfunktionen (HEGGER et al., 2013; MARTIN et al., 2006) ergeben sich so neue Sicherheitsanforderungen.

Ein sehr häufiges Anwendungsgebiet ist die Sicherheitsüberwachung von öffentlichen Plätzen (**Abb. 1.1** links; AMPLIANITIS et al., 2014; BENEDEK, 2014; ZHANG et al., 2007). Jedoch wird die automatische Personenerkennung auch im Privatbereich angewandt.

In der Fahrzeugindustrie werden personenerkennende Fahrerassistenzsysteme immer häufiger in Fahrzeugen aller Art (**Abb. 1.1** rechts; HEUER et al., 2014; KIDONO et al., 2011; SUARD et al., 2006) eingesetzt. Dadurch soll einerseits die allgemeine Verkehrssicherheit erhöht werden, andererseits kommen Fahrerassistenzsysteme immer häufiger auch in Baumaschinen oder Flurförderzeugen zum Einsatz, um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Dieses Einsatzgebiet wird in Zukunft rasant wachsen, da immer häufiger autonom agierende Flurförderfahrzeuge eingesetzt werden.

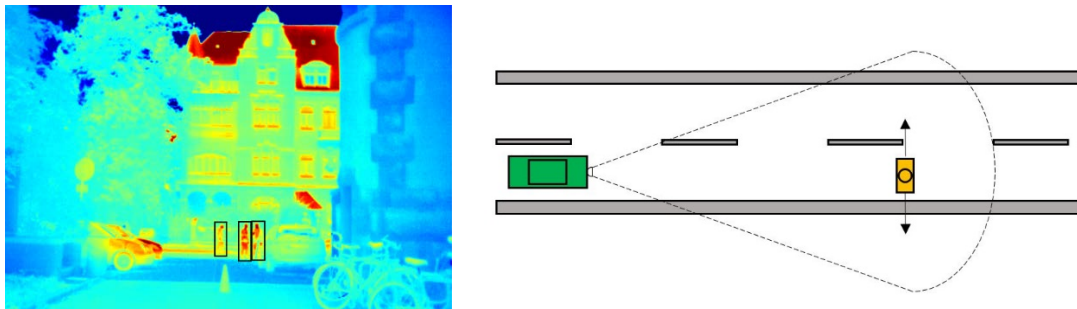


Abb. 1.1 Personenerkennung in der Überwachung öffentlicher Flächen (links) und in der Fahrerassistenz (rechts).

Um die unterschiedlichen Anwendungsgebiete im Zusammenhang mit der Mensch-Maschine-Interaktion systematisch darstellen zu können, sollen in diesem Projekt vorhandene Messverfahren gesichtet und die möglichen Anwendungsgebiete eruiert und systematisiert werden (vgl. Kapitel 3). Die automatische Personenerkennung wird in diesem Projekt als ein Beitrag zur Erhöhung der Arbeitssicherheit verstanden. Mögliche Anwendungen wie die Erhöhung der Verkehrssicherheit oder die Erhöhung der allgemeinen Sicherheit werden mit erwähnt, spielen jedoch bei der Systematisierung eine untergeordnete Rolle.

Nicht nur die Anwendungsgebiete, auch die verwendeten Messverfahren erfahren derzeit eine stete Erweiterung.

Neben nicht-berührungslos arbeitenden Messsystemen wie bspw. druckempfindlichen Sicherheitsschaltmatten (NEHMER, 2011) oder Lichtschranken-basierten Prinzipien (HADDADIN, 2007), finden derzeit auch Verfahren der berührungslosen 3D-Messtechnik Anwendung. Ermöglicht wird dies insbesondere durch die in den letzten Jahren vollzogene rasante technologische Entwicklung im Hard- und Softwarebereich (zeitliche und räumliche Sensorauflösung, Miniaturisierung, Echtzeitfähigkeit der Datenauswertung). Die dabei zum Einsatz kommende Sensorik reicht von Systemen mit Ultraschall oder Mikrowellenradar zur Anwesenheitserkennung (EKIMOV et al., 2008; YAROVOY et al., 2006) über Positionsbestimmungen mit aktiven, von der Person mitgeführten Sendern (MAUTZ, 2012), bis hin zu Kamerasystemen oder Laserscannern zur genauen Überwachung einzelner Bewegungen (STOMMEL et al., 2015; WESTFELD et al., 2013).

Darüber hinaus erhöht die Kombination komplementärer Sensorik (Sensorfusion) die Zuverlässigkeit der Personendetektion und -verfolgung innerhalb der überwachten Szene (MARTIN et al., 2006; SPORRER et al., 2016).

In wie weit sich die unterschiedlichen Messverfahren für eine sichere Personenerkennung innerhalb der Mensch-Maschine-Interaktion eignen, wird in diesem Projekt ebenfalls untersucht (vgl. Kapitel 2). Auch hierbei bildet die Erhöhung der Arbeitssicherheit bei Mensch-Maschine-Interaktionen den Schwerpunkt.

1.3 Ziel und Vorgehen im Projekt

Die Vielfalt an angebotenen Messverfahren und Sensorsystemen erfordert die Unterstützung von betrieblichen Planern und Beschaffern. Eine klar strukturierte Aufbereitung von Anwendungsgebieten und –grenzen kann dabei helfen, Potenziale sensorbasierter Sicherheitslösungen zu erkennen und prozessabhängig in die Planung zu integrieren. Damit werden künftig noch engere Kooperationen zwischen Mensch und Maschine bei gleichzeitiger Steigerung der Sicherheit möglich.

Neben den Anwendern können auch die Hersteller von Maschinen und Anlagen von der Aufbereitung der vorhandenen Verfahren profitieren und die Projekterkenntnisse in die Gestaltung ihrer Produkte einfließen lassen.

Das Ziel dieses Projektes ist es deshalb, eine Anwendungs-Matrix zu erarbeiten, die Messverfahren für eine sichere Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion sowohl bestimmten Anwendungsgebieten zuordnet als auch die Grenzen der Anwendung erläutert.

Dafür wurde folgende Vorgehensweise gewählt (**Abb. 1.2**):

1. Zunächst wurden die Messverfahren zusammengestellt und nach geeigneten Kriterien strukturiert (Arbeitspaket 1).
2. Zur Einstufung der Eignung dieser Verfahren für unterschiedliche Anwendungsgebiete sollten die Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt werden. Dafür wurden Anwendungsgebiete basierend auf dokumentierten Anwendungsfällen definiert und dabei auch Anwendungsgrenzen beachtet (Arbeitspakete 2 und 3).

3. Aufbauend auf den Ergebnissen der Recherchen fand eine übergreifende Auswertung und Zusammenführung statt, die schließlich in der zu entwickelnden Anwendungs-Matrix resultierte (Arbeitspaket 4).

Übergreifend erfolgte die Abstimmung mit dem Auftraggeber sowie die Dokumentati-on und Berichterstellung (Arbeitspaket 5).

Dieser Bericht ist folgendermaßen gegliedert:

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen von für das Anwendungsgebiet der Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion in Frage kommenden Messverfahren und Sensoren detailliert beschrieben.

Anschließend werden in Kapitel 3 die Einsatzmöglichkeiten für die Sensoren in der Mensch-Maschine-Interaktion aufgezeigt. Dazu werden die möglichen Anwendungsgebiete beschrieben und die für die Anwendungsgrenzen verantwortlichen Kenngrößen definiert. Der Aufbau der Anwendungsmatrix wird in diesem Kapitel ebenfalls erläutert.

Das 4. Kapitel schließt den Bericht mit einer Zusammenfassung über die Erkenntnis-se und einem Ausblick über mögliche zukünftige Arbeiten ab.

Die Anwendungsmatrix ist dem Bericht als Anhang beigefügt.

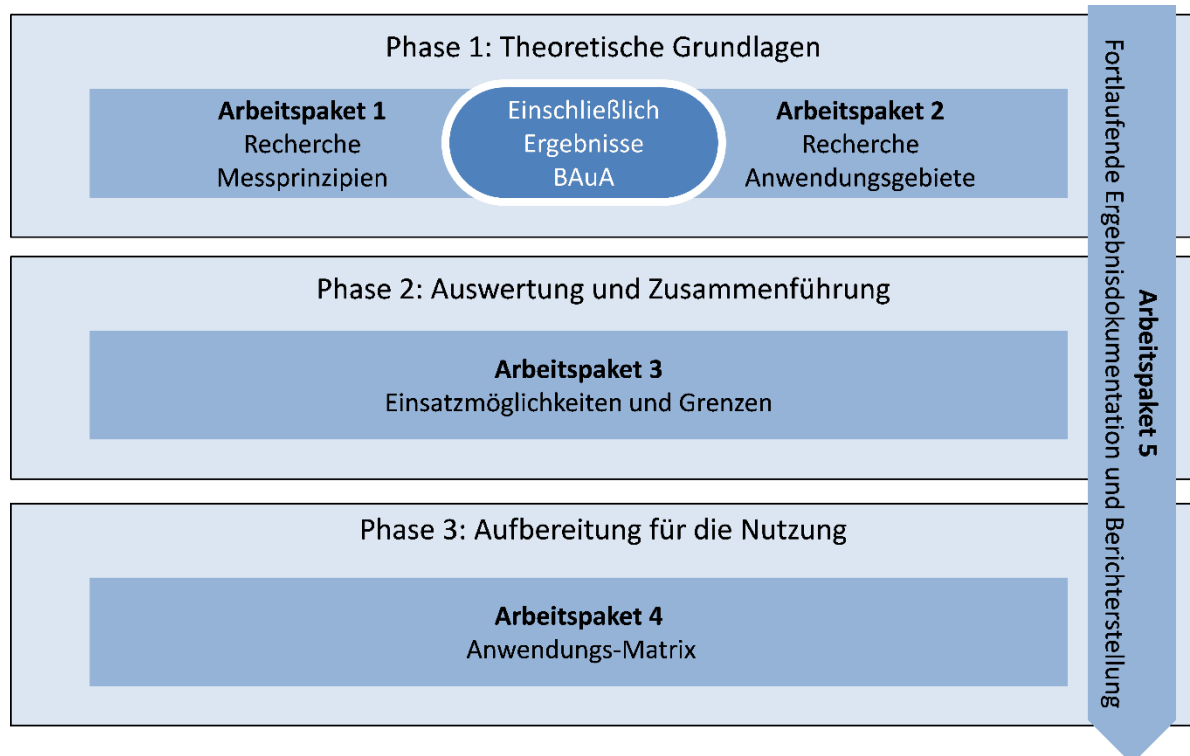


Abb. 1.2 Gewählte Vorgehensweise im Projekt.

2 Messverfahren zur Personenerkennung

Die Grundlage für eine Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion bilden Messverfahren, welche geeignete Sensoren und Sensorsysteme zur Detektion von Personen einsetzen. Abhängig von dem Messprinzip der Sensoren ergeben sich Vor- und Nachteile für die Nutzung im gewünschten Anwendungsbereich. Für die Aufstellung einer Anwendungs-Matrix müssen die Verfahren zunächst kategorisiert und die Eigenschaften der jeweiligen Messverfahren und -prinzipien anwendungsbezogen bewertet werden.

Die folgenden Abschnitte stellen diejenigen Messverfahren vor, die sich für eine Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion eignen. Die Verfahren werden nach der Art des Überwachungsbereichs geordnet dargestellt. Zunächst werden Verfahren beschrieben, bei denen der gesamte Arbeitsbereich (Kapitel 2.1) oder nur ein Teil davon (Kapitel 2.2) überwacht wird. Anschließend werden Verfahren untersucht, bei denen die Erkennung von der Maschine ausgeht (Kapitel 2.3). Abschließend werden Messverfahren behandelt, bei denen die Person einen aktiven Sensor mit sich führt (Kapitel 2.4).

Es werden jeweils geeignete Sensoren aufgezeigt und deren Messprinzip beschrieben. Zudem werden relevante Methoden der Personenerkennung mit den entsprechenden Sensoren vorgestellt.

2.1 Überwachung des gesamten Arbeitsbereichs

Im Hinblick auf eine Zusammenarbeit zwischen Maschine und Mensch ist es sinnvoll, den gesamten Arbeitsbereich volumenhaft zu überwachen und dabei stetig zu detektieren, wo sich eine Person relativ zur Maschine befindet. Zur volumenhaften Überwachung des Arbeitsbereichs eignen sich verschiedene Sensoren, die im Folgenden vorgestellt werden (**Abb. 2.1**).



Abb. 2.1 Sensoren: Industriekamera, 3D-Laserscanner, 3D-Kamera, Ultraschallsensor (von links nach rechts).

2.1.1 Multikamerasystem

Mit einem System aus zwei oder mehr konvergent angeordneten Digitalkameras kann nach dem Prinzip der Triangulation die dreidimensionale Position eines Objekts bestimmt werden. Dabei sind geometrische Abweichungen zur idealen zentralperspektivischen Abbildungsgeometrie sowie Positionen und Orientierungen aller Kame-

ras zueinander aus bei fest installierten Messsystemen einmalig durchzuführenden Kalibriermessungen bekannt. Die Berechnung der 3D-Koordinaten aufgenommener Objekte/Personen erfolgt durch automatisches Messen homologer Punkte in zwei oder mehr Bildern und anschließendes Verschneiden der korrespondierenden Lichtstrahlen im 3D-Raum (LUHMANN, 2010). In Abhängigkeit von der Anzahl der gemessenen Bildpunkte (und der räumlichen Sensorauflösung) kann die Objektoberfläche prinzipiell beliebig genau approximiert werden.

Es existieren unterschiedliche Ansätze für die Zuordnung homologer Punkte in den Bildern. Im einfachsten Fall werden kodierte Marken im Messbereich angebracht. Diese können sehr zuverlässig automatisch in den Bildern erkannt, sub-pixelgenau gemessen und zugeordnet werden. Zur berührungslosen Messung ohne Zielmarken kommen meist flächenbasierte Korrelationsverfahren (z.B. Least Squares Matching; GRÜN, 1985) oder merkmalsbasierte Ansätze (TUYTELAARS et al., 2008) zum Einsatz.

Sollen dynamische Objektzustände erfasst werden, sind Bildsequenzen von zwei oder mehr synchronisierten Kameras auszuwerten. Neben der räumlichen Zuordnung zeitgleich aufgenommener Bilder, ergibt sich auch die Notwendigkeit der Zuordnung auf der Zeitachse. Je nach Aufgabenstellung kann die Lösung der spatio-temporalen Zuordnung hohe Komplexität aufweisen und nicht immer zu fehlerfreien Lösungen führen.

Objekte werden bei einer Größe von etwa 1 m mit Genauigkeiten von unter 1/10 mm und bei einer Größe bis ca. 200 m mit Genauigkeiten im cm-Bereich erfasst (LUHMANN, 2010).

Die Verwendung von Kameras und Systemen aus mehreren Kameras wird bereits seit einigen Jahren für die Personenerkennung erforscht und findet zum Beispiel in der Überwachung von öffentlichen und privaten Räumen Anwendung (PAUL et al., 2013). Für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion sind außerdem bereits Kamerasysteme auf dem Markt erhältlich (z.B. Pilz SafetyEYE).

Personenerkennung

Mit Verfahren der Bildverarbeitung und der Computer Vision können in Bildern oder in Bildsequenzen Personen automatisch erkannt werden. Die Verfahren der Personenerkennung unterscheiden sich in den verwendeten Algorithmen und weisen unterschiedliche Zuverlässigkeit und Genauigkeiten auf. Die Personenerkennung wird in den folgenden drei Schritten durchgeführt: Zuerst werden Bereiche im Bild gesucht, welche die Abbildung einer Person darstellen könnten (**Segmentierung**). In einem zweiten Schritt werden diese Bereiche in „Mensch“ oder „nicht Mensch“ klassifiziert (**Klassifizierung**) und anschließend die klassifizierten Personen verfolgt (**Tracking**).

Die Segmentierung von Objekten im Bild kann über eine Trennung zwischen Vordergrund und Hintergrund gelöst werden (TOYAMA et al., 1999; PAUL et al., 2013). Dabei wird ein Referenzbild aufgezeichnet, welches den ursprünglichen Zustand darstellt. In späteren Messungen werden Veränderungen dazu festgestellt. In der Anwendung in einer Mensch-Maschine Interaktion wird bei diesem Verfahren z.B. auch ein Industrieroboter als Vordergrund-Objekt erkannt, wenn er sich im Vergleich zum

Referenzbild bewegt hat. Ist die Position des Roboters zu jeder Zeit bekannt und ist die Position der Kamera ebenfalls im gleichen Koordinatensystem bestimmt, kann dieser Bereich als Kandidat für eine Personenerkennung ausgeschlossen werden.

Nachdem mögliche Objekte segmentiert wurden, wird in einer Klassifizierung festgestellt, ob es sich um eine Person handelt. Dabei werden Bildbereiche mit Merkmalen beschrieben. Mit Verfahren des maschinellen Lernens kann auf Grundlage von zuvor klassifizierten Trainingsdaten eine Klassifizierung anhand der Merkmale vorgenommen werden. Die Anzahl und der Inhalt der Merkmale, sowie der Lösungsansatz aus dem Bereich des maschinellen Lernens unterscheiden sich je nach Methode. Die am weitest verbreiteten Ansätze zur Personendetektion nutzen oder kombinieren unter anderem die folgenden Merkmale:

1. Haar-ähnliche Merkmale (Haar-like features):

Haar-ähnliche Merkmale wurden zuerst von VIOLA et al. (2003) für die Detektion von Personen verwendet. Es werden Helligkeits-Differenzen zwischen zwei benachbarten rechteckigen Bildausschnitten berechnet. Die Anordnung, Richtung und Größe dieser Fenster wird variiert. Jedes Fenster bildet ein Merkmal und geht in einen Merkmalsvektor für die Klassifizierung ein.

2. Histogramm der Gradienten (HOG)

Die meisten Ansätze zur Personenerkennung verwenden Histogramme von Gradienten (DALAL et al., 2005). In einem Bild(ausschnitt) werden Gradienten der Grauwertverläufe gebildet. Die Richtung der Gradienten gibt Auskunft über die Form eines Objekts oder seiner Kontur. Die Verteilungen der Richtungen der Gradienten bilden einen mehrdimensionalen Merkmalsvektor, der um weitere Merkmale erweitert werden kann.

Anschließend werden die detektierten Personen in den darauffolgenden Aufnahmen verfolgt (Tracking). Dazu wird eine Korrespondenz zwischen den Aufnahmen einer Sequenz hergestellt. Wird eine Person in zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen detektiert, kann zunächst nicht festgestellt werden, ob es sich um dieselbe Person oder eine zweite Person handelt, da jedes Bild einzeln untersucht wird. Unter Betrachtung der gesamten Sequenz kann für jede detektierte Person eine Prognose über deren Bewegung aufgestellt werden. Dazu wird die bisherige Bewegung analysiert und die folgende Bewegung prognostiziert (z.B. mit einem Kalman-Filter: KALMAN, 1960). Wird in einem nachfolgenden Bild eine Person an der prognostizierten Position (inklusive eines Toleranzbereichs) gemessen, wird angenommen, dass es sich um dieselbe Person handelt. Durch das Tracking kann in Videosequenzen zu jeder Zeit festgestellt werden, wie lange sich eine Person bereits im Überwachungsbereich befindet, und ob neue Personen diesen betreten haben.

BENENSON et al. (2015) geben einen Überblick über mehr als 40 Ansätze zur Fußgängererkennung in Bilddaten. Die auf den Verfahren des maschinellen Lernens basierenden Algorithmen wurden mit mehreren Datensätzen getestet, welche komplexe Szenen im städtischen Umfeld zeigen (Verdeckungen, große Anzahl an Personen, große Distanzen). Das Verhältnis aus nicht detektierten und falsch detektierten Personen konnte in den letzten zehn Jahren auf Grund der Entwicklungen in Hard- und

Software stark reduziert werden. Die mittlere Quote der nicht detektierten Personen (miss rate) liegt bei unter 25%.

Ein System, bei dem eine Kamera den Arbeitsraum senkrecht von oben überwacht, wird von KUHN et al. (2007) vorgestellt. Durch Segmentierung im Bild werden bewegte Objekte und fester Hintergrund getrennt. Die Position und Form des Roboterarms sind zu jedem Zeitpunkt bekannt und liegen als 3D-CAD-Modell vor. Dieses Modell wird in das Bild der Kamera projiziert. Ein zuvor definierter Bereich um den Roboter wird im Bild als Schutzzone eingezeichnet. Schneidet sich ein unbekanntes und bewegtes Objekt mit dieser Zone, wird ein Signal an den Roboter übermittelt.

Die aus den Aufnahmen eines Mehrkameranasytems berechneten 3D-Informationen lassen sich ebenfalls zur Detektion von Personen verwenden.

Ein Verfahren zur Arbeitsraumüberwachung mit mehreren Kameras wird von OBERGECKS et al. (2014) präsentiert. Die Bilder von konvergent auf den Arbeitsbereich ausgerichteten Kameras werden in unbekannte Objekte und Hintergrundbereiche segmentiert. Alle statischen Bildbereiche werden als Hintergrund deklariert. Bewegte Roboter, die mit ihrer aktuellen Position bekannt sind werden ebenfalls als Hintergrund deklariert. Unbekannte (Vordergrund-) Objekte sind diejenigen Bildbereiche, in denen Bewegungen stattfinden, die nicht aus der Steuerung der Roboter bekannt sind. Die unbekannt Bildbereiche werden anhand der bekannten Orientierungen der Kameras in den 3D-Raum projiziert. Der Raum ist in ein Raster aus Volumen-Pixel (Voxel) unterteilt. Die Schnittpunkte von Projektionen aus mehreren Bildern in einem Voxel bilden 3D-Objekte im Raum. Zusammenhängende und zunächst unbekannt 3D-Objekte im Voxelgitter werden anschließend anhand von zuvor definierten Kriterien (z.B. Mindestvolumen der Objekte oder Zugänglichkeit der Position) als Personen klassifiziert (KUHN et al., 2010).

