

# Von Zäunen befreit

Industrieroboter mit Ultraschall absichern

Um das Risiko zu vermindern, dass Personen mit dem Roboter in Kontakt kommen und dabei verletzt werden, arbeiten industrielle Roboter hinter starren Schutzeinrichtungen. Das Institut für Arbeitsschutz (IFA) forscht an der Zukunftstechnologie „Kollaborierender Roboter“, um Menschen den gefahrlosen Zugang zum arbeitenden Roboter zu gewähren. Der Beitrag beschreibt, wie im Rahmen des von der Bayerischen Forschungstiftung geförderten Projektes „EsIMiP“ ein Konzept entwickelt wurde, einen Roboterarm mit Ultraschallsensoren so abzusichern, dass ein flexibles Zusammenarbeiten von Mensch und Roboter möglich wird.

**SCHLAGWÖRTER** Industrieller Roboter / Ultraschallsensoren / kollaborierender Roboter / EsIMiP / IFA / DGUV

**Freed from fences –  
Safeguarding industrial robots with ultrasound**

Industrial robots work behind rigid safety devices in order to lower the risk that persons come in contact with the robot and thus to harm. The IFA, an institute for research and testing of the German Social Accident Insurance in Germany, is working on the state of science in “collaborating robots”, to grant humans safe access to robots. In the course of the project “EsIMiP”, promoted by the Bavarian Research Foundation, a concept was developed at the IFA, allowing the robot’s arms to be secured by ultrasonic sensors. This enables a flexible collaboration between human and robot.

**KEYWORDS** Industrial robot / ultrasonic sensors / collaborating robot / EsIMiP / IFA / DGUV

**BJÖRN OSTERMANN, MICHAEL HUELKE,** Institut für Arbeitsschutz (IFA)  
**ANKE KAHL,** Bergische Universität Wuppertal

**D**er erste industrielle Roboter wurde 1954 von George C. Devol Jr. erfunden und 1961 bei General Motors erstmals in der industriellen Fertigung eingesetzt [1]. Der erste tödliche Unfall geschah 1979 [2]. Ende 2009 waren weltweit bereits mehr als eine Million Roboter in der Industrie im Einsatz, hiervon etwa 340 000 in Europa und mehr als 140 000 in Deutschland [3].

Durch die Anforderungen, die an die Sicherheit von Maschinen – nicht nur im europäischen Binnenmarkt – gestellt werden, verrichten die meisten dieser Roboter ihren Dienst hinter starren Zäunen. Mit der Zulassung von Laserscannern für Sicherheitsapplikationen in 1998 [4] und des Kamera Systems „SafetyEye“ in 2006 [5] konnten einige der starren Zäune durch berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen ersetzt werden. Doch auch diese unsichtbaren Zäune trennen Bediener und Roboter entlang einer vorgegebenen starren Grenze.

Eine flexible und sichere Zusammenarbeit zwischen Bediener und Roboter im selben Arbeitsraum ist mit heutigen Sicherheitssystemen nicht möglich. Hierzu wird ein neues System benötigt, das die Bewegungsräume des Bedieners möglichst wenig einschränkt und sicherheits- und auch prozesstechnisch flexibel auf den Aufenthaltsort des Bedieners reagiert. Neben der hohen Sicherheit spielen wirtschaftliche Aspekte eine große Rolle. Ein Roboter, der keinen Zaun benötigt und dem man sich bedenkenlos im Betrieb nähern kann, verspricht Möglichkeiten für neuartige Arbeitsplätze und die Umsetzung von platzsparenden Konzepten im Rahmen der Arbeitsplatzgestaltung.

## 1. KOLLABORIERENDE ROBOTER

Der Forschungsbereich „Kollaborierende Roboter“ befasst sich damit, den industriellen Roboter soweit sicher zu machen, dass er mit Menschen auf engem Raum zusammenarbeiten kann, ohne dabei durch eine fest stehende Schutzeinrichtung von den Menschen getrennt zu sein. Menschen können sich „mit Sinn und Verstand“ auf Änderungen einstellen. Ein gewöhnlicher industrieller Roboter kann seine Umgebung dagegen nicht wahrnehmen und hat keine Mög-

lichkeit, sich Veränderungen in seinen Arbeitsbedingungen anzupassen. Er arbeitet stochastisch sein Programm ab.

Das vom IFA zu entwickelnde Sicherheitssystem soll in die Robotersteuerung eingreifen und Kollisionen verhindern, indem die Geschwindigkeit des Roboters bei Annäherung bis zum Stillstand reduziert wird. Als Aufgabe ergibt sich hieraus, den Roboter mit geeigneter Sensorik auszustatten und in seiner Steuerung gleichzeitig Algorithmen einzubinden, die es ihm erlauben, seine Arbeitsweise den erfassten Werten anzupassen.

Eine geeignete Sensorik muss

- Daten schnell und zyklisch liefern und
- relevante Daten erfassen.

Die Algorithmik muss

- Daten schnell und zyklisch verarbeiten sowie
- mit den gelieferten Daten auskommen.

Beide Aufgabengebiete müssen aufeinander abgestimmt sein. Wenn die Sensorik unnötige Daten liefert, müssen diese in der Algorithmik mühsam gefiltert werden. Wenn die Sensorik zu wenige Daten liefert, kann die Algorithmik keine optimale Lösung finden. Andererseits darf die Algorithmik keine Daten erwarten, die mit Sensorik nicht erfasst werden können. Algorithmen, die nur an vollständigen Datensätzen aus virtuellen Computermodellen getestet werden, scheitern in der Praxis an den unvollständigen, fehlerbehafteten Daten, die ihnen reale Sensoren liefern.

