

**Robotereinsatz
in der
werkstatorientierten Fertigung**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Daniel Hahn
geboren am 08.12.1969 in Stuttgart

2007

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Friedrich - Wilhelm Bach

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Paul Drews

Tag der mündlichen Prüfung: 26.11.2007

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der APS GmbH, dem Europäischen Centrum für Mechatronik in Aachen.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. E. Reithmeier für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Professor Dr.-Ing. Fr.-W. Bach, Leiter des Instituts für Werkstoffkunde in Hannover, für die großzügige Förderung sowie für das Interesse, das er der Arbeit entgegenbrachte.

Herrn Professor Dr.-Ing. P. Drews danke ich besonders für seine wertvollen Anregungen zu dieser Arbeit sowie die stete Unterstützung während der Forschungstätigkeiten.

Ferner danke ich allen Kollegen und studentischen Mitarbeiter, die mit engagierten Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dies gilt insbesondere für Herr Prof. Dr.-Ing. Günther Starke, Herr Dipl.-Ing. Christoph Dreyer, Herr Dipl.-Ing. Michael Brüninghaus, Herr Dipl.-Ing. Michael Bellwied, Herr Dipl.-Ing. Marcus Hellmich und Herr Dipl.-Ing. Richard Rudolf.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir diesen Weg ermöglicht hat.

Aachen, im Dezember 2007

Daniel Hahn

Kurzfassung

Der vorliegende Ansatz soll dazu beitragen, die Lücke zwischen vollautomatisierten und manuellen Fertigungsaufgaben zu schließen. Damit diese Vision Realität werden kann, müssen Roboter in der Lage sein, Arbeitsanweisungen des Werkers auf ihm vertrautem fertigungstechnologischem Niveau zu verstehen, sie planerisch durch integrierte Intelligenz zu einem lauffähigen Maschinenprogramm umzusetzen und die gewünschten Arbeitsschritte, angepasst an die jeweilige Fertigungsumgebung, auszuführen. Als Ergebnis wurde eine multimediale, mobil einsetzbare Programmier- und Instruktionsplattform mit Überwachungs- und Servicefunktionen geschaffen, die für Produktionseinrichtungen in der schweißtechnischen Fertigung adaptiert und einsetzbar ist.

Stichworte: Mensch-Roboter-Interaktion, Intuitive Roboterprogrammierung, Kleinserienfertigung

Abstract

The presented approach attempts to bridge the gap between automated, mass-production techniques and labour intensive, manual-based manufacturing. Developed for the production environment, it targets small batch production for a welding manufacturing process. The innovative concept described, involves programming robots using a 6 DOF-Pointer and wearable computer technology; the latter providing additional benefits by supporting monitoring and service functions. A collision avoidance system is incorporated to provide a safe environment for human-robot cooperation.

Keywords: Human-Machine-Interaction, Intuitive Robot Programming, Small Batch Production

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Ausgangssituation	4
2.1	Robotik und Automatisierung.....	4
2.2	Stand der Forschung	6
3	Konzeption	20
3.1	Schwerpunktbereiche	20
3.2	Konzeptionelle Aufgabenfelder.....	22
3.2.1	Intuitives Programmieren mit einem 6D-Zeiger	22
3.2.2	Nutzerzentrierte Zuordnung der Prozesstechnologie.....	22
3.2.3	Automatische Generierung der Roboterprogramme	23
3.2.4	Prozessüberwachung	24
3.2.5	Sichere Mensch-Roboter-Kooperation.....	24
3.2.6	Unterstützung von Service-Tätigkeiten	25
4	Programmieren durch Zeigen	26
4.1	Integrierte Sensorik.....	26
4.1.1	Richtungswinkel.....	26
4.1.2	Neigungswinkel.....	27
4.1.3	Entfernungsmessung.....	28
4.2	Transformationen.....	29
4.2.1	Transformation vom Sensor- in das Stativkoordinatensystem.....	30
4.2.2	Referenzkoordinatensystem	32
4.3	Aufbau der Sensorsteuerelektronik.....	35
4.4	Nutzerinteraktion mit dem 6D-Zeiger	35

5	Dynamische Kollisionsvermeidung	37
5.1	Konzept einer dynamischen Arbeitsraumüberwachung.....	37
5.2	Funktionsweise der Lasersensoren	38
5.3	Software zum Auslesen der Sensordaten.....	40
5.4	Unterscheidung kollisionsgefährdeter und –freier Objekte	41
5.5	Bedienoberfläche der Objekterkennung	42
5.6	Bahnplanung des Flächenportalroboters	43
6	Nutzerorientierte Kommunikationsplattform	45
6.1	Integration tragbarer PC-Technik in die Fertigungszelle.....	45
6.2	Anwendung tragbarer Computertechnik	45
6.3	Ergonomische Gestaltung der Nutzerschnittstelle	46
6.4	Umsetzung der Kommunikationsplattform	47
7	Integration und Erprobung in einer Schweißfertigungszelle.....	50
7.1	Struktureller Aufbau des Gesamtsystems.....	50
7.2	Systemkomponenten und Rahmenbedingungen.....	52
7.2.1	Robotersystem	52
7.3	Steuerung des Industrieroboters.....	55
7.3.1	Lasersensorik zur Nahtdetektion und Prozessführung	55
7.3.2	Vorversuche zum Aufbau des Sensorsystems	56
7.3.3	Konstruktion eines Sensorgehäuses	58
7.3.4	Sensorausrichtung und Schaltdistanzen.....	59
7.3.5	Verifikation der Werkstückposition zur Kollisionsvermeidung.....	60
7.3.6	Suchoperation und Verifikation der Werkstückgeometrie	61
7.3.7	Programmablauf des Industrieroboters.....	68
7.4	Wiederholgenauigkeit des Flächenportalroboters.....	69
7.5	Zuordnung der Prozesstechnologie und Parameter	70
7.6	Interaktive Organisation der Arbeitsprozesse	73

7.7	Prozessüberwachung mit tragbarer Kommunikationsplattform.....	74
7.8	Unterstützung der Nutzer im Service-Fall	76
7.9	Evaluierung der Ergebnisse.....	78
7.9.1	Messbereich und Kalibrierung der Werkstücke	78
7.9.2	Verifikation der Werkstückposition und Trajektoriengenerierung.....	81
7.9.3	Genauigkeit des Gesamtsystems	83
7.9.4	Arbeitsraumüberwachung und Ausweichbewegung	83
7.9.5	Integrierte Sicherheitsvorkehrungen bei der Mensch/Roboter- Koexistenz	87
7.9.6	Prozessüberwachung mit tragbarer Computerplattform	88
8	Zusammenfassung und Ausblick	90
9	Abbildungsverzeichnis	92
10	Tabellenverzeichnis.....	94
11	Abkürzungsverzeichnis	95
12	Literaturverzeichnis.....	97

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine stellt eine der größten Herausforderungen in der Technik dar. Im Bereich der Robotik wird versucht, die Effektivität dieser Interaktion zu optimieren. Daher wird eine Schnittstelle postuliert, welche vom Menschen intuitiv, also ohne langjährige technische Ausbildung, zu benutzen ist. Als besonders problematisch stellt sich hierbei die bidirektionale Kommunikation dar, d.h. die Art und Weise des Informations- und Instruktionaustausches zwischen Werker und Maschine.

Die heute üblicherweise in der Produktion eingesetzte Robotertechnik ist stationär in Fertigungszellen oder Fertigungslinien eingebunden, wobei die zu fertigenden Werkstücke bedarfsabhängig nach einem festgelegten Arbeits- und Materialflussschema in den Fertigungseinrichtungen bearbeitet werden. Ändern sich Teilaufgaben, so muss in den meisten Fällen eine Umprogrammierung des Robotersystems vorgenommen werden. Dies bedeutet erneute Einricht- und Anpassarbeiten, während derer das System nicht zur Produktion beitragen kann.

Alternativ zur klassischen Programmierung der Roboter im Online-Modus bieten heutige Offline-Programmiersysteme vielfältige Unterstützung bei der Beschreibung von Bearbeitungsaufgaben. Neben der Programmierung der Bearbeitungsabläufe ermöglichen integrierte Simulationswerkzeuge auch eine Erstellung von Trajektorien am Bildschirmarbeitsplatz. Mehrere Simulationsstudien in Verbindung mit teilweise bereits integrierten Optimierungsmethoden führen schließlich zu einem fest definierten Ablaufschema. Dieses muss in der Fertigungsstation an die gegebenen Bedingungen angepasst werden, um einen störungsfreien Ablauf im realen Produktionsumfeld zu gewährleisten. Entscheidender Nachteil bei sowohl der Offline- als auch der Online-Programmierung ist deren unzureichende Flexibilität in der Anwendung. Ändern sich Arbeitsabläufe oder fällt beispielsweise ein Gerät infolge eines Schadens oder einer Störung aus, stoppt die Fertigung, oder es muss im schlimmsten Fall ein neues, vollständiges Bearbeitungsprogramm erstellt werden. Entsprechend ist die Produktionsorganisation reglementiert, und die Möglichkeiten zur flexiblen Umgestaltung sind eingeschränkt. Derart „starre“ Automatisierungslösungen sind jedoch für eine wirtschaftliche Fertigung mit Robotern für Klein- und Kleinstserien bis hin zur Fertigung von Losgröße 1 ungeeignet. Es fehlt an

Flexibilität und der Möglichkeit, Robotersysteme bedarfsabhängig rekonfigurierbar einzusetzen. Es stellt sich die Frage, wie der Mensch mit seinen spezifischen Fähigkeiten gerade bei kleinen Produktionsvolumina sinnvoll in den Produktionsprozess integriert werden kann. Dabei fallen gerade bei der Kleinserienfertigung eine Vielzahl an unterschiedlichen Informationen über den Fertigungsprozess an. Herkömmliche Methoden sind oftmals ungeeignet, diese Informationen zu erfassen, zu strukturieren, aufzubereiten und dem Menschen zur Verfügung zu stellen.

Seitens der Anwender besteht daher Handlungsbedarf in folgenden Punkten:

- Steigerung der Flexibilität von Robotern
- Wirtschaftlicher Einsatz von Robotern bei kleinen Losgrößen
- Schnelle Umrüstung auf andere Aufgaben ohne Roboterspezialisten
- Ablaufoptimierung des Roboters zwischen verschiedenen Arbeitspositionen
- Neue Strategien zur Prozessüberwachung
- Unterstützung der Nutzer im Service-Fall
- Sichere Mensch-Roboter-Kooperation in einem gemeinsamen Arbeitsraum

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, Technologien zu erforschen und nutzbar zu machen, die einen flexiblen Einsatz von Robotern in einer werkstatorientierten Fertigung für eine Kleinserienfertigung bis Losgröße 1 ermöglichen. Fertigungssysteme sollen den Werker bei seiner Arbeit unterstützen und auf diese Weise eine Automatisierung von Fertigungsaufgaben erlauben.

In diesem Zusammenhang soll eine neuartige Programmierstrategie entwickelt werden, die in einem von Menschen und Roboter gemeinsam genutzten Arbeitsraum am Werkstück durchführbar ist. Hierzu müssen Sicherheitsvorkehrungen zum Schutz des Menschen entwickelt werden verbunden mit einer intuitiven Programmierung. Eine icon-basierte Technologiezuweisung, das Beschreiben der gewünschten Werkzeugbewegungen durch „Zeigen“ am Bauteil mit einem 6D-Hybridsensorsystem sowie der Einsatz von „wearable Computer“, also tragbarer Rechner-technologie

als mobiler Informations- und Kommunikationsplattform, sollen dies ermöglichen. Um die so programmierten Informationen in ein Roboterprogramm umsetzen zu können, muss „planerische, rekonfigurierbare Intelligenz“ im Roboter selbst verfügbar sein.

Ein weiteres Ziel besteht darin, die gerade bei kleinen Losgrößen auftretende Vielzahl kritischer Parameter echtzeitnah zu erfassen und auszuwerten, ohne dass der Werker seine Aufmerksamkeit auf den aktuellen Fertigungsprozess richten muss. Service-Prozesse lassen sich auf hierbei zwei Arten unterstützen: der Werker kann entweder gezielten Zugriff auf Informationen erhalten, oder er kann über ein multimediales Konferenzmodul einen externen Experten konsultieren.

Angestrebt wird ein flexibler Einsatz der neuartigen Technik für punkt-, bahn- und flächenorientierte Bearbeitungsprozesse wie Schweißen, Schneiden, Polieren, Schleifen, Entgraten, Beschichten, etc. Besondere Vorteile werden dabei vor allem für kleine und mittlere Unternehmen erwartet, die bislang auf die Nutzung der Robotertechnik wegen unzureichender Einsatzflexibilität und fehlendem qualifizierten Roboterbedienpersonal verzichten mussten.

Als Ergebnis soll beispielhaft aufgezeigt werden, wie Robotertechnik in der werkstatorientierten Fertigung integriert werden kann. Das System soll für Produktionseinrichtungen in der schweißtechnischen Fertigung adaptiert und einsetzbar sein.

2 Ausgangssituation

Dieses Kapitel gibt einen detaillierten Überblick über den Stand der Technik und Stand der Forschung mit den Schwerpunkten Mensch-Maschine-Interaktion, Wearable Computing sowie Robotik und Automatisierung mit Schwerpunkt Klein- und Kleinstserienfertigung.

2.1 Robotik und Automatisierung

Roboter sind heutzutage unverzichtbare Werkzeuge in vielen Bereichen der Industrie. Ihre Zuverlässigkeit und Schnelligkeit in der Fertigung erlauben eine hohe Wirtschaftlichkeit und Qualität. Aus diesen Gründen ist die Nutzung von Industrierobotersystemen in den letzten Jahren weiterhin beträchtlich angestiegen, weltweit wurden im Jahr 2005 etwa 121.000 Geräte installiert [1], dies entspricht einem Zuwachs von 25 % gegenüber 2004.

Theoretisch ist der Einsatz von Robotern aufgrund ihrer Flexibilität und Programmierbarkeit besonders für häufig wechselnde Fertigungsaufgaben geeignet. Jedoch wurden in den vergangenen Jahrzehnten Industrieroboter hauptsächlich in der Großserienfertigung eingesetzt. Dies hatte eine entsprechende technische Fokussierung der Systeme und ihrer Fähigkeiten zur Folge. Hierbei wird deutlich, dass Roboter aufgrund ihrer derzeitigen technischen Gestaltung ihre Rationalisierungseffekte erst bei einer bestimmten Seriengröße entfalten können und ihr Einsatz in der Einzel- und Kleinserienfertigung weniger vorteilhaft ist [2].

Ein Haupthindernis für eine wirtschaftliche Nutzung von Robotern in der Klein- und Kleinstserienfertigung liegt in deren oftmals unflexiblen und umständlichen Programmierung. Sie ist entweder offline oder online durchführbar. Kombinationen dieser beiden Varianten kommen auch zum Einsatz. Ein Hauptunterscheidungsmerkmal der Programmiermethoden besteht darin, dass im Gegensatz zur Online-Methode die Offline-Methode ausschließlich am PC stattfinden kann. Während der Offline-Programmierung kann der Roboter Produktionsaufgaben erfüllen und bei kompletter Fertigstellung eines neuen Programms erfolgt eine Übertragung auf die Steuerung des Roboters sowie die Umrüstung für die neue Aufgabe.

Dabei wird deutlich, dass aus Kosten- und Zeitgründen die bisherigen Konzepte für die Klein- und Kleinstserienfertigung nicht übertragbar sind. Die Hauptbeweggründe für die Einführung einer flexiblen Fertigungsautomatisierung sind:

1. Kostenreduktion

Die Arbeitskosten haben einen hohen Anteil an den Gesamtkosten in der Fertigung. Deshalb ist eine Reduzierung dieser Kosten ein wichtiger Beweggrund. Im Allgemeinen gibt es mehrere Wege, um Arbeitskosten zu reduzieren:

Reduzierung des Fertigungsaufwands, indem die Anzahl der zu fertigenden Teile designtechnisch verringert wird. Dies ist unabhängig von dem Automatisierungsgrad des Produktes.

Eine Anpassung der Fertigungsabläufe kann zu einer erhöhten Effizienz durch verkürzte Laufwege oder Vermeidung von Zwischenlagerungen führen.

Verringerung des manuellen Arbeitsanteils mit weniger Nacharbeit durch die Automatisierung von Fertigungsschritten.

2. Hohe und konstante Qualität

In einer Produktionsumgebung mit hohem Anteil an manueller Fertigung können durch den Faktor Mensch Fehler entstehen. Es gibt verschiedene Strategien, um dies zu vermeiden:

Durch Produktdesign, Inspektionen und eine Anpassung der Fertigungszelle kann die Anzahl der Fehler im Produktionsprozess verringert werden.

Eine optimal integrierte Automatisierungsstrategie liefert eine hohe und reproduzierbare Fertigungsqualität.

Neben den Hauptbeweggründen gibt es noch die technische Notwendigkeit zur Automatisierung, beispielsweise wenn die Sensorik den menschlichen Sinnen überlegen ist oder die Umgebungsbedingungen dies erfordern (Reinräume, Strahlenbelastung, etc.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bisher Potentiale in der Klein- und Kleinstserienfertigung weitgehend ungenutzt bleiben. Die Gründe hierfür liegen bei nicht zur Verfügung stehenden Programmierverfahren, die für die

Werkstattfertigung meist ungeeignet sind. Deshalb ist der wirtschaftliche Einsatz von Robotern in der Kleinserienfertigung oder sogar bei Losgröße 1 aufgrund der zeitaufwändigen Programmierung schwierig. Kleine und mittlere Unternehmen setzen wegen der aufwändigen Programmierung nur bedingt Robotertechnik ein. Allerdings zwingen immer kürzer werdende Produktzyklen sowie zunehmender Preis- und Konkurrenzdruck bei steigenden Qualitätsanforderungen die produzierende Industrie zu stetiger Rationalisierung durch flexiblen Einsatz von Maschinen und Robotern.

2.2 Stand der Forschung

Die Forschung und Entwicklung der Robotik im Bereich der Fertigung bediente sich innerhalb der letzten Jahre verschiedener Basistechnologien und Schlüsselkomponenten und konnte auf diese Weise eine Reihe von interessanten Systemlösungen für unterschiedliche Fertigungsaufgaben realisieren. Trotz vielfacher Fortschritte ist die Integration in die Fertigung unbefriedigend, und viele Problemstellungen sind in Verbindung mit Automatisierungslösungen für geringe Losgrößen bislang noch unzureichend gelöst. Obwohl die Basistechnologien durchweg verfügbar sind, fehlt es an Entwicklungen, die den bewährten Industrierobotern neben Mobilität, sensorischen Fähigkeiten und leistungsfähiger Steuerungstechnik eine entsprechende „Intelligenz“ und Eigenständigkeit verleihen, damit sie in der Lage sind, den Werker in der Fertigung orts- und bedarfsflexibel bei seiner Arbeit zu unterstützen.

Eine zentrale Voraussetzung ist die Verfügbarkeit flexibel einsetzbarer und einfach zu rekonfigurierender Fertigungssysteme. Entwicklungs- und Forschungsinitiativen wie SMARTKOM [3] und MORPHA [4] haben diesbezüglich zahlreiche Lösungsansätze für die Kooperation von Mensch und Maschine unter Einbeziehung von Sprache, Gestik und Haptik sowie neue Instruktions- und Lernfähigkeiten geliefert. Weiterhin konnte das EU-Projekt NOMAD, welches einen 6-Achs-Roboterarm auf einer mobilen Plattform zum Schweißen von großen Stahlkonstruktionen verwendet [5], hier bereits entsprechende Impulse setzen. Dennoch fehlt es an systemintegrierter Intelligenz und Autonomie der Robotertechnik, um auf aufwändige Mess-Sensorik und komplexe Offline-Programmierverfahren verzichten zu können.

Im Sonderforschungsbereich 588 „Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter“ [6, 7] werden Konzepte, Methoden und Komponenten für humanoide Roboter entwickelt, die ihren Arbeitsbereich mit

dem Menschen teilen. Diese „teilanthropomorphe Robotersysteme“ sollen den Schritt zu kooperierenden, multimodalen und lernenden Robotersystemen vollziehen. Damit das Robotersystem dem Menschen ein hilfreicher Assistent im Alltag sein kann, muss es über vielfältige komplexe Fähigkeiten und Eigenschaften verfügen. Dabei bestehen Forschungsschwerpunkte im Bereich der Entwicklung mechatronischer Komponenten und der Konstruktion eines Demonstratorsystems, der Perzeption von Benutzer und Umgebung, der Modellierung und Simulation von Roboter, Umgebung und Benutzer, sowie der Mensch-Roboter-Kooperation und dem Lernen auf unterschiedlichen Verhaltensebenen.

Im Projekt MEPHISTO [8] wird ein Navigationssystem für mobile Plattformen in belebten, veränderlichen Umgebungen entwickelt. Im Vordergrund der Entwicklung steht eine verteilte, skalierbare und erweiterbare Architektur für das Navigationssystem, die Algorithmen zur Fusion der unterschiedlichen Sensoren und speziell angepasste Bahnplanungsmethoden für Einzelfahrzeuge sowie Fahrzeugflotten. Das Grundkonzept sieht externe, im Gebäude verteilte sowie fest installierte Sensoren vor, welche die Fähigkeiten der lokalen, mobilen Sensorsysteme durch globale Sichten ergänzen und somit verbessern. Die durch die Sensorsysteme gewonnene Umweltinformation wird mit Sensorinformationen der mobilen Plattformen in einem Umweltmodell fusioniert. Das Umweltmodell dient wiederum einem verteilten Bahnplaner als Ausgangsbasis. Die Bahnplanung erstellt günstige Fahrtrouten für mehrere mobile Plattformen.

Autonome Unterwasserfahrzeuge gewinnen als universelles Werkzeug sowohl in der Meeresforschung als auch bei industriellen Unterwasseranwendungen zunehmend an Bedeutung. Für die Entwicklung eines automatischen Kartierungs- und Probenentnahmesystems sind grundlegende Probleme zur autonomen Navigation zu lösen. Im Europäischen Projekt Seebee [9, 10] wird untersucht, wie der autonome Unterwasserroboter einen vordefinierten Pfad für Probenentnahme und Aufzeichnung von Umgebungsdaten verfolgen kann.

Der Sonderforschungsbereich 562 „Robotersysteme zur Handhabung und Montage“ [11, 12] erforscht innerhalb des Teilprojektes B4 eine automatisierte Programmierung von Robotern im Bereich der Handhabung und Montage sowie eine Simulation von Roboterarbeiten. Dabei wurde eine innovative Notation für kinematische Strukturen vorgeschlagen und die Tragfähigkeit der Lösung anhand unterschiedlicher paralleler, serieller und hybrider Strukturen nachgewiesen. Die automatisierte Roboterprogrammierung erhält hierbei

symbolisch-räumliche Relationen und die CAD-Beschreibungen der zu fügenden Bauteile als Eingabe. Hierfür sind zunächst geeignete Montagepläne zu berechnen. Anschließend werden die Montagepläne in Roboteraufgaben und diese wiederum in Netze von Aktionsprimitiven zerlegt, die von der Robotersteuerung und dem Roboter auszuführen sind.

In dem integrierten Europäischen Forschungsprojekt SMERobot [13] wird eine kostengünstige, modulare und interaktive Robotergeneration speziell für kleine und mittlere Unternehmen entwickelt. Diese neue Robotergeneration soll intuitiv Befehle verstehen, alle Sicherheitsvoraussetzungen für eine Mensch-Roboter-Kooperation erfüllen und binnen drei Tagen installiert und in Betrieb genommen werden können.

Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion werden im Sonderforschungsbereich 453 von der DFG gefördert [14, 15]. Das Ziel besteht darin, räumliche oder maßstabsbedingte Barrieren zwischen dem Operator einerseits und dem Teleoperator andererseits zu überwinden. Um den Realitätseindruck zu erhöhen, erfolgt eine visuelle, akustische und haptische Rückkopplung vom Ort der Manipulation zum Operator. Das Teilprojekt A1 erforscht die Steigerung der Flexibilität und Bedienerunterstützung von Telepräsenzsystemen, um diese für den Einsatz in produktionstechnischen Szenarien zu qualifizieren. Teilprojekt C1 untersucht die Telerobotik, bei der der menschliche Operator als Kontroll- und Entscheidungsinstanz fungiert. Hierbei werden Ziele, Nebenbedingungen, Pläne, Annahmen, Vorschläge und Kommandos durch einen zwischengeschalteten Computer an den Teleoperator übermittelt. Der Bediener erhält Informationen vom System zurück, z.B. über den aktuellen Stand der durch den Teleoperator erfüllten Aufgaben, über Problemfelder, Bedenken sowie sensorische Daten seiner Umgebung.

Im Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ [16, 17, 18] wird die endogene Änderung des zu erreichenden Ziels auf veränderte Umweltbedingungen hin und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Struktur, des Verhaltens sowie der Parameter dieses Systems untersucht. Damit geht die Selbstoptimierung auf veränderte Umgebungsbedingungen über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien hinaus. Die Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die somit in der Lage ist, selbstständig und flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren. Diese Systeme bestehen aus Konfigurationen von Systemelementen mit einer inhärenten Teilintelligenz.