Die Auflösung ist dabei abhängig von der Anzahl Elemente, in die man den Arbeitsbereich unterteilt. Für ein Volumen von 5 m x 5 m x 2,5 m entspricht eine Voxelzahl von 128 x 128 x 64 beispielsweise einer Auflösung von 3,9 cm. Die Rechenzeit, die für die Segmentierung der Bilder und die Berechnung des Raums benötigt wird ist abhängig von der Anzahl der Voxel (STENGEL et al., 2012). Hohe Auflösungen sind prinzipiell nur durch die Auflösung der eingesetzten Kameras und die Distanz zwischen Person und Kameras begrenzt.

Die Verwendung eines Voxelgitters hat gewisse Vorteile in der Mensch-Maschine Interaktion. Die Voxel können beliebig klein gewählt und mit einer Information über ihre Belegung versehen werden. Daraus kann ein Programm entscheiden, ob dieser Bereich vom Roboter angesteuert werden kann oder nicht. Falsch positiv belegte Bereichen führen zu Zeitverlust im Arbeitsablauf, stellen aber kein Sicherheitsrisiko dar. Ein fehlerhaft als frei deklariertes Voxel kann zu Zusammenstößen zwischen Maschine und Mensch führen und muss daher vermieden werden.

Mit Mehrkameranasytemen lassen sich 3D-Daten außer in Voxelgittern auch als 3D-Punktwolken bzw. als Tiefenbilder darstellen. Die Verfahren der Personenerkennung, die auf Daten dieser Typen angewendet werden können, werden in den Kapiteln zu 3D-Laserscannern (2.1.2) bzw. 3D-Kameras (2.1.3) vorgestellt.

Fazit

Wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, sowie der erreichbaren Messgenauigkeit sind Multikamerasysteme für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion sehr gut geeignet. Ein einschränkender Faktor ist die Zuverlässigkeit der Personenerkennung. Die Detektionsraten, die in anspruchsvollen Szenen im Straßenverkehr erreicht werden, sind für sicherheitsrelevante Anwendungen in der Zusammenarbeit zwischen Maschinen und Menschen nicht ausreichend. Allerdings unterscheiden sich die Bedingungen im industriellen Umfeld von den genannten Testszenarien. Eine Abschätzung der Zuverlässigkeit für diese Anwendung sollte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

2.1.2 3D-Laserscanner

Ein Laserscanner (auch LIDAR oder LADAR – Laser detection and ranging) ist ein berührungsloses Messsystem, das die Oberfläche eines Objekts durch sequentielle Abtastung mit einem Laser dreidimensional erfasst. Es existieren Instrumente, die auf dem Impulsmessverfahren, dem Phasenvergleichsverfahren oder einer Kombination beider Prinzipien beruhen. Beim Impulsmessverfahren (Pulsmodulation) wird die Laufzeit eines ausgesendeten, am Objekt reflektierten und über einen Fotodetektor empfangenen Lichtimpulses gemessen. Beim Phasenvergleichsverfahren wird die Laufzeit nicht direkt bestimmt, sondern über eine Messung der Phasenverschiebung zwischen der Modulation einer aktiven Beleuchtung und der Modulation des reflektierten Empfängersignals abgeleitet. Die 3D-Koordinaten ergeben sich aus der elektrophotischen Distanzmessung sowie den zusätzlich erfassten Horizontal- und Vertikalwinkeln durch polares Anhängen. Sie liegen in einem Winkelraster vor. Die 3D-Punkte können zusätzlich mit aus der Distanzmessung resultierenden monochromatischen Intensitätsinformationen überlagert werden. Eine ausführliche Darstellung des Funktionsprinzips und weiterer Aspekte des Laserscannings finden sich in VOSSELMAN et al. (2010). Die Genauigkeit einer mit einem Laserscanner aufgenommenen 3D-Koordinate in 10 m Aufnahmeentfernung beträgt 3 bis 10 mm (LUHMANN, 2010).

Laserscanner werden auf Grund ihrer schnellen und genauen volumenhaften Aufnahme großer Szenen für die Umfelderkennung bewegter Plattformen eingesetzt. Besonders im Bereich der Fahrerassistenz werden Laserscanner dabei auch zur Personenerkennung verwendet. Als problematisch stellt sich dabei die sequentielle Abtastung dar. Da der komplette Raum nicht simultan aufgenommen wird, treten große Verzerrungen und Artefakte bei der Aufnahme von bewegten Objekten bzw. beim Einsatz auf einer bewegten Plattform auf. Um diesen Einfluss zu minimieren, sollte die Dauer für die Aufnahme eines gesamten Scans möglichst kurzgehalten werden. Dafür werden in Fahrerassistenzsystemen Laserscanner eingesetzt, die die Szene nicht komplett sphärisch aufnehmen, sondern den Aufnahmebereich horizontal auf ca. 180° und vertikal auf einen schmalen Streifen beschränken.

Personenerkennung

Die Daten eines 3D-Laserscanners werden meist als Punktwolken abgespeichert. Die Punkte sind zufällig im Raum verteilt und treten nicht in einem regelmäßigen Raster auf. Die meisten Verfahren zur Personenerkennung in 3D-Punktwolken basieren auf Klassifikationsansätzen auf Grundlage unterschiedlicher geometrischer

Merkmale. In einem Vorverarbeitungsschritt werden die Daten zunächst zusammengefasst (Clustering). Dabei werden Bereiche vereint, die zum gleichen Objekt gehören. Das kann zum Beispiel über einen Maximalabstand zwischen zwei benachbarten Punkten realisiert werden. Eine Subtraktion des Hintergrunds vereinfacht die Segmentierung.

Die Cluster bilden Kandidaten für eine Klassifikation. Es wird ein Merkmalsvektor aufgestellt, der geometrische Merkmale wie Oberflächenstrukturen und Oberflächenrichtungen oder Richtungen und Momente des Körpers enthält. Mit Verfahren des maschinellen Lernens wird ein Klassifikator trainiert.

SPINELLO et al. (2010) unterteilen eine mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommene Punktwolke in horizontale Schichten. Anschließend werden zusammenhängende Punktgruppen einer Klassifizierung anhand von geometrischen Merkmalen unterzogen. Die Merkmale sind eine Sammlung aus quantitativen Beschreibungen der Punktgruppe (z.B. Anzahl der Punkte, Abweichung zum Schwerpunkt, Breite, Radius). Vertikal übereinanderliegende Schichten werden zu einem gesamten Klassifizierungs-Objekt zusammengefasst um komplette Personen zu detektieren. In einem Distanzbereich bis 15 m wird dabei eine Detektionsrate von 96% erreicht.

KIDONO et al. (2011) kombinieren geometrische Merkmale und Merkmale, die die Verteilung der Reflektivitäten beschreiben, um Personen in einer 3D-Punktwolke eines Laserscanners zu detektieren. Für die Personenerkennung werden in der Punktwolke zuerst Objekte und Boden segmentiert, dann zusammenhängende Objekte geclustert und anschließend mit den Merkmalen klassifiziert.

Fazit

3D-Laserscanner können eine hohe Genauigkeit in der Aufnahme von 3D-Punktwolken aufweisen. Die Genauigkeit der Einzelpunktmessungen wird beeinflusst von der Distanz zum Objekt und von den Reflektionseigenschaften der aufgenommenen Objekte. Die Genauigkeit der Bestimmung einer kompletten Person ist zusätzlich abhängig von der Bewegung der Person und des Scanners. Ist die Bewegung größer als die Dauer eines Scans, erscheinen die Objekte fehlerhaft in der Punktwolke. Abhängig von der Richtung der Bewegung im Vergleich zur Scanrichtung erscheinen die bewegten Objekte gestreckt oder gestaucht. Damit reduziert sich die Positionsgenauigkeit einer bewegten Person gegenüber der erreichbaren Einzelpunkt-Genauigkeit. Die Zeit, die der Scanner für die Aufnahme eines Scans benötigt, sollte also minimiert werden, um negative Effekte bei Bewegung zu verhindern. Dies kann z.B. durch eine Einschränkung des Scanbereichs erreicht werden.

Für die Personenerkennung werden Verfahren des maschinellen Lernens auf der Grundlage von Merkmalsvektoren angewendet. Je nach Parametrisierung muss dabei immer eine Abwägung zwischen einer hohen Anzahl an korrekt als Person klassifizierten und einer niedrigen Anzahl an falsch als Person klassifizierten Objekten stattfinden. Für den Einsatz in der Mensch-Maschine-Interaktion kann eine nicht erkannte Person sicherheitsrelevante Folgen haben. Dafür müssen falsch als Person deklarierte Objekte in Kauf genommen werden, die zu einem wirtschaftlichen Nachteil durch nicht notwendige Verzögerung in der Produktion führen. Bei den vorgestellten Algorithmen wird vorausgesetzt, dass die Person senkrecht steht. Für liegende oder sitzende Personen müssten die Algorithmen angepasst werden.

2.1.3 3D-Kamera

Distanzmessende Kameras (3D-Kamera, Range Imaging (RIM) Camera, Time-of-Flight (TOF) Kamera) auf der Grundlage von Photomischdetektoren (PMD) sind Digitalkameras, welche zusätzlich zu einem Grauwertbild synchron ein Entfernungsbild aufnehmen (z.B. SCHWARTE et. al. 1999).

Die Kamera sendet aktiv und kontinuierlich ein intensitätsmoduliertes Lichtvolumen aus. Dieses wird vom Objekt teilweise zurück reflektiert und auf dem Sensor pixelweise erfasst. Jedes Pixel des Sensors kann als elektrooptischer Entfernungsmesser nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens angesehen werden. Simultan mit dem Entfernungsbild wird ein aus der Amplitude des reflektierten Signals abgeleitetes Grauwertbild erzeugt. Als Ergebnis liegt eine raumzeitlich aufgelöste 3D-Darstellung des Objektraums vor. Bedeutende Vorteile einer 3D-Kamera im Vergleich zu terrestrischen Laserscannern sind vor allem in der Handlichkeit und die geringen Anschaffungskosten zu sehen. Ihr entscheidender Vorteil gegenüber stereophotogrammetrischen Systemen liegt im Wegfall des Arbeitsschritts der stereoskopischen Zuordnung. Eine 3D-Kamera ist somit als monosensorielles System zur Echtzeit-Tiefenbildakquisition mit hoher zeitlicher Auflösung besonders für die in der Arbeit behandelten Anwendungen der menschlichen Bewegungsanalyse geeignet.

Mit der zweiten Generation der Microsoft Kinect (BAMJI et al., 2015) und dem unter anderem im Google Tango Projekt integrierten Infineon Real3 Sensor (INFINEON, 2015) sind aktuell sehr kompakte und preiswerte 3D-Kameras auf dem Endverbrauchermarkt erhältlich.

Der maximale Distanzbereich ist bei TOF Kameras auf ca. 5 bis 8 m begrenzt. Es werden distanzabhängige Standardabweichungen von 0,5% erreicht. Das entspricht ca. 1 cm auf 3,5 m (BAMJI et al., 2015) bzw. 7 mm auf 2,8 m (WESTFELD et al., 2013).

Personenerkennung

Die Verwendung von Tiefenbildern ermöglicht den Einsatz von sowohl dreidimensionalen Methoden der Personendetektion als auch von Methoden, die aus den Ansätzen zur Personenerkennung in Einzelbildern oder Videos bekannt sind. Darüber hinaus können Kombinationen aus beiden Methoden angewendet werden. Die Merkmale, die in Intensitätsbildern zur Klassifizierung genutzt werden, finden hier ebenfalls Anwendung.

IKEMURA et al. (2011) stellen eine Personenerkennung in den Tiefenbildern einer 3D-Kamera vor. Für kleine Bereiche im Tiefenbild werden die Verteilungen der Tiefenwerte betrachtet und als Merkmale für eine Klassifizierung verwendet. Die Merkmale sind von dem, aus der bildbasierten Personenerkennung bekannten, HOG abgeleitet (Kapitel 2.1.1). Mit diesem Verfahren wird eine Detektionsrate von 95,3% bei einer Falsch-Positiv-Rate von 1% erreicht.

Die mit einer 3D-Kamera aufgenommenen Daten können auch als 3D-Punktwolke dargestellt werden. In die Punktwolken detektierter Personen können dann einzelne Modelle von Körperteilen eingepasst werden, woraus sich die Pose der Person ableiten lässt (**Abb. 2.2**, WESTFELD et al., 2013).

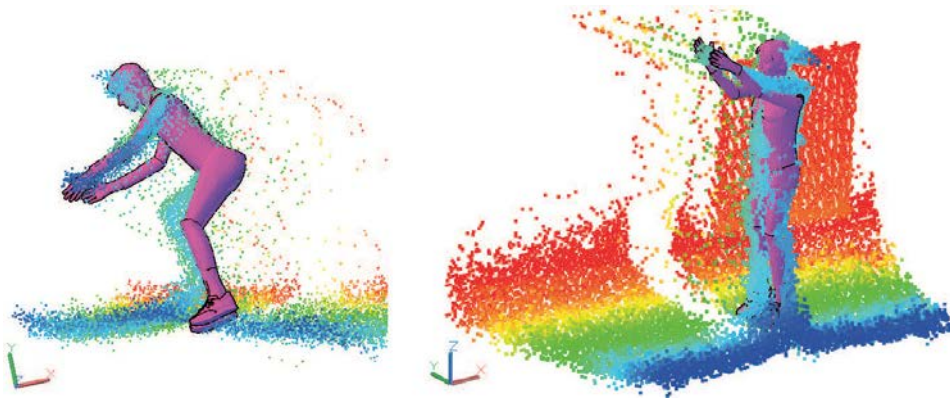


Abb. 2.2 Einpassung von Körperteilen in die Punktwolke (WESTFELD et al., 2013).

Fazit

3D-Kameras sind mit ihrer großen zeitlichen Auflösung und der Möglichkeit der monosensoriellen flächenhaften Distanzbestimmung für bestimmte Anwendungen zur Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion sehr gut geeignet. Die Kombination aus Merkmalen in den simultan aufgenommenen 2D- und 3D-Bildern ist der Personenerkennung in 2D- Bildern überlegen. Im Gegensatz zu anderen 3D-Sensoren (Laserscanner, Multikamera) ist die Reichweite der TOF-Kameras deutlich geringer. Im Vergleich zu Multikamerasystemen erfolgt eine direkte Bestimmung von Tiefenwerten. Der (fehleranfällige) Schritt der Mehrbildzuordnung entfällt hierbei. Im Gegensatz zur sequentiellen Abtastung beim Laserscanner wird die im Gesichtsfeld der 3D-Kamera befindliche Oberfläche flächenhaft erfasst. Dies ermöglicht die Aufnahme dynamischer Vorgänge.

2.1.4 Kamerasystem mit strukturierter Lichtprojektion

Bei Systemen, die mit dem Prinzip der Streifenlichtprojektion oder allgemein mit strukturiertem Licht Tiefeninformationen bestimmen, wird ein Muster auf das zu messende Objekt projiziert. Ein Projektor stellt hierbei die Lichtquelle dar und projiziert aktiv ein z.B. streifen- oder sinusförmiges bzw. zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten ein grau-kodiertes Streifenmuster auf die Objekt Oberfläche. Die Geometrie des projizierten Musters und des Videoprojektors als inverse Kamera sind durch eine Systemkalibrierung bekannt. Die Objekt Oberfläche kann nun effektiv mit bereits einer Kamera digitalisiert und anschließend durch Phasen oder Parallaxenmessungen im detektierten Muster rekonstruiert werden. Der Einsatz von Mehrkamerasystemen mit aktiver Musterprojektion erhöht die Zuverlässigkeit und Robustheit der Messung und ermöglicht die Erfassung bewegter Objekte.

Ein kompaktes und günstiges Kamerasystem mit aktiver Musterprojektion ist die Microsoft Kinect der ersten Generation. Der Arbeitsbereich liegt dabei zwischen 0,5 m und 5 m. Die Standardabweichung der Distanzmessung ist distanzabhängig und beträgt im Nahbereich einige Millimeter und im maximalen Distanzbereich 4 cm. Die Punktdichte nimmt ebenfalls mit der Distanz ab und beträgt bei 5 m Distanz noch 7 cm (KHOSHELHAM et al., 2012).

Personenerkennung

Kamerasysteme, die mit aktiver Projektion von strukturiertem Licht arbeiten, werden wegen der Verfügbarkeit von günstigen Sensoren in verschiedenen Anwendungen für die Personenerkennung eingesetzt. Die Daten werden in Tiefenbildern abgespeichert, welche mit den aus Kapitel 2.1.1 und 2.1.3 bekannten Bildverarbeitungsverfahren zur Personenerkennung verwendet werden können.

AMPLIANITIS et al. (2014) nutzen Kinect Kameras für die Überwachung von U-Bahn Waggons. Dabei werden Personen detektiert und verfolgt, indem bewegte Objekte vom statischen Hintergrund segmentiert werden. Um die verdeckten Bereiche möglichst klein zu halten, werden mehrere Kinect-Sensoren und zusätzliche Stereokamerasysteme eingesetzt.

XIA et al. (2011) wenden ebenfalls eine Personendetektion im Tiefenbild einer Microsoft Kinect an. Mit einer Kombination aus Kantendetektion und Mustererkennung erreichen sie in der gezeigten Experimentalkonfiguration eine Detektionsrate von 96% bei 0% falsch als Mensch deklarierten Objekten.

Fazit

Kamerasysteme, die mit der Projektion eines strukturierten Lichtmusters 3D-Positionen bestimmen, liefern vergleichbare Daten wie 3D-Kameras. In den Tiefenbildern kann eine Personenerkennung für die Mensch-Maschine-Interaktion durchgeführt werden. Die Reichweite und Genauigkeit sind anderen Systemen, wie Laserscannern zumeist unterlegen. Wie mit einer 3D-Kamera, lässt sich allerdings mit einem Musterprojektionssystem eine Szene flächenhaft in Videorate aufnehmen. Daher entstehen auch bei dynamischen Szenen keine Verzerrungen und Artefakte, wie sie bei der sequentiellen Aufnahme mit einem Laserscanner auftreten können. Außerdem sind die Systeme preiswerter als Laserscanner und die 3D-Punktbestimmung ist weniger komplex als mit ebenfalls preiswerten Mehrkamerasystemen.

2.1.5 Wärmebildkamera

Eine Wärmebildkamera zeichnet die Wärmestrahlung im mittleren bis langwelligen Infrarotbereich auf, die von den Objekten selbst abgestrahlt und reflektiert wird. Es handelt sich also um einen passiven Sensor.

In den meisten Fällen wird in Wärmebildern die Temperatur als Grauwert dargestellt. Die Bilder lassen sich also mit den Methoden der Bildverarbeitung weiterverarbeiten, um Objekte auf Grund ihrer Temperatur zu segmentieren und zu klassifizieren. Auch die Berechnung von 3D-Koordinaten aus der Aufnahme eines Objekts mit zwei oder mehr Wärmebildkameras ist möglich (WESTFELD et al., 2015).

Personenerkennung

Da sich Menschen in den meisten Umgebungen durch ihre Körpertemperatur von anderen Objekten abheben, können sie in den Bildern einer Wärmebildkamera einfach und zuverlässig detektiert werden. Die Temperatur kann dabei mit gekühlten Infrarot-Kameras mit bis zu 20 mK aufgelöst werden.

Eine Personenerkennung mit Wärmebildkameras kommt zum Beispiel bei der Sicherheitsüberwachung zum Einsatz. ZHANG et al. (2007) zeigen in einem direkten Vergleich, dass in Wärmebildern eine ähnliche Klassifikationsrate wie in 2D-Farbbildern erreicht wird. Nachteile gegenüber Verfahren mit Grauwert- oder Farbbildern treten bei Personen auf, die sich teilweise verdecken. In diesen Fällen sind die Silhouetten der einzelnen Personen nicht mehr klar trennbar. Die Detektionsraten liegen in den getesteten Szenarien bei ca. 80%.

Auch in militärischen Anwendungen und in der mobilen Robotik werden Wärmebildkameras eingesetzt. BERTOZZI et al. (2007) nutzen ein Stereo-Wärmebildkamera-System mit dem Ziel der Erkennung von Fußgängern auf einer militärischen oder privaten mobilen Plattform (Panzer, Kraftfahrzeug). Da sich Menschen unter bestimmten Umständen, zum Beispiel bei hoher Sonneneinstrahlung oder hohen Umgebungstemperaturen nicht eindeutig durch ihre Temperatur detektieren lassen, nutzen sie zusätzlich weitere Merkmale zur Erkennung. Zum einen berechnen sie Kanten in den Bildern, in der Annahme, dass die Silhouetten von Personen zu einem großen Anteil aus vertikalen Kanten bestehen. Weiterhin werden 3D-Informationen aus den Stereobildern berechnet und die Distanz und Größe zusammenhängender Objekte als Merkmal für die Erkennung verwendet. Abschließend wird die Form des Kopfs mit einem Template verglichen. Durch Hinzunahme der zusätzlichen Kriterien kann die Erkennungsrate von 70% nur mit Wärmeinformationen auf ca. 85% gesteigert werden.