## 2. ARBEITSAUFGABE DES INDUSTRIEROBOTERS

Ein wichtiger Faktor für die Planung eines kollaborierenden Roboters ist seine Arbeitsaufgabe. Die Wahl von Sensorik und Algorithmik ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Typ des Industrieroboters
  - Kraft
  - Reichweite
  - Freiheitsgrade (Anzahl Achsen)

- gewünschte Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters
- Aufgabe des Roboters, wie Beförderung kleiner, großer, (un-)übersichtlicher oder komplexer Teile, oder sonstige Aufgaben, wie Schweißen und Lackieren

Die zu bewältigende Arbeitsaufgabe wurde im Projekt EsIMiP festgelegt. In diesem Projekt, gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung (AZ-852-08), verfolgen die TU München, die Universität Kassel, das IFA sowie die Industriepartner Reis Robotics und Baumüller das Ziel, experimentelle Ansätze aus der Forschung mit verifizierbarer Sicherheitstechnik zu kombinieren. Als Arbeitsmittel wurde ein Roboter RV20-16 beziehungsweise RV30-16 der Firma Reis gewählt. Die Reichweite dieser Roboter liegt bei zirka 2 m. Als Aufgabe des Roboters wurde „Transport und Darreichung von kleinen Teilen“ gewählt.

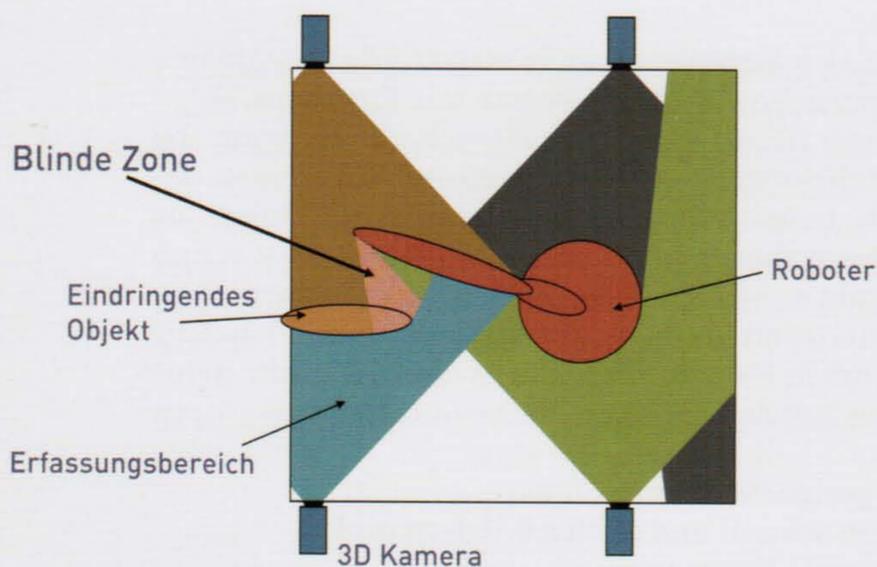
## 3. ABSICHERUNG DES ROBOTERS (MIT SENSOREN)

Zur Kollisionserkennung zwischen Roboter und Mensch werden geeignete Sensoren benötigt. Die Wahl dieser Sensoren hängt von verschiedenen Faktoren ab. Sie müssen

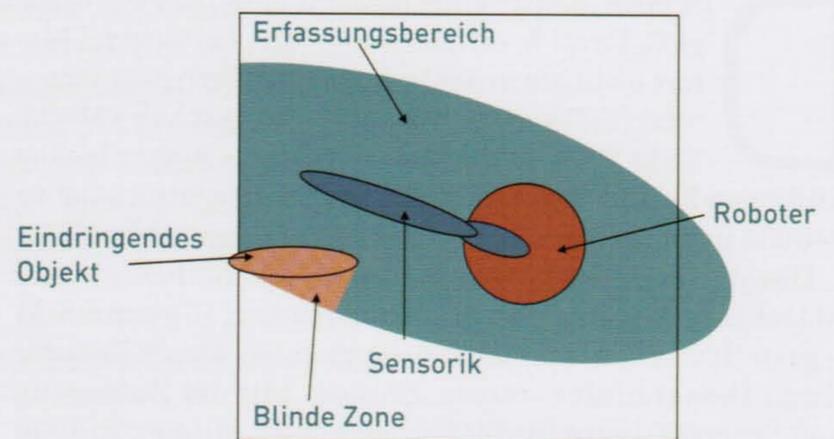
- eine lückenlose Überwachung der Roboterumgebung gewährleisten
- unabhängig von der Ausrüstung des Bedieners wirken
- ein sicheres Signal liefern
- ein schnelles Signal liefern
- störfest sein

### 3.1 Platzierung der Sensorik

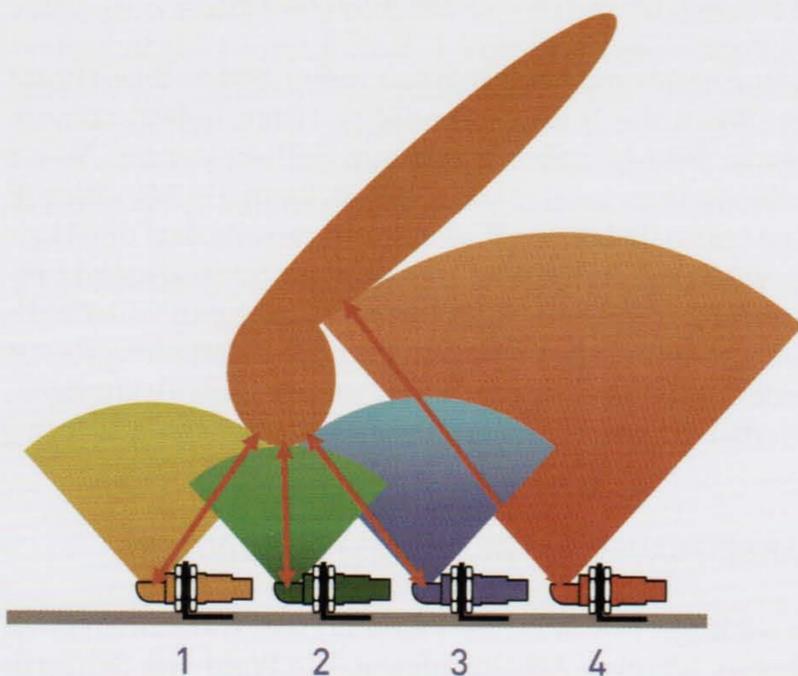
Für die lückenlose Überwachung der Roboterumgebung zur sicheren Kollisionsvermeidung sind drei unterschiedliche Vorgehensweisen denkbar:



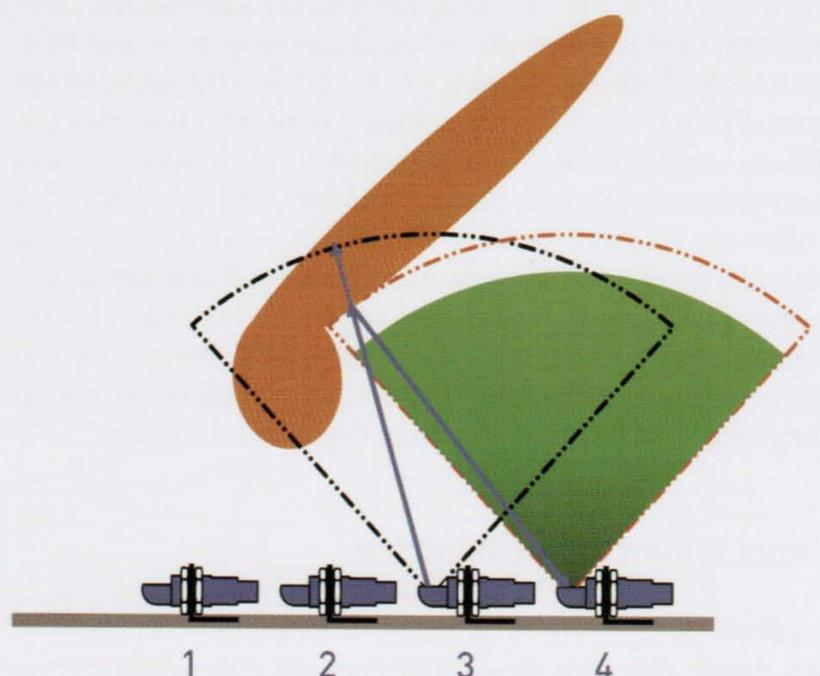
**BILD 1:** Arbeitsbereich, von außen überwacht mit Kameras



**BILD 2:** Arbeitsbereich, von innen überwacht



**BILD 4:** Eindringendes Objekt wirft Echos zurück, Sensor 2 misst geringste Distanz.



**BILD 5:** Verkürzte Schalllaufzeit für Sensor 4

- Überwachung mittels durchdringender Sensoren
- Überwachung des Arbeitsraumes mit nicht durchdringenden Sensoren „von außen“
- Überwachung der Roboterumgebung mit am Roboter montierten Sensoren „von innen“

#### A | Überwachung mittels durchdringender Sensoren

Lückenlose Überwachung kann erreicht werden, wenn Sensoren eingesetzt werden, die nur auf bestimmte Marker reagieren und restliche Materialien durchdringen. Ein Beispiel ist der Einsatz von RFID Tags, die vom Menschen am Körper getragen werden. Diese Technik wurde im IFA bereits für verschiedene Einsatzbereiche erprobt [6]. Es können allerdings nur solche Stellen am Mensch gefunden werden, die mit einem RFID Tag versehen sind. Hierdurch ergibt sich, dass Bediener mit ausreichendem Sicherheitsabstand arbeiten müssen, oder alle Körperteile des Bedieners, welche gefährdet sind, vollständig mit RFID Tags versehen sind.

Dieser Ansatz hat für die Interaktion von Mensch und Roboter den Nachteil, dass nur die Personen geschützt sind, die eine entsprechende Schutzausrüstung angelegt haben. Es muss deshalb organisatorisch sichergestellt sein, dass sich nur so geschützte Personen im Roboterbereich aufhalten. Organisatorische Maßnahmen sind in der Sicherheitstechnik aber nachrangig zu technischen Maßnahmen anzuwenden, die vorher ausgeschöpft sein müssen.

#### B | Überwachung des Arbeitsraumes mit nicht durchdringenden Sensoren „von außen“

Eine lückenlose Überwachung des Arbeitsraums von außen durch im Raum angebrachte Sensoren ist schwierig zu realisieren. Sensoren, deren Erfassungsbereich durch das erfasste Hindernis geblockt wird, erzeugen für den dahinter liegenden Bereich „blinde Zonen“, für die dann keine Daten vorliegen. Wie Bild 1 zeigt, können diese Zonen zwar durch die Verwendung vieler Sensoren aus unterschiedlichen Richtungen in ihrer Größe verringert werden. Auch können bekannte, starre Hindernisse bei der Platzierung der Sensoren berücksichtigt werden. Flexible Hindernisse, wie zum Beispiel der Bediener, oder auch der dynamisch ausweichende Roboter selbst, sind in der Planung allerdings nur schwer zu berücksichtigen. Gerade hier sind blinde Zonen besonders störend für eine dynamische Robotersteuerung.

#### C | Überwachung der Roboterumgebung mit Sensoren „von innen“

Ein weiterer Ansatz ist, die Montage der Sensoren am Roboter, um den Raum von innen zu überwachen. Wie Bild 2 verdeutlicht, treten auch hierbei blinde Zonen im Erfassungsbereich auf, wenn die Sensormessung auf das Hindernis trifft.