Der Sonderforschungsbereich 489 untersucht die Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile. Hierbei liegt ein Schwerpunkt auf das Erreichen von Toleranzen beim Präzisionsschmieden, wie sie bei vorbereitenden Zerspanprozessen erzielt werden. Dies erfordert einen hochgenauen Bearbeitungsprozess, der die gleichzeitige Bearbeitung von Keramik und Stahl erlaubt. Neben der Entwicklung geeigneter Schleifwerkzeuge erfordert dies eine adaptive Anpassung der Prozessparameter, um eine hochpräzise und wirtschaftliche Bearbeitung zu gewährleisten. Um werkstoffabhängig die idealen Prozessparameter auswählen zu können, wird eine geeignete Sensortechnologie für die adaptive Steuerung des Schleifprozesses entwickelt [19].

Im SFB 675 wird die Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und Verbindungen durch gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften untersucht. Damit soll das Anwendungsfeld für die zur Verfügung stehende Werkstoffpalette erweitert und zugänglich gemacht werden. Im Fokus ist der gesamte Herstellungs- und Entwicklungsprozess hochfester Strukturen mit lokal begrenzten Eigenschaften. Dazu sind sowohl neue werkstoffbezogene wie auch fertigungstechnische Ansätze und Prozesse erforderlich. Im Mittelpunkt der geplanten Forschungsarbeiten steht dabei die durchgängige Untersuchung des gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozesses bis hin zur Auslegung von Produktionsketten. Neben der örtlich definierten Wärmebehandlung untersucht eines der Teilprojekte die Prozessdurchführung mit Nonvakuum-Elektronenstrahlschweißen hinsichtlich Strahlpositionierung und Schweißnaht-Fehlerprüfung [20].

In PROSERV wird eine standardisierte, integrierte Architektur für das Service-Management geschaffen [21, 22]. Dieses Projekt wird u.a. vom BMBF unterstützt und hat die Erfassung aller relevanten Service-Daten zum Ziel. Hauptkomponenten sind einerseits das Service-Data-Warehouse (SDW), in dem alle Daten zusammengeführt, aufbereitet und analysiert werden, und andererseits die Customer-Service-Plattform (CSP), die Rohdaten aus der Anlage abfragt sowie Fehlererkennung und Diagnose durchführt. Um eine große Konfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit des Systems zu erreichen, wurden die internen sowie externen Schnittstellen vollständig in XML definiert.

Die Oberflächenregenerierung durch Auftragsschweißen kann durch Reverse Engineering unterstützt werden [23]. Das hierbei entwickelte „Intelligent Reverse Engineering System“ verfügt über ein Planungsmodul zur optimalen Bahnplanung. Dabei werden aus dem Vergleich verschiedener CAD-Daten die

entsprechenden Roboterbahnen generiert, um die Geometrie des existierenden Werkstücks durch Auftragsschweißen umzuformen.

Das europäische Projekt SenseLasBot [24] erforscht Strategien und Methodiken für das sensorgestützte Laserschweißen und entwickelt u.a. eine Simulationsumgebung zum Prüfen von Algorithmen beim Laserschweißen. Das Projekt umfasst nicht nur eine Offline-Nahterfassung, sondern auch eine kombinierte Echtzeit-Nahtverfolgung mit gleichzeitigem Laserschweißen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den prozessbedingt höheren Präzisionsanforderungen beim Laserschweißen gegenüber herkömmlichen Verfahren.

In dem Projekt rob@work unterstützt ein Robotersystem den Menschen bei einem interaktiven Schweißprozess, bei dem die Positioniergenauigkeit des Roboters mit der Prozessbeobachtung des Werkers kombiniert wird. Ein integrierter Produktionsassistent überwacht den Arbeitsraum und wird über eine Gestikerkennung gesteuert [25].

Eine direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter wurde hinsichtlich der Möglichkeit der optimalen Arbeitsteilung zwischen Werker und Roboter untersucht. Die Überwachung des Arbeitsraums erfolgte hierbei über ein bildgebendes Verfahren. Bei diesem Projekt wurden Verfahren zur Überwachung der Kooperation entwickelt, die sowohl eine Kollisionsüberwachung über einen kinematischen Ansatz als auch eine Ergonomieüberwachung über ein Neuro-Fuzzy-System beinhalten [26, 27].

Eine fähigkeitsorientierte und optimierte Montageablaufplanung in einer Mensch-Roboter-Kooperationszelle ausgehend von einem Ein-Produkt-Fall wird derzeit entwickelt. Anhand einer Analyse des Arbeitsprozesses wird ein Bewertungsmodell für die fähigkeitsorientierte Arbeitsteilung entworfen, mit dessen Hilfe verschiedene Eignungsgrade für Mensch und Roboter abgeleitet werden. Auf dieser Basis wird ein Verfahren zur Arbeitsteilung und Ablaufplanung konzipiert, das einen Montageablauf für Mensch und Roboter festlegt [28].

Die beiden nachfolgend aufgeführten Projekte sind in der Lotsize1-Initiative [29] zusammengeschlossen. Innerhalb dieser internationalen Initiative wird an neuen intelligenten und effizienten Robotern, Sensoren und Produktionssystemen geforscht, die auf kleine Losgrößen spezialisiert sind. Die Projekte dieser Initiative erforschen jedoch Fertigungseinrichtungen mit

ortsfesten Positionen und verfügen weiterhin nicht über die angestrebte Technologieeingabe mit Beschreibung der Arbeitsabläufe durch „Zeigen“.

Das EU-geförderte Projekt FlexPaint beschäftigt sich mit dem flexiblen und wirtschaftlichen Einsatz von Robotern bei Lackieranwendungen [30, 31]. Der Projektschwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Systems für eine automatische Roboterprogrammierung. Die geometrischen Daten werden hierbei aus CAD-Dateien extrahiert oder alternativ durch eine 3D-Sensorik ermittelt. Die Forschungsschwerpunkte zielen auf die Entwicklung von Simulations- und Planungsmodulen, welche die Trajektoriengenerierung bei unterschiedlichen Varianten und Positionen der Werkstücke bei geringen Losgrößen unterstützen.

Das internationale Projekt AMCARO – Automatic Moulding Line for Manufacturing Prototype Castings and Billets in Environmentally Friendly Robotic Cell [32] untersucht die robotergestützte Fertigung von Gussformen und Gussstücken in kleinen Losgrößen. Ein Schwerpunkt dabei ist die automatische Bahngenerierung mittels Bewegungsbibliothek sowie die Modellbildung aus CAD-Daten. Hierzu wird eine Technologie-Datenbank entwickelt und der Fertigungsprozess in geeignete Bearbeitungssequenzen unterteilt, die aus Elementarmakros zusammengesetzt werden.

Zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Realisierung der Digitalen Fabrik verfolgen Methodiken zur vollständigen Erfassung aller Fabrikbereiche bei der Abbildung oder Planung realer Prozessabläufe und Produktdaten im Computer. Hierbei gibt es mehrere Strategien, die durch Verwendung von E-Technologien den realen Fertigungsprozess digital abbilden [33, 34]. Weiterhin wird eine Datenmodellierung auf Basis einer gemeinsamen Ontologie verfolgt, um den Datenaustausch zu standardisieren [35, 36].

Portabilität und Ortsflexibilität beim Einsatz von Handhabungssystemen in der Fertigung stehen im BMBF-Projekt PORTHOS im Vordergrund der Entwicklungen [37, 38]. Ziel ist hier die Entwicklung eines portablen Robotersystems zur Bestückung von Werkzeugmaschinen. Dieses System soll auf einfache Weise in verschiedenen Bearbeitungszellen einsetzbar, intuitiv programmierbar und automatisch adaptierbar an seine neue Umgebung sein. Ein sicherer Betrieb ist durch zusätzliche Sensorik gewährleistet. Die Mobilität ist auf feste Standorte an den jeweiligen Maschinen beschränkt. Demzufolge sind die erforderlichen Zellenmodelle vorab generierbar. Dieses wird ebenso wie die Programmierung des Systems über eine speziell entwickelte

Bedienungsoberfläche wirkungsvoll unterstützt. Über nicht parametrisierte Funktionsblöcke in Form von Icons lassen sich komplette Programmabläufe erstellen, die später per Teach-in mit exakten Bewegungsdaten ergänzt werden. Das Programmiersystem wurde speziell für Handhabungsaufgaben entwickelt, die ein portables Robotersystem ausführt.

Die Generierung von kollisionsfreien Bahnbewegungen durch eine neuartige Verknüpfung von online- und offline-basierter Roboterprogrammierung ist Forschungsgegenstand im Projekt IRoProg [39, 40]. Ziel ist es dabei, die Programmierung von Robotersystemen signifikant zu vereinfachen und zu verbessern. Im Vordergrund steht die Vereinfachung der Offline-Programmierung von Robotern durch eine automatische Bahnplanung in der Simulation. Ihr liegen Suchalgorithmen (z.B. A*-Suchalgorithmus) mit hierarchischer Abstandsberechnung und nachgeschalteter Glättung und Optimierung zugrunde. Außerdem sind dynamische Eigenschaften als Qualitätskriterium in das Konzept einbezogen. Ferner soll das intuitive Programmieren durch Anwendung eines haptischen Eingabegerätes unterstützt werden. Hierbei wird ein Konzept vorgeschlagen, bei dem der Nutzer am Bildschirmarbeitsplatz im Offline-Programmiermodus einen virtuellen Roboter mit einem frei beweglichen Eingabestift entlang der gewünschten Konturen am CAD-Modell des Bauteils verfährt und auf diese Weise die späteren realen Bahnbewegungen definiert. Im Bereich der Online-Programmierung werden Verbesserungen dadurch erreicht, dass neuartige Bedien- und Programmierkonzepte entwickelt werden. Sie beruhen auf einfachen und bekannten Bedieneinheiten wie z.B. Joysticks und sind mit intelligent ausgewerteter Sensorik (z.B. Inertialsensorik, Bildverarbeitung) kombinierbar. Es steht hierbei die direkte Programmierung des Robotersystems im Vordergrund; eine vom Robotersystem unabhängige Programmierung wird ebenso wie die Eingabe prozessspezifischer Parameter nicht betrachtet.

In dem vom BmBF geförderten Projekt Robotyping wurden Verfahren zur direkten Herstellung großer Sandformen mit Robotern untersucht [41, 42]. Hierbei wurde eine flexibel konfigurierbare Prozesskette zur direkten Herstellung großer Sandgussformen (bis Kantenlänge 2,50 m) für den Metallguss ohne Verwendung von Modelleinrichtungen durch Kombination modellierender und abtragender Verfahren entwickelt. Eine wesentliche Teilaufgabe beinhaltet die Entwicklung eines Verfahrens zur 3D-Bahngenerierung und -führung für großflächige Freiformgeometrien unter

Berücksichtigung geometrischer Vorgaben, des Formstoffverhaltens und hoher Prozessgeschwindigkeit.

Neben einer verbesserten Programmierung ist die Integration von autonomer Planungsintelligenz für Fertigungssysteme vordringlich zu lösen. Das Projekt MORPHA konnte diesbezüglich erste Ergebnisse vorstellen. Zu diesem Zweck wurde ein Handlungsplaner in ein Care-O-Bot System vom Fraunhofer Institut IPA integriert. Wird nun durch den Benutzer eine Handlungsaufgabe, z.B. Hol- oder Bringaufgabe, definiert, so ist der Handlungsplaner selbsttätig in der Lage, elementare Operationen zu definieren und diese in Aktionen umzusetzen [43]. Dennoch steht die Entwicklung hier erst am Anfang, und weiterführende Forschungsanstrengungen sind notwendig, um Roboter mit kognitiven Fähigkeiten zur selbstständigen Planung von Handlungen auszustatten. Im Bereich der Navigation und Bewegungsplanung von mobilen Robotersystemen sind diesbezüglich mittlerweile eine Vielzahl von Entwicklungen zur Bahnplanung und Bewegungssteuerung bekannt. Technologisches Neuland wird jedoch bei der Entwicklung von systemintegrierten Handlungsplanern für Roboter beschritten, die zur Durchführung von Bearbeitungsaufgaben in der Fertigung eingesetzt werden sollen.

Die Nutzung und der Ausbau von 3D-Simulationssystemen ist für eine anschauliche offline Programmierung weiterhin FuE-Gegenstand [39, 40]. Die Hauptaktivitäten beziehen sich auf die Trajektoriengenerierung, die mit RRS-Schnittstellen eine realistische Bahnsimulation erlauben. In den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) finden solche Systeme bisher jedoch kaum Anwendung. Gründe hierfür sind die noch hohen Kosten, das fehlende qualifizierte Personal sowie die durchweg mangelhafte Planungsintelligenz der Systeme.

Im Bereich des Wearable Computing gibt es vielfache Forschungstätigkeiten, die sich einerseits auf Schnittstellen für die Ein- und Ausgabe und andererseits auf die Diversifizierung auf Applikationsebene konzentrieren. Ein Forschungsschwerpunkt im Bereich der tragbaren Computer konzentriert sich auf den Bereich Pervasive Computing. Hierbei integrieren sich Informationstechnologien in die Umgebung beziehungsweise Lebensräume und interagieren mit dem Nutzer. Entscheidendes Merkmal ist die Integration von eingebetteten, drahtlos vernetzten Systemen in eine Informationsverarbeitungsumgebung. Diese Systeme verarbeiten Signale unterschiedlicher Medientypen und beeinflussen oder kontrollieren ihre Umgebung entsprechend. An die Stelle der Ausführung einer Berechnungsaufgabe einer herkömmlichen Anwendung treten bei

eingebetteten Systemen zunehmend Überwachungs-, Steuerungs- oder Regelungsaufgaben. Durch die Verarbeitung wird nicht aus einer Input-Datenmenge eine Output-Information generiert, sondern es wird eine große Zahl von Eingabeereignissen (deren zeitliches Auftreten oft nicht vorhersehbar ist) in Ausgabeereignisse umgesetzt [44, 45, 46].

Auf Applikationsebene gibt es vielfach Ansätze, um dem Operator vor Ort mit Hilfe von Wearable Computing zu assistieren. Beispiele finden sich hierbei im Schiffsbau [47] sowie bei Wartung und Inspektion unterschiedlicher Geräte und Maschinen [48]. Bei diesen Beispielen handelt es sich größtenteils um Prototypen, die auf spezielle Aufgabenfelder fokussiert sind.

Bei der zunehmenden Durchdringung des Arbeits- und Freizeitbereichs mit tragbaren Computern befassen sich viele Forschungsarbeiten mit der Ergonomie der am Körper getragenen Computerkomponenten. Der Fokus liegt hierbei auf Bedienschnittstellen, Mobilität, Nutzungskonzepten, Funktionalität und Interaktionsintervallen [49, 50, 51].

Interessant ist der forschungstechnische Ansatz, Tragekomfort und Funktionalität statistisch zu erfassen. Hierbei zeigte sich, dass die von den Nutzern empfundene Funktionalität stark mit dem Tragekomfort korreliert [52].

Das seit zwei Jahren von der Europäischen Kommission geförderte Projekt (Integrated Project) wearIT@work mit einer Förderungsdauer von 54 Monaten untersucht im Bereich von Wearable Computing die Integration von Computern in Kleidung. Das Projekt umschließt vier Pilotstudien mit Anwendungen im medizinischen Bereich, Rettungswesen, Flugzeugwartung sowie in der Produktion inklusive Management und Training. Begleitend hierzu besteht ein Schwerpunkt in der Erforschung der Nutzerakzeptanz [53].

Viele Forschungsprojekte konzentrieren sich auf die (meist visuelle) Erweiterung der Realität mit Augmented Reality-Anwendungen. Interessante Forschungsergebnisse wurden in dem Leitprojekt ARVIKA erzielt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Integraler Bestandteil ist auch hier ein tragbarer Computer kombiniert mit einem see-through Display, wodurch die Realität um virtuelle Informationen erweitert wird, welche ortsfest in das Sichtfeld eingeblendet werden. Anwendungsfelder befinden sich in der Entwicklung von Automobilen, der Produktion von Autos und Flugzeugen, dem Service der dazu notwendigen Werkzeug- und Produktionsmaschinen sowie in der Wartung von Kraftwerksanlagen [54].

In dem Nachfolgeprojekt ARTESAS werden instrumentierungsfreie Tracking-Verfahren für raue Industrieumgebungen entwickelt, um die virtuelle Information lagerichtig zur realen Umgebung in das Blickfeld des Nutzers einzublenden. Ein weiterer Schwerpunkt besteht in der Entwicklung eines universellen Frameworks zur anwendungsgerechten Kombination der Vorteile verschiedener Verfahren [55].

Das vom BMBF geförderte Projekt TEREBES (Tragbares Erweitertes RealitätsSystem zur Beobachtung von Schweißprozessen) unterstützt den Schweißer mit virtuellen Informationen per Augmented Reality. Dabei wird die Arbeitsumgebung in der Weise aufbereitet, dass sowohl Umgebung als auch Lichtbogen zu erkennen und zu analysieren sind. Prozessparameter, Verlauf der Schweißnaht und konstruktive Details werden zusätzlich in das Blickfeld eingeblendet [56].

Eine Vielzahl von Projekten untersucht die Integration von Informationsdiensten in den Arbeitsablauf der Nutzer. Bei den Augmented Reality-Ansätzen wird ein Großteil der Forschungstätigkeit auf das Tracking & Tracing verwandt. Beispiele für Anwendungen im Produktionsbereich sind zahlreich, wobei sich die Forschungsansätze auf die Anlagenüberwachung, interaktive Assistenzsysteme zur Fehlerdiagnose, Service-Arbeiten, Designprozesse, Qualitätskontrolle und Training konzentrieren [57- 63].

Eine sichere Koexistenz von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum wird derzeit erforscht. Dies erfolgt unter dem allgemeinen Druck zu einer größeren Variantenvielfalt bei gleichzeitig sinkenden Losgrößen, da dies eine zunehmende Präsenz des Werkers im Arbeitsraum für beispielsweise Umrüstvorgänge erfordert. Das Konzept SafeMove von ABB drosselt automatisch die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters, wenn sich ein Mensch im Arbeitsraum befindet [64]. Sobald der Werker den sensorisch überwachten Bereich verlassen hat, bewegt sich der Roboter wieder mit voller Geschwindigkeit. Das Erkennen und Erfassen des Menschen erfolgt hierbei über 3D-Bildsensoren. SafetyEYE ist ein Kamerasystem, das einen dreidimensionalen Schutzraum um den Roboter legt [64]. Diese Sensoreinheit sitzt über der Arbeitsstation und überwacht den gesamten Aktionsraum des Roboters. Verschiedene Gefahrenbereiche sind durch virtuelle Hüllkurven definiert, die Warn- und Schutzräume einschließen. Damit werden nur Objekte, die in diese Bereiche eintauchen, als potenziell gefährdet betrachtet.

Verschiedene Roboterhersteller wie die Fa. Reis entwickeln eine personensichere Steuerung [65], welche mittels Laserscanner ein Personenmodell in ein 3D-Umweltmodell integriert. Hiermit lassen sich dreidimensionale Schutzbereiche konfigurieren. Ein Steuerungsmodul überwacht den Abstand zwischen Personen und Roboter. Der Roboter kann somit stillgesetzt werden, wenn er in eine verbotene Schutzzone eindringt.

Bei stetigem Wechsel von manuellen und automatischen Tätigkeiten, wie beispielsweise in der Montage, ist eine Trennung von Mensch und Roboter oft nicht sinnvoll. Hierzu wurde ein Ansatz für eine direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter entwickelt [66]. In experimentellen Untersuchungen wurden die wichtigsten Einflussparameter auf die menschliche Wahrnehmung und Empfindung ermittelt, um daraus ein benutzerzentriertes Systemdesign abzuleiten. Zwei sich ergänzende Verfahren zur Überwachung der Mensch-Roboter-Kooperation wurden entwickelt. Dies ist einerseits eine Kollisionsüberwachung über einen kinematischen Ansatz, wodurch direkte Kollisionen vermieden werden sollen, und andererseits eine Ergonomieüberwachung über ein Neuro-Fuzzy-System, welches die Robotergeschwindigkeit anpasst, um dem Menschen das Gefühl der absoluten Sicherheit und der Kontrolle über den Roboter zu vermitteln.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 368 „Autonome Produktionszellen“ wurden u.a. Arbeiten zur Thematik der genetischen Algorithmen bei Planungsvorgängen und der echtzeitfähigen Onlineprozesssteuerung einer Roboterzelle durchgeführt [67]. Dabei wurde festgestellt, dass die verwendeten Optimierungsmethoden mit großen Parameterräumen für komplexe, nichtlineare Zusammenhänge besonders geeignet sind. Ihre zusätzliche Eigenschaft zur weitgehend parallelisierten Implementierung prädestiniert sie für eine Anwendung in autonomen Systemen. Bei der Anwendung des Verfahrens, z.B. auf die Problemstellung der Bahnplanung, lassen sich sogenannte „Individuen“ definieren, welche die Konfiguration von Achsstellungen bzw. Gelenkvariablen zu einem bestimmten Zeitpunkt beinhalten und die Weiterverarbeitung entscheidend erleichtern. Für die Auswertung wurden eine Güte-, Kosten-, oder Auswertefunktion definiert. Mit ihrer Hilfe wurden aus der Gruppe der möglichen Variationen diejenigen Konfigurationen ermittelt, welche eine größtmögliche Verbesserung der Werkzeugposition hinsichtlich eines gegebenen Zielpunktes oder eines gegebenen Verlaufs der Bearbeitungsbahnen ergeben [68]. Der gewählte modulare Aufbau der zugehörigen Multiprozessorhardwareplattform erlaubt

eine Leistungssteigerung bei Planungsaufgaben. Es ergeben sich die Vorteile einer Annäherung an die technisch mögliche Grenzleistung konventioneller Rechensysteme sowie einer Verteilung der Prozesse auf mehrere Prozessoren, die auf handelsüblichen Rechnerkomponenten integriert werden können. Darüber hinaus unterstützt das entwickelte Modellbetriebssystem PROMICS die Zuteilung von Prozesssteuerungsressourcen bei dezentralen Strukturen. Das Problem der Zugriffsberechtigung bei Verteilung der Prozesse auf die verschiedenen Prozessoren wurde durch die Verwendung von „Semaphoren“ gelöst. Jeder Prozess „markiert“ den verwendeten Datensatz und sperrt ihn somit für andere Prozesse. Die Echtzeitfähigkeit von PROMICS wird durch diese Maßnahme nicht beeinträchtigt, da dieser Vorgang im Hinblick auf den Gesamttablauf in vernachlässigbarer Zeit stattfindet.

Innerhalb des BMBF-Vorhabens „Roboter als Werkzeug für die Werkstatt“ wurden Untersuchungen von Methoden und Techniken zur Nutzung von Roboterschweißtechnik für kleine Stückzahlen bis hin zu Einzelstücken durchgeführt [69]. Schon seit Jahren wird angestrebt, Robotertechnik als Werkzeug für den Werker einzusetzen [70, 71]. Wesentlich ist hierbei die Einbindung von Erfahrungswissen in Automatisierungskonzepte. Das oben genannte Forschungsprojekt verfolgt folgende thematische Schwerpunkte für den Robotereinsatz in der Werkstatt: neue Produktionskonzepte, Berücksichtigung menschlicher Potenziale, Nutzung von Erfahrungswissen, Strukturierung von Information und Kommunikation, Qualifikations- und Motivationsförderung, Mensch-Maschine-Schnittstelle, Methoden zur Nutzerbeteiligung bei Entwicklungsprozessen. Im Mittelpunkt stand dabei eine Zuteilung der Arbeit mit dem Roboter: Arbeit am Bildschirm mit der virtuellen Roboterzelle und Arbeit am wirklichen Roboterarbeitsplatz. Wesentliche Aufgaben zur Lösung der gestellten Problematik konzentrierten sich auf die Bereiche der Sensorik und Robotersimulation.

Im EU-Projekt „DOCKWELDER“ wurden neue Methoden für die Automatisierung und Nutzerführung anhand neuartiger Roboterkinematiken auf Werften erforscht [72, 73]. Im Dockbereich ist der Einsatz von konventionellen Automatisierungstechniken nur begrenzt möglich. Daher wurden Manipulatoren mit erheblich erhöhter Flexibilität entwickelt, die hohe mechanische und regelungstechnische Ansprüche erfüllen. Weiterhin befinden sich neue Prozessleittechniken in der Entwicklung, welche die Wegberechnungen in Echtzeit ermitteln und sich flexibel an unterschiedliche Werkstücke adaptieren.

Die Forschung konzentrierte sich auf die Bereiche Bahnplanung, Offline-Programmierung und Simulation sowie dezentrale Prozesssteuerung.

Im Forschungsvorhaben „Entwicklung eines tragbaren Service-Interface für die Produktions- und Schweißtechnik“ wurden die Grundlagen für eine multimediale, mobil einsetzbare Überwachungs- und Serviceeinheit ermittelt, die für Produktionseinheiten eingesetzt wird [74]. Gerade die bei komplexen Prozessen auftretende Vielzahl kritischer Parameter konnte in Echtzeit erfasst, visualisiert und ausgewertet werden. Neben der Entwicklung von intuitiv zu bedienenden Interaktionsmöglichkeiten mit diesem Maschineninformationssystem, z.B. ohne Verwendung der Hände oder ohne Abwenden von der eigentlichen Szene, waren die Untersuchungen und Umsetzungen einer entsprechenden Informationsstruktur vorrangige Forschungsziele. Ebenfalls untersucht wurden der Einsatz von neuen Informations- und Kommunikationstechnologien in einem tragbaren System innerhalb der Produktion sowie die Integration von unterschiedlichen Systemen zur Kommunikation im Produktionsbereich. Das Ergebnis stellt ein mobiles System dar, das den Zugriff auf prozessrelevante Informationen während des laufenden Betriebs ohne die physische Präsenz des Operators ermöglicht.