Mit einer Kombination aus den Bildern einer 2D-Farbkamera und einer Wärmebildkamera führen CIELNIAK et al. (2010) eine Personenerkennung auf einem mobilen Roboter durch. Durch die Verwendung der Farbinformationen können auch Personen erkannt werden, die sich gegenseitig verdecken und in den Wärmebildern schwer zu detektieren sind. Dafür wird die Verteilung der Farbwerte (Mittelwert, Varianz und Schiefe) für Kopf, Torso und Beine berechnet. Im Wärmebild werden elliptische Konturen detektiert, die den Kopf und den Torso darstellen. Durch die Fusion der beiden Datentypen wird eine Detektionsrate von ca. 90%, auch bei verdeckten Personen erreicht.

Fazit:

Wärmebildkameras bieten Vorteile in dunklen oder schlecht beleuchteten Räumen. Besonders bei teilweise von Hindernissen verdeckten Personen ist eine Detektion auf Grundlage der Temperatur einer Detektion in einem 2D-Farbbild überlegen. Vor allem in der Fusion mit anderen Sensoren eignen sich Wärmebildkameras daher gut für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion. Die unter Umständen nicht stabile Temperatur von Maschinen, die sich im Überwachungsbereich befinden, kann allerdings eine klare Unterscheidung einer Person vom Hintergrund beeinflussen.

2.1.6 Radar

Ein Radargerät (Radio Detection and Ranging) misst die Distanz zu Objekten mit elektromagnetischen Wellen. Durch ein Bewegen der Antenne oder durch den Einsatz eines Arrays aus mehreren gerichteten Antennen, kann wie bei einem Laserscanner auch die Richtung zu einem Objekt und damit seine 3D-Position bestimmt werden. Im Vergleich zu Laserscannern ist die Winkelauflösung bei Radar

eher gering. Die große Wellenlänge und Einschränkungen in der Bauweise der Antennen führen zu einer minimalen Breite der Radarkeule von 2° (entspricht 3,5 cm in 1 m Entfernung).

Mit einem Radar sind Messungen auch bei schlechten Sichtverhältnissen, z.B. durch Staubeentwicklung, möglich. Bei dem Einsatz von Radar in Gebäuden kommt es allerdings oft zu Fehlmessungen durch das Auftreten von Mehrwegeeffekten. Dabei wird das Signal mehrfach an Wänden und Objekten reflektiert, bevor es zum Gerät zurückkehrt. Dieser Effekt hat zu lang gemessenen Distanzen zur Folge. Radar nutzt elektromagnetische Wellen in unterschiedlichen Wellenlängen. Die eingesetzte Wellenlänge ist entscheidend für die Distanz-Auflösung.

Personenerkennung

Aus der Analyse von Frequenz und Amplitude des reflektierten Radarsignals oder durch Doppler-Messungen lassen sich periodische Bewegungen ableiten. Daraus können bestimmte Bewegungsmuster wie der Gang (GEISHEIMER et al., 2012) oder die Atmung (KUMAR et al., 2014) einer Person erkannt werden. Der genaue Zeitpunkt, an dem im reflektierten Signal eine von einer Person erzeugte Bewegung gemessen wird, lässt auf die Distanz der Person zum Radargerät schließen.

Mit Ultrabreitband-Radar können im Nahbereich Distanzen zu Objekten mit Auflösungen im cm-Bereich bestimmt werden. Dabei wird auch durch Hindernisse hindurch gemessen. Besteht eine Sichtverbindung zwischen dem Radargerät und dem Objekt, ist die Positionsgenauigkeit höher, als wenn sich Hindernisse wie z.B. ein Tisch oder eine Wand zwischen dem Radar und der Person befinden (KUMAR et al., 2014).

KIM et al. (2014) untersuchen das Doppler-Signal eines Radars auf Personen. Sie nutzen dafür Support-Vector-Machines aus dem Bereich des maschinellen Lernens zur Klassifikation. Die zur Klassifikation verwendeten Merkmale sind u.a. die Frequenz der Bewegung der Gliedmaße und die Schrittweite. Die Personen müssen sich bei diesem Verfahren bewegen, um erkannt zu werden.

Personenerkennung mit Radar wird unter anderem von Rettungskräften eingesetzt, um eingeschlossene Personen zu erkennen (ZETIK et al., 2016). HEUER et al. (2014) stellen einen Ansatz zur Personenerkennung in einem Fahrerassistenzsystem vor. Der verwendete Radar-Sensor nutzt eine Trägerfrequenz von 24 GHz und erreicht in einer Distanz bis 280 m eine Streckenauflösung von 1 m bei einer Winkelauflösung von 6° . Anhand der reflektierten Signalstärke und der aus Doppler-Messungen bestimmten Geschwindigkeit werden Personen aus den Daten gefiltert. Mit diesem Ansatz lassen sich die Positionen von Personen mit einer Standardabweichung von 91 cm bestimmen.

Fazit

Auf Grund der geringen Winkelauflösung ist eine Positionsbestimmung mit Radar den Kamera- und Laserscanner-gestützten Verfahren unterlegen. Eine genaue Abstimmung zwischen Maschine und Mensch ist daher nicht möglich. Für eine reine Anwesenheitsbestimmung eignet sich Radar hingegen sehr gut, da auch Personen detektiert werden können, die komplett von anderen Objekten verdeckt und mit opti-

schen Messprinzipien nicht erkennbar sind. Für die Anwesenheitserkennungen werden meist Dopplermessungen eingesetzt, mit denen die Bewegung von Personen messbar wird.

2.1.7 Ultraschall

Ultraschallsensoren funktionieren nach dem Prinzip der Echo-Laufzeitmessung. Mittels Zeitmessung zwischen Aussenden und Empfangen eines Ultraschallwellenzugs wird mit Kenntnis der Schallgeschwindigkeit die Distanz zum Objekt berechnet. Dabei arbeitet ein Ultraschallwandler mit Hilfe des piezoelektrischen Effekts zuerst als Lautsprecher und anschließend als Mikrofon. Ultraschallkeulen haben typischerweise einen Öffnungswinkel von 5° bis 8° bzw. 9 cm bis 14 cm auf 1 m Distanz (HERING et al., 2012). Die Winkelauflösung ist dadurch auch bei der Verwendung eines Antennenarrays begrenzt.

Personenerkennung

Die Personenerkennung mit Ultraschall ist vergleichbar mit der mit Radar. In erster Linie messen Ultraschallsensoren Distanzen ohne dabei eine Information über den Winkel oder die Position des angemessenen Objekts zu erhalten. Durch den gleichzeitigen Einsatz von mehreren Radarsensoren kann jedoch eine Richtungsinformation abgeleitet werden. Die Winkelauflösung reicht dabei nicht aus um Personen auf Grund ihrer Form zu erkennen. Daher muss wie bei Radar das Ultraschallsignal auf Bewegungsmuster von Personen untersucht werden.

Durch die Messung des Dopplereffekts können Bewegungen von Menschen mit aktiven Ultraschallsensoren detektiert werden.

BLUMROSEN et al. (2014) detektieren mit einem Breitband-Ultraschallsystem Personen in einem Bereich von 4 m x 3 m x 2,5 m. Laufende Personen können mit einer Klassifikationsrate von 98% erkannt werden, während stehende Personen nur zu 68% erkannt werden.

Alternativ kann passiv der Schall gemessen werden, der von Objekten selbst emittiert wird. EKIMOV et al. (2008) messen den Schall, der beim Auftritt einer Person erzeugt wird und detektieren so Personen bis zu 18 m. In der Anwendung für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion können passive Messungen allerdings durch die Geräusche der Maschinen gestört werden.

Fazit

Die Überwachung eines Arbeitsbereichs mit Ultraschall ist auf Grund der geringen Winkelauflösung für eine Positionsbestimmung von Personen für die Mensch-Maschine-Interaktion begrenzt. Außerdem können hochfrequente Störgeräusche die Funktion des Ultraschalls stören (SOLOMAN, 2010). Eine einfache Anwesenheitserkennung, vor allem in kleinräumigen Anwendungen, kann mit Ultraschall preiswert gelöst werden.

2.2 Überwachung einer Ebene im Arbeitsbereich

Die Überwachung einzelner Ebenen im Arbeitsbereich stellt eine Alternative zur volumenhaften Überwachung des gesamten Arbeitsbereichs dar. Eine Möglichkeit besteht in der Überwachung von vertikalen Ebenen auf das Durchschreiten von Personen. Dieser Ansatz ist vergleichbar mit der Verwendung eines Schutzzauns mit Tür. Dabei kann überwacht werden, ob eine Person den Arbeitsbereich betritt oder verlässt.

Eine andere Möglichkeit ist die Überwachung einer horizontalen Ebene. Dabei wird zum Beispiel der gesamte Fußboden oder eine Ebene darüber überwacht, um festzustellen, wo sich gerade eine Person aufhält.

Für die Überwachung einzelner Ebenen im Arbeitsbereich können prinzipiell die gleichen Sensoren eingesetzt werden, wie für die volumenhafte Überwachung des Arbeitsbereichs. Da allerdings auf eine dritte Dimension verzichtet werden kann, vereinfachen sich die Anforderungen an das System. Mit einem 2D-Laserscanner oder einem druckempfindlichen Fußbodenbelag können vertikale oder horizontale Ebenen im Arbeitsbereich überwacht werden.

2.2.1 2D-Laserscanner

Mit Zeilen- oder 2D-Laserscannern kann eine Ebene im Arbeitsbereich überwacht werden. Das Prinzip eines Zeilenlaserscanners entspricht dem eines 3D-Laserscanners mit dem Unterschied, dass der Laser zur Distanzmessung nur in einer Ebene durch einen rotierenden Spiegel ausgelenkt wird. Es wird also ein zweidimensionales Profil aufgenommen, das aus Richtung und Distanz zu den Objektpunkten vor dem Scanner besteht (MADER et al. 2014, **Abb. 2.3**).

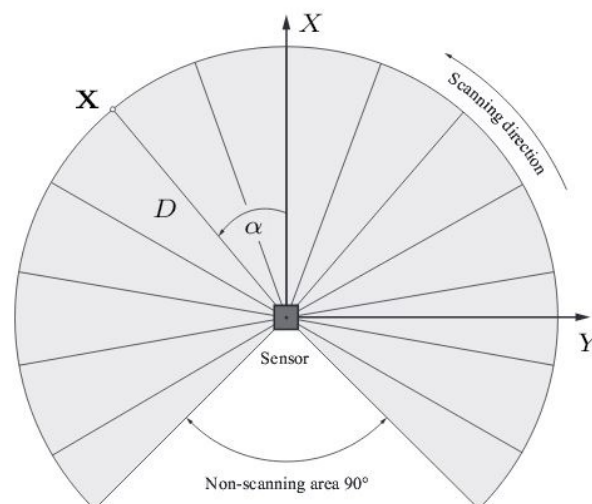


Abb. 2.3 Messprinzip und Definition des Koordinatensystems eines 2D-Laserscanners (MADER et al, 2014).

Personenerkennung

Zeilenlaserscanner sind bereits als Sensoren für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion erhältlich (z.B. SICK S 3000). Es wird ein Arbeitsbe-

reich kontinuierlich überwacht. Sobald ein Objekt diesen Bereich betritt, wird ein Signal ausgelöst, das an die Maschine übertragen werden kann. Die aktuell erhältlichen Systeme unterscheiden nicht zwischen einer Person und einem anderen Objekt. Sie eignen sich damit zwar zur zuverlässigen Erkennung von fremden Objekten im Überwachungsbereich, können aber nicht für eine Interaktion zwischen Maschine und Mensch eingesetzt werden. In wissenschaftlichen Projekten werden 2D-Laserscanner auch für eine Personenerkennung eingesetzt.

Mit einer Detektion von Beinen in einer Höhe von 11 cm über dem Boden und einer Auflösung von 0,5° tracken ARRAS et al. (2007) die Position bis zu vier Personen gleichzeitig. Zwei nah beieinanderliegende Punktgruppen werden als Beinpaar erkannt und in der Aufnahmesequenz verfolgt. Die Erkennung der Beine basiert auf geometrischen Merkmalen (Anzahl Punkte, Breite, Radius, u.v.m.). Als Ergebnis der Auswertung wird gezeigt, dass die Wege mehrerer Personen verfolgt werden können, auch wenn sich diese kreuzen oder sie sich auf der Stelle drehen.

LEE et al. (2007) detektieren Arme und Oberkörper in einer Höhe von 80 cm. Zunächst wird die Ausgangssituation, in der sich keine Personen im Arbeitsbereich befinden aufgenommen. In den folgenden Aufnahmen wird dieser Hintergrundbereich subtrahiert und neue Objekte (zusammenhängende Punktgruppen) als Menschen deklariert. Mit der Annahme, dass der Oberkörper einen Kreisbogen beschreibt, wird dessen Mittelpunkt als Position der Person angenommen. Der Weg einer Person wird innerhalb der Aufnahmesequenz verfolgt. Es werden mit diesem Verfahren in den Untersuchungen der Autoren bis zu drei Personen in einem Bereich von 4 m² getrackt. Durch den Einsatz von zwei Laserscannern werden auch Personen erkannt, die nebeneinander laufen und in der Aufnahme eines Scanners verdeckt sind.

Fazit

Im Gegensatz zu 3D-Laserscannern können 2D-Laserscanner nicht die genaue Körperhaltung und Pose der Personen aufnehmen. In einer Arbeitsraumüberwachung wird nur die 2D-Position der Person bestimmt. Um daraus eine Information für eine Maschine oder einen Roboter abzuleiten, welcher Bereich belegt ist, muss die Körperform der Person angenommen und diese z.B. mit einer quaderförmigen Box approximiert werden. Eine passgenaue Zusammenarbeit zwischen Maschine und Mensch kann dadurch nicht gesteuert werden. Die Ebene, in der der Scanner angebracht wird, darf sich außerdem nicht zu weit oberhalb des Bodens befinden, da Personen sonst darunter durch laufen und das System manipulieren können. Die Dauer für einen Scan ist bei 2D-Scannern kürzer als bei 3D-Laserscannern. Dadurch können auch bewegte Personen ohne Verzerrungen oder Artefakte aufgenommen werden. Außerdem sind die Systeme günstiger in der Anschaffung.

2.2.2 Druckempfindlicher Fußbodenbelag

Druckempfindliche Fußbodenbeläge werden aus vielen druckempfindlichen Elementen zusammengesetzt. Die Positionen der einzelnen Elemente sind in einem lokalen oder übergeordneten Koordinatensystem bekannt. Wirkt eine Kraft auf eines der Elemente, wird an dieser Position die Anwesenheit eines Objekts oder einer Person in diesem Abschnitt detektiert. Über die Analyse der einwirkenden Kraft kann abgeleitet werden, ob es sich um eine Person handelt.

Personenerkennung

Bei der Verwendung eines druckempfindlichen Bodenbelags wird über die einwirkende Kraft eine Hypothese aufgestellt, ob es sich um eine Person handelt. Die Position der Person oder eines beliebigen Objekts wird zweidimensional im Koordinatensystem des Industrieroboters gemessen (**Abb. 2.4**, SCHENK, 2016). Durch eine Analyse der Charakteristik des Auftritts kann außerdem auf die Identität einer speziellen Person geschlossen werden (ORR et al., 2000). Voraussetzung dafür ist, dass nur ein kleiner Kreis an bekannten Personen die Anlage betritt.

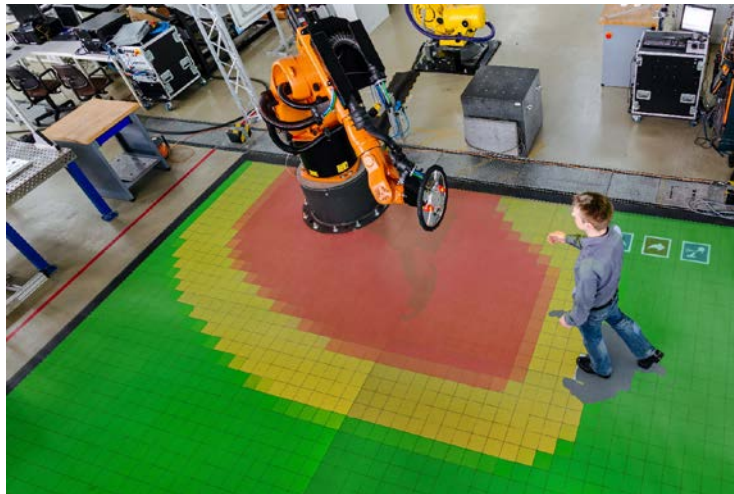


Abb. 2.4 Druckempfindlicher Bodenbelag (SCHENK, 2016).
Bildquelle: Fraunhofer IFF, Stefan Deutsch

Fazit

Druckempfindliche Bodenbeläge werden bereits für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion eingesetzt. Ein Nachteil der Bodenbeläge ist die feste Montage in den betreffenden Arbeitsräumen. Da eine Person den Boden aber in den meisten Fällen berührt, ist die Erkennung mit Drucksensoren sehr zuverlässig. Eine Unterscheidung zwischen Mensch und anderem Objekt kann dabei nicht immer gewährleistet werden. Wie bei einem 2D-Laserscanner kann mit diesem Verfahren keine genaue Aufnahme des gesamten Körpers einer Person durchgeführt werden. Daher ist diese Sensorik nur bedingt für eine direkte und räumlich enge Zusammenarbeit zwischen Maschine und Mensch geeignet.

2.3 Maschinenzentrierte Überwachung

Neben der Überwachung der Maschine und des Arbeitsbereichs von außen, besteht auch die Möglichkeit, Sensoren zur Kollisionsvermeidung zwischen Mensch und Maschine direkt an der Maschine anzubringen. Dabei erkennt das Messverfahren, wenn sich eine Person oder ein anderer Gegenstand nähert oder wenn ein Kontakt auftritt. Diese Art der Überwachung wird oft bei Robotern verwendet, um eine sichere Zusammenarbeit mit einer oder mehreren Personen im gleichen Arbeitsbereich zu ermöglichen.

Die Sensoren für eine maschinenzentrierte Überwachung müssen zuverlässig eine Annäherung oder eine Kollision mit einer Person feststellen, um dann ein Signal an die Maschine zu übermitteln, damit diese stoppen und eine Verletzung verhindern kann. Drucksensoren können eine Person erst bei einer Kollision erkennen, während kapazitive Sensoren bereits eine Annäherung detektieren. Außerdem besteht die Möglichkeit, die zuvor vorgestellte Sensorik direkt an einer Maschine oder einem Roboter zu befestigen. Somit kann die Position einer Person direkt in Relation zur Maschine bestimmt werden. Besonders eignen sich hierbei Ultraschallsensoren (STENGEL et al., 2013), Laserscanner oder 3D-Kameras (REISER et al., 2007). Für die Personenerkennung werden die bereits in Kapitel 2.1 vorgestellten Verfahren eingesetzt. Im Folgenden werden daher nur diejenigen Sensoren vorgestellt, die speziell für den Einsatz direkt auf der Maschine geeignet sind.

2.3.1 Drucksensoren

Roboter mit taktiler Sensorik ermöglichen eine sichere Mensch-Maschine-Interaktion, indem sie eine Berührung mit einem Menschen schnell und exakt lokalisieren können. Auf der Maschine befinden sich flächenhaft verteilte Drucksensoren. Der Roboter stoppt bei einer Berührung innerhalb von Millisekunden. Außerdem lässt er sich vom Arbeiter führen, um neue Abläufe einzuprogrammieren.

Personenerkennung

Eine Grundvoraussetzung für eine sichere Interaktion mit taktiler Sensorik ist, dass eine Kollision zwischen Roboter und Mensch keine Verletzungen hervorruft. Dafür werden weiche Bauteile verwendet, die für den Menschen ungefährlich sind. Durch eine exakte Lokalisation der Berührung kann der Roboter innerhalb von Millisekunden gebremst und z.B. eine vom Arbeiter geführte Ausweichbewegung durchgeführt werden. Außerdem werden gefährliche Quetschungen an den Gelenken des Roboters durch die Einhaltung von minimalen Winkeln verhindert.

Eine Studie über sichere Belastungsgrenzwerte im Kontaktfall mit einem Roboter wurde am Fraunhofer IFF durchgeführt (SCHENK, 2013).

Roboter, die mit Drucksensoren die Kollision mit Personen vermeiden oder abschwächen, sind bereits auf dem Markt verfügbar. Dazu zählen ABB YuMi (ABB, 2016), FANUC CR35iA (FANUC, 2015) und Audi Part4You (FEIGL, 2015).

Die Drucksensoren werden zum Beispiel mit Messwandlern aus piezoresistiven Polymerkompositen umgesetzt (SCHENK 2016). Dabei kann der Kollisionsort am Roboter lokalisiert werden (**Abb. 2.5**).



Abb. 2.5 Lokalisierung der Druckeinwirkung an einem Roboter (SCHENK 2016).
Bildquelle: Fraunhofer IFF.

Fazit

Mit Drucksensoren, die an einem Roboter befestigt werden, lassen sich Berührungen zwischen einer Person und einer Maschine zuverlässig messen. Dabei wird nicht zwischen Personen oder anderen Objekten unterschieden. Wird ein Kontakt festgestellt, muss der Roboter sofort gebremst werden. Um Verletzungen zu vermeiden, darf daher die Geschwindigkeit des Roboters im gesamten Arbeitsablauf nicht zu schnell werden. Daher verlangsamen sich die Prozesse. Eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine geht bei diesem Verfahren vom Mensch aus. Im Gegensatz zu den Messverfahren, die Personen im gesamten Arbeitsbereich erfassen, können Roboter, die mit Drucksensoren ausgestattet sind, nicht auf das Verhalten des Menschen reagieren. Das Verfahren eignet sich somit zwar für eine sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine im gleichen Arbeitsbereich, eine intelligente Personenerkennung zur frühzeitigen Anpassung der Arbeitsabläufe der Maschine ist allerdings nicht möglich.