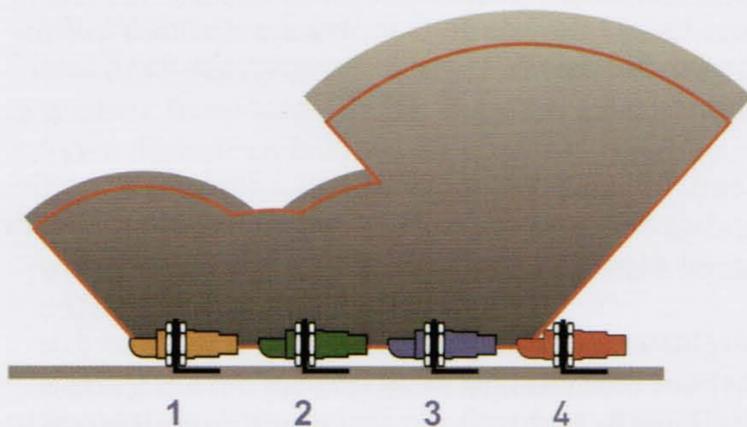
Die Sicherheit im Roboterarbeitsbereich wird durch diese blinden Zonen aber nicht beeinträchtigt, da hierfür nur der freie Bereich um den Roboter entscheidend ist. Die Information über den gesamten freien Raum, die für die arbeitstechnisch optimale Planung eines Roboterpfades benötigt wird, kann hierbei nicht erfasst werden. Daher ist das Überwachen des Raumes vom Roboter aus nur für den Teil der Steuerung passend, der die sichere Annäherung des Roboters an den Menschen überwachen soll. Die Sensoren müssen so platziert werden, dass vom Roboter gegriffene Teile und Arbeitsmittel vom Sensorfeld vollständig umschlossen sind. Dies kann sich für große Werkstücke problematisch gestalten.

### 3.2 Wahl der Sensoren

Auf Basis der beschriebenen Randbedingungen wurde im Projekt EsIMiP die Auswahl der Sensoren zur sicheren Hinderniserkennung auf solche beschränkt, die ohne zusätzliche Markierungen am zu erkennenden Objekt auskommen und sich für den Einsatz „von innen“ eignen. Analysen der in der Literatur beschriebenen, bereits umgesetzten Sensorkonzepte zeigen, dass

- Kraftsensoren, die erst bei Berührung auslösen, einen Zusammenstoß erkennen aber nicht verhindern können [7]
- Kapazitive Sensoren noch nicht zur sicheren Erfassung geeignet sind und nur einen begrenzten Erfassungsbereich haben [8]

**BILD 3:**  
Reis-Roboter  
mit Microsonic-  
Sensoren



**BILD 6:** Unterschied der freien Räume,  
mit und ohne Fehlmessung

- Kameras (2D und 3D) nur schwer sicherheitsertüchtigt werden können und dann hohen Rechenaufwand erfordern (Beispiel: Pilz SafetyEye)
- Laserscanner für 3D-Aufnahmen eine zu geringe Bildanzahl pro Sekunde liefern [9]
- PMD-Kameras noch nicht sicherheitsgerichtet funktionieren [10]

Nach weiteren Untersuchungen auf dem Markt verfügbarer Sensoren kristallisierte sich als Ergebnis die Nutzung von Ultraschallsensoren heraus. Der Vorteil dieser Sensoren ist, neben der bereits vorhandenen Applikation in der Sicherheitstechnik, dass sie auf jegliche Annäherung im Erfassungsbereich reagieren, und als Messergebnis immer die kürzeste Distanz zum erkannten Objekt zurückliefern. Der Rechenaufwand pro Sensor ist klein, sodass eine größere Anzahl von Sensoren eingesetzt werden kann, um eine flächendeckende Messung zu gewährleisten.

Im Projekt wurde ein Konzept entwickelt, den Roboter mit nach außen gerichteten Ultraschallsensoren einzukleiden. Die Vorgehensweise ähnelt damit der Einparkhilfe von Kraftfahrzeugen, bei der wenige Ultraschallsensoren in der Stoßstange eingebaut sind. Die Anzahl der am Roboter verwendeten Sensoren ist jedoch ungleich größer. Das IFA wird hierbei durch die Firma Microsonic technologisch unterstützt, die bereits 1996 ihren ersten Ultraschallsensor für die Sicherheitstechnik ertüchtigt hat.

Bild 3 zeigt den Reis Roboter RV30-16 mit angebauten Ultraschall Sensoren von Microsonic im Versatz von 10 cm.

Die Sensorwerte werden über eine Beckhoff-EtherCAT-Schnittstelle an die Auswerteeinheit (PC) übertragen. Nach ihrer Verarbeitung werden entsprechende Fahrbefehle weiter an die Robotersteuerung geleitet. Zurzeit wird davon ausgegangen, dass das Tool ebenfalls eine umschließende Überwachung mit Ultraschall zulässt.

### 3.3 Messprinzip des Ultraschall-Arrays

Ultraschallsensoren senden ein kurzes Schallsignal im für Menschen unhörbaren Ultraschallbereich aus und messen die Zeit, bis das von Fremdobjekten zurückgeworfene Signal wieder vom Sensor erfasst wird. Aus dieser Zeit, in Verbindung mit der aktuellen Lufttemperatur, wird die Distanz bis zum Objekt berechnet. Dieses Messprinzip ist möglich, da die Schalllaufzeit in 20 °C warmer Luft mit etwa 343 m/s sehr gering ist. Ein Microcontroller kann damit die Laufzeit mit der erforderlichen geringen Toleranz messen, um einen ausreichend genauen Abstand zum Objekt berechnen zu können. Für eine Abstandsmessung von 50 cm benötigt Ultraschall zirka 3 ms.