Arbeiten im Bereich der Telerobotik konzentrieren sich auf netzwerkbasierendes Fernsteuern eines Industrieroboters mit Hilfe von Virtual Reality [75]. Dabei ist der Roboter an einen Server angeschlossen, der ihn in das Netzwerk integriert. Über das Netzwerk nimmt ein Benutzer mit Hilfe eines Clients Kontakt zu dem Roboter auf. Der Client bildet somit das Interface für den Bediener, indem er den realen Roboter virtuell nachbildet. Über diese virtuelle Darstellung kann der Bediener den realen Roboter simulieren und steuern. Daher war ein Arbeitsschwerpunkt die Beschreibung der Bewegungsmöglichkeiten und Freiräume des sechsachsigen Roboters. Dies erforderte eine mathematische Beschreibung des kinematischen Systems.

Darüber hinaus wurde ein interaktives Programmier- und Simulationssystem für Industrieroboter entwickelt, das sich als Planungswerkzeug für Mehrlagenschweißen eignet [76, 77]. Zum Systemumfang gehören sowohl die Prozessplanung mit anschließender Programm-Erstellung, als auch die Erprobung innerhalb der Simulation mit dem Zweck, eventuelle Fehler bereits vor der direkten Programmübertragung an die Roboterstation zu eliminieren. Die auf OpenGL basierende Visualisierung erzeugt interaktive 3D-Modelle und erlaubt die direkte Manipulation der Bewegungsachsen des Roboters sowie der Werkzeug-Orientierung.

Weiterhin wurde ein System zur automatisierten Oberflächenerfassung entwickelt [78, 79], das bei Schweißprozessen oder Oberflächenbehandlung zum Einsatz kommt. Das Ziel der Oberflächenerfassung ist die vollständige Digitalisierung des Werkstücks bzw. der für den weiteren Prozess notwendigen Bereiche. Dies ist jedoch bei komplizierten Geometrien, beispielsweise Hinterschneidungen, mit etlichen Problemen verbunden. Hierfür wurden Methoden gefunden, die diese Problemzonen egalisieren. Aus dem Vergleich des 3D-Modells mit einem CAD-Modell des Werkstücks werden daraufhin automatisch Fertigungsstrategien bzw. -prozesse generiert, um beispielsweise abgenutzte Flächen durch Auftragschweißen instand zu setzen.

3 Konzeption

Dieses Kapitel definiert drei Schwerpunktbereiche und deren wissenschaftliche Aufgabenstellungen für eine nutzerfreundliche Interaktion für den Robotereinsatz bei einer werkstatorientierten Fertigung. Hieraus werden konzeptionelle Aufgabenbereiche detailliert abgeleitet.

3.1 Schwerpunktbereiche

Die Konzeption einer nutzerfreundlichen Interaktion für den Robotereinsatz in der Klein- und Kleinstserienfertigung in einem gemeinsamen Arbeitsraum von Werker und Roboter hat zum Ziel, Technologien und Systeme zur Verfügung zu stellen, um Roboter als flexible Fertigungsassistenten für Bearbeitungsprozesse in der Produktion wirtschaftlich einzusetzen. Hierfür soll ein System mit integrierter Planungsintelligenz entwickelt werden, das ortsflexibel und standortoptimiert für unterschiedliche Bearbeitungsprozesse in der Fertigung verwendet werden kann und effektive Kommunikationsschnittstellen zwischen Werkern, Robotersystemen und der Fertigungsumgebung nutzt. Die Konzeption zielt darauf ab, das Wissen von Roboterspezialisten für effiziente Bearbeitungsstrategien informationstechnisch als Assistenzsystem nachzubilden. Mit diesem neuen Ansatz ergibt sich insbesondere für kleinere und mittlere Unternehmen ein breites Anwendungsfeld, um bedarfsabhängig eine Automatisierung von Fertigungsaufgaben zu ermöglichen. Forschungsarbeiten und technologische Entwicklungen sind in drei Schwerpunktbereiche aufgliedert:

1. Methoden und Werkzeuge zur intuitiven Eingabe von Arbeitsanweisungen durch den Werker. Die Instruktion soll dabei ausschließlich auf fertigungstechnologischem Niveau erfolgen und lediglich die Bauteile, die Werkzeuge und die jeweilige Bearbeitungstechnologie berücksichtigen. Die Arbeitsanweisungen beinhalten keine expliziten Instruktionsfolgen. Sie werden unabhängig von der jeweiligen Roboterkinematik durch „Zeigen“ der Werkzeugbewegungen am realen Bauteil mit einem positionssensitiven Zeiger sowie durch interaktive, bearbeitungstechnologische Vorgaben in Form von Bildern (Icons) beschrieben und nachfolgend in ein neutrales Beschreibungsformat umgesetzt.
2. Ortsflexibler Einsatz eines Roboters in einem gemeinsamen Arbeitsraum mit dem Werker. Um die Sicherheit des Menschen zu gewährleisten, ist

eine Strategie zu entwickeln, die eine mögliche Kollision zwischen Mensch und Maschine verhindert. Das Roboterverhalten soll sowohl über entsprechende Ausweichstrategien als auch über situative Geschwindigkeitsanpassungen verfügen, dabei jedoch weiterhin die Produktivität des Systems gewährleisten.

3. Konzept für eine mobile Kommunikationsplattform auf Basis von tragbarer Computertechnik. Diese Plattform dient sowohl der Zuordnung von Fertigungsvorgaben bezogen auf den gewählten Produktionsprozess als auch der Überwachung von Produktionseinheiten. Weiterhin sollen Konzepte zur multimedialen Unterstützung von Service-Tätigkeiten erarbeitet werden. Hierzu soll eine anwenderfreundliche Navigationsstruktur konzipiert werden, die es erlaubt, intuitiv auf Informationen zuzugreifen.

Jeder der drei Forschungsschwerpunkte enthält eigene wissenschaftliche Aufgabenstellungen, die abgestimmt auf das Gesamtsystemkonzept zu lösen sind:

In Schwerpunkt 1 sollen die Definition und Strukturierung der Arbeitsanweisungen auf einem dem Anwender geläufigen Niveau mit der Maßgabe gelöst werden, durch möglichst wenige Elementaranweisungen die Vollständigkeit zur automatischen Generierung des technologischen Maschinenprogramms zu garantieren. Neben den Vorgaben zur kollisionsfreien Trajektoriengenerierung kommen hier neue Aspekte der Technologievorgaben und der hier ebenfalls zu entwickelnden Technik des "Zeigens" mittels 6D-Vorgaben hinzu (siehe Kapitel 4).

Schwerpunkt 2 beschreibt die Entwicklung eines sensorbasierten Überwachungssystems, das an die Randbedingungen eines gemeinsamen Mensch-Roboter-Arbeitsraums angepasst ist. Hierbei soll der Roboter eine bevorstehende Kollision erkennen und eine situative Ausweichbewegung einleiten, bei der sich die Geschwindigkeit adaptiert (siehe Kapitel 5).

In Schwerpunkt 3 werden die wissenschaftlichen Grundlagen für eine nutzer- und aufgabengerechte Bedienbarkeit der tragbaren Interaktionsplattform konzipiert und entwickelt. Schwerpunkte liegen in der Konsistenz, intuitiven Verfügbarkeit sowie Selbsterklärungsfähigkeit der Benutzerführung unter der Prämisse einer erhöhten Effizienz (siehe Kapitel 6).

3.2 Konzeptionelle Aufgabenfelder

3.2.1 Intuitives Programmieren mit einem 6D-Zeiger

Zur Programmierung der Fertigungsaufgabe durch den Nutzer sollen Strategien und eine geeignete Gerätetechnik entwickelt werden, die eine intuitive Eingabe der Werkzeugbewegungen am realen Werkstück durch „Zeigen“ ermöglichen.

Der zu entwickelnde 6D-Zeiger soll Entfernungen zwischen Zeiger und Bauteil bestimmen und Informationen über die Orientierung des Zeigerstrahls im Raum über Meridian- und Breitenwinkel bezogen auf ein internes Geräte-Koordinatensystem zur Verfügung stellen. Aus der Geodäsie sind der Theodolit als Winkelmessinstrument oder auch das Tachymeter zur Winkel- und Entfernungsmessung bekannt. Diese Technik ist bei entsprechenden Modifikationen hierfür nutzbar. Spezieller Forschungsbedarf ergibt sich dabei in der Bereitstellung einer 6D-Positionsmesstechnik, die eine für Roboteranwendungen ausreichend genaue Bestimmung der durch „Zeigen“ programmierten Bahnpositionen ermöglicht.

Laserdistanzmessgeräte erfassen die Entfernung aus dem reflektierten Lichtstrahl mittels Phasenverschiebungs- bzw. Laufzeitmessung. Ihr meist sichtbarer Lichtpunkt erleichtert hierbei das exakte Anvisieren der Messpunkte. Zusammen mit Horizontal- und Vertikalwinkel lassen sich die Ortskoordinaten des jeweils anvisierten Bahnpunkts bezogen auf das Zeiger-Koordinatensystem ermitteln. Ebenso sind Lösungen zur Bestimmung der jeweiligen Ortsposition des Zeigers während der Anwendung in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem zu erarbeiten.

3.2.2 Nutzerzentrierte Zuordnung der Prozesstechnologie

Für die Zuordnung der Prozesstechnologie zu den programmierten Bahnpositionen soll eine interaktive Methode entwickelt werden, die auf der Auswahl von Elementaroperationen aufbaut. Voraussetzung ist eine intelligente Strukturierung der Prozesstechnologie in Elementarmakros.

Geeignete Elementarmakros, welche die elementaren Bearbeitungssequenzen repräsentieren, sollen iconbasiert hinsichtlich des ausgewählten Fertigungsprozesses in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter ausgewählt werden. Diese Elementarmakros sind situations- und prozessabhängig definiert. Anschließend sollen die Inhalte als Makros implementiert und in einer

Technologiedatenbank hinterlegt werden. Von hier können sie bei Bedarf abgerufen werden.

Diese Arbeit konzentriert sich bei der Spezifizierung der Prozesstechnologie auf Anwendungen in der Roboterschweißtechnik, um die grundsätzliche technische Machbarkeit der Gesamtlösung aufzuzeigen.

Als Runtime-Plattform für die Technologie-Programmierung soll ein mobiler Computer (wearable computer) mit WLAN-Technik zum Einsatz kommen. Dieser stellt dem Nutzer eine geeignete Bedienungsoberfläche für interaktive Eingaben bei gleichzeitiger Mobilität zur Verfügung. Die graphische Oberfläche soll den Anwender durch die nutzergerechte Struktur in die Lage versetzen, die Einheit in Kombination mit dem Zeigersystem nach kurzer Einarbeitungszeit problemlos für Programmieraufgaben bedienen zu können.

3.2.3 Automatische Generierung der Roboterprogramme

Es sollen Verfahren und Algorithmen konzipiert werden, die eine automatische Generierung von Roboter-Arbeitsprogrammen ermöglichen. Dies soll aus der Vorgabe von 3D-Positionsdaten und zugeordneten Prozess- und Technologiedaten unter Berücksichtigung einer optimalen Ablaufplanung erfolgen.

Damit in Analogie zur menschlichen Vorgehensweise bei der Planung und Durchführung einer Arbeitsaufgabe ein kollisionsfreies Roboter-Programm generiert werden kann, müssen planerische Fähigkeiten in Form von Entscheidungsmustern verfügbar sein. Sie sind erforderlich, um anhand der Vorgaben eine Bahn- und Prozessplanung in der Simulation durchführen zu können. Grundlage für die Entwicklung der Entscheidungsmuster sind dabei elementare Bearbeitungssequenzen, die zu definieren sind, um prozessabhängig die Bahnplanung zu unterstützen. Die Entscheidungsmuster mit elementaren Bearbeitungssequenzen sollen somit eine navigierte Bahnplanung für verschiedene Bearbeitungsprozesse ermöglichen. Die Durchführbarkeit soll exemplarisch beim Lichtbogenschweißen mit Robotern dargestellt werden.

Die Prozess-Sequenzierung soll die Arbeitspunkte bahnoptimiert in Abhängigkeit zum jeweiligen Prozess ermitteln. Sie soll als „Embedded System“ in das Robotersystem integrierbar werden. Deshalb verfügt sie über neutrale Schnittstellen, die mit standardisierten Datenformaten und Übertragungsprotokollen arbeiten.

Angestrebtes Ergebnis der navigierten Bahnplanung und Zuordnung der jeweiligen Prozesstechnologie ist ein zeit- und prozessoptimiertes Roboterprogramm.

Um beim Anfahren des Roboters an das Werkstück Positionierungs- und Vorfertigungstoleranzen auszugleichen sowie den Roboter exakt positionieren zu können, soll ein Sensorsystem die genaue Lage der Bauteile verifizieren und die Werkstückpositionen an die Steuerungssoftware übermitteln. Die Steuerungssoftware berechnet damit eine kollisionsfreie Bahn, die gegebenenfalls durch eine integrierte Sensorik korrigiert wird.

3.2.4 Prozessüberwachung

Die Prozessüberwachung hat zum Ziel, den Zugriff auf prozessrelevante Parameter während des laufenden Betriebes zu ermöglichen, beispielsweise während des Programmiervorgangs mit dem 6D-Zeiger. Hierfür soll eine nutzerfreundliche Kommunikationseinheit geschaffen werden, mit der die Nutzer einen effizienten Informationszugang haben. Dazu müssen neue Zugänge sowie intelligente Werkzeuge und Strukturierungen konzipiert werden, die einen einfachen und effektiven Zugriff auf Informationen zur flexiblen Weiterverarbeitung in eigenen Informationssystemen ermöglichen. Hierzu sind Strategien notwendig, die eine Vorselektion und Aufbereitung der Daten bereitstellen.

3.2.5 Sichere Mensch-Roboter-Kooperation

Heutige Industrierobotersysteme sind nicht darauf ausgelegt, sich den Arbeitsraum mit einem Werker zu teilen. Um die Sicherheit für den Menschen zu gewährleisten, müssen Kollisionen vermieden werden, d.h. der Roboter muss dem Menschen ausweichen. Dazu wird die Roboterbewegung mit einer Ausweichbewegung überlagert, die somit eine sichere Bahnbewegung ermöglicht. Diese überlagerte Bahnbewegung soll auch ökonomisch sein, hierzu darf die Ausgleichsbewegung nur so weit von der ursprünglichen Bewegung abweichen, dass der Mensch ungefährdet handeln kann. Eine adaptive Geschwindigkeitsregelung soll hierbei den Roboter umso stärker abbremsen, je näher er dem Menschen kommt. Ist die Ausgleichsbewegung beendet, soll der Roboter wieder seine ursprüngliche Geschwindigkeit aufnehmen und sich geradlinig seinem Ziel nähern.

3.2.6 Unterstützung von Service-Tätigkeiten

Die Unterstützung von Service-Tätigkeiten in der Produktion wie beispielsweise Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten ist von besonderer Relevanz, da dies einen Produktionsstillstand verhindern oder Produktionsanlauf beschleunigen kann. Informationstechnische Kommunikations- und Assistenzsysteme können hierbei behilflich sein, indem sie dem Anwender einen ungehinderten und schnellen Zugriff auf relevante arbeitsspezifische Informationen liefern, unabhängig von Ort und Zeit. Dabei soll die benötigte Information bedarfsgerecht aufbereitet und kontextbezogen in die aktuelle Arbeitssituation integriert sein. Die Informationsangebote sollen modular aufgebaut und flexibel sowohl in ein Informationsmanagementsystem als auch in individuelle Arbeitsumgebungen integrierbar sein. Sollte eine benötigte Information nicht abrufbar sein, so sollen Synergieeffekte mit anderen Experten über eine multimediale Schnittstelle nutzbar sein, um somit externe Kompetenzen und Ressourcen zu integrieren.

4 Programmieren durch Zeigen

Dieses Kapitel erläutert die Entwicklung des 6D-Zeigers für die flexible Programmierung von Robotertrajektorien. Hierbei werden detailliert die integrierte Sensorik, die mathematischen Transformationen, die Steuer-elektronik sowie die Bedienung durch den Nutzer beschrieben.

4.1 Integrierte Sensorik

Zur Prozessdurchführung müssen die Roboterpositionen und -bewegungen ermittelt werden. Diese sind von dem jeweiligen Fertigungsprozess sowie der Werkstückposition abhängig. Die Werkstückposition wird mit dem 6D-Zeiger erfasst, indem mit dem Laserstrahl eines Lasersensors auf das Werkstück gezeigt und gleichzeitig die Entfernung gemessen wird. Weiterhin müssen die Winkelabhängigkeiten zwischen dem 6D-Zeiger und dem einzulesenden Punkt ermittelt werden. Die zwei zu erfassenden Winkel sind der Neigungswinkel und der horizontale Richtungswinkel. Hierzu sind die Sensoren auf einem Dreibein montiert, um abhängig von bekannten Referenzpunkten die Werkstückpositionen zu ermitteln.

4.1.1 Richtungswinkel

Zur Bestimmung des Richtungswinkels wird ein flacher Sensor benötigt, der in den räumlich begrenzten Bereich zwischen Stativkopf und -beinen integrierbar ist. Für diesen Zweck wird ein Schleifer-Potentiometer der Firma Altmann verwendet, welches nach Schutzart IP66 gegen Umgebungseinflüsse abgedichtet ist (s. Abbildung 4-1). Die Kapselung ist derart konzipiert, dass zwei runde Kunststofffolien in geringem Abstand miteinander verbunden sind, die damit einen Zwischenraum für eine elektrische Widerstandsbahn mit einem Gesamtwiderstand von $10,79 \text{ k}\Omega$ schaffen. Mittels eines mechanischen Schleifers werden die beiden äußeren Leiterbahnen elektrisch verbunden und somit wird der elektrische Widerstand verändert. Die daraus resultierende Änderung der Ausgangsspannung kann über den mittleren Kontakt ausgelesen werden.

- Programmieren durch Zeigen -

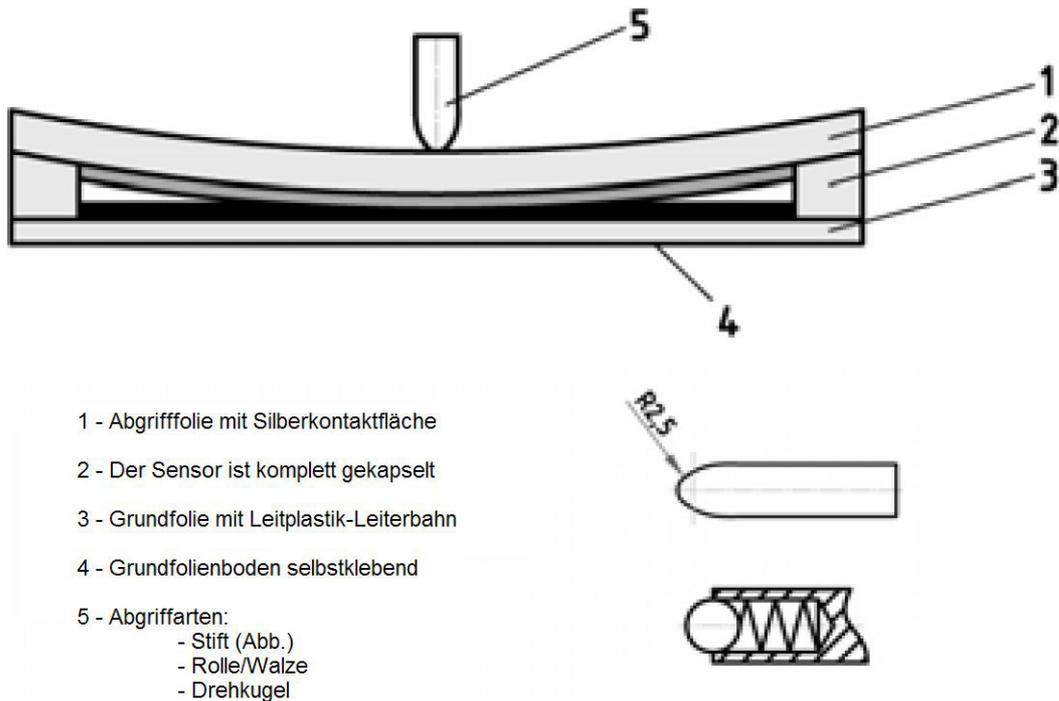


Abbildung 4-1: Schnittansicht eines Folienpotentiometers

Zu beachten ist, dass hierbei jeweils nur der relative Winkel zwischen zwei Punkten ermittelt werden kann.

4.1.2 Neigungswinkel

Der Neigungswinkel wird mittels eines Mikro-Elektro-Mechanischen-Systems (MEMS) ausgelesen. Der Sensor SCA103-D04 der Firma VTI (s. Abbildung 4-2) ermöglicht eine Winkelerfassung von $+15^\circ$ und -15° bezüglich der Horizontalen.



Abbildung 4-2: Neigungssensoren SCA 103-D04 der Firma VTI

Der Neigungssensor misst die Beschleunigung, die eine Prüfmasse in Abhängigkeit zu ihrer Ausrichtung im Erdschwerefeld erfährt. Durch Elongation des Sensors um einen Winkel bezüglich der Horizontalen wird eine federnd gelagerte Masse ausgelenkt. Dadurch werden die Platten eines Kondensators mitbewegt, wodurch eine Kapazitätsänderung erfolgt, deren Spannung messbar ist. Somit steht der Neigungswinkel in einem proportionalen Verhältnis zu dieser Spannung, die nach einer Analog-Digital-Wandlung einer sensorinternen Logik an die SPI-Schnittstelle übergeben wird

4.1.3 Entfernungsmessung

Die Entfernung wird mit einem Laserentfernungsmessgerät gemessen, da ein Laserimpuls sich aufgrund seiner spezifischen Strahlgeometrie und der damit verbundenen hohen Energiedichte für Laufzeitmessungen über größere Entfernungen besonders eignet. Zur Anwendung der Entfernungsmessung kommt ein Sensor des Typs DME3000-211 von der Firma Sick (s. Abbildung 4-3). Der Messbereich des Geräts umfasst 100 mm bis 8000 mm und ermöglicht Abstandsmessungen nach dem Prinzip der Phasenkorrelation. Bei dieser Laufzeitmessung wird die Dauer zwischen Aussenden des Impulses und Eintreffen des reflektierten Impulses ermittelt.



Quelle: SICK

Abbildung 4-3: Entfernungssensor DME3000-211 der Firma Sick

Vom Hersteller Sick werden folgende Codierverfahren unterstützt:

- Binär-Codierung
- Gray-Codierung 24+E
- Gray-Codierung 25

Aufgrund der geringen Leitungslänge von nur wenigen Zentimetern wird kein Code mit Fehlerkorrektur benötigt, wie sie in der Gray-Codierung 24+E beziehungsweise Gray-Codierung 25 enthalten ist. Es ist eine sichere Datenübertragung bereits mit der Binär-Codierung gewährleistet.

4.2 Transformationen

Die Sensordaten müssen derart aufbereitet und umgerechnet werden, dass die durch „Zeigen“ eingegebenen Bahnpunkte von der Robotersteuerung interpretierbar sind. Hierzu werden die Werkstückkoordinaten in das Anwender-/Userkoordinatensystem des Industrieroboters transformiert. Die nachfolgende Auflistung liefert einen Überblick über die genutzten Koordinatensysteme:

- Sensorkoordinatensystem
- Stativkoordinatensystem
- Referenzkoordinatensystem bzw. Roboterkoordinatensystem
- Anwender-/Userkoordinatensystem

Das Referenz- bzw. Roboterkoordinatensystem nimmt hierbei eine Sonderstellung ein, da es als Schnittstelle zwischen Sensorik und Aktorik fungiert und die gemeinsame Referenz für Sensorsystem und Robotersteuerung darstellt.

Zur Erfassung von Bahnpunkten mit dem 6D-Zeiger ist die Kenntnis der Stativposition notwendig. Das Ermitteln der Stativposition erfolgt anhand einer Referenzierung mit bekannten Referenzpunkten und wird im Folgenden als Referenzierungsprozess bezeichnet.