2.3.2 Kapazitive Sensoren

Wenn ein Roboter eine Person erst bei einer Berührung erkennt, darf die Geschwindigkeit des Roboters nur so schnell werden, dass er den Menschen nicht verletzen kann. Zwar polstern weiche Bauteile die Kollision ab und machen sie so auch bei höheren Geschwindigkeiten ungefährlich, dennoch können nicht die gleichen Geschwindigkeiten wie in einem menschenleeren Arbeitsraum eingehalten werden. Daher bietet sich ein System an, das einen Menschen schon detektiert, wenn er sich der Maschine nähert. Dafür kann ein taktiles System mit einer anderen Sensorik kombiniert werden. Eine mögliche Kombination ist der Einsatz von kapazitiven Sensoren, die ebenfalls flächenhaft auf der Maschine verteilt werden (FRITZSCHE et al., 2014).

Personenerkennung

Ein Kondensator strahlt ein elektrisches Feld aus. Nähert sich ein Mensch der Maschine, verändert sich die Kapazität dieses Felds. Bei einer Änderung der Kapazität wird ein Signal erzeugt, das an die Steuerung der Maschine oder des Roboters weitergegeben werden kann. Die Kapazitätsänderung ist äußerst gering und stark vom Material, bzw. der Zusammensetzung des Materials abhängig (KLEGER, 1998).

Es ist daher nicht möglich, zwischen einem Menschen und einem anderen Objekt zu unterscheiden.

Fazit

Roboter mit kapazitiver Sensorik reagieren auf die Annäherung einer Person. Der Sensor kennt die Position des Menschen dabei erst, wenn sich dieser sehr nah (<50 cm) zum Sensor befindet. Eine intelligente Zusammenarbeit, die von der Maschine ausgeht, wie beispielsweise eine Anpassung der Pfadplanung auf den Menschen, ist also nicht möglich. Da das Messverfahren zur Erkennung von Personen einfach ist, liefern kapazitive Sensoren sehr zuverlässige Informationen über eine Annäherung an einen Roboter. Soll eine sichere Zusammenarbeit in einem gemeinsamen Arbeitsbereich stattfinden, können kapazitive Sensoren eingesetzt werden. Die Geschwindigkeit des Roboters muss dabei an die Erkennungs- und Bremszeit angepasst werden.

2.4 Aktive personenbezogene Systeme

Als aktive personenbezogene Systeme werden hier diese Messprinzipien beschrieben, bei denen nicht der gesamte Arbeitsbereich überwacht und eine darin befindliche Person detektiert wird, sondern die Personen selbst einen Sensor bei sich tragen müssen, um detektiert zu werden.

Voraussetzung für eine sichere Anwendung der entsprechenden Messverfahren ist, dass sich nur Personen im Arbeitsbereich aufhalten dürfen, die den entsprechenden Sensor mit sich tragen. Der Sensor kann dabei zum Beispiel als Antenne auf einem Helm angebracht sein oder als kleiner Chip in der Tasche mitgeführt werden.

Eine aktive Erkennung von Personen kann nach dem Prinzip der Positionsbestimmung durch den Empfang von Signalen von Sendern, deren Position im Raum bekannt ist, erfolgen. Man spricht dabei auch von Indoor-Positionierung. Die Person trägt einen Empfänger bei sich, der aus den Signalen seine Entfernung zu den Sendern bestimmt. Aus dem Schnitt der Strecken zu mindestens drei Sendern kann die Position des Empfängers berechnet werden. Die Signale werden dabei durch elektromagnetische Wellen übermittelt. Der Empfänger benötigt also eine Antenne, welche die Signale der Sender empfangen kann.

Zur Übertragung der Signale kann unter anderem WLAN, Ultra Breitband Radar oder RFID (radio-frequency identification) verwendet werden (**Abb. 2.6**, links). Die Messprinzipien unterscheiden sich hauptsächlich in der Wellenlänge der übermittelten Signale und den zu verwendenden Antennen. Da RFID Transponder günstig und kompakt sind, wird dieses Messprinzip häufig für die Positionierung und Personenerkennung eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit der Positionsbestimmung mit aktiven Sensoren bieten 6-DOF Inertialsensoren, die ihre Geschwindigkeit, Position und Rotation unabhängig von weiteren Sensoren oder Stationen direkt von der Bewegung ableiten (**Abb. 2.6**, rechts).

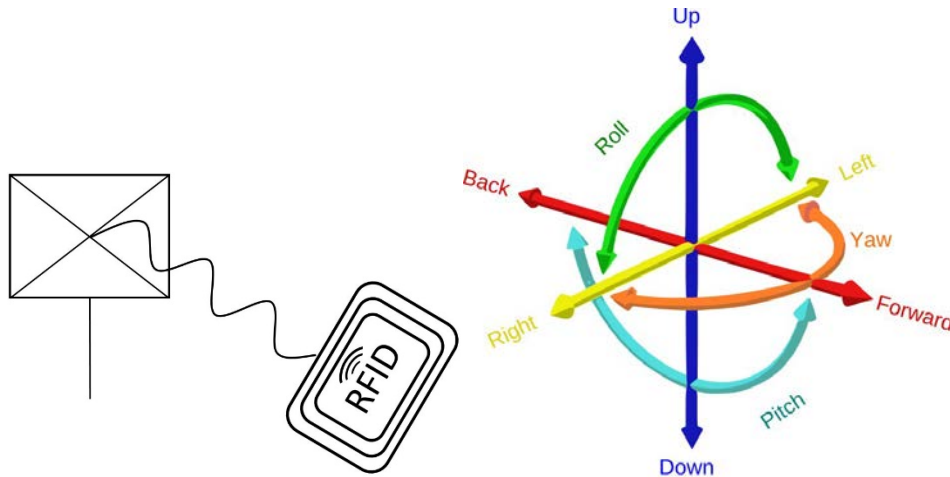


Abb. 2.6 RFID Übertragung zwischen Lesegerät und Transponder (links) und die sechs Freiheitsgrade (3 Positionen und 3 Rotationen) eines 6DOF Sensors (rechts, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:6DOF_en.jpg)

2.4.1 RFID

RFID Systeme nutzen Radiowellen um sehr kurze Nachrichten wie eine Identifikationsnummer zu übertragen. Ein RFID System besteht aus einem Lesegerät und einem Transponder. Man unterscheidet zwischen aktiven und passiven Transpondern. Die aktiven Transponder werden mit einer Batterie betrieben und können Signale über größere Strecken übermitteln, während die passiven Transponder sehr kleine Verbaugrößen aufweisen und dafür nur 1 bis 2 m Reichweite überbrücken können.

Personenerkennung

Für die Positionierung werden Systeme eingesetzt, bei denen die Person ein Lesegerät mit sich trägt und dieses seine Position relativ zu passiven oder aktiven Transpondern bestimmt, die im Arbeitsbereich angebracht sind. Umgekehrt kann die Person auch einen Transponder tragen und im Raum sind mehrere Empfänger angebracht, die die Position der Person bestimmen. Die Distanzbestimmung zwischen Transponder und Lesegerät kann aus der empfangenen Signalstärke, der Eintreffrichtung des Signals oder der Phase des Signals abgeleitet werden (MAUTZ, 2012).

Es sind bereits Systeme erhältlich, die mit RFID Transpondern die Anwesenheit von Personen überwachen um eine Kollision mit beweglichen Maschinen zu verhindern (z.B. ELOKON ELOshield).

Fazit

Nachteile von RFID sind neben dem Batterieverbrauch der aktiven Systeme und der geringen Reichweite passiver Systeme vor allem in der prinzipbedingten Art der Positionsbestimmung zu sehen. Während mit den zuvor genannten Verfahren entweder der gesamte Arbeitsbereich (Abschnitt 2.1) oder der Bereich im Umfeld der Maschine (Abschnitt 2.3) räumlich überwacht werden kann, wird bei diesem Verfahren nur eine einzelne Position bestimmt. Dabei kann, ähnlich wie bei den 2D-Verfahren in Abschnitt 2.2, keine Information über die genaue Position einzelner Körperteile abgelei-

tet werden, um eine direkte und räumlich enge Zusammenarbeit zwischen Maschine und Mensch zu ermöglichen.

Weitere Nachteile liegen im Datenschutz und in der Manipulationsmöglichkeit. Die RFID Sensoren, die von den Mitarbeitern getragen werden, senden eine eindeutige Identifikationsnummer. Auf diese Weise lassen sich Positionsdaten über Mitarbeiter erheben. Ein RFID gestütztes Verfahren zur Personenerkennung lässt sich durch nicht tragen des Sensors leicht manipulieren. Eine Zuverlässige Interaktion zwischen Mensch und Maschine ist folglich nicht sichergestellt.

Klare Vorteile ergeben sich aus der kleinen Größe und der preiswerten Anschaffung. Da ein RFID Sensor eindeutig geortet werden kann, ohne dass dafür flächenhafte oder volumenhafte Daten interpretiert werden müssen, ist die Detektion von Personen sehr zuverlässig.

2.4.2 6-DOF Inertialsensoren

Sensoren, die sowohl die Position im 3D-Raum, als auch die Orientierung in allen drei Raumwinkeln bestimmen, können als 6-DOF Systeme bezeichnet werden (six degrees of freedom, sechs Freiheitsgrade). Eine inertielle Messeinheit, bestehend aus drei Beschleunigungssensoren und drei Drehratensensoren, bestimmt dabei die Positionsänderung, Rotation und Geschwindigkeit einer bewegten Plattform. Ist die Ausgangsposition bekannt, können nachfolgende Positionen angehängt werden. Somit ist ein Inertialmesssystem unabhängig von äußerer Infrastruktur (MAUTZ, 2012).

Die Sensoren lösen Winkelveränderungen in der Größenordnung von $0,1^\circ$ auf. Da sich Fehler in den Beschleunigungsmessungen mit der Zeit immer weiter in die Positionsbestimmung fortpflanzen (dead reckoning, Koppelnavigation), unterliegt die Position, die mit einer inertialen Messeinheit bestimmt wird, einer starken Drift von mehreren Metern innerhalb einer Minute (WOODMAN, 2007).

Inertielle Messeinheiten werden beispielsweise für die Navigation von unbemannten Flugobjekten (UAV) verwendet.

Personenerkennung

Eine Person, die eine inertielle Messeinheit bei sich trägt kann seine Position und Orientierung an dieser Stelle stets feststellen. Werden diese Informationen an einen Computer übermittelt, können diese zur Steuerung einer Maschine verwendet werden. Dabei wird immer nur die Pose an der Position am Körper bestimmt, an der sich die inertielle Messeinheit befindet.

Durch das Anbringen von mehreren Sensoren, kann auch eine Messung des gesamten Körpers erfolgen. In der Medizin werden Inertialsensoren zur Untersuchung von Körperhaltungen eingesetzt. Dafür werden entlang der Wirbelsäule im Abstand von ca. 10 cm Inertialsensoren angebracht und damit die Verformung während bestimmter Bewegungsabläufe in Echtzeit analysiert.

Fazit

6-DOF Inertialsensoren kommen bisher sowohl in der Navigation von autonomen Fahrzeugen, als auch in der Bestimmung von Körperhaltungen zum Einsatz. Wird nur ein Sensor verwendet, ergeben sich die gleichen Nachteile, wie bei der Nutzung eines RFID Sensors zur Positionsbestimmung. Das System lässt sich leicht manipulieren und es wird ausschließlich eine Position bestimmt, die nicht auf die Position einzelner Körperteile schließen lässt. Hinzu kommen Drifts, also mit der Messdauer steigende Ungenauigkeiten in der Positions- und Richtungsbestimmung.

Um eine Aussage über Körperhaltungen oder die Bewegung einzelner Körperteile treffen zu können, müssen mehrere Sensoren am Körper angebracht werden. Aufgrund der umständlichen Inbetriebnahme und der schlechten Genauigkeiten in längeren Zeitspannen, ist das Messverfahren für eine Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion eher ungeeignet.

2.5 Multisensorsysteme

Die Fusion der Messdaten mehrerer Sensortypen bietet die Möglichkeit, die Vorteile der unterschiedlichen Messprinzipien zu kombinieren und dabei die Nachteile zu minimieren. Nach LUO et al. (1989) sind die Vorteile einer Sensorfusion unter anderem folgende:

- Redundanz: Bei einer Fehlmessung oder dem Ausfall eines Sensors springen die anderen Sensoren ein um weiterhin Messungen zu liefern. Außerdem verbessern sich die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Messung, also der Personenerkennung.
- Komplementarität: Die einzelnen Sensortypen arbeiten nach unterschiedlichen Messprinzipien und messen unterschiedliche Merkmale. Eine Fusion aus den Daten einer Wärmebildkamera und einer 3D-Kamera zum Beispiel erhöht die Zuverlässigkeit der Personenerkennung durch die Analyse der Merkmale Temperatur, Geometrie und Farbe.
- Mehr zeitliche Informationen: Durch die Fusion von mehreren Sensoren erhöht sich die zeitliche Dichte der aufgenommenen Daten.

Für die Anwendung in einem Service Roboter nutzen MARTIN et al. (2006) ein System, das aus einem 2D-Laserscanner, 16 Ultraschallsensoren und eine 360°-Fisheye-Kamera zur Detektion von Personen. Sie erreichen damit eine Detektionsrate von 93%, wobei die meisten nicht detektierten Personen sich hinter dem Roboter, also außerhalb des Sichtbereichs des Laserscanners befanden.

SPORRER et al. (2016) nutzen ein Multisensorsystem, bei dem eine multispektrale Infrarotkamera und eine Kamera mit strukturiertem Licht eingesetzt werden. In einer pixelweisen Klassifikation mit einem convolutionalen neuronalen Netzwerk (maschinelles Lernen) werden Bilder im nahen Infrarotbereich, Haut-Klassifizierungen aus den multispektralen Infrarotdaten und Tiefendaten der Kinect für eine Personenerkennung verwendet. Durch die Fusion der verschiedenen Informationen wird die Detektionsrate von 12% (nur mit Infrarotbildern) auf 66% gesteigert.

2.6 Testscenario für einen Vergleich der Messverfahren

Um die unterschiedlichen Messprinzipien bezogen auf ihre Eignung als Messverfahren zur Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion direkt vergleichen zu können, muss ein gemeinsames Testscenario erarbeitet werden.

In einer Veröffentlichung des amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) beschreiben SHNEIER et al. (2015) ein solches Verfahren zur Evaluation von Systemen für die Personenerkennung und das Tracking in Anwendungen der Robotik. Sie statten dabei Personen mit einem Helm aus, auf dem ein aktives Indoor Positionierungssystem auf Laserbasis und Reflektoren für ein Motion-Capturing System auf Kamerabasis angebracht sind. Mit den beiden Systemen kann die Position der Person auf Submillimeter genau bestimmt werden und dient als Referenz für die Überprüfung anderer Systeme. In den Tests bewegen sich mehrere Personen in einem Überwachungsbereich von 5 m x 5 m, in dem sich in einigen der Versuche auch Hindernisse befinden.

2.7 Vergleich der Messverfahren

Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren zur Personenerkennung eignen sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche in der Mensch-Maschine Interaktion. Während einige Messverfahren ein größeres Potential in der Messgenauigkeit und in der Aufnahme der kompletten Person aufweisen, zeichnen sich andere Messverfahren durch Zuverlässigkeit in der Detektion aus. Letztgenannte Verfahren sind dafür teilweise nicht in der Lage, zwischen Personen und anderen Objekten zu unterscheiden, während die erstgenannten nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit eine Erkennung garantieren können. Im Folgenden werden die Messprinzipien noch einmal mit ihren Stärken und Schwächen zusammengefasst.

Die höchsten Genauigkeiten für eine Objektpunktbestimmung im Raum bieten Mehrkamarasysteme mit Genauigkeiten im Submillimeter bis Millimeter Bereich. Laserscanner können ebenfalls mit Genauigkeiten in Größenordnungen von Millimetern bis Zentimetern Objekte auch in großen Distanzen erfassen. Jedoch ist die sequentielle Arbeitsweise eines Laserscanners in der Erkennung sich bewegender Personen ein stark limitierender Faktor.

3D-Kameras und Kamerasysteme mit strukturiertem Licht können flächenhaft und simultan in Videorate Objekte in wenigen Metern Distanz zentimetergenau erfassen. Bei kleinräumigen, dynamischen Vorgängen haben sie damit Vorteile gegenüber Laserscannern, auch in den Kosten.

Wärmebildkameras liefern zusätzliche Informationen über die Temperatur von Objekten, die unter anderem bei Verdeckungen eine bessere Personenerkennung ermöglichen. Vor allem in der Kombination mit 2D-Farbwerten und 3D-Daten aus der Fusion mit weiteren Sensoren erhöht diese zusätzliche Information die Zuverlässigkeit der Personenerkennung.

Radar und Ultraschallsysteme sind auf Grund der schlechten Winkelauflösung für eine Positionsbestimmung von Personen den anderen Sensoren unterlegen. Mit den Möglichkeiten der Bewegungsdetektion durch Dopplermessungen können dafür mit

diesen Sensoren auch verdeckte Personen detektiert werden, die sich nicht in direkter Sicht zum Sensor befinden.

Der Einsatz von druckempfindlichen Sensoren direkt an der Maschine liefert zwar sehr zuverlässige Detektionswerte, allerdings erst bei einer Kollision. In einer Kombination mit kapazitiven Sensoren können auch Personen erkannt werden, die sich der Maschine nähern. Die Reichweite ist hierbei allerdings ein einschränkender Faktor.

Druckempfindliche Fußböden liefern ebenfalls sehr zuverlässige Informationen über die Positionen von Objekten. Dabei kann aber nicht immer zwischen einer Person oder einem anderen Objekt unterschieden werden und nur die Position der Füße und nicht die der anderen Körperteile bestimmt werden.

Bei den aktiven Positionierungssystemen, bei denen z.B. mit RFID oder mit inertialen Messeinheiten die Position, Bewegung und Rotation einer Person bestimmt werden kann, müssen mehrere Sensoren am Körper angebracht werden, um eine Aussage über die einzelnen Körperteile ableiten zu können. Außerdem müssen bei diesen Systemen alle Personen, die in der Interaktion mit der Maschine beteiligt sind, mit Sensoren ausgestattet werden.

Bei den zweidimensionalen und den aktiven personenbezogenen Sensoren werden Personen in der Regel nur mit einer einzigen Position gemessen. Mit den Messverfahren auf Basis von Kameras und Laserscannern können aus den flächenhaft und volumenhaft komplett erfassten Personen einzelne Körperteile sub-segmentiert werden. Dadurch wird zum Beispiel eine Übergabe von Teilen zwischen Mensch und Maschine ermöglicht.

Um die Nachteile der einzelnen Sensoren zu überwinden, kann eine Kombination aus mehreren Sensoren eingesetzt werden. Die Fusion der unterschiedlichen Daten bietet eine unabhängige Kontrolle und kann für eine gesamte Detektion und Positionierung von Personen und für das Tracking einzelner Körperteile verwendet werden.

Die Messverfahren werden in der Anwendungsmatrix (Kapitel 3.3) systematisch über die Merkmale Funktionsprinzipien, Art der Personenerkennung sowie die vorhandenen Vorteile und Nachteile beschrieben.

3 Einsatzmöglichkeiten der Messverfahren zur sicheren Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion

3.1 Mögliche Anwendungsgebiete

Aus der umfangreichen Literaturrecherche hinsichtlich aktuell verfügbarer Messverfahren zur sicheren Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion konnten auf Grund der dort dokumentierten Anwendungsfälle verschiedenste Anwendungsgebiete zusammengetragen werden. Diese lassen sich in Industrieroboter, Maschinen und Anlagen, Automaten sowie Handling-Systeme, Flurförderzeuge, Fahrzeuge und Verkehrsmittel unterscheiden. Im Folgenden werden die Anwendungsgebiete kurz erläutert.

3.1.1 Industrieroboter

Ein Industrieroboter ist ein automatisches Fertigungssystem, welches unterschiedlichste Aufgaben in der Produktion übernimmt. Oft werden durch Menschen unterstützende Tätigkeiten im Umfeld des Industrieroboters übernommen, so dass ein hohes Gefahrenpotenzial für Menschen besteht. Bei der sicheren Kooperation von Mensch und Industrieroboter gilt deshalb, gemeinsam in einem Arbeitsraum ohne konventionelle Sicherheitstechnik wie Zäune oder Lichtschranken zu agieren und dabei an einer gemeinsamen Aufgabe intuitiv und effizient zu arbeiten. Anwendungen beziehen sich auf Tätigkeiten in einer Roboterzelle bzw. das Absichern eines Gefahrenbereichs um den Industrieroboter, indem mindestens die Anwesenheit des Menschen im Arbeitsbereich des Roboters mittels Sensoren erkannt wird.

3.1.2 Maschinen und Anlagen

Unter Maschinen und Anlagen werden sowohl Einzelmaschinen, Ladestationen oder Arbeitszellen als auch miteinander vernetzte Maschinen sowie ganze Fertigungsstraßen verstanden. Dabei können die Automatisierungsgrade von einer Teilautomatisierung bis hin zu hoch- bzw. auch vollautomatisierten Anlagen (wie z.B. in der Brennstoffzellenfertigung und –montage) variieren.