Beim Anbau der Sensoren muss in der gegebenen Anwendung darauf geachtet werden, dass sich die Schallkeulen überschneiden, um flächendeckende Messergebnisse in dem erforderlichen Sicherheitsabstand zu erreichen. Dringt nun ein Objekt in den überwachten Bereich ein, nehmen die Sensoren wie in Bild 4 gezeigt, ein zurückgeworfenes Echo auf und können hieraus auf ihre Entfernung zum Objekt schließen.

Der Bereich, der durch den Kegel der Sensoren in dieser Entfernung abgedeckt wird, kann damit als „frei von Objekten“ angenommen werden.

Um das dargestellte Bild zu erhalten, müssen die Sensoren ihren jeweils erzeugten und zurücklaufenden Schall

voneinander unterscheiden können. Bei gleichzeitiger Messung ist dies theoretisch durch eine Kodierung der Frequenzen möglich. Praktisch ergeben sich aber Mehrfachreflexionen in der Umgebung, die eine genaue Zuordnung des Empfangssignals verhindern. Auch ist das Verwenden verschiedener Ultraschallfrequenzen in der Praxis kaum zu realisieren. Eine Schallkodierung der einzelnen Sensoren lässt sich somit nicht in die Praxis umsetzen.

Theoretisch denkbar wäre es, auch sequenzielle Messungen durchzuführen. Durch das Abklingen des Schalls in der Umgebung sowie das zur Ruhe kommen des Send-/Empfangsmoduls im Sensor kann eine einzelne Messung im Bereich bis 60 cm aber nur alle 17 bis 20 ms durchgeführt werden. Das sequenzielle Messen führt somit bei der hier vorgesehenen großen Anzahl von Sensoren zu sehr großen Messzyklen.

Als Lösung für dieses Problem wird die Messung der Ultraschallsensoren bei gleicher Kodierung der Frequenzen gleichzeitig gestartet. Hierdurch ergibt sich jedoch ein weiteres Problem, wie Bild 5 darstellt. Der Weg von Sensor 3 zum Objekt und zurück zu Sensor 4 ist kürzer als von Sensor 4 selbst zum Objekt und zurück. Bei parallel laufender Messung wird in Sensor 4 somit das Rücklaufsignal von Sensor 3 und damit eine kürzere Distanz zum Objekt gemessen als sie wirklich gegeben ist. Der als frei bekannte Raum verkürzt sich damit an dieser Stelle.

Die Messung des minimalen Abstandes bleibt von dieser Messverfälschung jedoch unberührt. Für das Beispiel ergibt sich der in Bild 6 dargestellte Unterschied zwischen möglicher Messung (grau) und erfolgter Messung (rot).

Da für die Umsetzung der Sicherheitsfunktion die Geschwindigkeit des Roboters am kleinsten gemessenen Abstand auszurichten ist, ist eine geringe Verfälschung der restlichen Messwerte nicht von Bedeutung.

## 4. ALGORITHMEN ZUR MESSWERTAUSWERTUNG

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist es das Ziel des IFA, eine Anpassung der Robotergeschwindigkeit an die Umgebungsbedingungen zu erreichen.

Um die jeweils aktuell zulässige Geschwindigkeit zu berechnen,

- müssen die ermittelten Abstandswerte der Sensoren ausgewertet und zu einer virtuellen Karte der Umgebung verknüpft werden,
- muss berechnet werden, ab welcher Geschwindigkeit der Roboter mit den Außengrenzen der Karte gefährlich kollidiert.

Diese Schritte sind für die Ermittlung der konkreten Geschwindigkeitsvorgabe feiner unterteilt worden. Hierzu beschreibt dieses Kapitel:

- den Zusammenhang zwischen Messzyklus, Abstand und Geschwindigkeit
- den Datenfluss durch die einzelnen Algorithmen in der entwickelten „Fail Safe Control“
- die Bestimmung des freien Raums, angedeutet in Bild 6
- die Erfassung der Karte der statischen Umgebung und das Ziel:
- die Bestimmung der aktuell zulässigen Geschwindigkeit durch Kollisionsprüfung

#### 4.1 Zusammenhang Messzyklus - Abstand - Geschwindigkeit

Die Norm DIN EN ISO 13855 „Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen“ beinhaltet Berechnungsgrundlagen und -formeln, die auch für das vorgestellte Sensorkonzept genutzt werden können.

##### Mindestabstand

Die DIN EN ISO 13855 gibt für die Ermittlung des Mindestabstands „S“ die Berechnungsformel  $S = (K * T) + C$  vor.

- $K$  : Faktor für die Annäherungsgeschwindigkeit eines Menschen
- $T$  : Nachlaufzeit
- $C$  : Eindringtiefe in den Gefahrenbereich bis zur Detektion

Der Faktor  $K$  beträgt bei weniger als 500mm Mindestabstand  $2 \frac{m}{s}$ , ansonsten  $1,6 \frac{m}{s}$ . Hinzu kommt die Geschwindigkeit des Roboters selbst. Nach der erwähnten Norm besteht die Nachlaufzeit  $T$  eines Systems aus der Zeit zwischen Auslösen des Sensorsystems und dem Stillstand der Maschine. Im Projekt wird für  $T$  einen Wert von 100 ms angenommen. Da die Sensoren Finger erkennen können, kann  $C$  auf 0mm gesetzt werden. Bei stillstehendem Roboter ergibt sich ein Mindestabstand von

$$S = (2 \frac{m}{s} * 100ms) + 0mm = 200mm$$

##### Geschwindigkeit

Die erlaubte Geschwindigkeit des Roboters ist auf zwei Teilstrecken linear. Eine grafische Darstellung des Zusammenhangs bis zur maximalen Messreichweite von 600 mm zeigt Bild 7.

Danach darf sich der Roboter bei 60 cm freiem Raum mit maximal  $4,4 \frac{m}{s}$  bewegen.