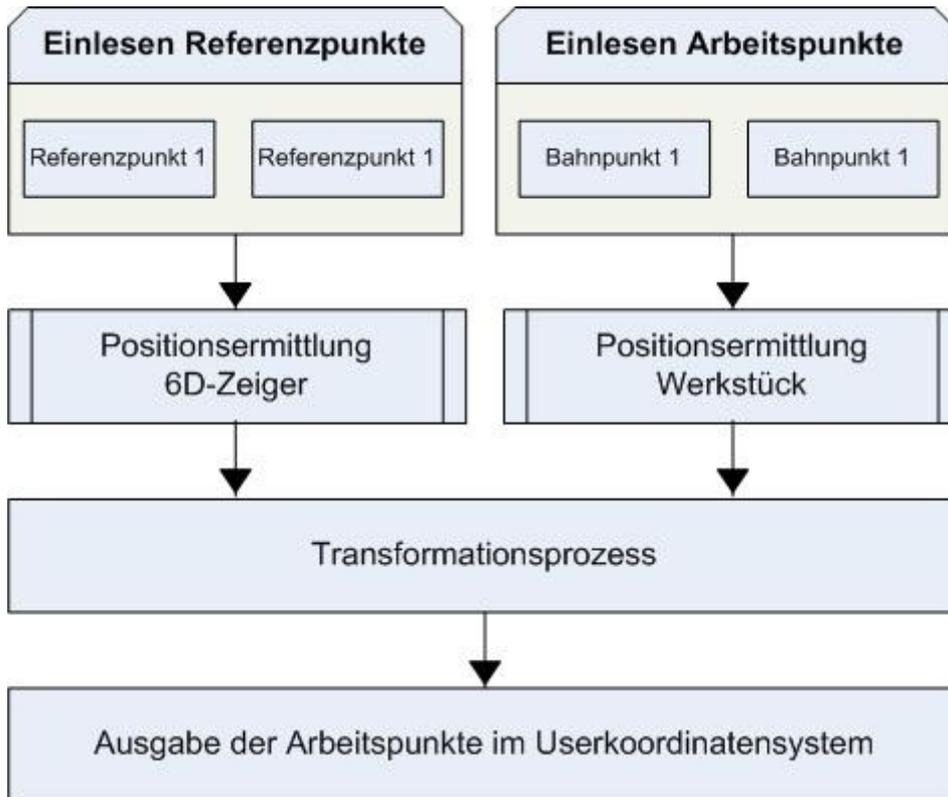


Abbildung 4-4: Mess- und Transformationsprozess

Nach Eingabe des ersten Arbeitspunkts erfolgt eine Korrekturrechnung, da sich der Lasersensor bei dem Aufbau nicht in der Drehachse des Stativs befindet. Diese Korrektur muss im Gegensatz zu anderen Berechnungen für jeden Punkt einzeln durchgeführt werden. Hierfür wird ein Hilfskoordinatensystem eingeführt, welches im Folgenden Stativkoordinatensystem genannt wird. Dessen Ursprung bzw. Stativbezugspunkt befindet sich im Schnittpunkt der horizontalen und vertikalen Drehachse des Stativkopfes.

4.2.1 Transformation vom Sensor- in das Stativkoordinatensystem

Der Ursprung des Sensorkoordinatensystems liegt im Austrittspunkt des

Laserstrahls. Damit benötigt man einen Korrekturvektor in X-Richtung $\vec{X} = \begin{pmatrix} l \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$,

dessen X-Komponente der gemessene Abstand zum Bahnpunkt sowie dessen Y- und Z-Komponenten jeweils Null sind.

Diese Koordinatentransformation erfordert eine Rotation um die Y-Achse mit dem Neigungswinkel des Sensorsystems sowie eine Verschiebung um den

Vektor $\vec{V} = \begin{pmatrix} 152 \\ 0 \\ 163 \end{pmatrix}$, der die Ursprünge beider Bezugssysteme verbindet. Die

Zahlenwerte sind Längenwerte in Millimeter und durch die Konstruktion vorgegeben. Die Translation ist vom Hauptneigungswinkel α abhängig, daher werden die jeweiligen Sinus- und Kosinusanteile addiert:

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} -163 \cdot \sin \alpha - 152 \cdot \cos \alpha \\ 0 \\ -163 \cdot \cos \alpha + 152 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

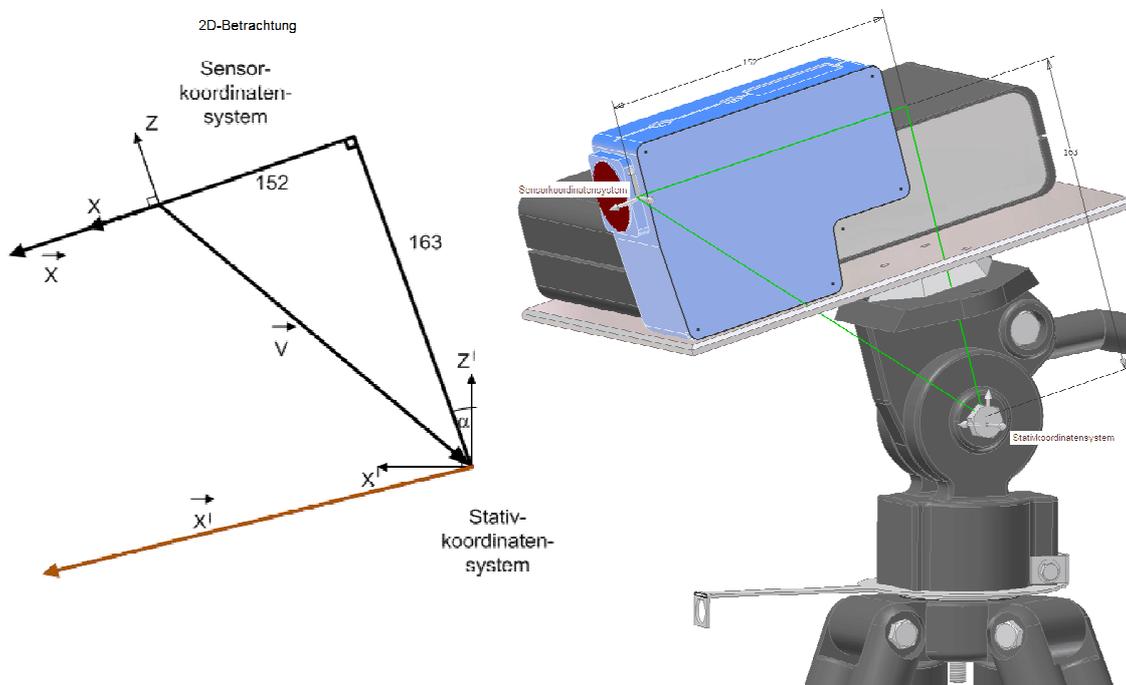


Abbildung 4-5: Transformation zwischen Sensor- und Stativkoordinatensystem

Zur Transformation muss man die Verschiebung und Drehung in eine homogene 4x4-Transformationsmatrix zusammenführen (1). Die Werte in Gleichung (1) eingesetzt ergeben Gleichung (2). Das Ergebnis (3) liefert die Transformation mit dem vertikalen und horizontalen Abstand des eingelesenen Punktes bezogen auf den Ursprung des Stativkoordinatensystems.

$$\vec{X}' = T_{B'B} \cdot \vec{X} \quad (1)$$

$$\vec{X}' = \begin{pmatrix} -\cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & -163 \cdot \sin \alpha - 152 \cdot \cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha & -163 \cdot \cos \alpha + 152 \cdot \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{X}' = \begin{pmatrix} -l \cdot \cos \alpha - 163 \cdot \sin \alpha - 152 \cdot \cos \alpha \\ 0 \\ l \cdot \sin \alpha - 163 \cdot \cos \alpha + 152 \cdot \sin \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Mittels dieser Koordinatentransformation können verschiedene Punkte eingelesen werden, da die Bahnpunkte ein gemeinsames Koordinatensystem besitzen.

4.2.2 Referenzkoordinatensystem

Das Referenzkoordinatensystem wird aufgespannt durch zwei fest vorgegebene Referenzpunkte. Der eine Referenzpunkt ist im Ursprung dieses Koordinatensystems, und der andere befindet sich in einem Abstand von einem Meter zum Ursprung auf der positiven X-Achse (s. Abbildung 4-6).

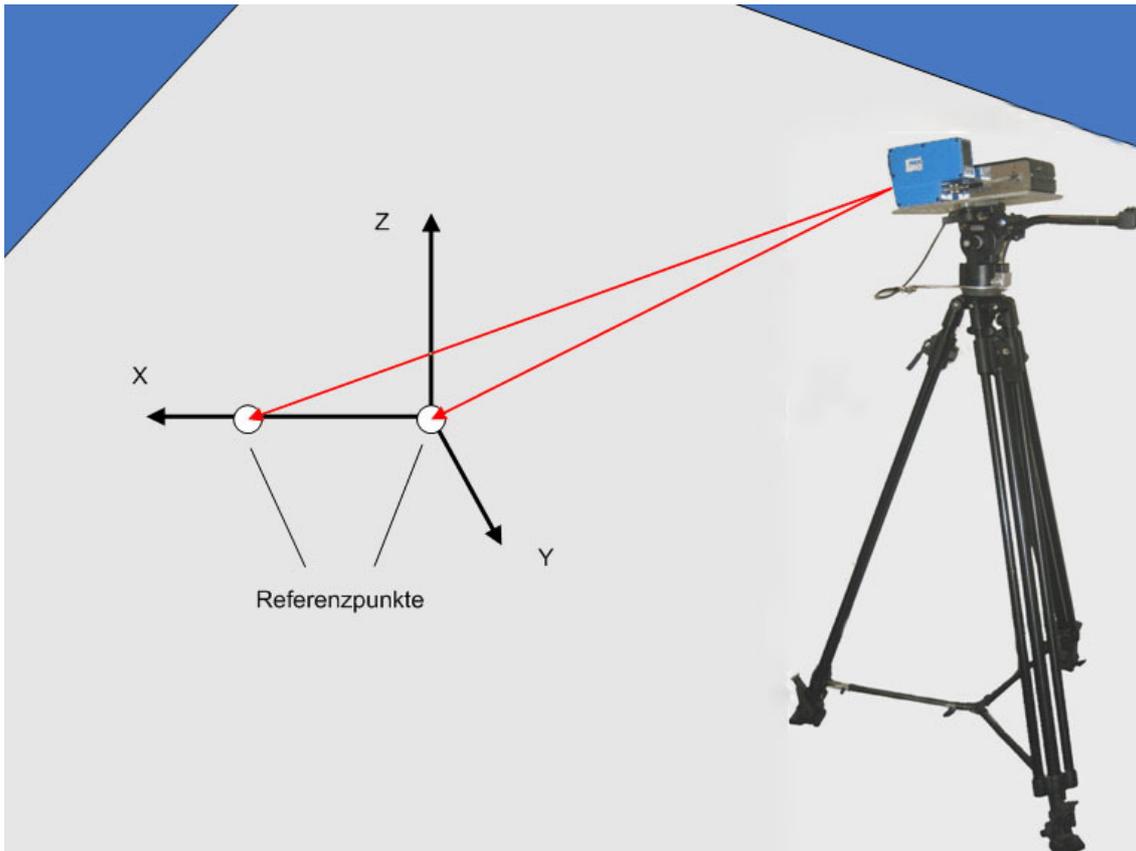


Abbildung 4-6: Überblick über den Referenzierungsprozess

Die Referenzpunkte werden immer in der gleichen Reihenfolge eingelesen, so können durch Beachtung des Vorzeichens von dem Differenzwinkel erste Informationen über die Stativposition getroffen werden. Da die Richtungswinkel im Uhrzeigersinn ansteigen und der Ursprungswinkel vom zweiten Richtungswinkel subtrahiert wird, befindet sich das Stativ bei einem negativen Differenzwinkel im ersten oder zweiten Quadranten und bei einem positiven Differenzwinkel im dritten oder vierten Quadranten.

Nach Einlesen der Referenzpunkte kann die Berechnung der Stativposition beziehungsweise des Stativvektors durchgeführt werden. Die Abstände vom Stativ zu den Referenzpunkten sind bekannt. Ein Dreieck wird dadurch aufgespannt und die gesuchten Größen sind die projizierten Längen (s. Abbildung 4-7).

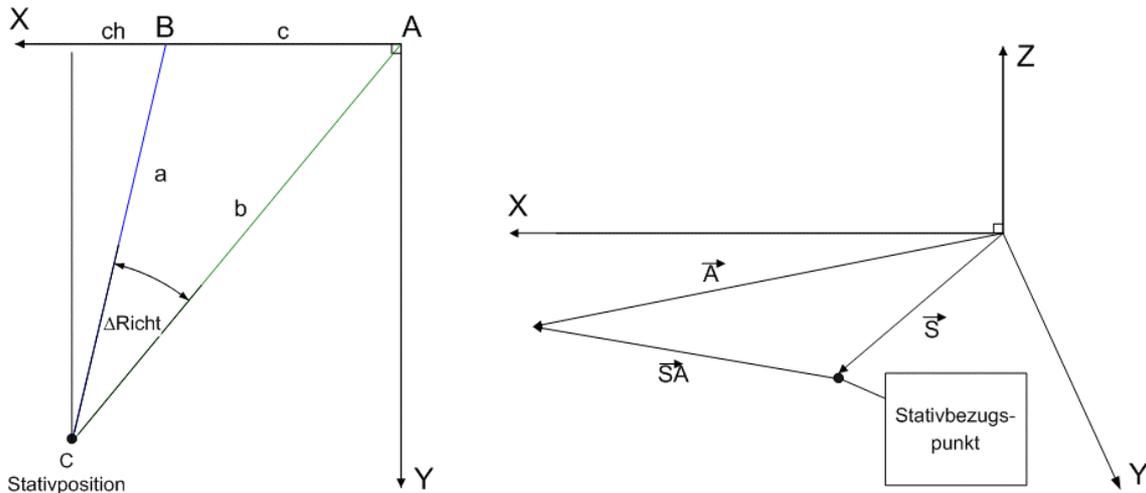


Abbildung 4-7: 2D-Aufsicht und Vektoraddition

Die Stativposition wird mit Hilfe des Satzes von Pythagoras an den beiden rechtwinkligen Dreiecken ermittelt.

Dabei gilt:

$$x = c + ch \quad (4)$$

$$b^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

$$a^2 = ch^2 + y^2 \quad (6)$$

Durch Einsetzen und Umformen erhält man:

$$x = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2c} \quad (7)$$

$$y = \sqrt{b^2 - \frac{(b^2 + c^2 - a^2)^2}{4c^2}} \quad (8)$$

$$z = l \cdot \sin \alpha - 163 \cdot \cos \alpha + 152 \cdot \sin \alpha \quad (9) \text{ siehe (3)}$$

Hieraus ergibt sich die in X-Y-Z-Koordinaten dargestellte Stativposition im Portalkoordinatensystem. Diese Koordinaten dienen als Basis zur Berechnung der Bahnpunkte.

Die Bahnpunkte werden mit dem 6D-Zeiger eingelesen und liegen zuerst im Stativkoordinatensystem vor. Um sie ins Roboterkoordinatensystem zu

transformieren, muss der Winkel zwischen Stativkoordinatensystem und Roboterkoordinatensystem ermittelt sowie eine Addition des Stativvektors \vec{S} mit dem Vektor \vec{SA} zum Bahnpunkt AP des resultierenden Vektors \vec{A} mit $\vec{A} = \vec{S} + \vec{SA}$ durchgeführt werden. Durch Einlesen eines zweiten Bahnpunktes wird eine zu bearbeitende Strecke am Werkstück definiert. Dabei legt der erste Bahnpunkt den Anfang und der zweite Bahnpunkt das Ende der Bahn fest.

4.3 Aufbau der Sensorsteuerelektronik

Die Sensoren werden über einen Mikrocontroller ATmega16 der Firma Atmel ausgelesen. Die Hauptplatine ist bestückt mit dem Mikrocontroller sowie Neigungssensoren, Bauteilen zur Spannungsversorgung, dem Kommunikationsmodul sowie diversen weiteren Komponenten. Der Mikrocontroller liest die Sensordaten aus, erstellt daraus ein Datenpaket und sendet dieses zu einem PC. Dabei läuft er in einer Endlosschleife, in der bei jedem Durchlauf der Zustand der seriellen Schnittstelle abgefragt wird (Polling).

Der Richtungssensor liefert eine analoge Ausgangsspannung zwischen 0 V und 2,5 V und wird auf einen 10-Bit-Analog-Digital-Umsetzereingang des Mikrocontrollers geführt. Dieser wandelt die Spannung in einen Zahlenwert zwischen 0 und 1023.

Die Neigungssensoren werden über einen SPI-Bus ausgelesen, wobei ein Datenpaket von 11 Bit gesendet wird. Jedoch ist der ATmega 16 auf eine Datenmenge von 8 Bit beschränkt. Deshalb wurde eine Software entwickelt, die an den Ports des Mikrocontrollers eine solche SPI-Schnittstelle simuliert.

Der Lasersensor ist mit dem Mikrocontroller über die SSI-Schnittstelle verbunden, die eine dem SPI-Bus vergleichbare Konfiguration aufweist.

4.4 Nutzerinteraktion mit dem 6D-Zeiger

Eine graphische Bedienoberfläche dient der Überprüfung der gemessenen Sensordaten und daraus abgeleiteten Werkstückpositionen. Abbildung 4-8 zeigt die Bildschirmansicht der Benutzeroberfläche. Im linken Bereich wird der durchzuführende Fertigungsprozess ausgewählt. Im mittleren oberen Bereich werden laufend die aktuellen Messdaten eingeblendet und graphisch interpretiert. In dieser Anzeige nehmen die Schieberegler seitlich der Messuhr die Position ein, die der gemessenen Entfernung sowie der Neigung und Querneigung entspricht. Die Messuhr zeigt die Ausrichtung des Stativkopfs durch die

Darstellung des Richtungswinkels. Oben rechts wird die aktuelle Stativposition in Polarkoordinaten angezeigt. Unterhalb davon sind die eingelesenen Bahnpunkte tabellarisch aufgelistet. Das untere Textfeld zeigt den aktuellen Betriebszustand des Sensorsystems. Dies sind beispielsweise Angaben über Erfolg oder Misserfolg des Referenzierungsprozesses oder die errechneten Roboterpositionen beim Start des Arbeitsvorganges.

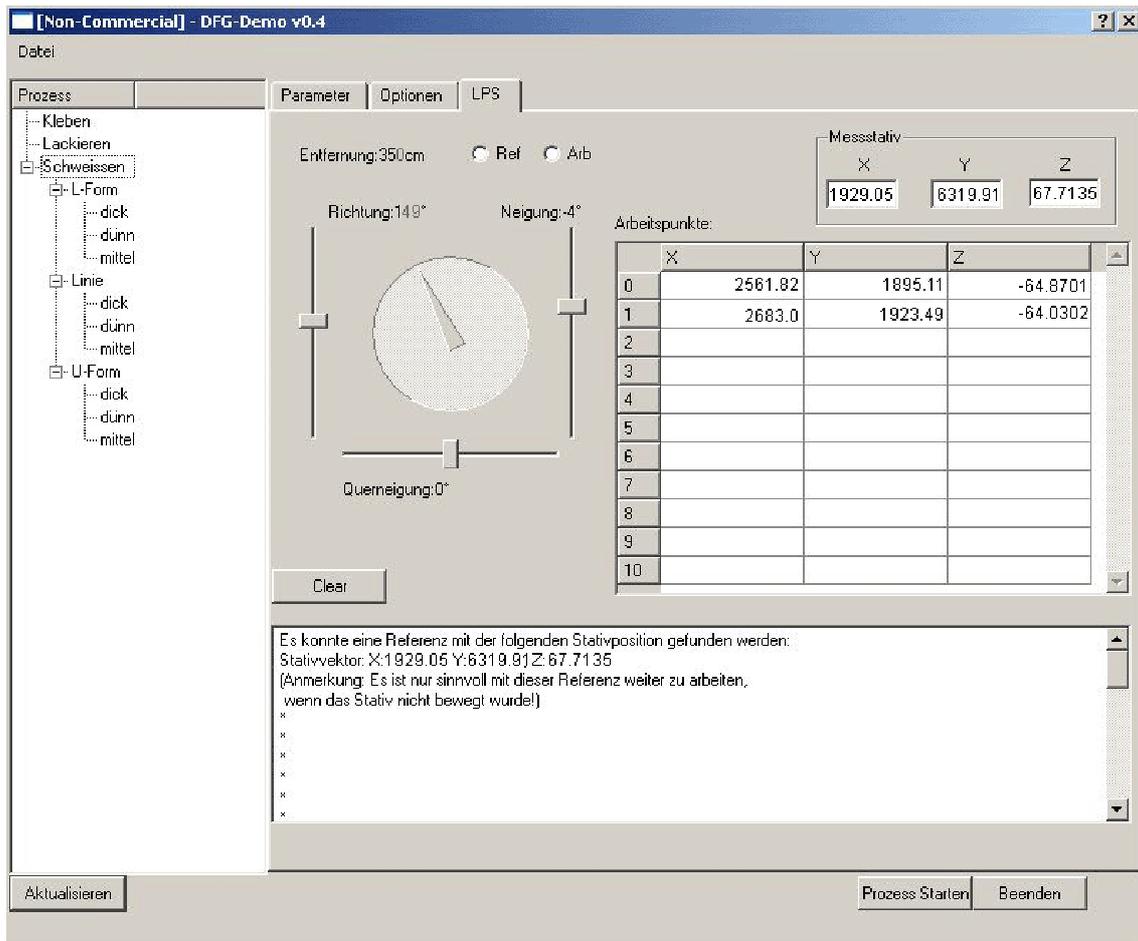


Abbildung 4-8: Übersicht über die graphische Bedienoberfläche

5 Dynamische Kollisionsvermeidung

Der Werker ist gefährdet im Arbeitsraum eines Roboters, wenn er beispielsweise mit dem 6D-Zeiger neue Werkstücke einliest. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie ein Flächenportalroboter eine Bewegung durchführt, ohne mit dynamischen Hindernissen, wie zum Beispiel einem Menschen, zu kollidieren. Hierzu wird das Konzept einer dynamischen Arbeitsraumüberwachung vorgestellt, die Sensorik und Software beschrieben und die Bahnplanung erläutert.

5.1 Konzept einer dynamischen Arbeitsraumüberwachung

Da ein sich bewegendes Roboter eine Gefahrenquelle für den Menschen darstellt, ist bisher eine Trennung der Arbeitsbereiche von Mensch und Roboter üblich. Jedoch gibt es zunehmend Anwendungsfelder, bei denen die Anwesenheit des Werkers im Arbeitsbereich des Roboters sinnvoll oder gar notwendig ist, beispielsweise bei Montage- oder Programmiervorgängen. Herkömmliche Lösungen reduzieren hierbei strikt die Geschwindigkeit des Roboters. Ökonomischer ist es jedoch, wenn die Geschwindigkeit sich lediglich innerhalb eines gewissen Sicherheitsbereichs um den Menschen reduziert.

Innerhalb des vorgeschlagenen Konzepts bietet die sichere Koexistenz von Mensch und Flächenportalroboter den Vorteil, dass der Werker in dem mit dem Roboter geteilten Arbeitsraum mit Hilfe des 6D-Zeigers die Werkstückposition ermitteln kann. Hierbei wird eine virtuelle Schutzzone um den Menschen gelegt, in die der Roboter nicht einfährt. Steht ein Mensch oder Hindernis auf dem direkten Weg zwischen Anfangs- und Endpunkt einer geplanten Roboterbewegung, soll der Roboter selbstständig eine sichere Ausweichbewegung ausführen (s. Abbildung 5-1).

Zusätzlich ermöglicht der gemeinsame Arbeitsraum dem Werker, den Produktionsprozess aus nächster Nähe zu beobachten, um gegebenenfalls korrigierend einzugreifen.

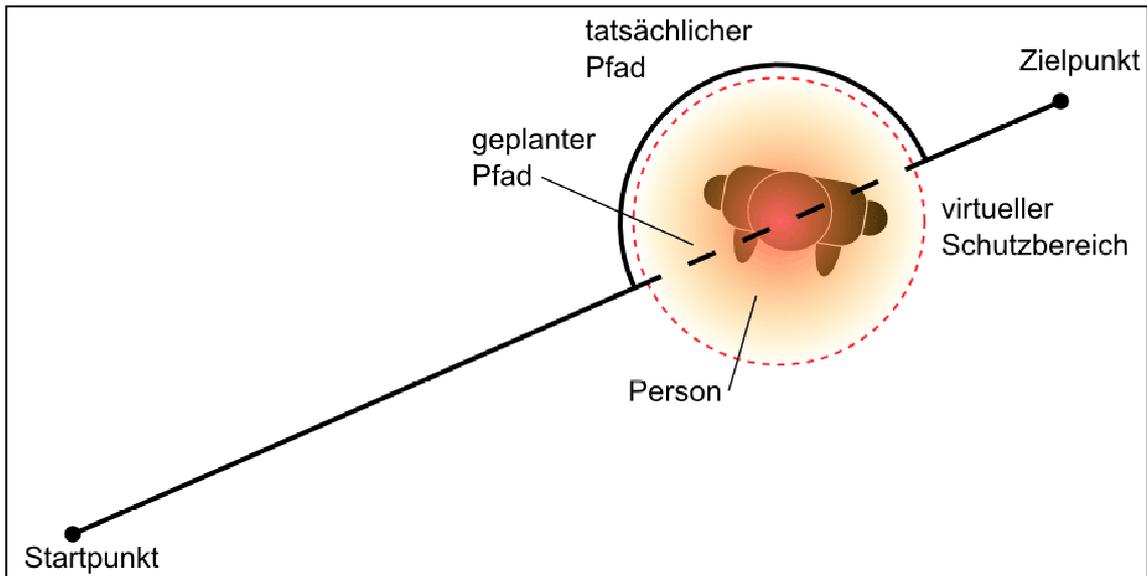


Abbildung 5-1: Ausweichbewegung des Flächenportalroboters

Die Position von Objekten im Arbeitsraum soll mittels geeigneter Sensorik echtzeitnah ermittelt werden. Ein modulares Software-Konzept soll hierbei sicherstellen, dass das Sicherheitssystem ausbaufähig ist. Zur Überprüfung des Konzepts werden zwei Lasersensoren verwendet, die mit einem Winkel von 90° zueinander im Arbeitsraum angebracht sind.