Für eine sichere Personenerkennung bei der Tätigkeit an Maschinen und Anlagen spielt die Gefahrenbereichsüberwachung eine große Rolle. So sollen besondere Gefahrenstellen oder Zugänge zu den Maschinen überwacht werden, aber auch beispielsweise Einlegeplätze, an denen Menschen tätig sind. Bei der Gefahrenbereichsüberwachung ist oft die Absicherung sehr großer, teils komplex geschnittener Flächen notwendig. Zusätzlich erschwerend wirken extreme Umgebungsbedingungen wie Temperatur, mechanische Beanspruchung, Verschmutzung oder Nässe. Oft ist auch eine mehrseitige Zugangsabsicherung notwendig.

3.1.3 Automaten und Handling-Systeme

Im Kontext der sicheren Personenerkennung werden unter Automaten vor allem Zutrittskontrollsysteme in Unternehmen und im öffentlichen Bereich verstanden. Es werden aber auch Zählsysteme (beispielsweise im Einzelhandel, Museum oder öf-

fentlichen Personenverkehr) oder Systeme, die eine Personenannäherung bemerken und dann aktiv reagieren (beispielsweise im Sanitärbereich und Spielkonsolen) diesem Anwendungsgebiet zugeordnet.

Mit Handling-Systemen sind unterstützende Einrichtungen in der Fertigung gemeint, die der besseren Handhabung von zu transportierenden oder zu montierenden Produkten dienen. Diese gewinnen immer mehr an Bedeutung, wenn es um ergonomisches Arbeiten (Unterstützung beim manuellen Lastenhandling, bei Überkopfarbeiten oder bei Arbeiten in ungünstigen Arbeitshaltungen) oder um das schnelle und sichere Handling von empfindlichen Produkten geht. Die Systeme sind teil- bzw. vollautomatisiert (Leichtbauroboter). Insofern gelten ähnliche Anwendungsbereiche zur sicheren Personenerkennung wie in 3.1.1 und 3.1.2 beschrieben.

3.1.4 Flurförderzeuge

Beim Einsatz von Flurförderzeugen geht es vor allem um eine sichere Personenerkennung bei der Absicherung von:

- Be- und Entladezonen,
- Lagergassen/Schmalgängen und
- fahrerlosen Flurförderzeugen.

Die Sensoren sind am Flurförderzeug montiert bzw. entsprechende Transponder an der Person, am Stapler oder an Gebäudeteilen. Damit ist die Überwachung eines definierten Bereichs möglich. Gängige Sensoren für diese Anwendungsfälle sind Ultraschall, 2D-Laserscanner und RFID. Beim Erkennen von Personen wird das Fahrzeug automatisch bis zum Stillstand abgebremst. Der Bediener bekommt zusätzlich ein akustisches und optisches Signal angezeigt.

3.1.5 Fahrzeuge (Baumaschinen, Nutzfahrzeuge, Automobile)

Anwendungsgebiete bei der sicheren Erkennung von Personen im Zusammenwirken mit Fahrzeugen sind Rangierhilfen beim Rückwärtsfahren, Rückfahrwarnsysteme, Hinderniserkennungssysteme oder Systeme zur Fußgängererkennung.

3.1.6 Verkehrsmittel (Flugzeuge, Schienenfahrzeuge)

Diese Kategorie umfasst die sichere Detektion von Personen im Zusammenwirken mit Verkehrsmitteln. Hierbei sollen vor allem Kollisionen zwischen Personen und Verkehrsmitteln, aber auch zwischen den Verkehrsmitteln vermieden werden, insofern gelten die Anwendungsbereiche wie in 3.1.5 beschrieben. Ein weiterer Anwendungsbereich liegt in der Vermeidung von Gefahrensituationen im Innenbereich der Fahrzeuge (beispielsweise Angriffe, Vandalismus, Unfälle).

3.2 Anwendungsgrenzen

Ausgehend von den recherchierten Messverfahren und den daraus resultierenden Anwendungsgebieten wurden mögliche **Einsatzzwecke**, die für jedes Messverfahren geltenden **technische Parameter** sowie notwendige **Umgebungsfaktoren** bewertet. Diese Merkmale werden anhand weiterer Untermerkmale systematisch defi-

niert (**Tab. 3.1**) und verdeutlichen die Anwendungsgrenzen der Messverfahren. In den folgenden Abschnitten werden die Untermerkmale detailliert beschrieben.

Tab. 3.1 Anwendungsgrenzen im Überblick.

Einsatzzweck	Anwesenheitserkennung Positionsbestimmung Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine Aufnahme von Körperhaltungen
Technische Parameter	Erfassungsdaten <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit • Zuverlässigkeit • Detektionszeit • Überwachungsbereich Installation <ul style="list-style-type: none"> • Abmessungen • Zugänglichkeit • Konfiguration • Komponenten • stationär/mobil • Innen-/Außenbereich • Integrierbarkeit Weiteres <ul style="list-style-type: none"> • Manipulierbarkeit • Wartungsaufwand • Erweiterung/Schnittstellen/Austauschbarkeit • Schutzart • zusätzliche Ausstattung
Umgebungsfaktoren	Beleuchtungsgrößen Optische Strahlung Klimagrößen Vibrationen Aerosole Äußere Einflüsse

3.2.1 Einsatzzweck

Anwesenheitserkennung

Die Anwesenheit bzw. der Eintritt von Personen in den mittels Sensoren überwachten Arbeitsraum wird erkannt. Die genaue Position im Arbeitsraum spielt dabei keine Rolle. Als Beispiel sei hier der Hintertretschutz erwähnt.

Positionsbestimmung

Das Sensorsystem ist in der Lage die aktuelle Position von Personen im überwachten Arbeitsraum zu bestimmen. Dabei werden an dieser Position durchgeführte Bewegungen oder eingenommene Körperhaltungen nicht erfasst.

Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine

Das Sensorsystem erfasst und bewertet menschliche Bewegungen mit einer hohen Genauigkeit und lässt sich für eine Kollaboration von Mensch und Technik, die sich durch aufeinander abgestimmte Bewegungen beider Elemente auszeichnet, einsetzen (z. B. für die Mensch-Roboter-Interaktion).

Aufnahme von Körperhaltungen

Das Sensorsystem bietet die Möglichkeit, eingenommene Körperhaltungen zu erfassen. Einsatzmöglichkeiten sind bspw. Ergonomiescreenings/ -bewertungen für Tätigkeiten mit physischen Belastungen.

3.2.2 Technische Parameter

Erfassungsdaten

Genauigkeit

Die Kategorie Genauigkeit beschreibt, wie genau mit dem verwendeten Messprinzip eine Messgröße bestimmen kann. Als Messgröße ist für die Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion die Position der detektierten Person entscheidend. Eine Genauigkeit wird daher nur angegeben, wenn sich das Messprinzip zur Positionsbestimmung (Kategorie „Einsatzzweck“) eignet.

Die Genauigkeit einer Messung beschreibt die Differenz zum wahren Wert und setzt sich aus systematischen und zufälligen Anteilen zusammen. Systematische Anteile bilden ein Offset zum wahren Wert und können bei bekanntem physikalischen Messprinzip kalibriert und eliminiert bzw. minimiert werden. Die zufälligen Fehler beschreiben die normalverteilte Streuung der Messwerte um den Erwartungswert nach Eliminierung der systematischen Fehler. Die Präzision gibt die Größe der zufälligen Fehler an und kann mit der Standardabweichung beschrieben werden.

Nach der ISO/BPIM Vorgabe „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM; dt.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) wird zu jeder Messung eine Messunsicherheit angegeben (JCGM 100:2008). Die Messunsicherheit wird als Standardunsicherheit angegeben, ist also bereits um bekannte systematische Abweichungen korrigiert und kann auf zwei Arten bestimmt werden: Wurden Mehrfachmessungen durchgeführt, kann sie durch Mittelbildung und Varianzfortpflanzung mit statistischen Methoden bestimmt werden (Typ A). Wurde nur eine einzelne (zufällige) Messung durchgeführt, kann sie durch Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie aus allen möglichen Einflussfaktoren abgeleitet werden (Typ B). Dabei werden Angaben vom Hersteller oder aus früheren Messungen, Daten aus einer Kalibrierung, Erfahrungen oder Kenntnisse über die Messgeräte und den Messprozess oder Referenzdaten aus Handbüchern hinzugezogen.

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ wird in DIN 40041:1990-12 als eine Wahrscheinlichkeit definiert, dass ein Sensor eine definierte Funktion im Zeitraum $\{0, t\}$ erfüllt. Diese Missionszeit t kann beispielsweise in Stunden, Betriebszyklen, oder in Kilometern Laufleistung bemessen werden. Man kann die Zuverlässigkeit dann als relative Zahl der

noch funktionierenden Sensoren ansehen, wenn man diese auf die bekannte Gesamtzahl N Sensoreinheiten im Versuch oder Feldeinsatz bezieht und von einer Anzahl n ausgefallenen Sensoren ausgeht. (TRÄNKLER et al., 2014)

Die Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde ist ausschlaggebend dafür, was für ein Performance Level (nach EN ISO 13849-1) erreichbar ist.

Detektionszeit

Mit Detektionszeit ist die Zeit gemeint, die benötigt wird, um eine Person bzw. ein Objekt kollisionsfrei ausfindig zu machen.

Überwachungsbereich

Der Überwachungsbereich beinhaltet Angaben zur Schutz- bzw. Warnfeldreichweite (Radius, Erfassungswinkel), zur Objektauflösung und zur Anzahl der einstellbaren Schutzfelder. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist, ob sich Schutzfelder flexibel an die Anforderungen der Prozessabläufe anpassen lassen.

Installation

Abmessungen

Die Abmessungen (Platzbedarf) beziehen sich auf die baulichen Maße wie Höhe, Breite und Tiefe der Sensoren.

Zugänglichkeit

Bei der Installation ist darauf zu achten, dass z. B. Hindernisse nicht die freie Sicht verdecken, um die Durchlässigkeit zu gewähren.

Konfiguration

Mit der Konfiguration wird die Inbetriebnahme ermöglicht. In Softwarelösungen enthalte Simulationsmodi können dabei unterstützend wirken.

Komponenten

Unter Komponenten werden alle Bauteile verstanden, die zur Funktionsfähigkeit des Messsystems erforderlich sind.

stationär/mobil

Die Sensoren eignen sich für stationäre (z. B. Gefahrenbereichsabsicherung oder Zugangsabsicherung) oder mobile Applikationen (z. B. Flurförderzeuge).

Innen-/Außenbereich

Die Sensoren können im Innenbereich, also in geschlossenen Räumen oder im Außenbereich, im Freigelände eingesetzt werden.

Integrierbarkeit

Die Integrierbarkeit umfasst Aufwendungen für die Montage (z. B. Berücksichtigung von Sicherheitsabständen, Montagehöhen oder zulässige Deckenlasten) der Sensoren und die Aufnahmebedingungen in das gesamte Messsystem.

Weiteres

Manipulierbarkeit

Die Kategorie Manipulierbarkeit beschreibt die Einschätzung, wie sich die jeweils im Einsatz befindlichen Sensoreinheiten durch persönliche Maßnahmen der zu detektierenden Personen außer Kraft setzen lassen.

Wartungsaufwand

Da die Zuverlässigkeit des Messsystems auch von Wartungstätigkeiten abhängt, spielt der Wartungsaufwand (z. B. Wartungsintervalle, Kosten) eine wichtige Rolle für die Langzeitstabilität der Sensoren.

Erweiterung/Schnittstellen/Austauschbarkeit

Diese Kategorie beschreibt, in wieweit weitere Funktionen/zusätzliche Anwendungen in das Sensorsystem im Sinne von Nachrüstungen integrierbar sind. Sind Schnittstellen zu anderen Messsystemen möglich, z. B. beim Einsatz von Multisensoren? Sind die Sensoren durch andere Produktspezifikationen austauschbar?

Schutzart

Schutzarten werden gemäß DIN EN 60529 eingeteilt. Die Schutzarten sind durch international gültige Kurzzeichen gekennzeichnet (IP =International Protection). Der Abkürzung IP folgen zwei Ziffern. Die erste Ziffer steht für den Schutz gegen das Eindringen fester Körper (**Tab. 3.2**). Die zweite Ziffer beschreibt den Schutzgrad gegen das Eindringen von Wasser (**Tab. 3.3**). Die Angaben beziehen sich auf unbearbeitete Gehäuse ohne Berücksichtigung von Einflüssen wie Alterung, Temperaturwechsel u.ä..

Tab. 3.2 Berührungs- und Fremdkörperschutz (1. Kennziffer).

0	nicht geschützt
1	geschützt gegen feste Fremdkörper 50mm Durchmesser und größer
2	geschützt gegen feste Fremdkörper 12.5mm Durchmesser und größer
3	geschützt gegen feste Fremdkörper 2.5mm Durchmesser
4	geschützt gegen feste Fremdkörper 1 mm und größer
5	Staubgeschützt (eine Beeinträchtigung des Gerätes / Sicherheit darf nicht erfolgen)
6	Staubdicht (kein Eindringen von Staub bei einem Unterdruck von 20mbar im Gehäuse)

Tab. 3.3 Wasserschutz (2. Kennziffer).

0	kein Schutz
1	geschützt gegen Tropfwasser (senkrecht fallende Tropfen)
2	geschützt gegen Tropfwasser, wenn das Gehäuse bis zu 15° geneigt ist (senkrecht fallende Tropfen)
3	geschützt gegen Sprühwasser (Wasser in einem Winkel von bis zu 60° beiderseits)
4	geschützt gegen Spritzwasser (Wasser aus jeder Richtung)
5	geschützt gegen Strahlwasser (Wasser aus jeder Richtung mit ca. 12,5 Liter / Minute)
6	geschützt gegen starkes Strahlwasser (Wasser aus jeder Richtung; 100 l/min)
7	geschützt gegen die Wirkung des zeitweiligen Untertauchens in Wasser
8	geschützt gegen die Wirkung beim dauernden Untertauchen in Wasser

Zusätzliche Ausstattung

Zusätzliche Ausstattungen sind bei aktiven Messsystemen unumgänglich. D.h. Personen müssen entweder einen Empfänger oder einen Sender bei sich tragen. Aus Arbeitsschutzaspekten betrachtet, grenzt diese Kategorie die Anwendung von Sensoren ein, da das Tragen der zusätzlichen Ausstattung von der Person manipuliert werden kann.

3.2.3 Umgebungsfaktoren

Folgende Umgebungsfaktoren können Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Sensoren haben.

Beleuchtungsgrößen

Alle Angaben dieses Abschnitts beruhen auf SCHMAUDER et al. (2014).

Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke E ist die am häufigsten gebrauchte lichttechnische Größe. Sie entspricht dem Lichtstrom ϕ , der auf eine Fläche A trifft und hat die Einheit Lux ($lx = lm/m^2$)

$$E = \phi/A$$

Sie ist als Mittelwert zu verstehen, da im Allgemeinen der Lichtstrom ungleichmäßig über die Fläche verteilt ist. Für große Verhältnisse von r^2 zu A kann die Beleuchtungsstärke auch aus der Lichtstärke I und dem Abstand r zum beleuchteten Punkt berechnet werden. Bei einem Verhältnis von Abstand zur Lichtquelle zum Ausdehnung der Lichtquelle von größer 5 gilt näherungsweise:

$$E = I/r^2$$

Steht die beleuchtete Fläche nicht senkrecht unter der Lichtquelle, ist die resultierende Beleuchtungsstärke E' abhängig vom Winkel ε der betrachteten Fläche zur Lichtquelle und der Anbringungshöhe r:

$$E' = I/r^2 * \cos^3 \varepsilon$$

Lichtstrom ϕ

Der Lichtstrom ϕ umfasst die gesamte von einer Lichtquelle abgegebene sichtbare Strahlung. Die Einheit des Lichtstroms ist Lumen (lm).

Lichtstärke I

Die Lichtstärke I dient zur Bewertung des Lichtes, das in einer bestimmten Richtung ausgestrahlt wird. Sie ist definiert als die in eine bestimmte Raumrichtung ε abgegebene sichtbare Strahlung ϕ bezogen auf den dabei durchfluteten Raumwinkel Ω . Ihre Einheit ist Candela ($cd = lm/sr$).

Raumwinkel Ω

Gemäß dem Zusammenhang $\Omega = A/r^2$ bildet ein von einem Punkt ausgehendes Strahlenbüschel einen Raumwinkel Ω . Dabei ist A das Oberflächenstück, das der Raumwinkel aus einer Kugel mit dem Radius r vom Ursprung des Strahlenbüschels ausschneidet. Die Einheit ist der Steradian (sr).

Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte L beschreibt die Energie, die als sichtbares Licht in das Auge dringt und hat die Einheit cd/m^2 . Sie ist eine objektive physikalische Größe, die zu einem subjektiven Helligkeitsempfinden führt und resultiert aus der Reflexion einer beleuchteten Fläche oder aus der Lichtstärke eines selbstleuchtenden Körpers.

Kontrast

Um zwei Sehobjekte unterschiedlicher Leuchtdichte getrennt wahrnehmen zu können, muss der Kontrast (Leuchtdichtenunterschied) einen Mindestwert überschreiten. Der Kontrast zwischen Sehobjekt und Umfeld wird als Leuchtdichtequotient angegeben / errechnet.

Reflexion

Licht wird an Grenz- bzw. Oberflächen entsprechend deren Eigenschaften transmittiert (z. B. Glas), absorbiert (z. B. schwarzer Stoff) und reflektiert (z. B. Spiegel). Die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Flächen ermöglichen im Wesentlichen deren Sichtbarkeit und Erkennbarkeit auf Grund von Kontrasten. Der Reflexionsgrad ρ quantifiziert dieses Phänomen durch das Verhältnis des reflektierten Lichtstroms Φ_r zum auftreffenden Lichtstrom Φ_0 . Man unterscheidet gerichtete, gestreute und gemischte Reflexion. Je heller und glatter eine Oberfläche ist, umso größer ist der Reflexionsgrad.

Optische Strahlung

Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Inkohärente optische Strahlung, Teil Allgemeines, 2013) unterteilen das Spektrum der optischen Strahlung in ultraviolette Strahlung, sichtbare Strahlung und infrarote Strahlung:

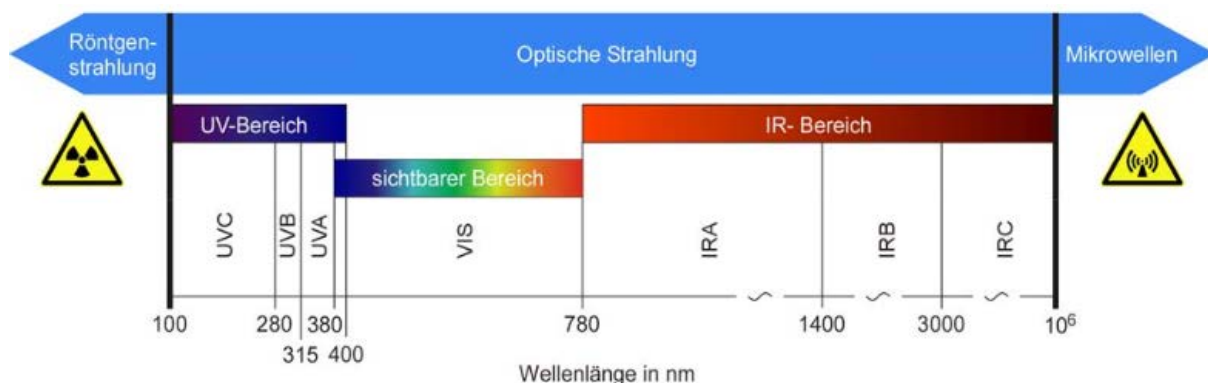


Abb. 3.1 Spektrum der optischen Strahlung.

Optische Strahlung ist die elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 1 mm. Zur optischen Strahlung zählen ultraviolette, sichtbare und infrarote Strahlung (Begriffsbestimmungen nach DGUV Information 203-035, 2004).

„Sichtbare Strahlung (VIS-Strahlung) ist die optische Strahlung, die unmittelbar einen visuellen Eindruck hervorrufen kann. Dies ist Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm.

1. Ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) ist die optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 400 nm.
2. Infrarote Strahlung (IR-Strahlung) ist die optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 780 nm bis 1 mm.“

Als künstliche Strahlungsquellen bezeichnen die Technischen Regeln zur Arbeitschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Inkohärente optische Strahlung, Teil Allgemeines, 2013) vom Menschen gemachte Quellen optischer Strahlung.

„Dazu gehören z. B. Lampen zur Beleuchtung, Scheinwerfer, Lampen und LED für Anzeigen, Elektro- und Gasschweißgeräte, Öfen zur Erwärmung, Öfen zum Schmelzen von Metall und von Glas, Lampen zur Entkeimung sowie zur Lack- und Kunststofftrocknung, Blitzlampen zur Ausleuchtung sowie Blitzlampen zur kosmetischen und medizinischen Behandlung.“ (TROS Inkohärente optische Strahlung, Teil Allgemeines, 2013, Seite 5)

Es kann zwischen kohärenter und inkohärenter optischer Strahlung unterschieden werden. Kohärente Strahlung wird auch als Laserstrahlung bezeichnet.