#### 4.2 Fail Safe Control

Um das sichere Abbremsen des Roboters vor einer Kollision zu kontrollieren, wird im IFA die in Bild 8 dargestellte „Fail Safe Control“ (FSC) entwickelt. Um dies zu erreichen, werden die Sensorwerte zu einer Umgebungskarte zusammengefügt und diese Karte mit der Roboterbewegung abgeglichen. Diese Maßnahmen sind sicherheitsrelevant und müssen deshalb in Echtzeit durchgeführt werden.

Die Eingaben in die FSC erfolgen

- durch die Ultraschallsensoren, die alle 60 ms ihre Distanzwerte liefern
- durch den Roboter selbst, dessen Steuerung
- alle 2 ms die eigene Position liefert
- alle 10 ms die nächste anzufahrende Position liefert
- durch einen weiteren Programmteil, der einmalig die statischen Objekte der Umgebung liefert

Ausgegeben werden die Werte für die maximalen Geschwindigkeiten der Achsen, die alle 10 ms bereitgestellt werden.



BILD 7: Zusammenhang „aktueller Abstand - maximal erlaubte Geschwindigkeit“ für eine Reaktionszeit von 100 ms

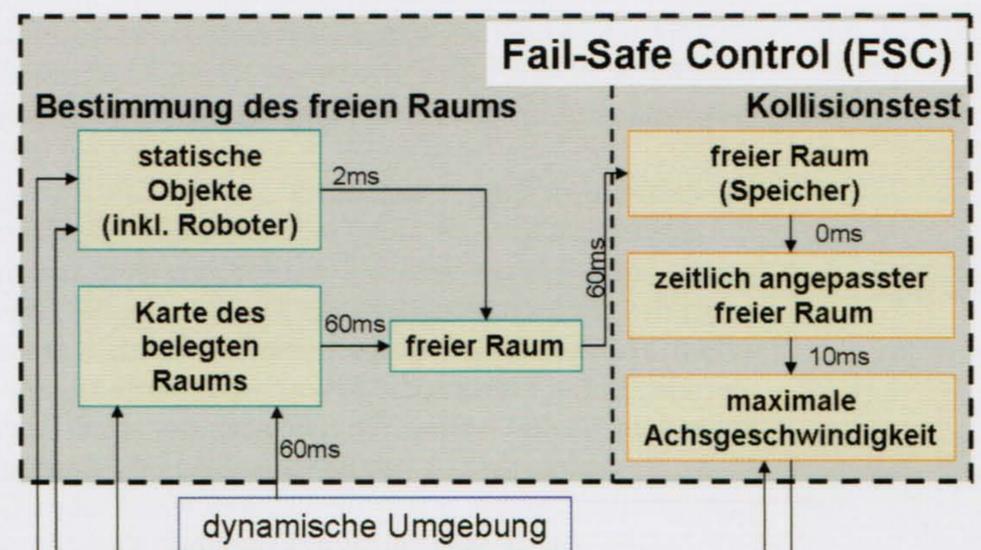


BILD 8: Zeitlicher Ablauf der Berechnungen

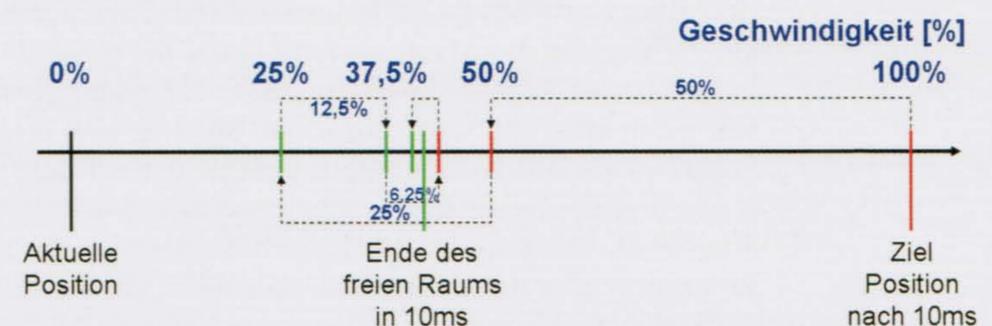


BILD 9: Bahnkurvenabhängige Berechnung der aktuell zulässigen Geschwindigkeit

## 4.3 Bestimmung des freien Raums

Der freie Raum (siehe Bild 6) entsteht aus den Bereichen, die die Sensoren als frei von Objekten identifizieren. Der Abstand des Roboters von den Außengrenzen des freien Raumes bestimmt grundsätzlich die zulässige Geschwindigkeit des Roboters. Es ist allerdings wichtig zu unterscheiden, ob diese Grenzen durch statische Hindernisse beziehungsweise durch den Arbeitsplatz selbst entstehen, oder ob dynamische Hindernisse den freien Raum einschränken.

Die Geschwindigkeit des Roboters soll nur gegenüber dynamischen Hindernissen, zum Beispiel Bedienern, verringert werden, damit die maximal zulässige Geschwindigkeit nur dort, wo es sicherheitstechnisch erforderlich ist, eingeschränkt wird. Statische Hindernisse, beispielsweise Arbeitstische, sind bereits heute durch andere Funktionen der Robotersteuerung, wie Softwaresocken, abgesichert. Auch muss gegenüber einem statischen Objekt kein Sicherheitsabstand eingehalten werden.

Bei der Messung mit Ultraschall ist es allerdings nicht möglich, einzelne Objekte direkt zu unterscheiden. Auch ist die Auflösung des geplanten Sensornetzwerks zu gering, um die Form von Objekten zu erkennen und gegebenenfalls zuzuordnen. Wegen der angeführten Vorgabe wird aber eine Funktion benötigt, die es dem Programm erlaubt, zwischen statischen und dynamischen Hindernissen zu unterscheiden. Eine solche Möglichkeit bietet die Hintergrundausblendung. Hierbei muss die statische Umgebung des Roboters bekannt sein und dann bei der Auswertung der Sensorwerte ausgeblendet werden.