5.2 Funktionsweise der Lasersensoren

Der Scanner PLS200-113 von Sick (Proximity Laser Scanner) erzeugt mit einem Infrarot-Laser Lichtimpulse, aus denen eine zweidimensionale Abbildung der Umgebung abgeleitet wird. Wird der Laserstrahl von einem Hindernis reflektiert, lässt sich aus der Laufzeit des Laserstrahls die Entfernung berechnen. Mit dem zugehörigen Winkel ist damit die Position eines Hindernisses in einem polaren zweidimensionalen Koordinatensystem bekannt. Über die RS232-Schnittstelle können diese Daten von einem Computer ausgelesen werden. Hierzu schickt der Computer eine Sendeanforderung an den Sensor.

Ein PC errechnet aus der Antwort der zwei Lasersensoren die Position eines Objekts. Diese Position wird an den Mikrocontroller gesendet, der den Portalroboter steuert.

Das Ausweichen wird nicht über eine scharfe Begrenzung geregelt, sondern mittels einer Gleichung, die sich am Magnetismus mit zwei abstoßenden Polen orientiert.

$$F_g = -k \cdot v_{Soll} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (10)$$

Der Betrag der Ausweichkraft ist entgegengesetzt zu der Kraft, durch welche die ursprüngliche Bewegung eingeleitet wurde. Der Faktor r gibt den Abstand eines detektierten Objekts zu der aktuellen Roboterposition an. Die Sollgeschwindigkeit v_{Soll} verstärkt die Auslenkung mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Größe der virtuellen Schutzzone wird durch den Faktor k festgelegt. Da die Ablenkung mit abnehmender Distanz zwischen Mensch und Portalroboter bei Verwendung der Gleichung (10) langsamer zunimmt, wird dadurch die Mechanik des Roboters entlastet. Bei mehreren Objekten im Arbeitsraum wird die obige Gleichung für jedes einzelne Hindernis berechnet und die Ergebnisse werden vektoriell addiert.

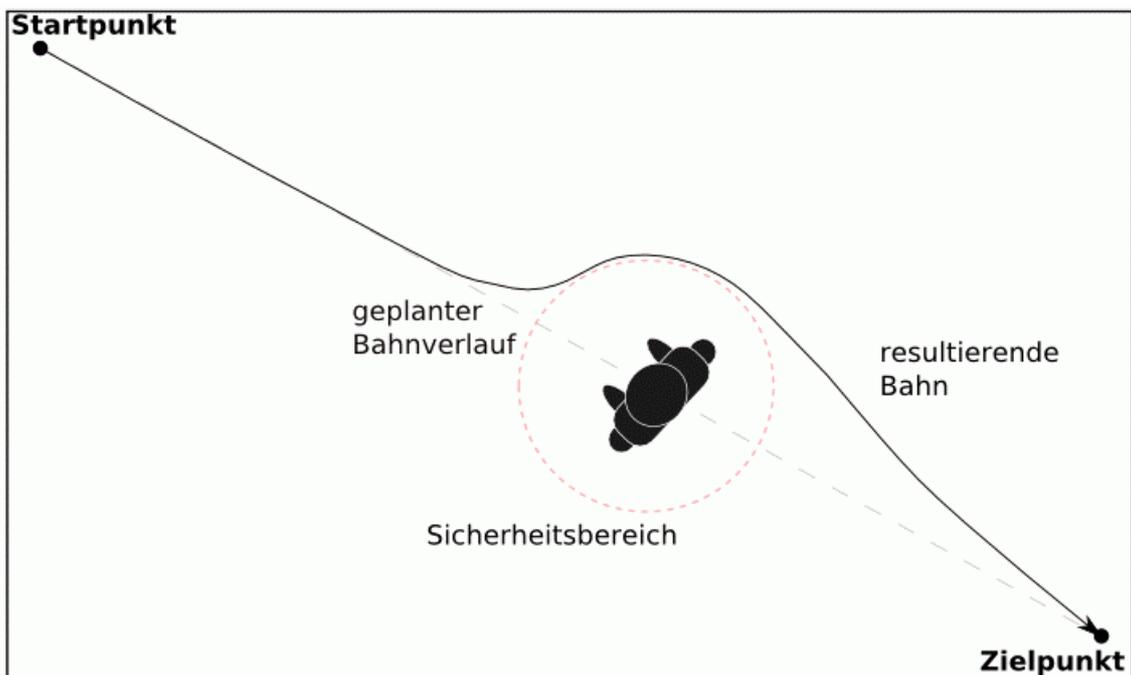


Abbildung 5-2: Ablenkung der Roboterbahn durch die virtuelle Schutzzone

In Abbildung 5-2 wird deutlich, dass die resultierende Bahn sich im Gegensatz zu Abbildung 5-1 bereits vor Erreichen der Sicherheitszone in Richtung der ablenkenden Kraft bewegt und dass sie sich von dem Scheitelpunkt tangential dem Zielpunkt nähert.

5.3 Software zum Auslesen der Sensordaten

Für die Auswertung der Daten von den Laserscannern wurde eine Software entwickelt, die diese Daten in ein kartesisches Koordinatensystem umrechnet. Die Koordinaten eines Punktes werden aus Abstand r und Winkel φ (in Grad) mittels Sinus- bzw. Kosinussatz berechnet:

$$x_1 = r_1 \cdot \sin\left(\varphi_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right), \quad y_1 = r_1 \cdot \cos\left(\varphi_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + y_{S1} \quad (11)$$

Diese Koordinaten beschreiben die Position der vom Sensor detektierten Objekte im Arbeitsraum und werden als Hindernisse behandelt. Unterschreiten zwei Objekte einen vorgegebenen Mindestabstand, werden diese als ein einzelnes Objekt behandelt. Die Unterscheidung wird mit jeweils zwei Zählschleifen für jeden einzelnen Datenpunkt durchgeführt. Zur Ermittlung des Mindestabstandes wurden verschiedene Testreihen bezüglich stabilem Bild, niedrigem Datenvolumen und stabiler Datenerkennung durchgeführt. Aus den zu einem Objekt gehörenden Koordinaten wird der Schwerpunkt berechnet. Hierzu wird der arithmetische Mittelwert genommen:

$$x_{SP} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad y_{SP} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (12)$$

Da Objekte in dieser Versuchsanordnung nur von zwei Seiten gescannt werden, entspricht der ermittelte Schwerpunkt nicht dem realen Flächenschwerpunkt.

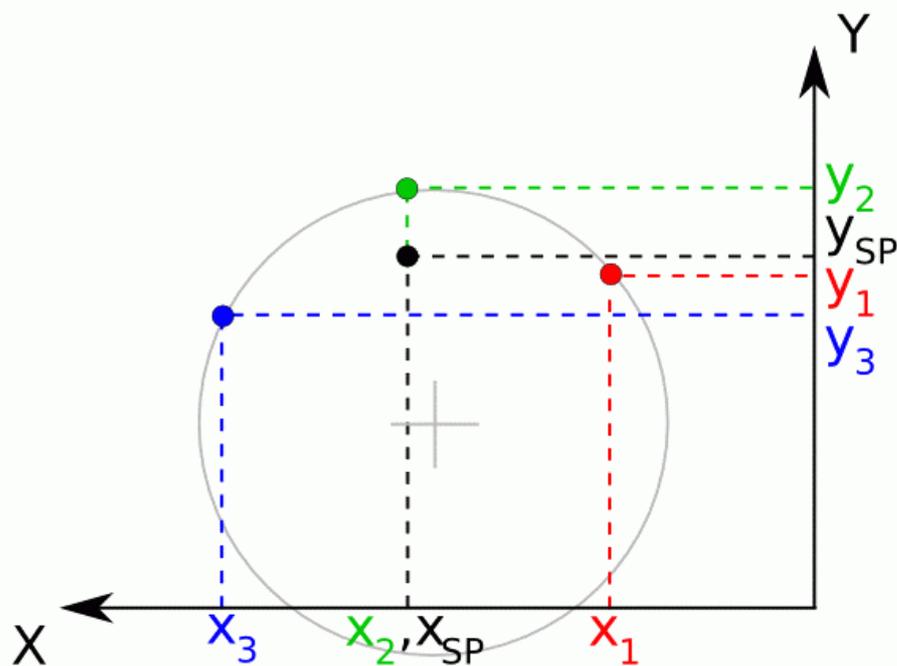


Abbildung 5-3: Ermittlung des Objektschwerpunktes

Der hierbei entstehende Fehler hängt ab vom Durchmesser des gemessenen Objektes und liegt im Bereich von wenigen Zentimetern.

Da die von den Laserscannern ermittelten Daten bei identischem Versuchsaufbau eine Messunsicherheit aufweisen, werden die Daten jedes Datensatzes mit den vorigen Daten verglichen. Sind die Abstände zweier Objektschwerpunkte geringer als 100 mm, werden die Koordinaten des zuvor gemessenen Schwerpunktes verwendet. Dadurch wird die Detektion stabilisiert und die Erkennung von statischen Objekten erleichtert. Nachteilig ist die Erkennung von sehr dynamisch bewegten Objekten wie sich schnell fortbewegenden Personen, welche jedoch im Allgemeinen nicht im industriellen Arbeitsumfeld vorkommen.

5.4 Unterscheidung kollisionsgefährdeter und –freier Objekte

Das System kann zwischen Objekten unterscheiden, mit denen eine Kollision unbedingt vermieden werden muss (z.B. Personen) und anderen, über die der Roboter sich hinweg bewegen darf (z.B. Arbeitstische). Hierzu wird ein Initialisierungsvorgang ohne kollisionsgefährdete Hindernisse im Arbeitsraum durchgeführt. Hierbei wird die Position aller Objekte erfasst und als kollisionsfrei registriert. Im Arbeitsbetrieb werden die Positionen jedes einzelnen Objektes mit den Koordinaten der als kollisionsfrei registrierten Objekte verglichen. Ist ein

kollisionsgefährdetes Hindernis näher als 500 mm an einem als kollisionsfrei registrierten Objekt, werden beide Objekte als ein einzelnes Objekt zusammengefasst und der gemeinsame Schwerpunkt ermittelt. Dieses Hindernis wird vom System als kollisionsgefährdetes Objekt behandelt.

5.5 Bedienoberfläche der Objekterkennung

In der graphischen Bedienoberfläche des Auswerte-Programms für die Laserscanner werden die aktuell erkannten Objekte zentral dargestellt (s. Abbildung 5-4). Die Positionen der Scanner werden ebenfalls graphisch angezeigt. Die linke Seite beinhaltet ein Textfenster, welches die Meldungen seit Programmstart anzeigt.

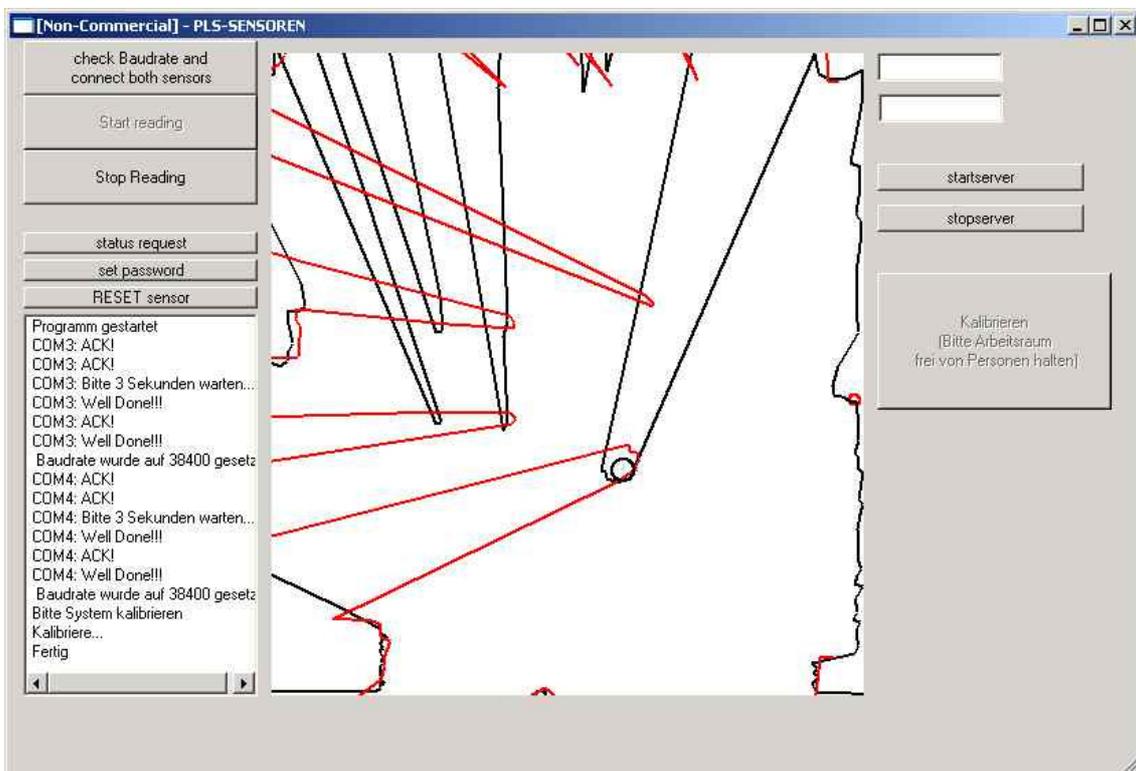


Abbildung 5-4: Bedienoberfläche der Objekterkennung

Nach Initialisieren und Verbinden der Sensoren wird ein Server gestartet. Es können sich beliebige Client-Rechner über das Intranet daran anmelden und die Positionen von kollisionsgefährdeten Objekten abfragen.

5.6 Bahnplanung des Flächenportalroboters

Die Ausweichbewegungen des Portalroboters erfolgen als Continuous-Path-Bewegungen. Dadurch kann der Roboter durch ermittelte Ausweichpunkte auf einer stetigen Bahn mit differenzierbaren Bewegungen fahren.

Für die Ausweichfunktion müssen die notwendigen Bahnpunkte einer Ausweichbewegung von einem PC bereitgestellt werden, da die Speicherkapazität des Mikrocontrollers begrenzt ist. Zu Beginn einer Bahnfahrt an Punkt 1 (s. Abbildung 5-5) sendet der PC die Bahnpunkte 3 und 5 an den Mikrocontroller. Dabei ist im Nachrichtentelegramm die Information enthalten, ob der zweite Bahnpunkt ein Zwischen- oder Endpunkt ist. Sobald der Portalroboter einen festgelegten Abstand zum Zwischenpunkt 2 erreicht, fordert er per Telegramm den übernächsten Bahnpunkt an. Nach Passieren des dritten Bahnpunktes werden die Reglerwerte der Achssteuerung auf den nächsten Punkt justiert. Bei Erreichen des festgelegten Abstands zu Bahnpunkt 4 werden wieder die Koordinaten des übernächsten Bahnpunktes angefordert, sofern dieser Punkt kein Endpunkt ist.

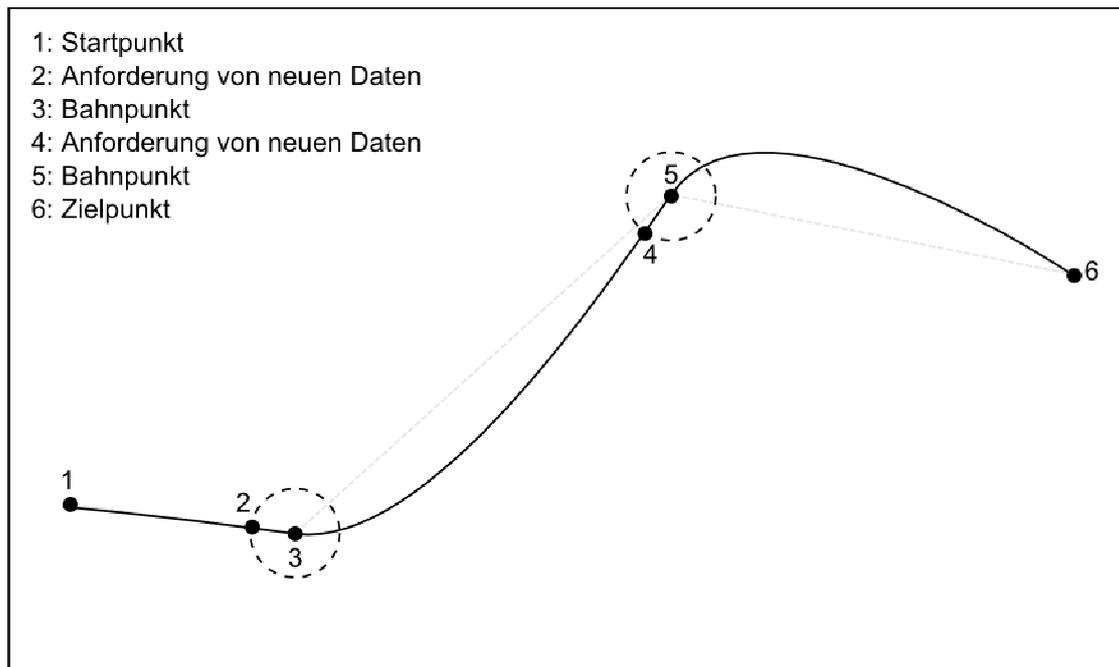


Abbildung 5-5: Bahnsteuerung einer stetigen Bewegung

Da die Bahnpunkte extern von einem PC übermittelt werden, erlaubt diese Vorgehensweise eine Änderung der Bahnkurve während einer laufenden Bewegung. Dadurch kann, beispielsweise auf ein detektiertes Hindernis,

kurzfristig reagiert und eine Ausweichbewegung eingeleitet werden. Die Ausweichbewegung wird im Mikrocontroller anhand der Bahnpunkte berechnet. Dabei wird ein Vorfaktor durch die zweite Potenz des Abstandes zweier Körper dividiert.

$$\vec{A} = -k \cdot v_{Soll} \cdot \frac{1}{|\vec{r}|^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (13)$$

Der Vektor \vec{A} ist die Achsgeschwindigkeit. k ist ein Faktor, der den Betrag der Ausgleichsbewegung festlegt und damit auch den Mindestabstand des Roboters zum Mittelpunkt der virtuellen Schutzzone bestimmt. v_{Soll} gibt die Sollgeschwindigkeit des Roboters an. Der Vektor \vec{r} ist die aktuelle Entfernung des Roboters zum Mittelpunkt eines detektierten Objektes. Das Ergebnis dieser Berechnung wird achsenbezogen auf die Sollwerte für die Achsregler addiert:

$$A_x = \frac{|\vec{A}| \cdot r_x}{|\vec{r}|}, \quad A_y = \frac{|\vec{A}| \cdot r_y}{|\vec{r}|} \quad (14)$$

Da die Stellwert- und Beschleunigungsbegrenzung erst nach dem Addieren von A_x und A_y durchgeführt wird, bremst der Roboter bei einem detektierten Objekt nicht abrupt ab, sondern leitet eine sanfte Ausgleichsbewegung ein.

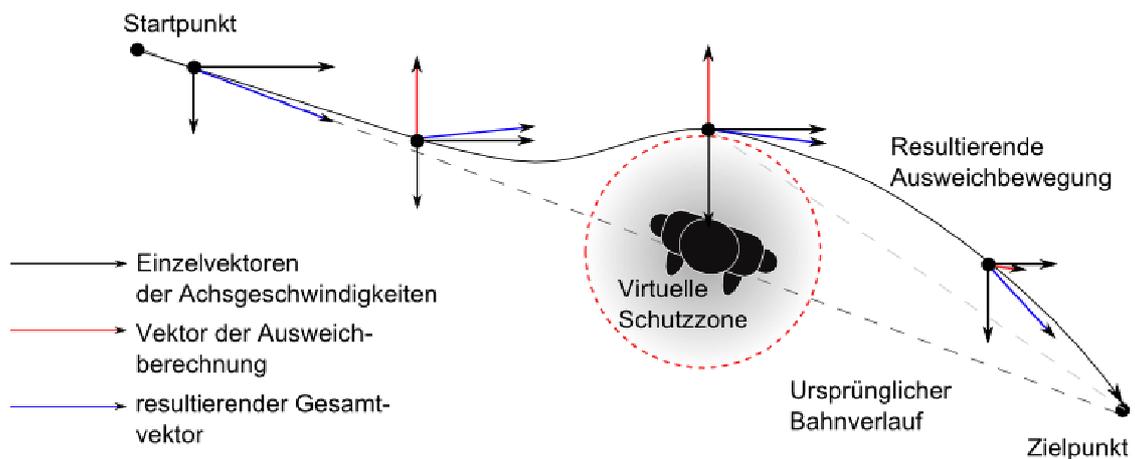


Abbildung 5-6: Vektoransicht der Ausweichbewegung

6 Nutzerorientierte Kommunikationsplattform

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer nutzerorientierten Kommunikationsplattform auf Basis eines tragbaren Computersystems erläutert und deren Nutzerunterstützung für die Prozesszuweisung und -überwachung beschrieben.

6.1 Integration tragbarer PC-Technik in die Fertigungszelle

Herkömmliche Methoden zur Erfassung, Strukturierung und Aufbereitung von größeren Mengen an Maschinenparametern erweisen sich oftmals als ungeeignet für Prozessdatenrepräsentation und -überwachung, Prävention und Diagnose. Zusätzlich ist die informationstechnische Unterstützung von Service-Prozessen wie beispielsweise Instandhaltungsarbeiten vor Ort oftmals ungenügend.

Vor diesem Hintergrund besteht ein Forschungsschwerpunkt darin, die gerade bei einer werkstatorientierten Fertigung mit kleinen Losgrößen auftretende Vielzahl an Parametern in Quasi-Echtzeit zu erfassen und auszuwerten, um anhand dieser Informationen gezielte Eingriffe bei Störungen innerhalb des Prozess- und Fertigungsablaufs vornehmen zu können. Darüber hinaus haben die Forschungsarbeiten eine multimediale Unterstützung von Service-Abläufen zum Ziel. Hierzu soll ein Maschineninformationssystem dienen, welches die Maschinen- und Prozessparameter für eine spätere Auswertung speichert. Für den Fall, dass kein Experte vor Ort ist, soll ein Videokonferenzsystem mit virtuellem Flipboard die Übermittlung multimedialer Handlungsanweisungen entscheidend vereinfachen.

Auf diese Weise lässt sich durch die Verknüpfung der verschiedenen Forschungsschwerpunkte eine mobile Überwachungs- und Service-Einheit entwickeln, die eine erhebliche Verbesserung des gesamten Produktionsablaufs gewährleistet.

6.2 Anwendung tragbarer Computertechnik

Oberflächlich betrachtet unterscheidet sich die von tragbarer Computertechnik bereitgestellte Funktionalität wenig von herkömmlichen Desktop- bzw. Notebook-Anwendungen. Gemeinsam ist die Möglichkeit der Interaktion, Informationsrepräsentation, sowie Datenerfassung und -auswertung. Jedoch eröffnet die mobile Assistenz des Werkers mittels tragbarer Computertechnik

neue Perspektiven für Anwendungen, in denen herkömmliche Computersysteme (Desktop PC, Notebook) nicht einsetzbar sind und eine Automatisierung der auszuführenden Tätigkeit nicht möglich ist. Hierbei soll der Nutzer anwendungsorientiert durch den Computer unterstützt werden und möglichst wenig durch die Bedienung des Systems abgelenkt werden. Der Einsatz eines solchen Systems bringt im produktionstechnischen Umfeld folgende Vorteile mit sich [80]:

- Die Tätigkeit ist ortsflexibel,
- Die Tätigkeit kann während einer Bewegung durchgeführt werden,
- Der Schwerpunkt der primären Aufmerksamkeit liegt in der physischen Welt,
- Die Aufgabe wird an einem Ort, jedoch an wechselnden Objekten durchgeführt,
- Die simultane Überwachung verschiedener Anlagen ist möglich.

Produktivitätssteigerungspotenziale durch Einsatz tragbarer Rechnersysteme bestehen innerhalb Aufgabenstellungen, bei denen der Nutzer beide Hände für seine Tätigkeit frei haben muss, keine Abstellfläche zur Verfügung steht und in denen die Unterstützung durch Computertechnik benötigt wird. Beispielsweise profitiert ein Service-Mitarbeiter bei Montage- oder Wartungsarbeiten durch den unmittelbaren Zugriff auf gerätespezifische Dokumentation, während beide Hände für die Erledigung der primären Aufgabenstellung frei bleiben. Durch tragbare Computertechnologie können somit Arbeitsabläufe effizienter sowie zeit- und kostengünstiger gestaltet werden.

6.3 Ergonomische Gestaltung der Nutzerschnittstelle

Beeinflusst durch die Vorstellung des „Invisible Computing“ [81] steigt die Nachfrage nach ergonomischen und intelligenten Schnittstellen kontinuierlich. Entsprechende Konzepte werden zum Beispiel in den Visionen des „Ubiquitous Computing“ [82] und der „Ambient Intelligence“ [83] beschrieben. Beide Visionen beschreiben eine intelligente persönliche Umgebung, ein neues Paradigma für die Interaktion zwischen einer Person und ihrer alltäglichen Umgebung: Intelligente Schnittstellen integrieren sich in die Umgebung des Nutzers und sind mit Rechen- und Kommunikationsressourcen ausgestattet, um automatisiert und situationsabhängig den Anwender in seiner Tätigkeit zu unterstützen.