Inkohärente optische Strahlung

„Inkohärente optische Strahlung im Sinne der OStrV ist optische Strahlung aus künstlichen Quellen, die im Unterschied zu Laserstrahlung ohne feste Phasenbeziehung der elektromagnetischen Wellen ist.“ (TROS Inkohärente optische Strahlung, Teil Allgemeines, 2013, Seite 5)

Laserstrahlung

„Laserstrahlung ist jede elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Bereich zwischen 100 nm und 1 mm, die als Ergebnis kontrollierter stimulierter Emission entsteht.“ (Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - TROS Laserstrahlung, 2015, Seite 7)

„Das Wort Laser ist eine Abkürzung und setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der englischen Bezeichnung Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation zusammen, zu Deutsch: ‚Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung‘.“ (Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - TROS Laserstrahlung, 2015, Seite 16)

„Die Laserstrahlung unterscheidet sich von der Strahlung anderer künstlicher Strahlungsquellen, wie z. B. Glühlampen oder Licht emittierenden Dioden (LED), im Wesentlichen durch die folgenden Eigenschaften:

1. Kohärenz: zeitlich und räumlich feste Phasenbeziehung der Wellen;
2. Monochromasie: die Laserstrahlung weist exakt eine Wellenlänge auf (‚Einfarbigkeit‘, Schmalbandigkeit);

3. Parallelität: der Laserstrahl weist eine äußerst geringe Divergenz auf (typische Strahldivergenz = 0,001 rad = 1 mrad) und
4. hohe Bestrahlungsstärke: die Kombination dieser drei Eigenschaften führt dazu, dass ein Laserstrahl ca. 100 mal besser fokussiert werden kann als die Strahlung konventioneller optischer Strahlungsquellen.“ (Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - TROS Laserstrahlung, 2015, Seite 16 - 17)

Klimagrößen

Betriebstemperatur

Die Lufttemperatur ist die Temperatur der den Menschen umgebenden Luft ohne die Einwirkung der Wärmestrahlung. Sie wird deswegen mit Hilfe von wärmestrahlungsgeschützten Sensoren gemessen. Als Raumtemperatur wird eine zusammenfassende Temperaturgröße aus der örtlichen Lufttemperatur und Strahlungstemperaturen der einzelnen Umgebungsflächen bezeichnet (Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik [LASI], 2011).

Luftfeuchte

Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Wasserdampfgehalt der Luft. Es lassen sich unterscheiden (SCHLICK et al., 2010):

- Die relative Luftfeuchte in % gibt das Verhältnis des momentanen Wasserdampfgehalts zum maximal möglichen Wasserdampfgehalt an.
- Die absolute Luftfeuchte gibt die Wasserdampfmasse pro Luftvolumen an und hat die Einheit g/m^3 .

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung beschreibt den Wärmeübergang durch Strahlung zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur. Die Intensität der Strahlung wird als Wärmestromdichte oder als Wärmestrahlung ausgedrückt und hat die Einheit W/m^2 (SCHLICK et al., 2010).

Umgangssprachlich wird damit meist Infrarotstrahlung bezeichnet, theoretisch kann aber grundsätzlich jeder Bereich des elektromagnetischen Spektrums thermischen Ursprungs sein (KOMMER et al., 2015).

Vibrationen

Vibrationen sind mechanische Schwingungen eines Gegenstandes um seine Ruhelage, die durch Kontakt übertragen werden. Sie sind den Schwingungen der Luft bei Schallwellen in einigen Eigenschaften ähnlich, besitzen jedoch meist größere Amplituden, geringere Frequenzen und sind im Gegensatz zu den Longitudinalwellen des Schalls Transversalwellen (SCHMAUDER & et al., 2014).

Unterschieden wird nach SCHLICK et al. (2010) entsprechend des zeitlichen Verlaufs zwischen sinusförmigen, periodischen und stochastischen Schwingungen. Mechanische Schwingungen sind sowohl bei beweglichen Arbeitsplätzen (z. B. beim

Führen von mobilen Arbeitsmaschinen) als auch bei der Arbeit mit angetriebenen, handgeführten Werkzeugen (z. B. Motorsägen) von Relevanz. Die Autoren bezeichnen folgende Messgrößen in ihrem zeitlichen Verlauf als relevant:

- Weg: $s(t)$
- Geschwindigkeit: $v(t)$
- Beschleunigung: $a(t)$

Aerosole

„Ein Aerosol ist eine stabile Suspension fester und/oder flüssiger Partikel mit Teilchengrößen zwischen 10^{-3} bis 10^2 μm in einem gasförmigen Lösungsmittel (im einfachsten Falle Luft).“ (KLOSE et al., 2008, Seite 234)

Einteilung von Aerosolen nach SCHMAUDER et al. (2014):

Stäube

Stäube sind disperse Verteilungen fester Stoffe in Gasen, die durch mechanische Prozesse oder Aufwirbelungen entstanden sind. Staub kann pflanzlicher, tierischer, metallischer oder mineralischer Herkunft sein und daher organische (z. B. Samen, Pollen, Sporen) oder anorganische Bestandteile (z. B. Sand, Kohle, Kalk, Zement) enthalten.

Rauche

Unter Rauchen sind disperse Verbindungen feinsten fester Stoffe in einem Gas, insbesondere in der Luft, zu verstehen. Sie können durch thermische bzw. chemische Prozesse entstehen. Beispiele für Rauche sind Löt- und Schweißrauch, Zinkoxidrauch sowie Dieselruß.

Nebel

Nebel sind fein verteilte flüssige Stoffe (z. B. Wassertröpfchen) in Gasen, insbesondere in der Luft. Natürlicher Nebel entsteht, wenn sich wassergesättigte Luft abkühlt.

Lösungsmöglichkeiten / Alternativen

- Typische Schwebeteilchen in der Atmosphäre wie Rauch und Nebel sind für LWIR-Strahlung (langwellige Infrarot-Strahlung) fast vollständig transparent, da die extrem langwellige Strahlung von diesen kompakten Teilchen kaum beeinflusst wird (m-u-t GmbH, o. J.).
- Ausstattung der Kameras mit Spülluft, um Eindringen von Staub in das Gehäuse und eine Verschmutzung der Linse zu vermeiden.

Der Einfluss von Aerosolen ist abhängig von dem Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, welches für das Messprinzip eingesetzt wird. Optische Strahlung, wie sie von Kamerasensoren gemessen wird, wird stark von Aerosolen beeinflusst, während Schallwellen und Mikrowellen nicht beeinflusst werden.

Äußere Einflüsse

Bei dem Einsatz von Sensoren im Außenbereich spielen äußere Umgebungseinflüsse wie Regen, Schnee, Wind, Nebel und UV-Strahlung eine wichtige Rolle für die Anwendungsgrenzen.

3.3 Beschreibung der Anwendungs-Matrix

Die in Kapitel 2 vorgestellten Messverfahren wurden auf Grundlage der Anwendungsgebiete (Kapitel 3.1) und Anwendungsgrenzen (Kapitel 3.2) in einer Anwendungs-Matrix bewertet. Die Matrix ist diesem Bericht als Anhang angefügt. Im Folgenden werden Aufbau und Handhabung der Anwendungs-Matrix (Anhang) beschrieben.

Die Matrix unterteilt sich in 13 Messverfahren, die in den einzelnen Zeilen aufgelistet sind. In den Spalten befinden sich jeweils:

- die den Messverfahren zugeordneten Merkmale,
- Beispiele zu ausgewählten Projekten oder Produkten
- die Anwendungsgebiete und
- die Anwendungsgrenzen.

Mit den **Merkmale** Funktionsprinzip, Personenerkennung, Vorteile und Nachteile werden die Messsysteme kurz beschrieben.

In der Spalte **Beispiele** sind ausgewählte aktuelle Projekte bzw. Produkte hinterlegt, die dem Leser die Möglichkeit bieten, vertiefende Informationen zu recherchieren.

Die möglichen **Anwendungsgebiete**, die sich in der aktuellen Praxis bewährt haben, sind in der entsprechenden Spalte eingetragen: Industrieroboter, Maschinen und Anlagen, Automaten und Handling-Systeme, Flurförderzeuge, Fahrzeuge, Verkehrsmittel.

Die **Anwendungsgrenzen** sind durch Einsatzzweck, technische Parameter und Umgebungsfaktoren beschrieben.

Beim *Einsatzzweck* wird zwischen Anwesenheitserkennung (A), Positionsbestimmung (P), Bewegungsanalyse (B) und Körperhaltungen (K) unterschieden. Hier kennzeichnen jeweils Kreuze (geeignet), Kreise (teilweise geeignet) oder Striche (nicht geeignet) die Eignung des jeweiligen Messprinzips für diesen Einsatzzweck.

Bei den *technischen Parametern* werden jeweils Erfassungsdaten, Installationsdaten und weitere Daten beschrieben, bei den *Umgebungsfaktoren* werden Beleuchtungsgrößen, optische Strahlung, Vibrationen, Klimagrößen, Aerosole und äußere Einflüsse genauer beschrieben.

Für manche Messverfahren können keine allgemeinen (nicht produktspezifischen) Angaben in allen Unterkategorien gemacht werden. Wird keine Angabe zu einer Unterkategorie gemacht, ist diese entweder nicht relevant, lässt sich nicht verallgemeinern bzw. es sind keine Informationen dazu verfügbar. Das ist beispielsweise bei

Produkten der Fall, die sich noch im Forschungsstatus befinden. In diesem Fall wird keine Information zu dieser Unterkategorie aufgeführt.

Die Informationen und Angaben zu konkreten Werten entstammen entweder der genannten Literatur, aus Forschungsprojekten, dem Fachwissen der Autoren oder sind von marktrelevanten Produkten abgeleitet. Diese sind dann entweder als Spanne oder als bestmöglicher Wert (bei Einzelwerten) angegeben.

Die Genauigkeitsangaben beziehen sich relativ zur Distanz und sind in Prozent angegeben. Zuverlässigkeiten beziehen sich auf die Quote der Personenerkennung in den genannten und im Bericht beschriebenen Projekten / Untersuchungen.

Die in der Matrix in eckigen Klammern angegebenen Quellen entsprechen der Nummerierung im Literaturverzeichnis dieses Berichtes.

Tab. 3.4 zeigt die verwendeten Abkürzungen bzw. Symbole und Ziffern in der Matrix im Überblick.

Angaben zu den Abmessungen erfolgen stets in Höhe x Breite x Tiefe.

Tab. 3.4 Verwendete Abkürzungen (Buchstaben/Symbole/Ziffern) in der Matrix.

Spaltenbezeichnung	Verwendete Abkürzungen
Einsatzzweck	A: Anwesenheitserkennung P: Positionsbestimmung B: Bewegungsanalyse K: Körperhaltungen
	x: geeignet o: teilweise geeignet –: nicht geeignet
Technische Parameter	Pos. Genauigkeit: Positionsgenauigkeit

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zusammenfassung

Im Projekt konnten insgesamt 13 verschiedene Messverfahren zur sicheren Personenerkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion voneinander abgegrenzt und systematisch beschrieben werden. Die Messverfahren werden in einer Anwendungsmatrix anhand ihrer jeweiligen Funktionsprinzipien, der Art der Personenerkennung sowie der jeweiligen Vorteile und Nachteile systematisch beschrieben. Für jedes Messverfahren werden die Anwendungsgebiete und -grenzen benannt und erläutert.

Sieben Messverfahren (Multikamerasystem, 3D-Laserscanner, 3D-Kamera, Kamerasystem mit strukturierter Lichtprojektion, Wärmebildkameras, Radar und Ultraschall) dienen der Überwachung ganzer (Arbeits-) Bereiche. Sie bilden damit den Schwerpunkt der bereits in der Praxis (in der Industrie, aber auch im öffentlichen Raum) eingesetzten Verfahren. Die Messverfahren können je nach Größe und Distanz des Arbeitsbereichs eine oder mehrere Personen oder zumindest Körperteile aufnehmen. Dadurch liefern sie entscheidende Informationen für eine kollaborative Zusammenarbeit zwischen Maschine und Mensch. Fast alle dieser Messverfahren eignen sich auch zur Aufnahme von Körperhaltungen und können somit neben der Personenerkennung zukünftig auch zur Verbesserung der Ergonomie in den Arbeitsbereichen beitragen.

Zwei Messverfahren (2D-Laserscanner und druckempfindlicher Fußbodenbelag) dienen der Überwachung von nur einer Ebene des Arbeitsbereiches. Diese Verfahren erfahren trotz dieses Nachteiles auch Anwendung im Industriebereich, da sie relativ robust, leicht zu installieren und zuverlässig in der Detektion sind.

Eine in letzter Zeit ebenfalls häufig verwendete Gruppe von Messverfahren sind die maschinenzentrierten, bei denen z.B. Drucksensoren oder kapazitative Sensoren direkt an der Maschine bzw. am Roboter angebracht werden. Anwendung finden diese bei den Industrie- und Leichtbaurobotern. Die Verfahren eignen sich zur gemeinsamen Arbeit von Mensch und Maschine im selben Arbeitsbereich, eine intelligente Personenerkennung nebst Positionierung zur frühzeitigen Anpassung des Arbeitsablaufs der Maschine ist allerdings nicht möglich. Neben den aufgezeigten Sensoren können auch weitere Sensortypen (u.a. die zuvor vorgestellten 2D- und 3D-Sensoren) direkt am Roboter angebracht werden. Entsprechend wird in dieser Richtung auch in Zukunft weiter geforscht werden.

Die Messverfahren RFID und 6-DOF Inertialsensoren sind aktive personenbezogene Systeme, die ursprünglich zur Ortung von Personen oder für Haltungsanalysen im ergonomischen Bereich entwickelt wurden. Sie können aber auch als Messverfahren in der sicheren Personenerkennung einen wertvollen Beitrag leisten. Ein Schwachpunkt bleibt jedoch das Umgehen der Sicherheitsvorkehrungen, wenn die Sensoren nicht an der Person getragen werden.

Die Fusion der Messdaten von mehreren Sensortypen bietet die Möglichkeit, die Vorteile der unterschiedlichen Messprinzipien zu kombinieren und dabei die Nachteile zu minimieren. In diesem Punkt ist das größte Potential zu sehen.

4.2 Ausblick

Bisher existieren wenige Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Personenerkennung in industriellen Umgebungen. Die Anforderungen an eine Personenerkennung unterscheiden sich im gewünschten Anwendungsbereich von den Szenarien, die den meisten Evaluationen von Personenerkennungsalgorithmen zu Grunde liegen. Bei zum Beispiel den bildbasierten Verfahren wurde die Zuverlässigkeit der Personenerkennung in Szenarien getestet, in denen sehr viele Personen in einem Bild erscheinen, die sich gegenseitig verdecken und teilweise weit entfernt oder durch andere Hindernisse teilweise verdeckt sind. In weiteren Untersuchungen sollten die vorgestellten Verfahren im industriellen Umfeld getestet werden. Erst dann lässt sich eine gesicherte Aussage über die Zuverlässigkeit der Personenerkennung in der entsprechenden Anwendung tätigen. Es kann erwartet werden, dass die Aufnahmeverhältnisse günstiger sind, da zum Beispiel nur ein definierter und bereits bekannter Bereich um eine Maschine überwacht wird. Der Hintergrund bleibt zum Beispiel bei Anwendungen in Roboterzellen stabil oder ist in seiner Veränderung bekannt. Diese Verhältnisse erleichtern die Personenerkennung und beschränken den zu überprüfenden Raum auf Bereiche, die sich zum ursprünglichen Zustand verändert haben.

Für Anwendungen in der Industrie 4.0 mit dem Ziel, die Personen im Umfeld einer Maschine zuverlässig, genau und detailliert zu erkennen, ist aktuell eine Fusion aus den Daten mehrerer unterschiedlicher Sensoren unumgänglich. Die Stärken der flächenhaften Sensoren liegen in der räumlich-zeitlich hochaufgelösten Erfassung des gesamten Körpers einer Person, während die Stärken der zweidimensionalen, maschinenzentrierten oder aktiven Messprinzipien in der Zuverlässigkeit punktuellen Positionsbestimmung liegen. Durch die Kombination der Vorteile komplementärer Systeme kann ein Multisensorsystem aufgebaut werden, welches zuverlässig die sicherheitsrelevante Detektion von unbekanntem Objekten im Arbeitsbereich durchführt. Eine anschließende Personenklassifikation erlaubt die Erfassung ganzer Bewegungsabläufe sowie die Vermessung darin eingenommener Körperhaltungen. Auf diese Weise lassen sich die Arbeitsabläufe zwischen Mensch und Maschine für eine gemeinsame Zusammenarbeit sicher abstimmen.

Literaturverzeichnis¹

- [1] Amplianitis, K.; Adduci, M.; Reulke, R.: Calibration of a multiple stereo and rgb-d camera system for 3d human tracking. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Copernicus GmbH). 2014. 40. 3.
- [2] Arras, K. O.; Grzonka, S.; Luber, M.; Burgard, W.: Efficient people tracking in laser range data using a multi-hypothesis leg-tracker with adaptive occlusion probabilities. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2008. 1710-1715.
- [3] Bamji, C. S. et al: A 0.13 μm CMOS system-on-chip for a 512 \times 424 time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2015. 303-319.
- [4] Benedek, C.: 3D people surveillance on range data sequences of a rotating Lidar. *Pattern Recognition Letters* (Elsevier). 2014. 50. 149-158.
- [5] Benenson, R.; Mohamed O.; Hosang, J.; Schiele, B.: Ten years of pedestrian detection, what have we learned? *Computer Vision-ECCV 2014 Workshops*. 2015. 613-627.
- [6] Bertozzi, M.; Broggi, A.; Caraffi, C.; Del Rose, M.; Felisa, M.; Vezioni, G.: Pedestrian detection by means of far-infrared stereo vision. *Computer vision and image understanding* (Elsevier). 2007. 106(2). 194-204.
- [7] BIPM. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. *JCGM 100:2008*. 2008.
- [8] Blumrosen, G.; Fishman, B.; Yovel, Y.: Noncontact Wideband Sonar for Human Activity Detection and Classification. *IEEE SENSORS JOURNAL*, November 2014. 4043-4055.
- [9] Botthof, A.: Zukunft der Arbeit im Kontext von Autonomik und Industrie 4.0. In: *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. 2014. 4-6.
- [10] *Brigade Backsense*. <http://brigade-electronics.com/product/pulsed-radar-sensors/overview-prs> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [11] Cernavin, O.: Industrie 4.0 und Prävention. *Sicherheitsingenieur*. 2014. 18-21.
- [12] Chen, C. C.: *Attenuation of Electromagnetic Radiation by Haze, Fog, Clouds, and Rain*. Santa Monica, CA: United States Air Force Project Rand. 1975.

¹ Die Einträge im Literaturverzeichnis sind alphabetisch nach dem Nachnamen des erstgenannten Autors sortiert. Für eine kompakte Referenzierung in der Anwendungs-Matrix sind die Einträge zusätzlich nummeriert.

- [13] Chow, J. K.; Lichti, D.; Teskey, W.: Performance analysis of a low-cost triangulation-based 3D camera: Microsoft Kinect system. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress (ISPRS)*. 2012. 175-180.
- [14] Cielniak, G.; Duckett, T.; Lilienthal, A. J.: Data association and occlusion handling for vision-based people tracking by mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems* (Elsevier). 2010. 58(5). 435-443.
- [15] Dalal, N.; Triggs, B.: Histograms of oriented gradients for human detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2005. 886-893.
- [16] Davis, J. W.; Keck, M.: A two-stage template approach to person detection in thermal imagery. 2005. 364-369.
- [17] Diedericks, T.: Seeing through fog and rain. *hi-tech security solutions magazine*. September 2008. <http://www.securitysa.com/article.aspx?pkarticleid=5369> (Zugriff am 12. Mai 2016).
- [18] DGUV Information 203-035: Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung (bisher: BGI 5006). 2004.
- [19] DIN. Zuverlässigkeit, Begriffe. *DIN 40041:1990-12*. 1990.
- [20] Dombrowski, U.; Riechel, C.; Evers, M.: Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H.: *Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. 129-153. Berlin: GITO Verlag. 2014.
- [21] Ekimov, A.; Sabatier, J. M.: Human detection range by active Doppler and passive ultrasonic methods. *SPIE Defense and Security Symposium*. 2008. 69430R--69430R.
- [22] El-laithy, R. A.; Huang, J.; Yeh, M.: Study on the use of Microsoft Kinect for robotics applications. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*. 2012. 1280-1288.
- [23] *Elokon ELOprotect*. <http://www.elokon.de/d-eloprotect.php> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [24] *Elokon ELOshield*. <http://www.elokon.de/d-eloshield.php> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [25] „FANUC CR-35iA.“ 2015. <http://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/robots-datasheets/datasheet%20cr-35ia.pdf> (Zugriff am 17. Mai 2016).
- [26] Feigl, K.: Neue Mensch-Roboter-Kooperation in der Audi-Produktion. Februar 2015. <https://www.audi-mediacyber.com/de/pressemitteilungen/neue-mensch-roboter-kooperation-in-der-audi-produktion-1206> (Zugriff am 17. Mai 2016).

- [27] Felzenszwalb, P.; McAllester, D.; Ramanan, D.: A discriminatively trained, multiscale, deformable part model. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2008. 1-8.
- [28] Fernandez-Caballero, A.; Castillo, J. C.; Martinez-Cantos, J.; Martinez-Tomas, R.: Optical flow or image subtraction in human detection from infrared camera on mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 2010. 58(12). 1273-1281.
- [29] Fritzsche, M.; Elkmann, N.: *Roboter mit sensibler Haut*. IFFOCUS 1/2014, Magdeburg: Fraunhofer. 2014.
- [30] Geisheimer, J. L.; Greneker, E. F.; Marshall, W. S.: High-resolution Doppler model of the human gait. *AeroSense*. 2002. 8-18.
- [31] Goodvin, C.; Park, E. J.; Huang, K.; Sakaki, K.: Development of a real-time three-dimensional spinal motion measurement system for clinical practice. *Med Bio Eng Comput*. 2006. 1061-1075.
- [32] Görnemann, O.; Stubenrauch, H.-J.: Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) für sichere Maschinen. In: *Optoelektronische Schutzeinrichtungen*. Herausgeber: Sick Whitepaper. März 2013.
- [33] Gruen, A.: Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*. 1985. 14(3). 175-187.
- [34] Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger G.: Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing. *Robotics: Science and Systems*. 2007.
- [35] Hegger, F.; Hochgeschwender, N.; Kraetzschmar, G. K.; Ploeger, P. G.: People detection in 3D point clouds using local surface normals. In: *RoboCup 2012: Robot Soccer World Cup XVI*. Springer, 2013. 154-165.
- [36] Hering, E.; Schönfelder, G.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Springer, 2012.
- [37] Heuer, M.; Al-Hamadi, A.; Rain, A.; Meinecke, M.-M.: Detection and tracking approach using an automotive radar to increase active pedestrian safety. *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. IEEE, 2014. 890-893.
- [38] Ikemura, S.; Fujiyoshi, H.: Real-time human detection using relational depth similarity features. *Computer Vision--ACCV 2010*. Springer, 2010. 25-38.
- [39] Infineon Technologies AG. Real3 Image Sensor Family. November 2015. http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-REAL3+Image+Sensor+Family-PB-v01_00-EN.PDF?fileId=5546d462518ffd850151a0afc2302a58 (Zugriff am 16. Februar 2016).