### Karte der statischen Umgebung

Bei einem Roboter, der keine selbstständige Änderung an seiner einprogrammierten Bahn (Trajektorie) vornimmt, kann die geplante vorgegebene Trajektorie, die die statischen Hindernisse bereits berücksichtigt, abgefahren werden. Dabei können die Erwartungswerte für die Sensoren eingelernt werden. Ein Roboter, der seine Trajektorie an Fremdobjekte in seiner Umgebung dynamisch anpasst, muss dagegen mit einer Karte der statischen Objekte arbeiten, um diese von dynamischen Objekten unterscheiden zu können. Hierbei kann benutzt werden:

- ein Modell aller statischen Objekte im Raum  
oder
- ein Modell des freien, befahrbaren Raums

Die vorhandenen Ultraschallsensoren bieten die Konstruktion einer Karte des freien Raums als den einfacheren Weg an. Zu Beginn der Messung wird dazu der gesamte, von dynamischen Objekten befreite Raum als belegt „gesetzt“. Mit jeder Messung wird dann der Bereich, den einzelne Sensoren als frei zurückliefern vom belegten Raum abgezogen und der Arbeitsraum schrittweise in das Programm eingelernt. Der Roboter wird hierfür entweder durch ein Programm oder durch den Bediener selbst gesteuert. Wird der Raum mit Hilfe eines Bedieners eingelernt, ist eine grafische Darstellung von Raum, Roboter und Sensormesswerten nötig. Zur statischen Umgebung gehört bei der dynamischen Anpassung auch der Roboter selbst. Sensoren, die am ersten Arm angebracht sind, erkennen ab einem bestimmten Winkel der Gelenke den zweiten Arm, beziehungsweise das Werkzeug des Roboters. Auch diese Werte müssen aus der Kollisionberechnung ausgeschlossen werden.

## 4.4 Kollisionstest

Der Kollisionstest erfolgt, wie auch die Sensormessung, zyklisch. Die Dauer eines einzelnen Tests ist jedoch geringer als die Dauer der Messung. Deshalb ist es möglich, mehrere Kollisionsprüfungen pro Messzyklus durchzuführen. Hieraus ergibt sich, dass die Annahmen über den freien Raum, die vor dem ersten Kollisionstests gemessen wurden, für den zweiten Kollisionstest in einem Zyklus nicht mehr aktuell sind. Um jederzeit mit sicheren Werten arbeiten zu können, müssen die Sensorwerte deshalb an die Zeit angepasst werden, die vergangen sein wird, wenn die errechnete Geschwindigkeitsvorgabe angewendet wird. Damit kann berücksichtigt werden, dass sich dynamische Objekte in der Zwischenzeit dem Roboterarm genähert haben können. Mit dem zeitlich angepassten Raum muss eine Kollisionsprüfung durchgeführt werden, bei der üblicherweise der geringste Abstand zwischen Roboter und Umgebung bestimmt wird.

Für diesen Kollisionstest wurden zahlreiche Algorithmen entwickelt, die aber größtenteils auf dem Hintergrund der Pfadplanung basieren. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine performantere Lösung entwickelt, die allein auf die Kollisionsüberwachung spezialisiert ist.

### Abgleich freier Raum und Bewegungsvorhersage – Berechnung der Geschwindigkeit

Eine große Herausforderung bei der dynamischen Bewegungsplanung industrieller 6-Achsen-Roboter ist die Kollisionsprüfung mit Hindernissen in seiner Umgebung. Alle sechs Achsen können sich unabhängig von einander bewegen und die Bewegung einzelner Glieder ist von allen davorliegenden Achsen abhängig. Auch können bestimmte Positionen des Werkzeugs durch eine Vielzahl von Achskombinationen erreicht werden.

Während sich die prozessorientierte Pfadplanung im Projekt auf die Kollisionsprüfung des Roboterwerkzeugs allein konzentrieren kann – um hierdurch den Aufwand der Berechnungen in Grenzen zu halten – muss die sicherheitsgerichtete Kollisionsüberwachung stets den kompletten Roboter überwachen. Es wird im Projekt deshalb davon ausgegangen, dass eine Überwachung aller denkbaren Zustände, die der Roboter und die manipulierten Werkstücke theoretisch einnehmen können, nicht in Echtzeit erfolgen kann, weil die zu verarbeitende Datenmenge zu groß ist.

Dieses Problem wurde in diesem Projektteil elegant über eine „Bewegungsvorhersage“ gelöst. Die sicherheitstechnische Überwachung greift nicht in die Pfadplanung des Roboters selbst ein. Sie regelt nur dessen Geschwindigkeit innerhalb des durch die Pfadplanung vorgegebenen Pfads. Aus sicherheitstechnischer Sicht ist es ausreichend, nur den Raum um diesen speziellen Pfad zu überwachen. Dazu wird der Kollisionssteuerung regelmäßig die der Pfadsteuerung bekannte aktuelle Stellung aller Achsen sowie die nächste anzufahrende Position des Roboters übermittelt. Der mathematische Aufwand zur Kollisionserkennung wird damit auf ein Minimum reduziert, und die sicherheitstechnische Steuerung des Roboters kann in Echtzeit erfolgen.

Bild 9 zeigt den Ablauf des Algorithmus graphisch. Die Überwachung prüft als erstes, ob im nächsten Überwa-

chungszyklus (geplant 10 ms bis 100 ms) eine Kollision mit der Umgebung vorliegt, wenn der Roboter mit maximaler Geschwindigkeit in die geplante Richtung bewegt wird. Ist dies nicht der Fall, wird die maximale benötigte Geschwindigkeit der Achsen erlaubt.

Falls eine Kollision droht, wird die Geschwindigkeit aller Achsen auf 50 % der geplanten Bahngeschwindigkeit reduziert, und eine neue Kollisionsprüfung findet statt. Hiernach wird die Geschwindigkeit iterativ um 50 % der vorhergehenden Anpassung erhöht, beziehungsweise vermindert, je nachdem ob eine Kollision festgestellt wurde.