Eine ergonomische Gestaltung der visuellen Ausgabeschnittstelle ist von entscheidender Bedeutung. Gerade im mobilen Umfeld ist nicht nur die Nutzer-Oberfläche wichtig, es muss die gesamte Interaktion zwischen Mensch und tragbarem PC inklusive der Ein- und Ausgabekanäle bedacht werden. Je intuitiver sich die Bedienung der Interaktionsmöglichkeiten gestaltet, desto einfacher sind sie zu benutzen und desto besser werden sie vom jeweiligen Nutzer angenommen. Zusätzlich reduziert eine intuitive Bedienung die Trainingskosten und verbessert den Arbeitsfluss. Deshalb muss eine Bedienoberfläche konsistent gestaltet sein und ähnliche Interaktionsmuster sollten sich ebenfalls durch konsistente Bedienung auszeichnen.

Die Oberfläche der Applikation wurde nach folgenden Kriterien gestaltet:

Aufgabenorientierte Gestaltung	Praxisgerechte Funktionalität
Bedienablauf	Intuitivität durch Konsistenz mit vertrauten Prinzipien
Layout	Einheitlichkeit der Bedienelemente und Informationsdarstellung hinsichtlich Farbwahl und Icondarstellung
Terminologie	Aussagekräftige Begriffe mit konsistenter Verwendung
Navigation	Flexibler und konsistenter Zugang zu Funktionen und Informationen

6.4 Umsetzung der Kommunikationsplattform

Die Vernetzung bietet den Nutzern einen permanenten fach- und medienübergreifenden Zugriff auf die vorhandenen Informationsressourcen. Die Maschinen- und Prozessüberwachung erlaubt den Zugriff auf prozessrelevante Informationen während des laufenden Betriebs ohne die Notwendigkeit der physischen Präsenz des Maschinennutzers an den Fertigungseinheiten. Dies ermöglicht eine simultane Überwachung verschiedener Produktionsanlagen. Für Service-Anwendungen haben die Mitarbeiter in einem Service-Center direkten Zugriff auf maschinen- und prozessrelevante Parameter und können einen Techniker direkt unterstützen.

Als Hardwareplattform werden die tragbaren Rechnersysteme MA IV und MA IV TC von der Xybernaut GmbH verwendet. Diese Systeme bestehen aus verschiedenen Ein- und Ausgabegeräten, Tastaturen und LCD-Displays, welche wahlweise am Unterarm (Flatpanel Display 6.4“ DLR und Flatpanel Display 6.4“ JAE) oder als Headmounted Display (HMD 00100 jeweils see-through und mirror) getragen werden. Der Rechner selbst ist unterteilt in eine universelle Rechnerkomponente und in eine kompakte Schnittstellenkomponente, die mit wenigen Handgriffen voneinander zu trennen sind. Die Schnittstellenkomponente lässt sich so konfigurieren, dass sie die benötigten Ein-/Ausgabe-Geräte bedient.

In Abbildung 6-1 ist die Überwachung mehrerer Anlagen dargestellt. Hierbei indizieren die Balkendiagramme die jeweilige Stromstärke und Spannung bei der beispielhaften Implementierung eines Schweißprozesses. Abweichungen von Soll-Stromstärke und -Spannung sind bei 5 % in gelb und bei 10 % in rot farblich hervorgehoben. Numerisch werden Ist- und Soll-Werte dieser Parameter angezeigt und gespeichert. Weiterhin sind die Drahtgeschwindigkeit und die Werkstückdicke aufgeführt.

Monitoring	Alert!	Conference	Service	Archive	Exit
▼ ▲				akt	ref
TIME Syn02	Bte/Nr: 00001/0003	Status: ON	146	I	140
Stop			21.7	U	22.2
Details			V D	4.3	3.8 M
TIME Twin	Bte/Nr: 00001/0003	Status: ON	144	I	-----
Stop			21.8	U	-----
Details			V D	-----	----- M
IRON TX01	Bte/Nr: 00002/0002	Status: ON	143	I	145
Stop			21.6	U	21.9
Details			V D	4.3	3.8 M
IRON TX02	Bte/Nr: 00001/0003	Status: ON	144	I	131
Start			21.8	U	22.2
Details			V D	4.3	3.8 M

Abbildung 6-1: Überwachung mehrerer Fertigungseinheiten

Abbildung 6-2 zeigt die Detailansicht einer einzelnen Schweißanlage mit Balkendiagramm, numerischen Angaben bezüglich Soll- und Ist-Werten von Schweißstromstärke und -spannung sowie deren Kurvenverlauf.

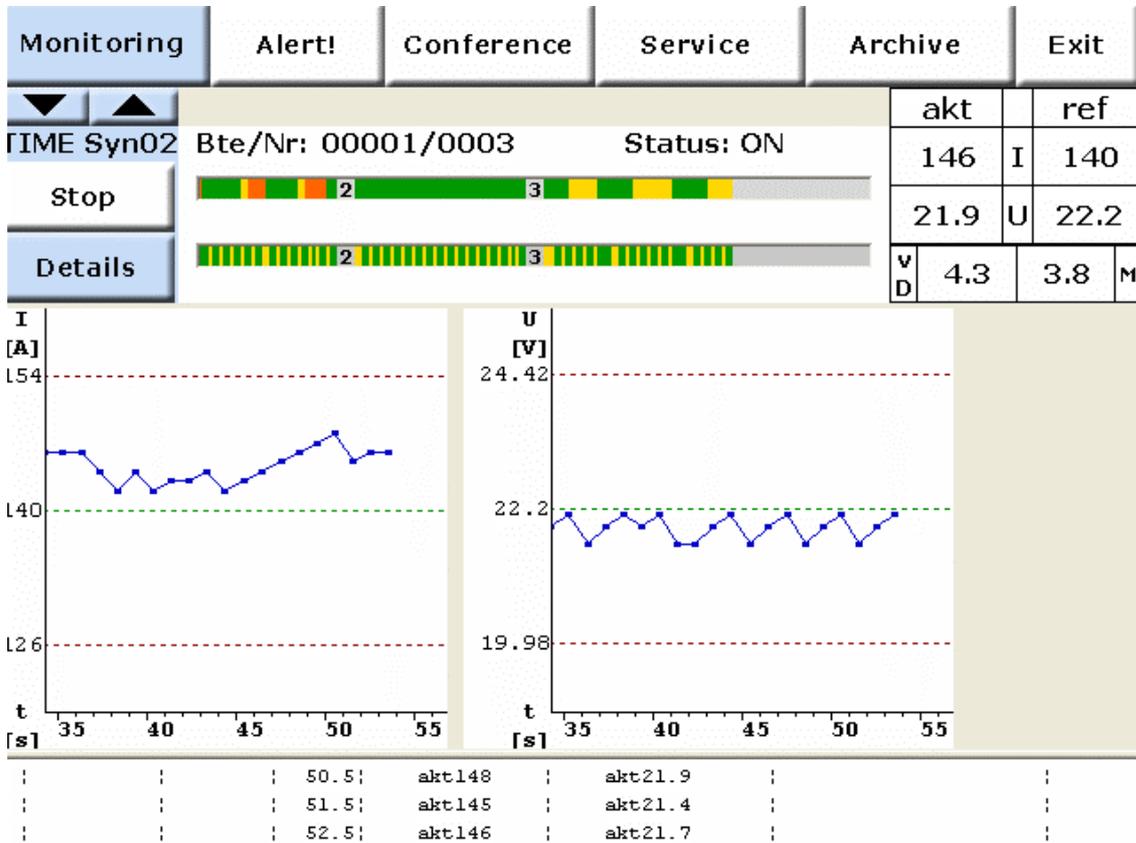


Abbildung 6-2: Detailansicht der Fertigungsparameter

Damit eine Fehlfunktion bemerkt werden kann, wird bei Überschreiten einer Toleranzgrenze ein optischer und akustischer Alarm ausgelöst.

7 Integration und Erprobung in einer Schweißfertigungszelle

Die entwickelten Strategien und Verfahren werden in einer Pilotanlage, bestehend aus einem Flächenportalroboter und daran befestigtem Industrieroboter mit Schweißanlage, exemplarisch integriert und erprobt. Im Folgenden werden der strukturelle Aufbau der Pilotanlage sowie die Systemkomponenten und Rahmenbedingungen vorgestellt. Daran schließt sich die Integration der einzelnen Komponenten und die technische Umsetzung in einem Robotersystem als besonderem Schwerpunkt an. Weiterhin wird die Genauigkeit des Flächenportalroboters festgestellt. Daraufhin folgen die Zuordnung der Prozesstechnologie und die interaktive Arbeitsorganisation. Darüber hinaus wird die Integration der Kommunikationsplattform in die Schweißfertigungszelle mit Prozessüberwachung und Unterstützung im Service-Fall beschrieben. Das Kapitel schließt ab mit einer Evaluierung der Ergebnisse.

7.1 Struktureller Aufbau des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem besteht aus einer Pilotanlage, die zusammengesetzt ist aus den fünf Komponenten: Messstativ, Laserscanner, Flächenportalroboter, Industrieroboter sowie ein tragbarer Rechner, die jeweils über einen PC im Netzwerk miteinander verbunden sind (s. Abbildung 7-1). Die vom Werker über das Messstativ gemessenen Daten werden über eine serielle Schnittstelle an einen PC zur Auswertung gesendet. Dieser berechnet die Werkstückpositionen und übergibt diese an den tragbaren Rechner, an dem die gewünschte Technologie eingegeben wird. Die Koordinaten werden an den Rechner des Portalroboters übergeben. Dieser Rechner übermittelt die Koordinaten an einen Mikrocontroller, in den die Steuerung des Portalroboters implementiert ist. Sollten die beiden PLS-Sensoren ein Hindernis detektiert haben, sendet deren Rechner die Koordinaten dieses Objekts an den Rechner des Portalroboters. Diese Koordinaten werden an den Mikrocontroller übermittelt, worauf dieser eine Ausweichbewegung einleitet. An dem Flächenportalroboter ist ein Knickarmroboter der Firma Motoman befestigt. Hat der Portalroboter sein Ziel erreicht, leitet der Rechner des Industrieroboters den eigentlichen Bearbeitungsprozess anhand der vom tragbaren PC übergebenen Prozessart und Prozessparameter ein. Über den integrierten Sensor wird die Bauteilposition verifiziert und gegebenenfalls korrigiert. Daraufhin beginnt der

- Integration und Erprobung in einer Schweißfertigungszelle -

eigentliche Fertigungsprozess, wobei in der vorliegenden Arbeit beispielhaft ein Schweißprozess realisiert wurde.

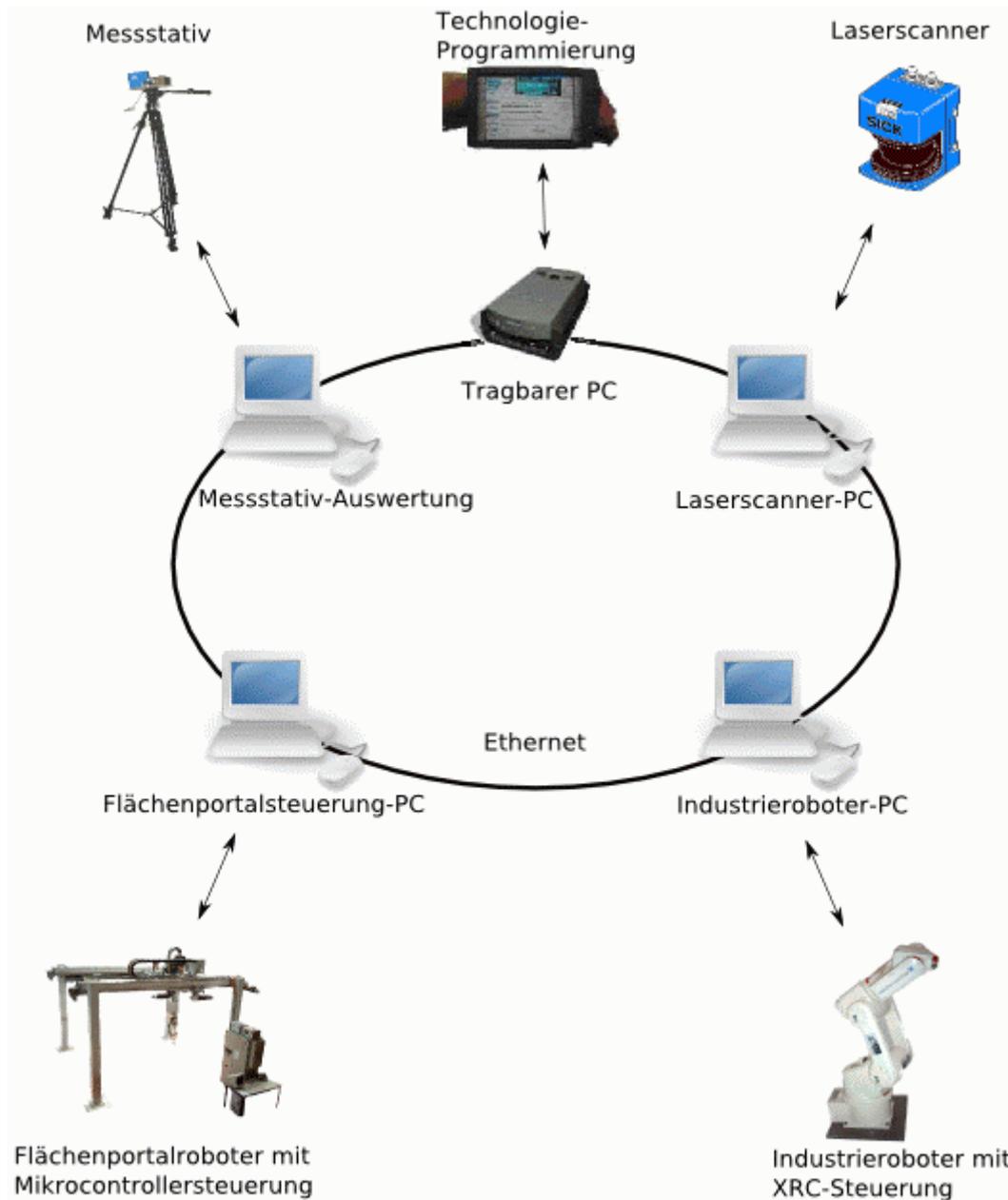


Abbildung 7-1: Überblick über das Gesamtsystem

Da die Sensordaten des Messstativs und der Laserscanner über Server im Netz bereitgestellt werden, können diese auch von weiteren Client-Rechnern abgerufen und visualisiert werden.

7.2 Systemkomponenten und Rahmenbedingungen

7.2.1 Robotersystem

Das Schweißfertigungssystem verfügt über eine Steuerung, die es erlaubt, dass das System durch ein Netzwerk angesprochen werden kann. Der Arbeitsraum ist ausreichend bemessen, damit ortsflexible Produktionsvoraussetzungen gegeben sind. Um die Einsatzmöglichkeiten zu vergrößern, wurde ein Knickarmroboter an einem Flächenportalroboter angebracht.

7.2.1.1 Industrieroboter

Der verwendete Industrieroboter ist ein Knickarmroboter Motoman SV3X (s. Abbildung 7-2) mit einer maximalen Traglast von 3 kg. Das Robotersystem ist als Konsolroboter mit verhältnismäßig kleiner Standfläche und geringem Gewicht von 30 kg für die Montage an dem Flächenportalroboter geeignet.



Abbildung 7-2: Motoman SV3X

Gesteuert wird der Roboter über eine Motoman XRC-Steuerung. Diese Steuerung verfügt neben dem Steuerungsrechner über eine integrierte Energieversorgung, Antriebsregler, Ein-/Ausgabe-Boards und Sicherheitskreise. Die XRC-Steuerung ermöglicht eine Kommunikation über Ethernet, Feldbus sowie RS-232-Schnittstelle und besitzt 40 digitale Ein- und Ausgänge. Die

- Integration und Erprobung in einer Schweißfertigungszelle -

Steuerung ist über eine PC-Karte ansprechbar und ermöglicht somit das Erstellen und Auslesen von sogenannten Jobs mit handelsüblichen PCs.

7.2.1.2 Flächenportalroboter

Der Motoman-Roboter ist kopfüber hängend an einem Flächenportalroboter montiert, um dadurch den Arbeitsraum für die Durchführung der verschiedenen Aufgaben zu vergrößern. Bei dem verwendeten Flächenportalroboter handelt es sich um den Typ FP-II aus dem Hause Mannesmann DEMAG (s. Abbildung 7-3).

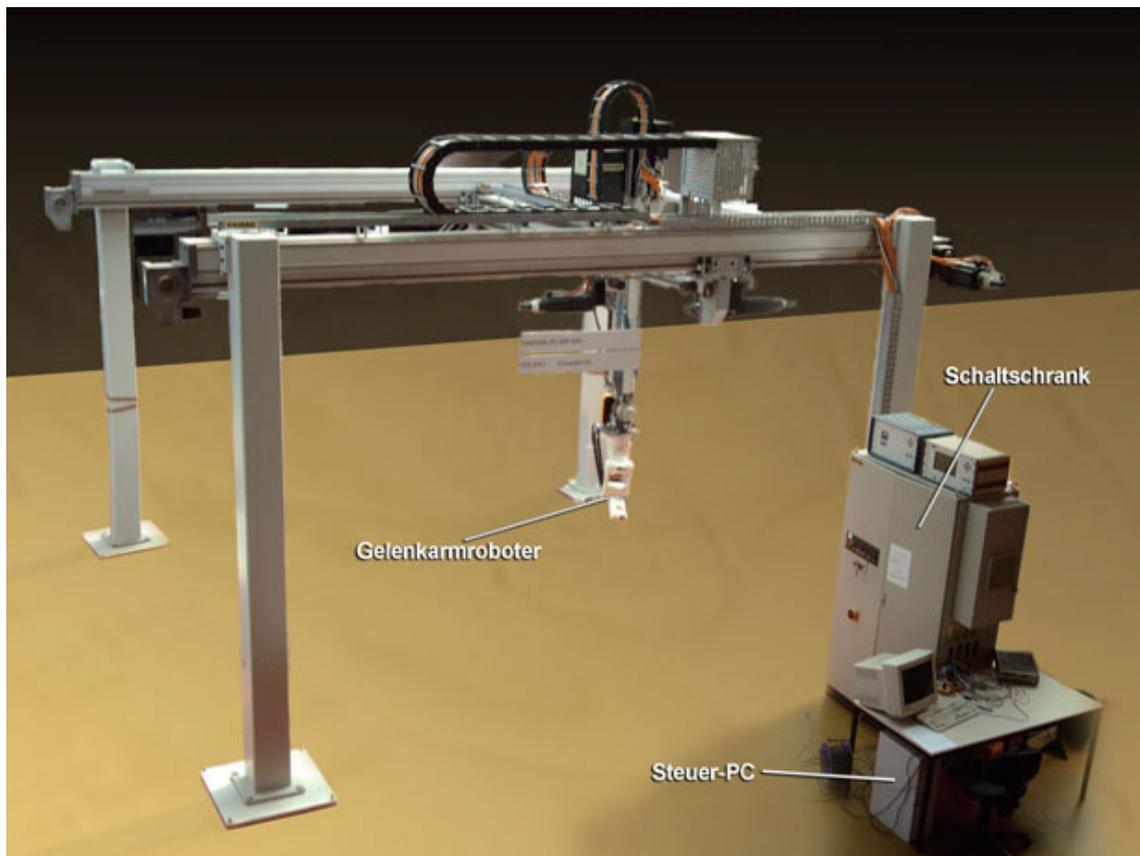


Abbildung 7-3: Flächenportalroboter mit montiertem Roboter

Der Flächenportalroboter verfügt über sechs Achsen (3 translatorische und 3 rotatorische). Bei einem Eigengewicht von 810 kg ist das Portal für eine Nutzlast von maximal 30 kg ausgelegt, dies entspricht dem Gewicht des Motoman SV3X. Der Arbeitsraum umfasst 5 m x 3 m, wobei Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu 2,2 m/sek möglich sind.

Da die vorhandene Siemens SIROTEC ACR 20-Steuerung nicht netzwerkfähig ist, wurde sie durch die Integration modularer Steuerungsmodule dahingehend erweitert, dass der Portalroboter extern angesteuert werden kann. Durch die Implementierung geeigneter Mikrocontrollertechnik und entsprechender Software sind nun Point-To-Point- und Continuous-Path-Bewegungen im kartesischen Arbeitsraum der Grundachsen möglich. Die Bewegungsprogrammierung erfolgt auf PC-Ebene während die Bewegungsplanung auf Mikrocontroller-Ebene (μC) implementiert ist (s. Abbildung 7-4).

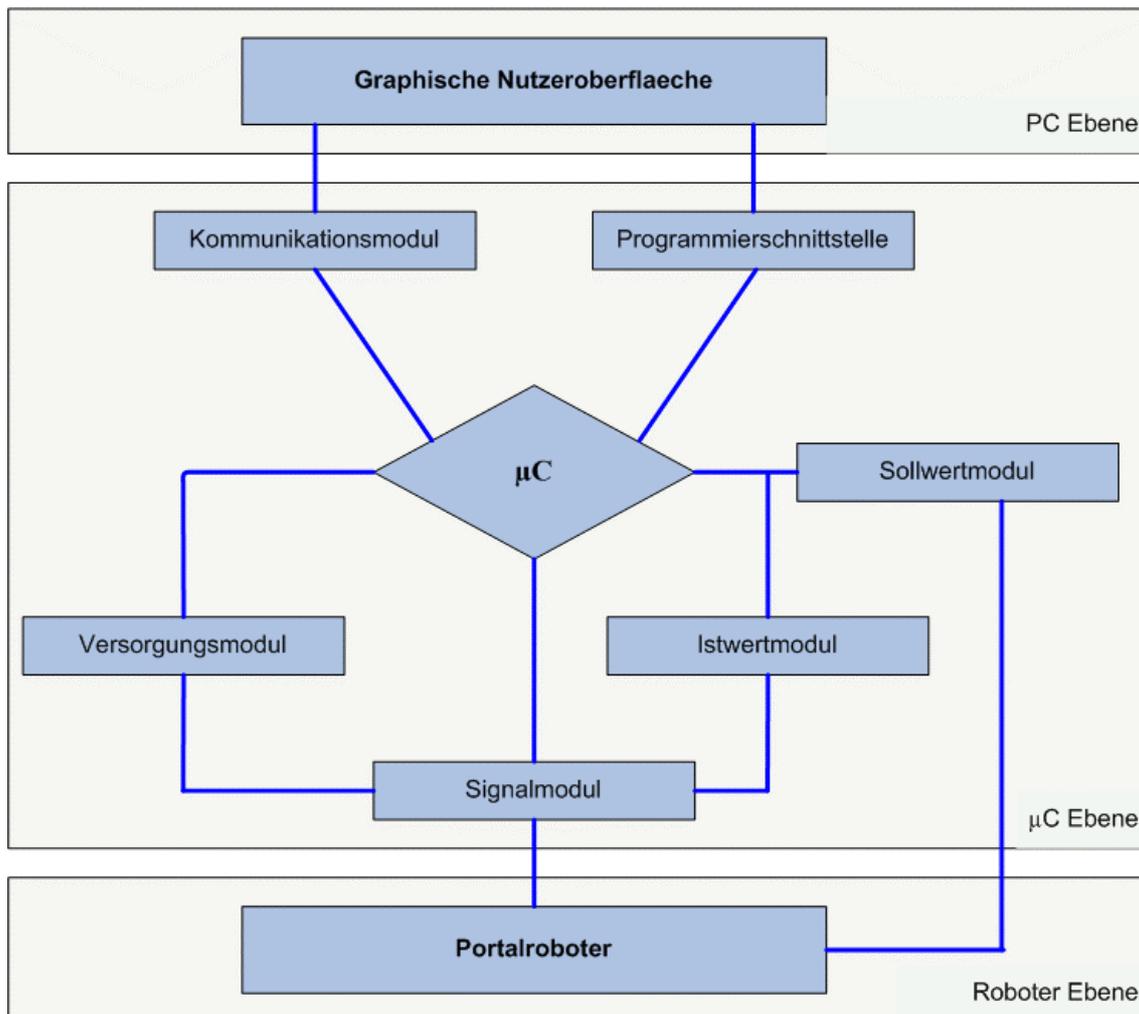


Abbildung 7-4: Modulare Darstellung der Portalsteuerung

Die Plattformarchitektur gliedert sich in PC-, Mikrocontroller- und Roboter-Ebene. Die μC -Ebene ist in sieben einzelne Module aufgeteilt. Fahrbefehle werden auf PC-Ebene in für den Mikrocontroller verständliche Formate umgewandelt und über den COM-Port des PCs an das Kommunikationsmodul gesendet. Der zweite COM-Port ist mit der Programmierschnittstelle verbunden.

Über diese Schnittstelle wird der Programmcode des Mikrocontrollers bei Bedarf überschrieben. Der Mikrocontroller wird über das Versorgungsmodul des Schaltschranks vom Portalroboter mit Spannung versorgt. Der Datenaustausch (Soll-/Istwerte) des Portalroboters erfolgt über das Sollwert-, Istwert- und Signalmodul. Das Signalmodul schaltet die Steuersignale für beispielsweise Achsantriebe, Bremse oder Not-Aus. Mit dem Sollwertmodul werden die Sollgeschwindigkeiten der Achsen in Form von analogen Differenzspannungen an die Servoantriebsmodule gesendet. Das Istwertmodul liest die Drehgeber der Achsantriebe aus, um die Position des Roboters im Arbeitsraum zu bestimmen.