- [40] Jebali, C.; Essaadali, R.; Saidi K.; Seguin, M. A.; Kouki., A.: Improving RFID tag detection in the presence of mechanical vibration. *IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*. 2015. 1-3.
- [41] Kahlmann, T.: Range Imaging Metrology. *Dissertation Nr. 17392*. ETH Zürich, 2007.
- [42] Kalman, R.E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering*. 1960. 35-45.
- [43] Kehl, R.; Van Gool, L.: Markerless tracking of complex human motions from multiple views. *Computer Vision and Image Understanding (Elsevier)*. 2006. 104(2). 190-209.
- [44] Khoshelham, K.; Oude Elberink, S.: Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*. 2012. 1437-1454.
- [45] Kidono, K.; Miyasaka, T.; Watanabe, A.; Naito, T.; Miura, J.: Pedestrian recognition using high-definition LIDAR. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2011. 405-410.
- [46] Kim, Y.; Ha, S.; Kwon, J.: Human detection using Doppler radar based on physical characteristics of targets. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2015. 12(2). 289-293.
- [47] Kleger, R.: *Sensorik für Praktiker*. VDE Verlag, 1998.
- [48] Klose, B.; Klose, H.: *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Berlin: Springer, 2008.
- [49] Kommer, C.; Tugenhat, T.; Wahl, N.: *Tutorium Physik fürs Nebenfach: Übersetzt aus dem Unverständlichen*. Berlin: Springer, 2015.
- [50] Krüger, J.; Nickolay, B.; Heyer, P.; Seliger, G.: Image based 3D surveillance for flexible man-robot-cooperation. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. Elsevier, 2005. 54(1). 19-22.
- [51] Kuhn, S.; Henrich, D.: Fast vision-based minimum distance determination between known and unknown objects. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2007. 2186-2191.
- [52] Kumar, A.; Li, Z.; Liang, Q.; Zhang, B.; Wu, X.: Experimental study of through-wall human detection using ultra wideband radar sensors. *Measurement*. Elsevier, 2014. 47. 869-879.
- [53] Länderfachausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI): Klimagrößen zur Beurteilung raumklimatischer Grundparameter. 2011.
- [54] Lass, S.; Kotarski, D.: IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0. In: *Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*, von W. Kersten, H. Koller und H. Lödding. Berlin: GITO Verlag, 2014.

- [55] Laurentini, A.: The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. IEEE, 1994. 16(2). 150-162.
- [56] Jae Hoon, L. et al.: Security door system using human tracking method with laser range finders. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2007. 2060-2065.
- [57] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichmann Verlag, 2000.
- [58] Luo, R. C.; Kay, M. G.: Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*. 1989. 19(5). 901-931.
- [59] Mader, D.; Westfeld, P.; Maas, H.-G.: An Integrated Flexible Self-calibration Approach for 2D Laser Scanning Range Finders Applied to the Hokuyo UTM-30LX-EW. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5*, 2014. 385-393.
- [60] Marek, J.; Trah, H.-P.; Suzuki, Y.; Yokomori, I.: *Sensors for Automotive Technology*. WILEY-VCH, 2003.
- [61] Martin, C.; Schaffernicht, E.; Scheidig, A.; Gross, H.-M.: Multi-modal sensor fusion using a probabilistic aggregation scheme for people detection and tracking. *Robotics and Autonomous Systems*. 2006. 721-728.
- [62] Mautz, R.: Indoor positioning technologies. Habilitationsschrift. ETH Zürich, 2012.
- [63] m-u-t GmbH: LWR-Temperaturüberwachungs- und Brandfrüherkennungssystem AR-TUS. <http://www.mut-group.com/de/branderkennung/artus-system.html> (Zugriff am 25. November 2015).
- [64] Navarro-Serment, L. E.; Mertz, C.; Hebert, M.: Pedestrian detection and tracking using three-dimensional ladar data. *The International Journal of Robotics Research*. Sage Publications, 2010.
- [65] Nehmer, J.: Elektronische Notfallüberwachung: sensorbasierte Erfassung und Prävention von kritischen Gesundheitszuständen. *Altern und Technik*. 2011. 73-86.
- [66] Niemeier, W.: 3D Laserscanner in der Unfallforschung für den Straßenverkehr. *Hamburger Anwenderforum "Terrestrisches Laserscanning"*. 2005.
- [67] Ober-Gecks, A.; Haenel M.; Werner, T.; Henrich, D.: Fast multi-camera reconstruction and surveillance with human tracking and optimized camera configurations. *Proceedings of 41st International Symposium on Robotics*. 2014. 1-8.

- [68] Orr, R. J.; Abowd, G. D.: The smart floor: a mechanism for natural user identification and tracking. *CHI'00 extended abstracts on Human factors in computing systems*. 2000. 275-276.
- [69] Paul, M.; Haque S.; Chakraborty, S.: Human detection in surveillance videos and its applications-a review. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. Springer, 2013. 1. 1-16.
- [70] *Pilz SafetyEYE*. <https://www.pilz.com/de-DE/eshop/00106002207042/SafetyEYE-Sicheres-Kamerasystem> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [71] Reiser, U.; Kubacki, J.: Using a 3D time-of-flight range camera for visual tracking. *Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)*. Juni 2007. 355-360.
- [72] Ringbeck, T.; Möller, T.; Hagebeucker, B.: Multidimensional measurement by using 3-D PMD sensors. *Advances in Radio Science*. 2007. 135-146.
- [73] Schanz, G.: *Sensoren: Sensortechnik für Praktiker*. Hüthig, 2004.
- [74] Schenk, M.: Kollisionsuntersuchungen für die Mensch-Roboter-Interaktion. 2013.
<http://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/robotersysteme/produktblaetter/2013-03-Kollisionsmessung.pdf> (Zugriff am 17. Februar 2016).
- [75] Schenk, M.: Taktile Sensorsysteme. 2016.
<http://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/taktile-sensorsysteme-fraunhofer-iff.pdf> (Zugriff am 7. Juli 2016).
- [76] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: *Arbeitswissenschaften*. Berlin: Springer, 2010.
- [77] Schmauder, M.; Spanner-Ulmer, B.: *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. Darmstadt: Hanser, 2014.
- [78] Schmidt, H.: Maschinenbedienung ohne Netz und doppelten Boden. *Sicherheitsingenieur*. 2014. 26-29.
- [79] Schwarte, R.; Heinol, H. ; Buxbaum, B.; Ringbeck, T.; Xe, Z.; Hartmann, K.: Principles of three-dimensional imaging techniques. In: Jähne, B.: *Handbook of Computer Vision and Applications - Sensors and Imaging*. Academic Press, 1999. 463-484.
- [80] Shackleton, J.; VanVoorst, B.; Hesch, J.: Tracking people with a 360-degree lidar. *Seventh IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. 2010. 420-426.
- [81] Shneier, M.; Hong, T.; Cheok, G.; Saidi, K.; Shackelford, W.: *Performance Evaluation Methods for Human Detection and Tracking Systems for Robotic Applications*. NISTIR 8045, National Institute of Standards and Technology, 2015.

- [82] Sick S3000. <https://www.sick.com/de/de/optoelektronische-schutzeinrichtungen/sicherheits-laserscanner/s3000-standard/c/g187231> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [83] Sick v300. <https://www.sick.com/de/de/optoelektronische-schutzeinrichtungen/sichere-kamerasysteme/v300-work-station-extended/v30w-0101000/p/p71344> (Zugriff am 08. Februar 2016).
- [84] Soloman, S.: *Sensors Handbook*. Mc Graw-Hill, 2010.
- [85] Spath, D., Pokorni, B.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2013.
- [86] Spinello, L.; Arras, K. O.; Triebel, R.; Siegwart, R.: A Layered Approach to People Detection in 3D Range Data. *AAAI*. 2010.
- [87] Sporrer, S.; Steiner, H.; Velte, M.; Jung, N.: NIR Camera Based Person Detection in the Working Range of Industrial Robots. *Proceedings of 8th International Conference of Industrial Automated Systems - SIAS 2015*. Königswinter: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2016. 147-152.
- [88] Steiner, H.; Sporrer, S.; Kolb, A.; Jung, N.: Design of an Active Multispectral SWIR Camera System for Skin. *Journal of Sensors*. 2016.
- [89] Stengel, D.; Düpjohan, W.; Ostermann, B.: Sicher und effizient - Wie lässt sich eine gleichermaßen sichere und effiziente Zusammenarbeit von Mensch und Roboter realisieren? *Computer & AUTOMATION*. 2013.
- [90] Stengel, D.; Wiedemann, T.; Vogel-Heuser, B.: Efficient 3d voxel reconstruction of human shape within robotic work cells. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2012. 1386-1392.
- [91] Stommel, M.; Beetz, M.; Xu, W.: Model-Free Detection, Encoding, Retrieval, and Visualization of Human Poses From Kinect Data. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*. 2015: 865-875.
- [92] Suard, F.; Rakotomamonjy, A.; Bensrhair, A.: Pedestrian Detection using Infrared images and Histogram of oriented gradients. *Intelligent Vehicles Symposium*. 2006: 206-212.
- [93] Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung: TROS Laserstrahlung. 2015.
- [94] Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung: TROS Inkohoränte optische Strahlung, Teil Allgemeines. 2013.
- [95] Toyama, K.; Krumm, J.; Brumitt, B.; Meyers, B.: Wallflower: Principles and practice of background maintenance. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. 1999. 255-261.

- [96] Tränkler, H.-W.; Reindl, L.-M.: *Sensortechnik*. Springer, 2014.
- [97] Tuytelaars, T.; Mikolajczyk, K.: Local invariant feature detectors: a survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*. Now Publishers Inc., 2008. 3(3). 177-280.
- [98] Veigt, M.; Lappe, D.; Hribernik, K. A.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. *Industrie Management*. 2013. 15-18.
- [99] Viola, P.; Jones, M. J.; Snow, D.: Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance. *International Journal of Computer Vision*. Springer, 2005. 63(2). 153-161.
- [100] Vosselman, G.; Maas, H.-G.: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, 2010.
- [101] Westfeld, P.: Geometrische und stochastische Modelle zur Verarbeitung von 3D-Kameradaten am Beispiel menschlicher Bewegungsanalysen. Bde. Reihe C, Nr. 687. München: Deutsche Geodätische Kommission, 2012.
- [102] Westfeld, P.; Mader, D.; Maas, H.-G.: Generation of TIR-attributed 3D Point Clouds from UAV-based Thermal Imagery. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*. 2015. 381-391.
- [103] Westfeld, P.; Maas, H.-G.; Bringmann, O.; Grölllich, D.; Schmauder, M.: Automatic techniques for 3D reconstruction of critical workplace body postures from range imaging data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier, 2013. 85. 56-65.
- [104] Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: *Hanbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [105] Woodman, O. J.: *An introduction to inertial navigation*. Technical Report No. 696. University of Cambridge Computer Laboratory. 2007.
- [106] Xia, L.; Chen, C.-C.; Aggarwal, J. K.: Human detection using depth information by kinect. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. 2011. 15-22.
- [107] Yarovoy, A. G.; Ligthart, L. P.; Matuzas, J.; Levitas, B.: UWB radar for human being detection. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2006.
- [108] YuMi ABB Backgrounder. 2016.
https://library.e.abb.com/public/f8abc84599b64aeca155c9d177db574d/ROB0318EN_A_YuMi_backgrounder.pdf (Zugriff am 17. Mai 2016).
- [109] Zetik, R.; Crabbe, S.; Krajnak, J.; Peyerl, P.; Sachs, J.; Thomä, R.: Detection and localization of persons behind obstacles using M-sequence through-the-wall radar. *Defense and Security Symposium*. 2006. 62010I--62010I.

- [110] Zhang, L.; Wu, B.; Nevatia, R.: Pedestrian detection in infrared images based on local shape features. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'07)*. 2007. 1-8.

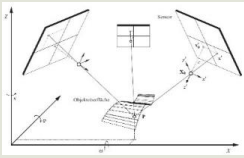
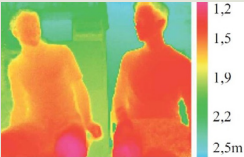
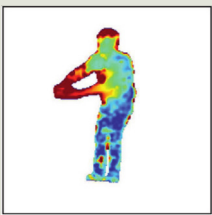

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 1.1	Personenerkennung in der Überwachung öffentlicher Flächen (links) und in der Fahrerassistenz (rechts).	8
Abb. 1.2	Gewählte Vorgehensweise im Projekt.	10
Abb. 2.1	Sensoren: Industriekamera, 3D-Laserscanner, 3D-Kamera, Ultraschallsensor (von links nach rechts).	11
Abb. 2.2	Einpassung von Körperteilen in die Punktwolke (Westfeld et al., 2013).	18
Abb. 2.3	Messprinzip und Definition des Koordinatensystems eines 2D-Laserscanners (Mader et al, 2014).	23
Abb. 2.4	Druckempfindlicher Bodenbelag (Schenk, 2016). Bildquelle: Fraunhofer IFF, Stefan Deutsch	25
Abb. 2.5	Lokalisierung der Druckeinwirkung an einem Roboter (Schenk 2016). Bildquelle: Fraunhofer IFF.	27
Abb. 2.6	RFID Übertragung zwischen Lesegerät und Transponder (links) und die sechs Freiheitsgrade (3 Positionen und 3 Rotationen) eines 6DOF Sensors (rechts, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:6DOF_en.jpg)	29
Abb. 3.1	Spektrum der optischen Strahlung.	42

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 3.1 Anwendungsgrenzen im Überblick.	36
Tab. 3.2 Berührungs- und Fremdkörperschutz (1. Kennziffer).	40
Tab. 3.3 Wasserschutz (2. Kennziffer).	40
Tab. 3.4 Verwendete Abkürzungen (Buchstaben/Symbole/Ziffern) in der Matrix.	47

Anhang Anwendungs-Matrix

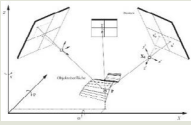

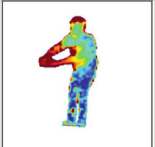

Überwachungsbereich	Sensoren	Funtionsprinzip	Personenerkennung
3D Überwachung des gesamten Arbeitsbereichs			
	Multi-Kamera	Eine oder mehrere Kameras überwachen den Arbeitsbereich. Aus einer Verschneidung der Informationen mehrerer Kameras kann die 3D Position von Objekten bestimmt werden.	In 2D-Bildern können mit Verfahren der ComputerVision und des maschinellen Lernens Personen automatisch erkannt werden. Auch in den aus der Verschneidung mehrere Bilder entstehenden 3D-Punktwolken können Personen automatisch detektiert werden.
	3D-Kamera	Werden auch Time-of-Flight Kamera genannt. Mit Photomischdetektoren wird in einer Digitalkamera zusätzlich zu einem Grauwertbild ein Entfernungsbild aufgenommen. Dazu wird anhand des Phasenvergleichverfahrens die zurückgelegte Zeit des Lichts vom Objekt zur Kamera und damit die Distanz gemessen.	In den 2D-Grauwertbildern und den Tiefenbildern können mit den Methoden der ComputerVision und des maschinellen Lernens Personen automatisch anhand ihrer Geometrie und ihrer Erscheinung detektiert werden.
	Strukturiertes Licht	Ein System aus einer Kamera und einem Projektor, der strukturiertes Licht auf die Objekte vor ihm projiziert. Aus der veränderten Struktur des mit der Kamera aufgenommenen Musters kann die Geometrie dieser Objekte bestimmt werden. Kamera und Projektor arbeiten oft im nahen Infrarotbereich. Es wird ein Tiefenbild und ein Grauwertbild aufgenommen. Man spricht auch von RGBD Kameras.	In den 2D-Grauwertbildern und den Tiefenbildern können mit den Methoden der ComputerVision und des maschinellen Lernens Personen automatisch anhand ihrer Geometrie und ihrer Erscheinung detektiert werden.
	Wärmebildkamera	Eine Wärmebildkamera misst in jedem Pixel passiv die Wärmestrahlung (mittleres bis langwelliges Infrarot), die von Objekten ausgesendet wird und stellt diese als Wärmebild dar.	Im Wärmebild können Personen anhand ihrer Temperatur vom Hintergrund unterschieden und anhand ihrer Form als Person klassifiziert werden.

Überwachungsbereich	Vorteile	Nachteile	Anwendungsgebiete	Einsatzzweck			
				A ¹	P ²	B ³	K ⁴
	sehr genaue Positionsbestimmung; viele Ansätze zur Personenerkennung	Textur notwendig	Industrieroboter, Maschinen und Anlagen; Automaten und Handling-Systeme; Fahrzeuge	X	X	X	X
	Kombination aus Farb- und Tiefeninformationen; simultane flächenaufnahme; Aufnahme auch von texturlosen Oberflächen	anfällig gegenüber Nebel, Staub, etc.; geringe Reichweite	Industrieroboter; Fahrzeuge	X	X	X	X
	simultane flächenaufnahme (bei Musterprojektion); 3D-Aufnahme auch von texturlosen Oberflächen	anfällig gegenüber Nebel, Staub, etc.; geringe Reichweite		X	X	X	X
	stabiler gegen Verdeckungen als 2D-Bilder	geringe Auflösung der Wärmebilder		X	X	X	X

¹ Anwesenheitserkennung, ² Positionsbestimmung, ³ Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine, ⁴ Aufnahme von Körperhaltung

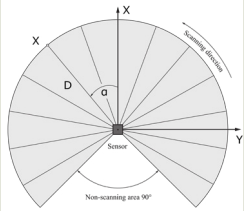
Überwachungsbereich	Technische Parameter		
	Erfassungsdaten	Installation	Weiteres
	<p>Pos.Genauigkeit: 0,001% - 0,01% [57], Zuverlässigkeit: 75-95% [5], max. Distanz: >50m; Sichtfeld abhängig von Objektiv und Bildsensor: 5° (Tele) - 180° (Fisheye)</p>	<p>a) Kameraraster wird von Oben oder von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet oder auf einer mobilen Plattform angebracht b) mehrere Kameras sind konvergent im gesamten Arbeitsbereich (z.B. in den Ecken) angebracht; Geometrie zwischen den einzelnen Kameras darf sich nicht verändern; auch für Außenbereich geeignet; typische Abmessungen einer einzelnen (Industrie-) Kamera: 5-10 x 5-10 x 5-10 cm</p>	<p>Datenschutz: Personen können in den Bildern identifiziert werden; IP67 möglich [73]</p>
	<p>Pos.Genauigkeit: 0,5% - 1% [3] [101], Zuverlässigkeit: bis 95% [38], max. Distanz: <10m; Sichtfeld abhängig von Objektiv und Bildsensor: typischerweise Weitwinkel (>50°)</p>	<p>3D-Kamera wird von Oben oder von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Einsatz mehrerer 3D-Kameras um Verdeckungen zu minimieren; Einsatz auch im Außenbereich und auf mobilen Plattformen möglich; typische Abmessungen: 25 x 25 x 5-10 cm</p>	<p>Datenschutz: Personen können in den Bildern identifiziert werden</p>
	<p>Pos.Genauigkeit: 0,5-1% [44], Zuverlässigkeit: bis 96% [106], max. Distanz: <5m [44]; Sichtfeld abhängig von Objektiv und Bildsensor: 5° (Tele) - 180° (Fisheye)</p>	<p>Kamera und Projektor werden von Oben oder von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Einsatz mehrerer Kameras um Verdeckungen zu minimieren; Einsatz auf mobilen Plattformen möglich; Einsatz im Außenbereich stark eingeschränkt; typische Abmessungen: 25 x 25 x 5-10 cm</p>	<p>Datenschutz unkritisch, da nur Geometrie aufgenommen wird</p>
	<p>Zuverlässigkeit: 80-90% [6][60]; max. Distanz: >50m; Thermische Empfindlichkeit: 0,05 K; Sichtfeld abhängig von Objektiv und Bildsensor: 5° (Tele) - 180° (Fisheye)</p>	<p>Wärmebildkamera wird von Oben oder von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Einsatz mehrerer Kameras um 3D Informationen zu generieren (Multi-Wärmebildkamera-System) und Verdeckungen zu minimieren; Einsatz auf mobilen Plattformen und im Außenbereich möglich; typische Abmessungen: 5-10 x 5-10 x 5-10 cm</p>	<p>Datenschutz unkritisch, da nur Temperatur aufgenommen wird; IP67 möglich</p>