Dieser Algorithmus führt nach nur 10 Kollisionsprüfungen zu einer Genauigkeit von 0,1 % bei der Festlegung der maximal erlaubten Geschwindigkeit. Mit dieser Geschwindigkeitsvorgabe kann die Robotersteuerung kollisionsfrei fahren. Das korrekte Einhalten der Geschwindigkeitswerte erfolgt durch die Sicherheitssteuerung. Um die geplante Bahn nicht zu verlassen, muss diese in der Lage sein, alle Motoren auf die errechnete Geschwindigkeit hin zu überwachen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Das vorgestellte System beschreibt ein Sicherheitskonzept für kollaborierende Roboter. Als Sensorik werden Ultraschallsensoren eingesetzt, die ein Sicherheitsfeld um den Roboter aufspannen. Es wird dargestellt, wie diese Sensoren parallel messen können, ohne die Messergebnisse zur unsicheren Seite hin zu verfälschen. Die vorgestellten Algorithmen lassen sich in der Regel einfach in bestehende Roboterarbeitsplätze integrieren, in den meisten Fällen sogar ohne Änderungen an den vorhandenen Prozesssteuerungen zu erfordern. Eine voraus-

schauende Kollisionsprüfung wird vorgestellt, die den Rechenaufwand für Geschwindigkeitsvorgaben auf ein Minimum reduziert. Dadurch können Kollisionsprüfungen in sehr kurzer Zykluszeit erfolgen.

MANUSKRIPTEINGANG  
09.09.2010

Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

## REFERENZEN

- [1] United States Patent 2988237, Inventors: Devol Jr., George C.
- [2] Philadelphia Inquirer - August 11, 1983 - A10 NATIONAL
- [3] IFR Statistical Department, World Robotics 2010  
([http://www.worldrobotics.org/downloads/2009\\_executive\\_summary.pdf](http://www.worldrobotics.org/downloads/2009_executive_summary.pdf))
- [4] Datenbank BG-PRÜFZERT – tested products  
(<http://www.hvbg-service.de/pruefz.tpl/produkt.htm>)
- [5] Pilz SafetyEye – (<http://www.pilz.de/company/press/messages/sub/products/articles/00951>)
- [6] Little brother is protecting you, Der Arbeits- und Gesundheitsschutz entdeckt die Transponder-Technologie (Teil 1), holzinfo 132 Oktober – Dezember 2008
- [7] The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments, The Industrial Robot Band 34 (2007) Heft 5, Seite 376-385, A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C Ott, A Stemmer, T Wimböck, G Hirzinger; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Germany
- [8] Technische Voraussetzungen zur Mensch-Roboter Kooperation, P. Heiligensetzer, ([http://www.bg-metall.de/fileadmin/downloads/FA\\_MFS/Symposien/Praesentation\\_\\_KUKA.pdf](http://www.bg-metall.de/fileadmin/downloads/FA_MFS/Symposien/Praesentation__KUKA.pdf))
- [9] rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments, MORPHA, E. Helms, R. D. Schraft and M. Hägele, 2002
- [10] Industrial jointed arm robot evading dynamic objects, Master Thesis, Björn Ostermann, ([http://www.maschinenbautage.eu/fileadmin/veroeffentlichungen/Master\\_Thesis\\_Bjoern\\_Ostermann.pdf](http://www.maschinenbautage.eu/fileadmin/veroeffentlichungen/Master_Thesis_Bjoern_Ostermann.pdf))

## AUTOREN



M.Sc. Dipl.-Ing. (FH)  
**BJÖRN OSTERMANN**  
(geb. 1980) hat 2009 den „Master of Science in Autonomous Systems“ erworben. Zurzeit promoviert er zum Thema kollaborierende Roboter an

der Bergischen Universität Wuppertal im Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit. Die Arbeit wird am Institut für Arbeitsschutz (IFA) durchgeführt.

**Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)**  
Fachbereich 5: Unfallverhütung / Produktsicherheit,  
Alte Heerstrasse 111, D-53757 Sankt Augustin,  
Tel. +49 (0) 2241 231 26 70,  
E-Mail: [Bjoern.Ostermann@dguv.de](mailto:Bjoern.Ostermann@dguv.de)



Dr. **MICHAEL HUELKE**  
(geb. 1959) ist Dipl.-Ing. (TU) Elektrotechnik. Er leitet im Fachbereich 5 „Unfallverhütung – Produktsicherheit“ das Referat „Neue Technologien,

Mensch und Technik“ mit den Schwerpunkten Funktionale Sicherheit sowie biomechanische und kognitive Mensch-Maschine-Schnittstellen.

**Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)**  
Fachbereich 5: Unfallverhütung / Produktsicherheit,  
Alte Heerstrasse 111, D-53757 Sankt Augustin,  
Tel. +49 (0) 2241 231 26 44  
E-Mail: [Michael.Huelke@dguv.de](mailto:Michael.Huelke@dguv.de)



Prof. Dr.-Ing.-habil.  
**ANKE KAHL**  
(geb. 1969) leitet an der Bergischen Universität Wuppertal im Fachbereich D das Fachgebiet Sicherheitstechnik/ Arbeitssicherheit.

Zu ihren Gebieten gehört Methodik der Arbeitssicherheit, Arbeitsschutz, und Gefahrstoffmanagement. Sie ist unter anderem Mitglied im Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) am BMAS.

**Bergische Universität Wuppertal,**  
FB D, Fachgebiet Sicherheitstechnik/  
Arbeitssicherheit,  
Gaußstraße 20, D-42119 Wuppertal,  
Tel. +49 (0) 202 439 20 53,  
E-Mail: [akahl@uni-wuppertal.de](mailto:akahl@uni-wuppertal.de)