7.3 Steuerung des Industrieroboters

7.3.1 Lasersensorik zur Nahtdetektion und Prozessführung

Die am Roboter angebrachte Sensorik dient zur Verifizierung der durch „Zeigen“ ermittelten Werkstückpositionen sowie zur Unterstützung der Prozessführung und Kollisionsvermeidung mit Werkstücken.

Für den Fall einer teilweise unbekanntem Arbeitsumgebung muss der Positionskalibrierung des Robotersystems bei vorgegebener Arbeitsaufgabe besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Insbesondere durch die Kombination der beiden Robotersysteme und eine geometrisch nicht eindeutig bekannte Fertigungsumgebung ist eine präzise Zuordnung von Werkstück- und Roboterkoordinaten zunächst nicht gegeben. Dieses resultiert aus einer unzureichend genauen oder sogar falschen Positionierung des Schweißbrenners bezogen auf die zu schweißende Naht. Die Folge sind elementare Qualitätsverluste beim Schweißen.

Um den Lasersensor für die drei verschiedenen Aufgaben nutzen zu können, mussten zunächst entsprechende Bewegungsprogramme für den Gelenkarmroboter entwickelt werden. Die Spezifikationen der Bewegungsprogramme für die Findung einer Kehlnaht weichen ab von denjenigen, die zur Detektion einer Steignaht notwendig sind.

Das verwendete Robotersystem ist in der Lage, auch im laufenden Betrieb seine Bewegungsprogramme zu wechseln. Der Wechsel zwischen den verschiedenen Bewegungsprogrammen beträgt maximal eine Sekunde und ist somit für den vorgesehenen Einsatz ausreichend schnell. Ein Programm-

wechsel während einer schnellen Prozessphase (z.B. während einer schnellen Brennerbewegung) wird nicht benötigt und ist daher nicht vorgesehen.

Bei der Generierung der Bewegungsprogramme wurde darauf geachtet, dass während des Fertigungsprozesses eine möglichst flüssige Bewegung vom Robotersystem gefahren wird, da dies das Bearbeitungsergebnis beeinflussen kann wie beispielsweise beim Schweißen.

7.3.2 Vorversuche zum Aufbau des Sensorsystems

Verschiedene Vorversuche wurden durchgeführt, um die Funktion des Laser-Reflexionssensors unter den für die Aufgabenstellung spezifischen Bedingungen zu testen. Diese Testreihen untersuchten unterschiedliche Oberflächeneigenschaften des zu detektierenden Werkstücks sowie den aktiven Schweißprozess hinsichtlich der Störlichtunterdrückung.

Die Wiederholgenauigkeit des Laserreflexionssensors wurde durch Messobjekte mit unterschiedlichen Farben und Winkelstellungen bestimmt. Hierzu wurden als Prüfstück Papiere unterschiedlicher Farben¹ aufgelegt und mit dem Sensor detektiert. Zusätzlich ist an Werkstücken mit Primeranstrichen² gemessen worden. Um den Einfluss von Verunreinigungen zu testen, wurden die Werkstücke mit dünnen Schichten aus Öl, Fett sowie Wasser versehen. Alle Prüfstücke wurden bei Winkelstellungen -60° , 0° , 45° und 60° des Sensors bezüglich der Prüfstückoberfläche mit eingestellten Schaltdistanzen zwischen 215 mm und 270 mm überprüft. Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Laser-Reflexionssensor je nach zu detektierender Oberfläche mit Messabweichungen von maximal 0,4 mm schaltet.

Die Funktion des Sensors wurde bei aktivem Schweißprozess überprüft, da es sich bei dem Laserreflexionssensor um ein optisches System handelt und während des Metall-Aktiv-Gasschweißens ein heller Lichtbogen in der

¹ Farben: weiß, hautfarben, gelb, rosa, grün, rot, blau und schwarz

² Primer: Schutzanstrich gegen Korrosion

unmittelbaren Nähe des Sensorlichtpunktes leuchtet. Im Versuch zeigte sich, dass das Sensorsignal bei aktivem Lichtbogen stark oszilliert. Weder die Wahl unterschiedlicher Distanzen zwischen Lichtbogen und Sensortastpunkt noch Abschirmung des direkten Schweißlichts durch verschiedene lichtundurchlässige Barrieren zwischen Lichtbogen und Sensor ergaben merkliche Änderungen dieses Problems. Ein möglicher Einfluss durch elektrische Störfelder auf das Sensorkabel wurde getestet, indem die Orientierung des Sensors geändert wurde, so dass kein direktes Licht des Lichtbogens in das Sensorfeld gelangen konnte, Kabel und Sensor sich jedoch in unveränderter Distanz zum Schweißprozess befanden. Bei dieser Anordnung blieb das Sensorsignal konstant, und ein Einfluss durch elektrische Störfelder auf das Sensorsignal konnte ausgeschlossen werden. Bei Einsatz eines alternativen Schweißverfahrens (Wolfram-Inertgas-Verfahren) funktionierte der Laser-Reflexionssensor ohne Messwertverfälschungen, woraus zu schließen ist, dass die Störungen des Sensors beim MAG-Schweißen durch die MAG-spezifische emittierte Strahlung hervorgerufen wird.

Um diese Störung des Sensors durch den MAG-Lichtbogen auszuschalten, wurde vor das Sensorfeld ein Interferenzfilter angebracht. Hierbei wird eintreffendes Licht durch Reflexion an den Grenzflächen überlagert, durch Interferenz werden bestimmte Wellenlängenbereiche des Lichtes ausgelöscht und andere Wellenlängen transmittieren. Durch geeignete Wahl der Anzahl und Dicke der Schichten kann ein schmales Frequenzband eingestellt werden, welches das Filter passieren kann. Für das eingesetzte Interferenzfilter wurde die Center-Wellenlänge von 675 nm gewählt, da dies der Lichtwellenlänge der Laserdiode im Reflexionssensor entspricht. Der Halbwertsbereich beträgt 15 nm, dies stellt sicher, dass der Laserstrahl auch bei leichter Verschiebung der Laserwellenlänge transmittiert wird, beispielsweise bei erhöhter Diodentemperatur oder schrägem Auftreffwinkel des Lichts auf das Interferenzfilter. Dabei liegt der größte Teil der vom MAG-Lichtbogen emittierten Strahlung unterhalb von 600 nm.

Somit wird durch das Interferenzfilter mit schmalen Durchlassbereich bei 675 nm die MAG-Strahlung fast vollständig abgeblockt und die Störung des Sensors beim Abtasten des Werkstücks minimiert (siehe Abbildung 7-5), kurze Störsignale sind trotz des Einsatzes des Interferenzfilters nicht zu verhindern. Diese Störsignale wurden mit Hilfe eines elektronischen Tiefpasses aus dem Sensorsignal herausgefiltert.

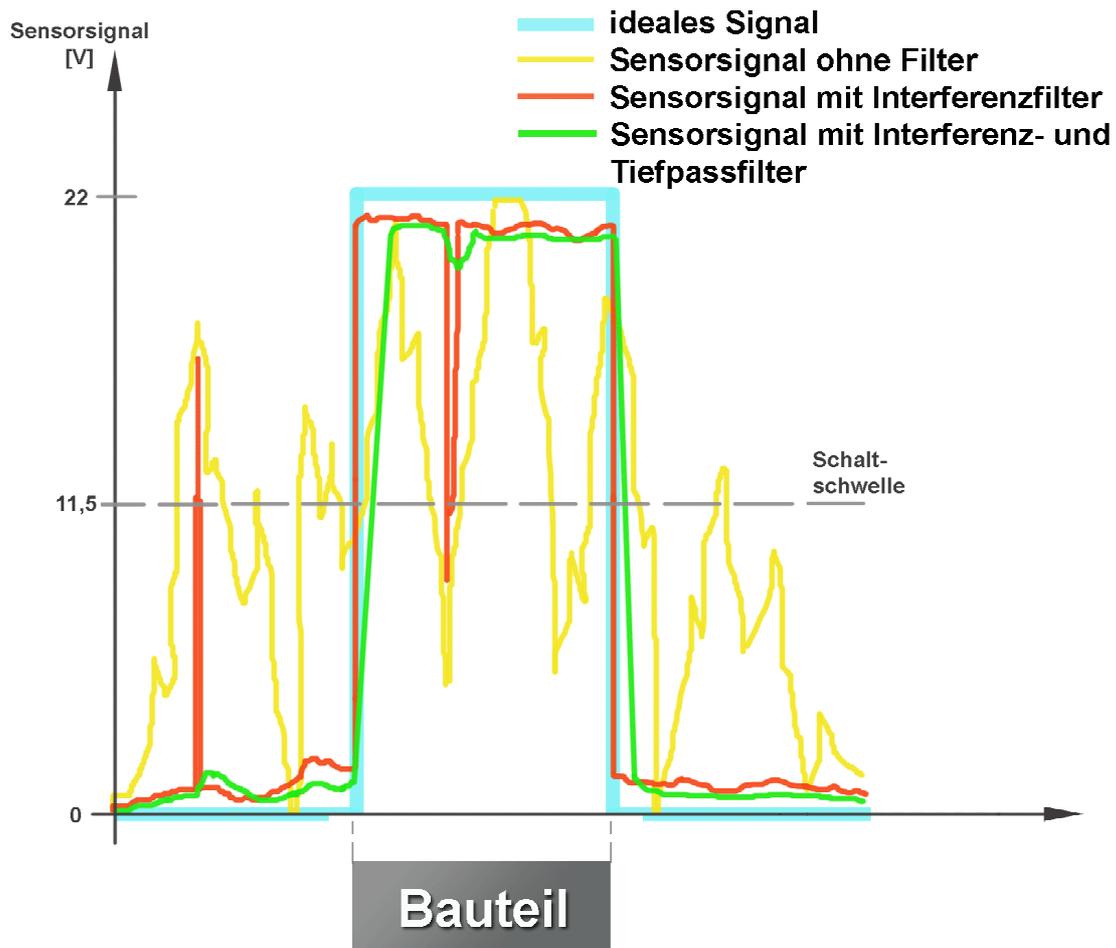


Abbildung 7-5: Glättung des Sensorsignals mit Interferenz- und Tiefpassfilter

Durch verschiedene Versuche wurde festgestellt, dass der Sensor für die eingesetzten Farben und Strukturen den Abstand mit einer ausreichenden Genauigkeit von 0,4 mm detektiert. Die Störung des Sensors durch die im MAG-Schweißprozess emittierte Strahlung konnte durch die Verwendung eines Interferenzfilterelements vor dem Sensorfeld sowie eines Tiefpassfilters zur Glättung des Sensorsignals beseitigt werden.

7.3.3 Konstruktion eines Sensorgehäuses

Um den Sensor für den Einsatz in der Produktion gegen das Eindringen von Rauch, Staub und Schmutz zu schützen, müssen geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden. Hierzu wurde eine entsprechende konstruktive Lösung für das Sensorgehäuse gefunden (s. Abbildung 7-6).

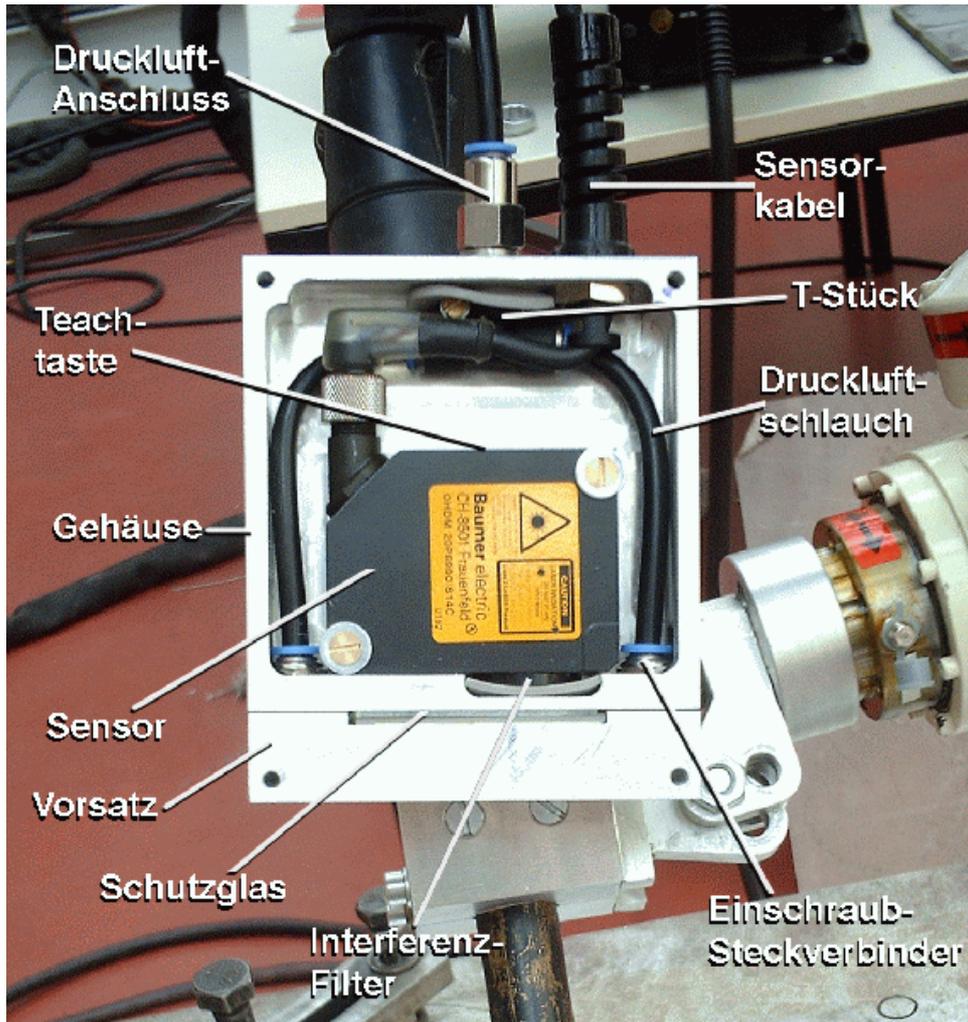


Abbildung 7-6: Bestückung des Sensorgehäuses

Das Gehäuse ist mit Laser-Reflexionssensor, Pneumatikbauteilen, Schutzglas und Dichtungen bestückt. Zum Schutz vor Verschmutzung ist vor dem Sensor ein Schutzglas eingelassen. Zusätzlich werden die Aussparungen für das Laserlicht mit Druckluft ausgeblasen, um ein Verschmutzen des Schutzglases durch Rauch oder Schweißspritzer zu verhindern. Die Druckluft wird an der Rückseite des Gehäuses angeschlossen und über T-Stück und Schläuche in die Kanäle für die Druckluft geführt.

7.3.4 Sensorausrichtung und Schaltdistanzen

Um die Suchoperationen für verschiedene Werkstückgeometrien durchführen zu können, wird der Sensor am Schweißbrenner ausgerichtet wie in Abbildung 7-7 dargestellt. Das obenliegende Werkstück wird vom Sensor-Lichtstrahl mit einem Vorlauf von 55 mm abgetastet. Somit ist ausreichend Raum gegeben,

den Brenner für die Anfahrt des Nahtendes, zur Detektion des Werkstückendes oder einer Ecke zu orientieren. Um auch bei schräg auslaufenden Werkstücken das Nahtende fehlerfrei detektieren zu können, trifft der Sensorlichtstrahl in einer Höhe von 8 mm über der Schweißkehle auf das Werkstück.

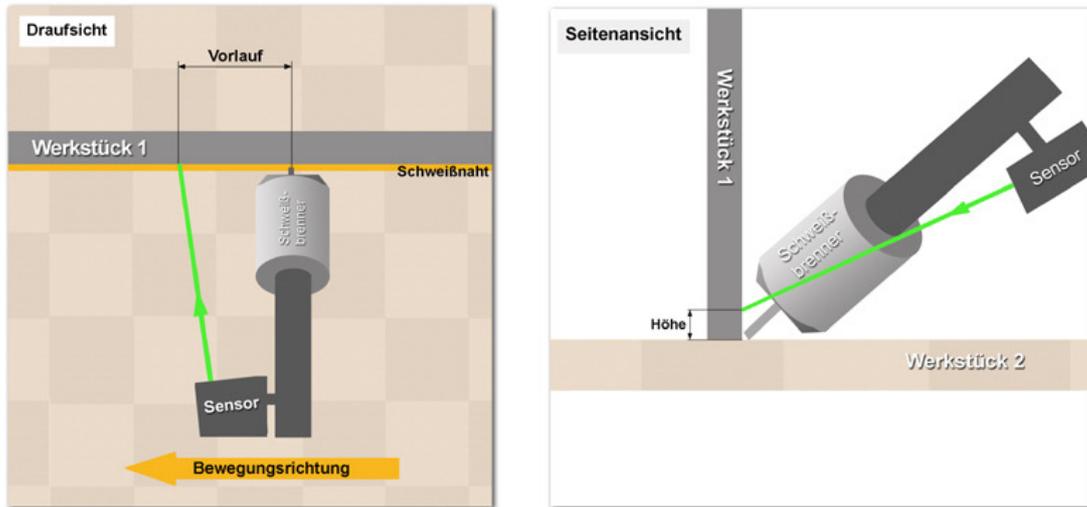


Abbildung 7-7: Sensorausrichtung am Schweißbrenner

7.3.5 Verifikation der Werkstückposition zur Kollisionsvermeidung

Der Sensor dient der Verifikation der durch den 6D-Zeiger ermittelten Position, da ansonsten eine Kollision zwischen Werkstück und Roboter erfolgen könnte. Aus den per 6D-Zeiger eingegebenen Positionsdaten eines Werkstücks wird ein vorläufiges User-Koordinatensystem für das zu schweißende Bauteil aufgespannt. Der Portalroboter fährt den Industrieroboter an eine sichere Startposition mit definiertem Abstand zu dem erwarteten Nahtanfangspunkt. Von diesem Punkt startet der Industrieroboter mit Hilfe der Sensordaten die Suchoperationen in den drei Koordinatenrichtungen, um die zu verschweißenden Werkstücke zu detektieren. Bei einer Abweichung der durch den 6D-Zeiger bezüglich der vom Sensorsystem ermittelten Position wird das User-Koordinatensystem gegebenenfalls korrigiert. Danach wird der Schweißbrenner direkt in die Kehle am Nahtanfangspunkt positioniert. Nach Beginn des Schweißprozesses tastet der Laser-Reflexionssensor vorlaufend das Werkstück ab, um am Werkstückende, vor einer Ecke oder einem Hindernis das Ende des Schweißprozesses einzuleiten. Am detektierten Schweißnahtende wird der Schweißprozess beendet und der Roboter wieder in

eine sichere Position gebracht, von der das Robotersystem zu dem nächsten Arbeitspunkt verfahren werden kann.

7.3.6 Suchoperation und Verifikation der Werkstückgeometrie

Im Folgenden werden Bewegungsmuster für die Suchoperationen und Verifikation der Werkstückposition bei verschiedenen Bauteilanordnungen dargestellt.

7.3.6.1 Suchoperation zur Verifikation des Werkstück-Anfangs

Vor der sensorgestützten Verifikation des Werkstücks wird aus den von dem 6D-Zeiger ermittelten Positionsdaten das User-Koordinatensystem definiert. Abbildung 7-8 zeigt das User-Koordinatensystem für gerade Werkstücke mit Schweißnahtanfang am Werkstückanfang.

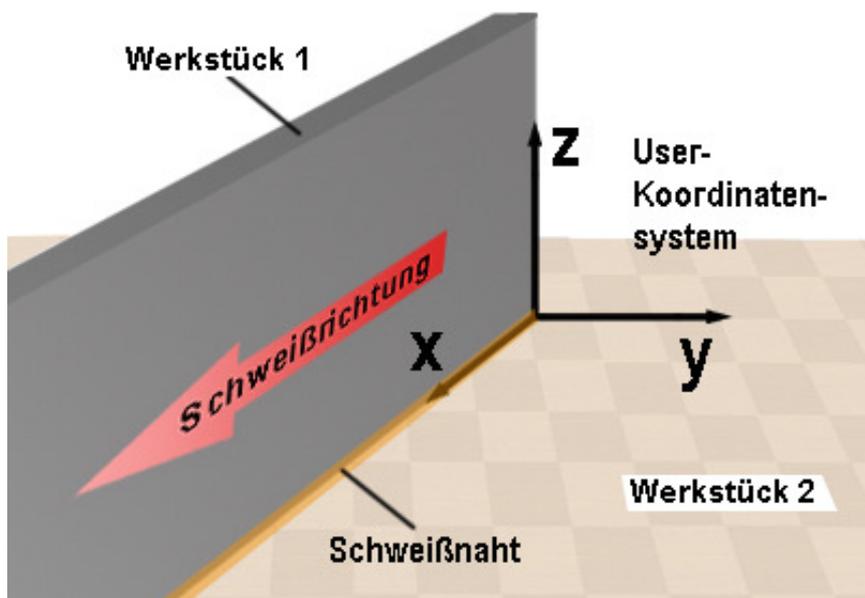


Abbildung 7-8: User-Koordinatensystem

Die X-Achse wird hierbei in die Schweißnaht in Richtung der Schweißbewegung gelegt, die Y-Achse steht senkrecht auf Werkstück 1 auf Nahtseite und die Z-Achse steht senkrecht auf Werkstück 2 (positive Z-Richtung auf Seite von Werkstück 1).

Abbildung 7-9 zeigt die Vorgehensweise bei der Verifikation des Schweißnahtanfangspunkts, hierzu wird ausschließlich Schaltdistanz 1 des Sensorsystems genutzt (s. Kapitel 7.3.4).

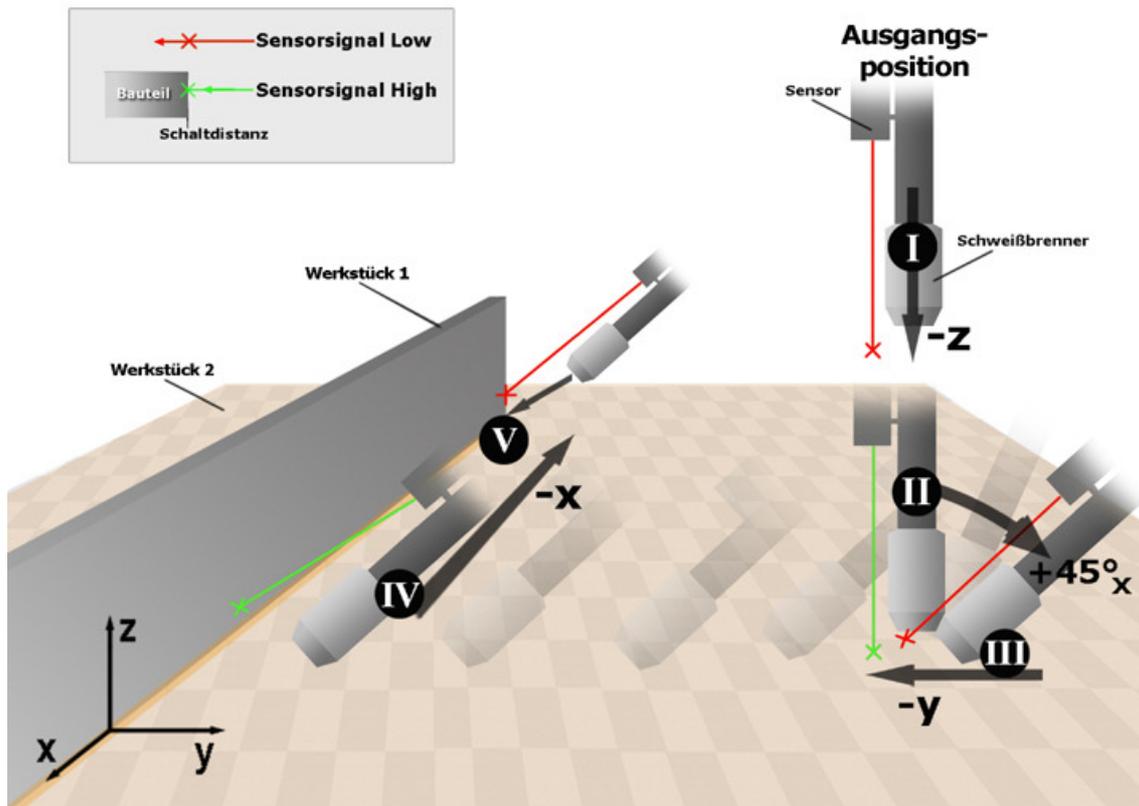


Abbildung 7-9: Verifikation der Position und Anfahrt am Werkstück

Für die Verifikation der Werkstückposition wird der Roboter von dem Portal an eine sichere Startposition mit definiertem Abstand zum Nahtanfangspunkt gefahren (Position I), der durch den 6D-Zeiger bestimmt wurde. Bei dieser Startposition ist das Sensorsignal „OFF“, da sich Werkstück 2 vom Sensor in größerer Distanz als die im Sensor programmierte Schaltschwelle befindet. Ausgehend von der Startposition fährt der Roboter in negativer Z-Richtung auf Werkstück 2 zu und beendet die Bewegung bei Unterschreiten der Schaltdistanz, und der Sensor schaltet auf „ON“ (Position II). Damit ist die tatsächliche vertikale Position von Werkstück 2 ermittelt. Es folgt ein Anstellen des Schweißbrenners um 45° um die X-Achse. Dabei schaltet das Sensorsignal wegen des durch das Anstellen verlängerten Weges des Laserlichtstrahls von „ON“ zurück auf „OFF“ (Position II). Daraufhin bewegt der Roboter den Schweißbrenner in negativer Y-Richtung auf Werkstück 1 zu und beendet diese Bewegung, sobald der Sensor das Werkstück detektiert und auf „ON“ schaltet (Position IV). Die Werkstückposition in Y-Richtung ist somit ebenfalls exakt bestimmt. Nach Erreichen von Position IV wird der Schweißbrenner in negativer X-Richtung an Werkstück 1 entlang bewegt, bis der Laserlichtpunkt über den Werkstückanfang hinaus fährt und das Sensorsignal auf „OFF“ wechselt

(Position V). Damit sind alle benötigten Positionsparameter der Werkstücke verifiziert, und das User-Koordinatensystem wird gegebenenfalls korrigiert. Daraufhin fährt der Roboter eine durch die Sensoranordnung bestimmte Ausgleichsbewegung, um den Schweißbrenner exakt in die Kehle und an den tatsächlichen Nahtanfang zu positionieren.