Überwachungsbereich	Umgebungsfaktoren		
	Beleuchtungsgrößen	optische Strahlung	Vibration
	minimal benötigte Beleuchtungsstärke abhängig von Objektiv, Blendenöffnung und Empfindlichkeit des Bildsensors; Optimierung der Belichtungszeit in Hinblick auf erwartete Bewegung im Objektraum	evtl. aktive Beleuchtung mit sichtbarer optischer Strahlung	relative Geometrie der Kameras zueinander darf sich nicht verändern; Vibrationen wirken sich im Bildraum aus und pflanzen sich je nach Konfiguration teilweise stark auf die Position im Objektraum fort; wenn die Kameras fest verbunden sind arbeiten sie auch bei leichten Vibrationen innerhalb der Toleranzen
	durch aktive Beleuchtungseinheit und schmalbandige optische Filter unabhängig von Umgebungsbeleuchtung	Laserklasse 1, Infrarot-A [101], ca. 1W Strahlungsleistung [101]	Vibrationen am Sensor wirken sich im Bildraum aus und pflanzen sich distanzabhängig teilweise stark auf die laterale Position im Objektraum fort; Bsp.: 0,1 mm Bewegung im Bildraum mit einem 10 mm Objektiv entspricht 30 mm in 3 m Distanz
	durch aktive Beleuchtungseinheit auch bei schwacher Umgebungsbeleuchtung oder im Dunkeln einsetzbar; bei Sonnenlicht eingeschränkte Funktion [22]	Beleuchtungseinheit sendet Licht im nahen Infrarot- oder im sichtbaren Bereich aus	Vibrationen am Sensor wirken sich im Bildraum aus und pflanzen sich distanzabhängig teilweise stark auf die laterale Position im Objektraum fort; relative Geometrie zwischen Projektor und Kamera darf sich nicht verändern
	unabhängig von der Beleuchtung	passiver Sensor, keine Strahlung	Vibrationen am Sensor wirken sich im Bildraum aus und pflanzen sich distanzabhängig teilweise stark auf die laterale Position im Objektraum fort; beim Einsatz mehrerer Wärmebildkameras zur 3D Erfassung muss die relative Geometrie stabil bleiben

Überwachungsbereich	Umgebungsfaktoren		
	Klimagrößen	Aerosole	Äußere Einflüsse
	Umgebungstemperatur: -20°C - +60°C; Aufwärmphase zu Betriebstemperatur für konstante Messungen; starke Temperaturgradienten können sich problematisch auf die Genauigkeit auswirken	bei dichten Stäuben, Nebel oder Rauch keine Sichtbarkeit des Schutzfeldes wegen Streuung des Lichts an den Aerosolen [17]	keine Sicht bei starkem Nebel, Regen oder Schnee wegen Streuung des Lichts an den Wassertropfen [17]
	Umgebungstemperatur: 0°C - +50°C [101]; Aufwärmphase von ca. 30 Minuten für konstante Distanzmessungen [101]; Temperaturabhängiger Gradient: 8mm/°C [41]	nahes Infrarot durchdringt Aerosole besser als sichtbares Licht; Verkürzung der Reichweite durch Streuung; bei dichten Aerosolen keine Sicht wegen Streuung [17]	Sonnenlicht verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis, Gegenmaßnahmen minimieren diesen Einfluss (u.a. schmalbandige optische Filter) [72]; IR Strahlung durchdringt leichten Nebel, Schnee und Regen besser als sichtbares Licht [17]; keine Sicht bei starkem Nebel, Schnee oder Regen [17]
	Aufwärmphase von ca. 1h für konstante Distanzmessungen [13]; starke Temperaturgradienten können sich problematisch auf die Genauigkeit auswirken	nahes Infrarot durchdringt Aerosole besser als sichtbares Licht; Verkürzung der Reichweite durch Streuung; bei dichten Aerosolen keine Sicht wegen Streuung [17]	Einsatz bei Sonnenlicht eingeschränkt [22]; IR Strahlung durchdringt leichten Nebel, Schnee und Regen besser als sichtbares Licht [17]; keine Sicht bei starkem Nebel, Schnee oder Regen [17]
	Umgebungstemperatur: -15°C - +50°C; Objekttemperatur: -40°C - 2500°C [57]; Differenz zwischen Temperatur der Personen und der Hintergrundtemperatur (z.B. im Umfeld von Maschinen) muss gegeben sein; Anfällig gegenüber Temperaturschwankungen [84];	Infrarot durchdringt Aerosole besser als sichtbares Licht; Verkürzung der Reichweite durch Streuung; bei dichten Aerosolen keine Sicht wegen Streuung [17]	Nebel, Regen und Schnee dämpfen die IR Strahlung durch Streuung an den Wassertropfen und verkürzen die Reichweite [17]; IR Strahlung durchdringt leichten Nebel, Schnee und Regen besser als sichtbares Licht [17]; keine Sicht bei starkem Nebel, Schnee oder Regen [17]

Überwachungsbereich	Sensoren	Funtionsprinzip	Personenerkennung
	3D-Laser-scanner	Ein Laserstrahl wird ausgesendet, von einem Objekt reflektiert und wieder empfangen. Anhand der Laufzeit kann auf die Distanz zum Objekt geschlossen werden. Durch Drehung und Kippung eines Spiegels kann der Scanner sphärisch (360°) seine Umgebung abscannen. Es entsteht dadurch eine 3D-Punktwolke.	In der 3D-Punktwolke können Personen anhand ihrer Geometrie automatisch detektiert werden.
	Radar	Mikrowellen werden ausgesendet, am Objekt reflektiert und wieder empfangen. Aus der Laufzeitmessung kann auf die Distanz zum Objekt geschlossen werden. Mit einem Array aus mehreren Antennen kann eine flächenhafte Überwachung stattfinden. Aus Dopplermessungen können außerdem Geschwindigkeiten bestimmt werden.	Anhand der Geschwindigkeit und der Frequenz können Bewegungen aus den Daten gefiltert werden, die von einem Mensch erzeugt wurden (Bewegung der Arme oder Beine, Bewegung des Brustkorbs beim Atmen)
	Ultraschall	Ein Schall wird ausgesendet, von einem Objekt reflektiert und wieder empfangen. Durch die Messung der Laufzeit kann die Distanz zum Objekt bestimmt werden. Mit dem Einsatz von mehreren Sendern (Lautsprecher) und Empfängern (Mikrophon) kann eine flächenhafte Abtastung stattfinden. Außerdem lassen sich mit Dopplermessungen die Geschwindigkeiten von Personen bestimmen.	Anhand des Geschwindigkeitsprofils kann eine sich bewegende Person automatisch erkannt werden.

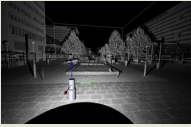
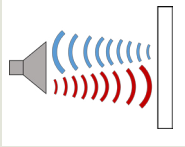

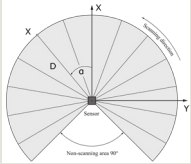
2D Überwachung einzelner Ebenen

	2D-Laser-scanner	Ein Laserstrahl wird ausgesendet, von einem Objekt reflektiert und wieder empfangen. Anhand der Laufzeit kann auf die Distanz zum Objekt geschlossen werden. Durch den Einsatz eines Drehspiegels kann der Scanner eine Ebene seiner Umgebung abtasten. Es entsteht dadurch ein 2D-Punktwolke.	Der horizontale Zeilenscan kann zum Beispiel auf Beine untersucht werden um damit die Position einer Person festzustellen.
---	------------------	--	--

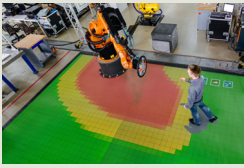
Überwachungsbereich	Vorteile	Nachteile	Anwendungsgebiete	Einsatzzweck			
				A ¹	P ²	B ³	K ⁴
	genaue Positionsbestimmung; hohe Winkelauflösung	anfällig gegen äußere Einflüsse wie Staub; sequentielle Aufnahme kann bei schnellen Bewegungen zu Artefakten in der Punktwolke führen; Kompromiss zwischen Aufnahme rate und Messgenauigkeit	Industrieroboter; Maschinen und Anlagen; Automaten und Handling-Systeme; Fahrzeuge	X	X	X	X
	unempfindlich gegen Schmutz und Staub; durchdringt auch Hindernisse z.B. aus Plastik oder Holz; zusätzliche Messung der Geschwindigkeit	geringe Winkelauflösung, Personenerkennung nur bei Bewegung	Automaten und Handling-Systeme; Flurförderzeuge; Fahrzeuge; Verkehrsmittel	X	O	–	–
	zusätzliche Messung der Geschwindigkeit, Unabhängig von Beschaffenheit der Oberfläche und von Beleuchtung, Staub, schmutz, Nebel, Rauch	geringe Winkelauflösung, Personenerkennung nur über Geschwindigkeit	Automaten und Handling-Systeme; Flurförderzeuge; Fahrzeuge	X	O	–	–
	mobil, kompakt; auch auf bewegten Plattformen	Personen können sich unterhalb oder über der überwachten Ebene befinden; Position nur 2D bestimmbar	Maschinen und Anlagen; Flurförderzeuge	X	X	–	–

¹ Anwesenheitserkennung, ² Positionsbestimmung, ³ Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine, ⁴ Aufnahme von Körperhaltung



Überwachungsbereich	Technische Parameter		
	Erfassungsdaten	Installation	Weiteres
	Pos.Genauigkeit: 0,01% - 0,1% [57], Zuverlässigkeit 75-95% [64][86]; max. Distanz: >50m; Strahldivergenz: 0,01°; Sichtfeld 360° horizontal /320° vertikal	3D Laserscanner wird von Oben oder von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Einsatz mehrerer Scanner um Verdeckungen zu minimieren, Verknüpfung der 3D Punktwolken mehrerer Scanner möglich; Einsatz im Außenbereich und auf mobilen Plattformen möglich (Scanner mit hoher Aufnahmezeit vorausgesetzt); Abmessungen ab 5-10 x 5-10 x 5-10 cm	Datenschutz unkritisch, da nur Geometrie aufgenommen wird; IP67
	Streckengenauigkeit: <1%; Öffnungswinkel Radarkeule: >2° [104]; max. Distanz: >50m [104]; Geschwindigkeiten ab 0,1m/s werden erkannt [36]	Raster aus mehreren Radar-Antennen oder bewegte Antenne (synthetische Apertur) wird von der Seite auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Messung teilweise auch durch Hindernisse hindurch; Einsatz auf mobilen Plattformen und im Außenbereich möglich; Abmessungen ca. 10 x 10 x 10 cm	Datenschutz unkritisch, da Geometrie (mit geringer Auflösung) und Bewegung gemessen wird; IP67
	Streckengenauigkeit: 0,1 - 1% [73]; Öffnungswinkel Schallkeulen: 5-8° [36]; max. Distanz: <8m [36]	Raster aus mehreren Ultraschallsensoren wird von der Seite auf den Arbeitsbereich ausgerichtet; Einsatz auf mobilen Plattformen und im Außenbereich möglich; typische Abmessungen für einen Ultraschallsensor: 1 x 1 x 1 cm	Datenschutz unkritisch, da Geometrie (mit geringer Auflösung) und Bewegung gemessen wird; IP67 [73]
	Pos.Genauigkeit: 0,01 - 0,1%, max. Distanz: >50m; Winkelauflösung: 0,01°	2D Laserscanner wird von der Seite auf Höhe der Beine auf den Überwachungsbereich ausgerichtet; Einsatz im Außenbereich und auf mobilen Plattformen möglich; Abmessungen 20 x 15 x 15 cm	Manipulierbarkeit: Um zu verhindern, dass sich Personen unterhalb der Überwachungsebene aufhalten darf der Scanner nicht zu hoch angebracht werden

Überwachungsbereich	Umgebungsfaktoren		
	Beleuchtungsgrößen	optische Strahlung	Vibration
	bei allen Lichtverhältnissen einsetzbar; reflektierende Materialien führen zu Fehlern	Laserklasse 1, Infrarot-A	Vibrationen am Sensor wirken sich linear auf die 3D Messung aus
	kein Einfluss der Beleuchtung	keine optische Strahlung (Mikrowellen)	vibrierende Maschinenteile können zur Meldung einer Bewegung führen [47]; Vibrationen am Sensor wirken sich linear auf die 3D Messung aus
	kein Einfluss der Beleuchtung [47]	keine optische Strahlung (Ultraschallwellen)	vibrierende Maschinenteile können zur Meldung einer Bewegung führen; Vibrationen am Sensor wirken sich linear auf die 3D Messung aus; Hochfrequente Umgebungsgeräusche können Ultraschallsensoren stören [84]
	unempfindlich gegenüber Fremdlicht [82]	Laserklasse 1, Infrarot-A	Halterung ist schwingfest [82]

Überwachungsbereich	Umgebungsfaktoren		
	Klimagrößen	Aerosole	Äußere Einflüsse
	Umgebungstemperatur: -10°C - +60°C	Fehlmessungen bei Stäuben; das reflektierte Signal von Nebel unterscheidet sich von dem Signal fester Körper und kann gefiltert werden [104]	leichter Regen, Dunkelheit und Störlicht beeinflussen die Ergebnisse nur unwesentlich [66]; starker Regen führt zu Fehlmessungen
	Umgebungstemperatur: -40°C - +85°C [60]	kein oder sehr geringer Einfluss [17]	Starker Niederschlag führt zu Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnis und senkt die Reichweite durch Dämpfung des Signals [104]
	Umgebungstemperatur: -40°C - +150°C [104]; Luftfeuchte beeinflusst die Messgenauigkeit nicht [36]; Empfindlichkeitseinbuße bei komplett benetztem Sensor [47]; Starke Luftströmungen (>20 m/s) beeinflussen die gemessene Entfernung [47]; Anwendung nur in Luft möglich [36]	Staub, Rauch und Nebel beeinträchtigen die Messgenauigkeit nicht [36] [47]	Niederschläge in normaler Dichte führen zu keiner Funktionsbeeinträchtigung des Ultraschall-Sensors [36]; mit Eis bedeckte Ultraschallsensoren arbeiten kaum noch [47]
	Betriebstemperaturen: -10°C bis +50°C [82]	robust gegenüber Schmutz und Staub [82]	bei jedem Wetter einsetzbar, extremes Wetter kann Not-Aus auslösen [82]





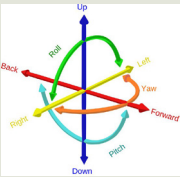
Überwachungsbereich	Sensoren	Funtionsprinzip	Personenerkennung
 <p>Fraunhofer IFF, Stefan Deutsch, [75]</p>	Druckempfindlicher Fußboden	Der Boden im Umfeld der Maschine wird mit druckempfindlichen Sensoren ausgestattet.	Die Krafteinwirkung auf ein bestimmtes Element des Bodens wird gemessen. Daraus kann auf die Position eines Objekts (z. B. einer Person) geschlossen werden.

Maschinenzentrierte Sensoren

 <p>Fraunhofer IFF, [75]</p>	Drucksensoren	Am Roboter werden druckempfindliche Sensoren angebracht, die eine Berührung messen; Umsetzung der Druckmessung ist unterschiedlich und produktspezifisch	Bei der Kollision mit einer Person wird die Position des Kontakts an der Stelle des Sensorelements festgestellt und die Maschine wird gebremst.
	kapazitive Sensoren	Am Roboter werden kapazitive Sensoren angebracht.	Eine Änderung der Kapazität des elektrischen Felds vor dem Sensor lässt auf die Annäherung eines Objekts (z.B. einer Person) schließen.





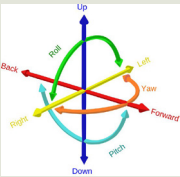
Aktive personenbezogene Systeme

	RFID	Durch die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger z.B. über Funk wird die Position eines Sensors im Arbeitsbereich festgestellt.	Die Person trägt einen Sensor bei sich und lässt sich somit orten.
 <p>https://commons.wikimedia.org/wiki/File:6DOF_en.jpg</p>	6-DOF Inertialsensoren	Durch die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger z.B. über Funk wird die Position eines Sensors im Arbeitsbereich festgestellt.	Die Person trägt 3D-Wirbelsäulensensoren und lässt sich somit orten. Es können zusätzlich Haltungsanalysen durchgeführt werden zur ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes.

Überwachungsbereich	Vorteile	Nachteile	Anwendungsgebiete	Einsatzzweck			
				A ¹	P ²	B ³	K ⁴
	unempfindlich gegen Schmutz, Staub	nicht mobil; Position nur 2D bestimmbar	Industrieroboter; Maschinen und Anlagen; Automaten und Handling-Systeme	X	X	–	–
	lässt sich auch für eine menschengesteuerte Führung des Roboters nutzen	erst bei Kollision wird Person erkannt	Industrieroboter	X	O	–	–
	der Abstand zwischen Mensch und Maschine wird direkt gemessen	kleine Distanz	Industrieroboter; Automaten und Handling-Systeme	X	O	O	–
	auch Informationen über die Person (ID) können übermittelt werden	Person muss Sensor mitführen	Industrieroboter; Maschinen und Anlagen; Automaten und Handling-Systeme; Flurförderzeuge	X	X	X	–
	Übertragung zur Empfangseinheit unempfindlich gegen Verdeckungen	Drift und Fehleraufsummierung durch Koppelnavigation (dead reckoning); Person muss Sensor(en) mitführen	Flurförderzeuge; Fahrzeuge; Verkehrsmittel	X	X	X	X

¹ Anwesenheitserkennung, ² Positionsbestimmung, ³ Bewegungsabstimmung Mensch-Maschine, ⁴ Aufnahme von Körperhaltung

Überwachungsbereich	Technische Parameter		
	Erfassungsdaten	Installation	Weiteres
	Positionsgenauigkeit abhängig von Größe der taktilen Sensorelemente (mm möglich)	Druckempfindliche Sensorelemente werden lückenlos auf dem Boden im Überwachungsbereich ausgelegt; nicht mobil	
	Positionsgenauigkeit abhängig von Größe der taktilen Sensorelemente (mm möglich)	Drucksensoren werden flächendeckend an der Maschine angebracht; Geschwindigkeit der Bewegung der Maschine bzw. des Roboters muss gering gehalten und Bauteile gepolstert werden um Verletzungen bei Kollisionen zu vermeiden [75]; Einsatz auf mobilen Robotern möglich	produkt-spezifisch
	max. Distanz: <50cm	kapazitive Sensoren werden flächendeckend an der Maschine angebracht; minimaler Sensordurchmesser: 1 cm ² [47]	IP67 leicht möglich [47]
	Pos. Genauigkeit: 1%; max. Distanz: passiv: <2m, aktiv: >30m [62]	Person trägt Sensor bei sich, z. B. als Antenne auf einem Helm oder als Transponder in der Hosentasche; stationäre Referenzsender sind rund um den oder im Überwachungsbereich verteilt; über Funk wird die Position relativ zu den Referenzsendern zu einer zentralen Recheneinheit übertragen	Datenschutz: Wenn ID übermittelt wird, kann das System zur Überwachung der Mitarbeiter eingesetzt werden; Manipulierbarkeit: trägt die Person keinen Sensor bei sich, wird sie nicht erkannt; IP67 mit Gehäuse möglich; Wartungsaufwand: aktive Transpondersysteme benötigen eine Batterie
	Winkelauflösung: 0,1°; Wiederholungsgenauigkeit: zwischen +- 5µm und +-15µm [36]	Person trägt Sensor am Körper; über Funk werden die Bewegungen am Sensor an ein Grundgerät übermittelt	Manipulierbarkeit: trägt die Person keinen Sensor bei sich, wird sie nicht erkannt; IP67 [36]

Überwachungsbereich	Umgebungsfaktoren		
	Beleuchtungsgrößen	optische Strahlung	Vibration
	kein Einfluss der Beleuchtung	keine Strahlung	kein Einfluss
	kein Einfluss der Beleuchtung	keine Strahlung	Vibrationen beeinflussen Maschine und Sensor gleichermaßen, daher unkritisch
	kein Einfluss der Beleuchtung	keine optische Strahlung (elektrisches Streufeld)	Vibrationen beeinflussen Maschine und Sensor gleichermaßen, daher unkritisch
	Reflexionen an metallischen Objekten führen zu Löchern im Überwachungsbereich [36]	keine optische Strahlung (Langwellen, Kurzwellen, Dezimeterwellen oder Mikrowellen)	mechanische Vibrationen führen zu Interferenz mit den elektromagnetischen Signalen und zu Fehlern in der Übertragung [40]
	kein Einfluss der Beleuchtung	keine optische Strahlung	Vibrationen haben keinen Einfluss, da die Sensoren auch zur Erfassung von Vibrationen eingesetzt werden

Überwachungsbereich			
	Klimagrößen	Aerosole	Äußere Einflüsse
	nicht ermittelbar	kein Einfluss, da nicht berührungslos	nur für den Innenraum
	produktspezifisch	kein Einfluss, da nicht berührungslos	produktspezifisch
	hohe Temperaturstabilität [36]	Beeinträchtigung durch Staub und Feuchtigkeit [36]	Wasser (Niederschlag) führt zu einer Veränderung der Kapazität und kann somit zu Fehlmessungen führen; Tau oder Schmutz auf der Sensoberfläche kann kompensiert werden [47]
	Umgebungstemperatur: -40°C - +60°C	abhängig von der verwendeten Frequenz	Einfluss von Niederschlag abhängig von der verwendeten Frequenz
	Umgebungstemperatur: -25°C - +75°C [36]	kein Einfluss	produktspezifisch: bei Signalübertragung über Funk kein Einfluss; bei Kabelverbindung zur Recheneinheit sind die Steckkontakte vor Staub und Wasser zu schützen; optische Strahlung hat keinen Einfluss; starke magnetische Felder können die Funktion beeinträchtigen