7.3.6.2 Suchoperation zur Verifikation einer Ecke

Abbildung 7-10 veranschaulicht die Vorgehensweise bei der Verifikation der Position des Schweißnahtanfangs in einer Ecke bei L-förmigem Werkstück. Für diese Suche wird ausschließlich Schaltdistanz 1 (S. Kapitel 7.3.4) benutzt.

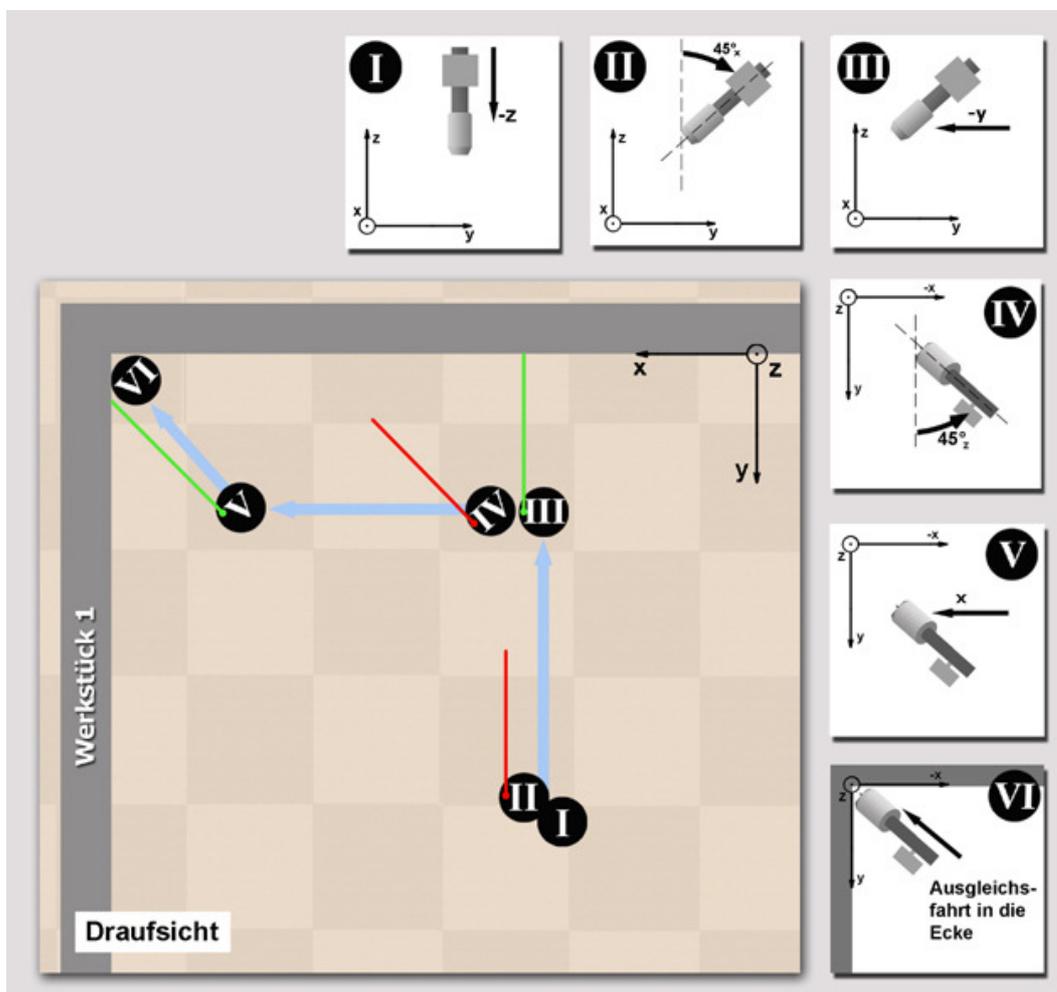


Abbildung 7-10: Verifikation der Position und Anfahrt einer Ecke

Vor dem Beginn der Verifikation fährt das Portal den Roboter an eine sichere Startposition (Position I) mit definiertem Abstand zu dem ermittelten Nahtanfangspunkt. Das Sensorsignal ist „OFF“ geschaltet, da sich das

Werkstück 2 in größerer Distanz als die im Sensor programmierte Schaltschwelle befindet. Der Roboter fährt von der Startposition in negativer Z-Richtung auf Werkstück 2 zu und stoppt die Bewegung, sobald die Schaltdistanz unterschritten wird und der Sensor auf „ON“ schaltet. Damit ist die vertikale Position dieses Werkstücks ermittelt. Daraufhin wird der Schweißbrenner mit einem Winkel von 45° um die Y-Achse gedreht, dabei schaltet das Sensorsignal wegen des verlängerten Wegs des Laser-Lichtstrahls auf „OFF“ (Position II). Nach dieser Bewegung wird der Roboter in negativer X-Richtung zu Werkstück 1 bewegt, bis es vom Sensor detektiert wird und auf „ON“ schaltet (Position III). Somit ist auch die Eckposition in X-Richtung verifiziert. Im Folgenden wird der Schweißbrenner mit einem Winkel von 45° um die Z-Achse gedreht. Sobald das Sensorsignal wieder auf „OFF“ wechselt (Position IV), wird der Schweißbrenner in negativer Y-Richtung das Werkstück entlang bewegt, bis der Sensor bei der Schaltschwelle auf „ON“ wechselt (Position V). Damit sind alle benötigten Positionsdaten verifiziert, das User-Koordinatensystem wird gegebenenfalls korrigiert, und der Roboter fährt die durch die Sensoranordnung bedingte Ausgleichsbewegung, um den Schweißbrenner exakt in die Ecke zu positionieren (Position VI).

7.3.6.3 Verifikation des Werkstückendes

Die Vorgehensweise bei der Verifizierung des Werkstückendes zeigt Abbildung 7-11, hierfür wird ausschließlich Schaltdistanz 1 (s. Kapitel 7.3.4) verwendet.

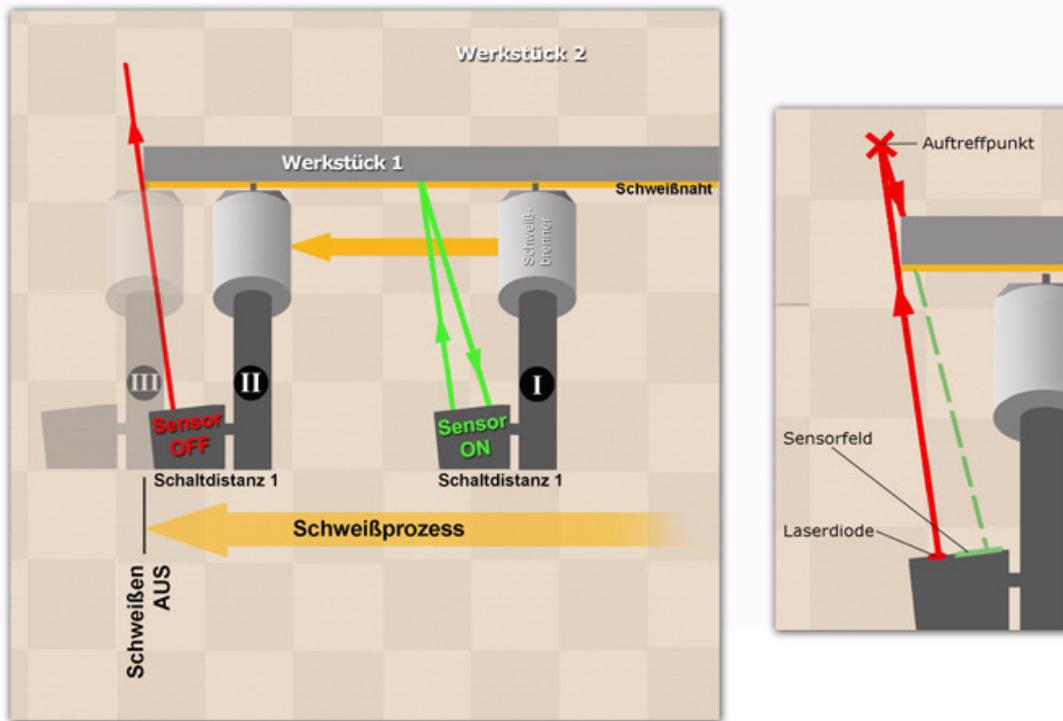


Abbildung 7-11: Verifikation des Nahtendes

Während des aktiven Schweißprozesses fährt der Brenner die Kehle entlang, hierbei befindet sich Werkstück 1 innerhalb der am Sensor programmierten Schaltstanz, und das Sensorsignal ist auf „ON“ (Position I). Bewegt sich der Laserstrahl des Sensors über das Werkstückende hinaus, wechselt das Signal am Sensorausgang aufgrund des verlängerten Lichtwegs auf „OFF“ (Position III). Der Schweißprozess wird jedoch erst nach der Ausgleichsfahrt beendet, da der Roboter noch den durch die Sensoranordnung bedingten Vorlauf des Lichtstrahls gegenüber dem Lichtbogen ausgleicht.

Wie in Abbildung 7-11 rechts dargestellt, wird an Position II der vom Sensor gesendete und von Werkstück 2 reflektierte Lichtstrahl durch Werkstück 1 geblockt. Das Laserlicht kann deshalb nicht vom Sensorfeld aufgefangen werden, und der Sensor schaltet wegen dieser Störung auf „OFF“. Bei Wahl der am Sensor programmierten Schaltstanz braucht diese Anordnung nicht gesondert berücksichtigt zu werden, da der Sensor am Werkstückende aufgrund dieser Begebenheit stets auf „OFF“ schaltet. Die programmierte Schaltstanz ist in diesem Fall ohne Relevanz.

7.3.6.4 Verifikation einer Ecke

Abbildung 7-12 stellt die Vorgehensweise bei der Verifikation der Werkstückposition bei einer Ecke dar. Für diese Verifikation wird ausschließlich Schaltdistanz 2 (s. Kapitel 7.3.4) verwendet.

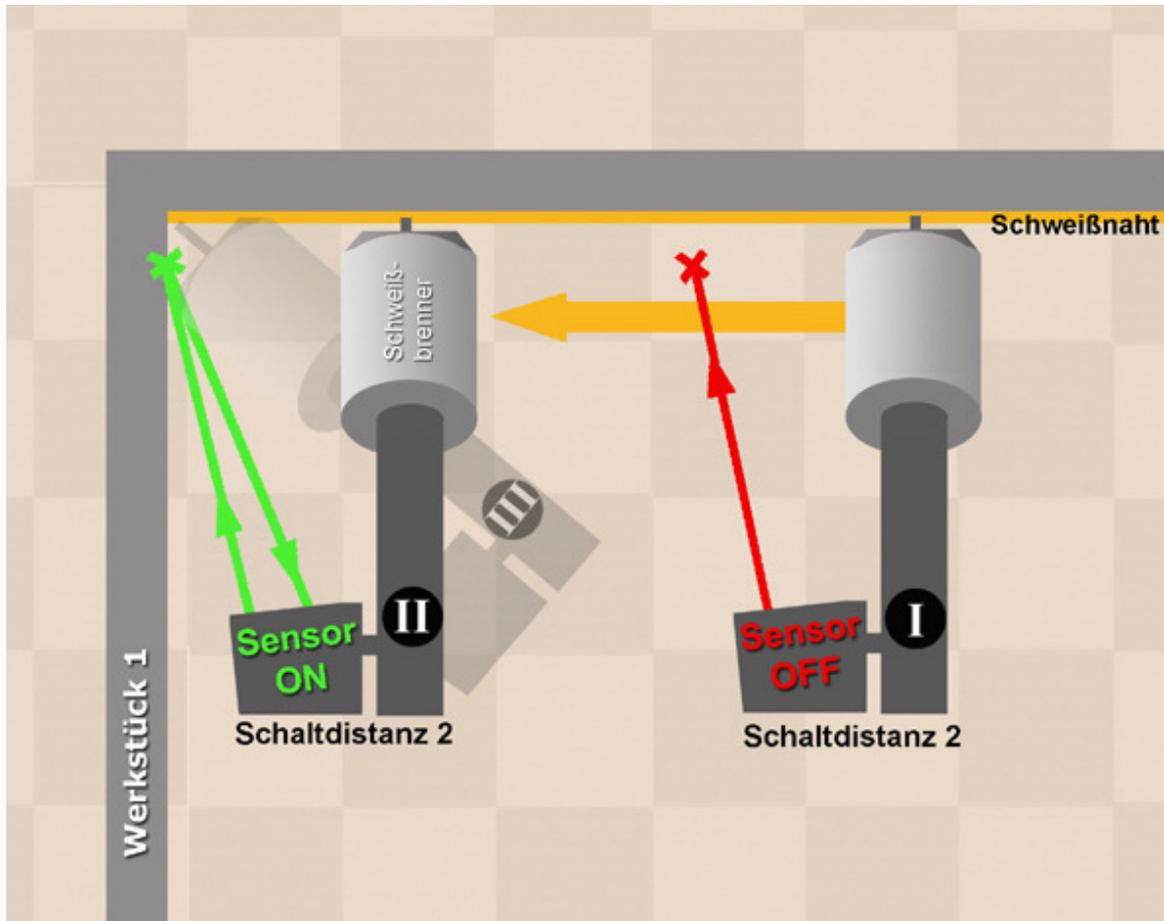


Abbildung 7-12: Anfahrt einer Ecke

Der Brenner fährt bei aktivem Schweißprozess die Kehle entlang. Werkstück 1 befindet sich außerhalb der am Sensor programmierten Schaltdistanz mit Sensorsignal „OFF“ (Position I). Sobald ein quer zur Bewegungsrichtung befindliches Werkstück detektiert wird, wechselt das Sensorsignal auf „ON“ (Position II). Ausgehend von dieser bekannten Position wird bei aktivem Schweißprozess die Naht linear zu Ende gefahren, wobei der Brenner eine Drehung um 45° um die Z-Achse durchführt, um eine Kollision mit dem Werkstück zu vermeiden. In der Ecke (Position III) werden der Schweißprozess und die Bewegung beendet.

7.3.6.5 Verifikation des Endes einer Steignaht

Die Vorgehensweise bei der Verifikation des Endes einer Steignaht zeigt Abbildung 7-13. Für diese Detektion wird ausschließlich Schaltdistanz 1 (s. Kapitel 7.3.4) benutzt.

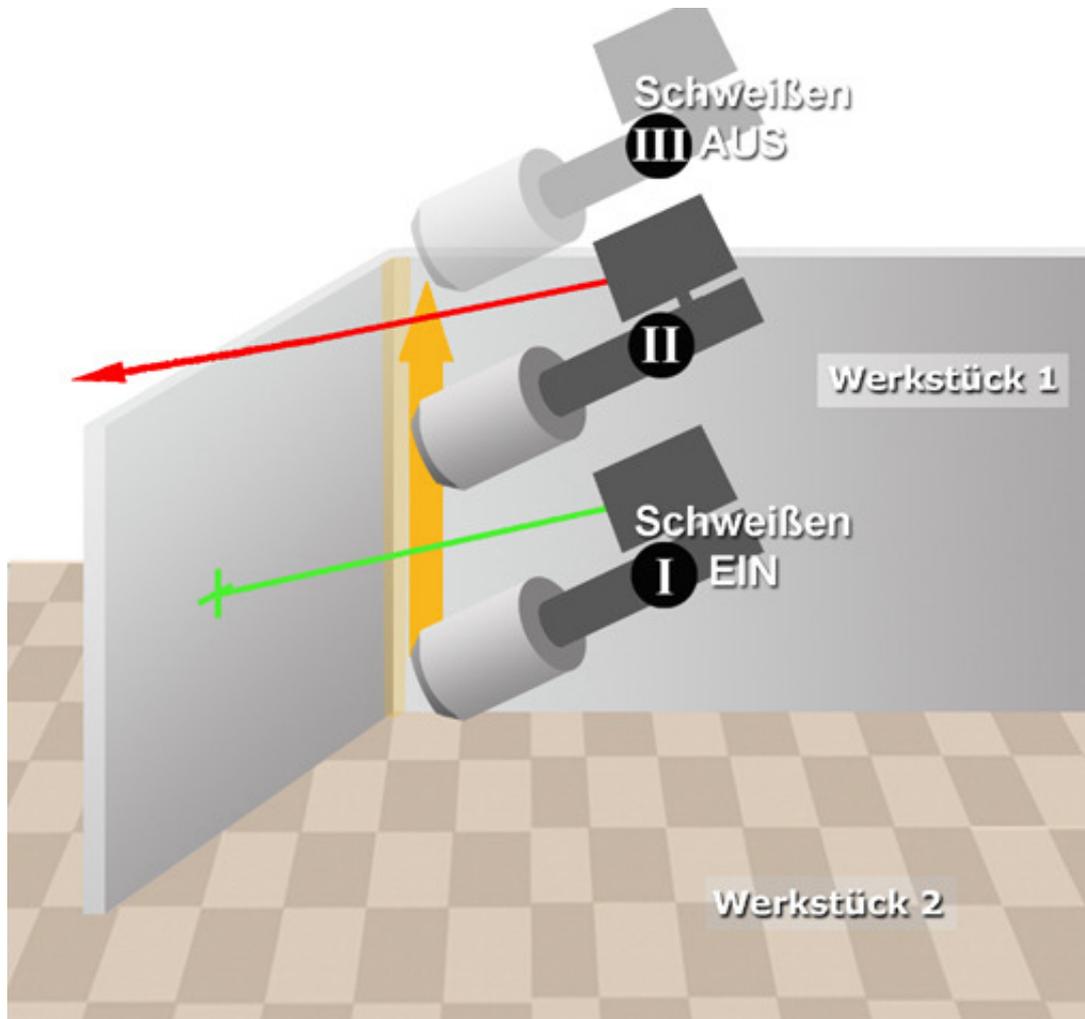


Abbildung 7-13: Verifikation und Anfahrt am Nahtende

Zu Beginn wird der Schweißbrenner in der Ecke positioniert (s. Kapitel 7.3.6.2), der Schweißprozess gestartet und der Brenner in positiver Z-Richtung bewegt (Position I). Da sich Werkstück 2 innerhalb der am Sensor programmierten Schaltdistanz befindet, ist das Sensorsignal „ON“. Bewegt sich der Laserstrahl in vertikaler Richtung über das Werkstückende hinaus, wechselt das Signal am Sensorausgang auf „OFF“ (Position II). Ausgehend von der bekannten Position der oberen Werkstückkante wird bei aktivem Schweißprozess die Naht zu Ende gefahren und am Schweißnahtende der Schweißprozess sowie die Bewegung beendet.

7.3.7 Programmablauf des Industrieroboters

Nach Positionierung des Industrieroboters durch den Flächenportalroboter können verschiedene Programme ausgeführt werden. In Abbildung 7-14 ist ein Diagramm zur Abfolge der Unterprogramme für die Verifikation und Verschweißung der Werkstücke aufgeführt.

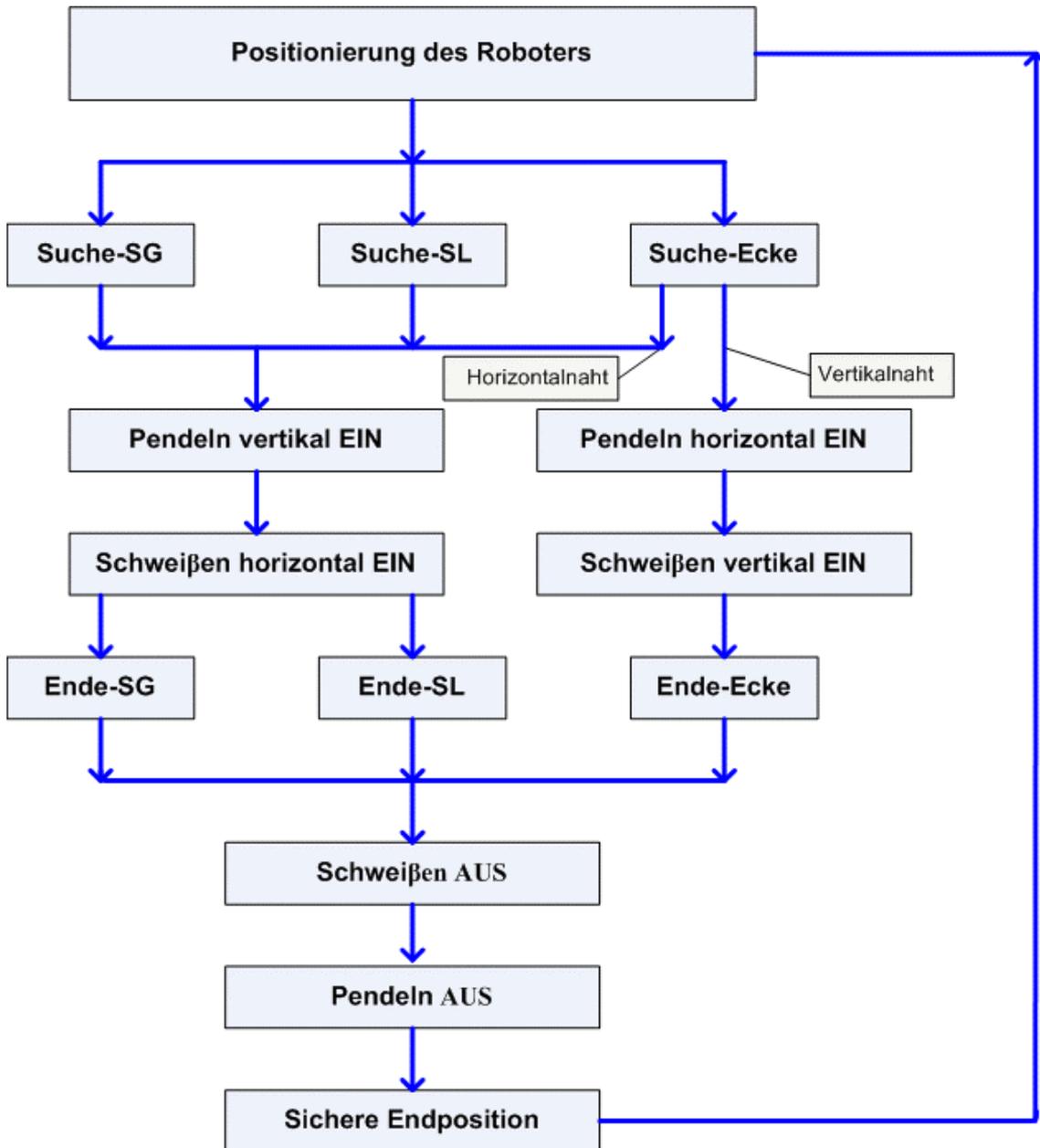


Abbildung 7-14: Ablauf der Unterprogramme

Der Portalroboter positioniert den Roboter an der Startposition. Die Startposition wird aus den vom 6D-Zeiger ermittelten Positionsdaten bestimmt, woraus das User-Koordinatensystem hergeleitet wird. Ausgehend von der Startposition wird

die jeweilige Suchoperation zur Verifikation des User-Koordinatensystems gestartet. Sollte eine Abweichung von dem durch den 6D-Zeiger bezüglich dem sensorisch ermittelten User-Koordinatensystem erkannt werden, wird das User-Koordinatensystem anhand der Sensordaten neu justiert. Je nach Auswahl über das tragbare Computersystem beginnt ein Programm mit der Suche des Nahtanfangs am freien Werkstückende (SUCHE_SG), Nahtanfang am freien Werkstückende bei Werkstücken mit Deckblech (SUCHE_SL) oder Nahtanfang in der Ecke zwischen zwei Werkstücken (SUCHE_ECKE). Im Folgenden werden die Pendelbewegungen sowie die Schweißprogramme und damit die Roboterbewegung gestartet. Bei Detektion des Nahtendes fährt der Roboter die jeweilige Ausgleichsbewegung und beendet den Schweißprozess. Dabei wird zwischen Nahtende am freien Werkstückende, Nahtende in einer Ecke und Nahtende einer Steгнаht unterschieden. Mit Erreichen des Nahtendes wird der Schweißprozess gestoppt und die Pendelbewegung beendet. Der Roboter fährt in eine sichere Endposition und das Portal kann für die nächste Operation positioniert werden.

7.4 Wiederholgenauigkeit des Flächenportalroboters

Roboter besitzen generell eine unterschiedliche Wiederholgenauigkeit. Um zu prüfen, inwieweit die Wiederholgenauigkeit des Flächenportalroboters in die Genauigkeit des Gesamtsystems eingeht, wurde diese ermittelt. Hierzu wurde eine Messuhr am Tool-Center-Point angebracht und ein definierter Punkt wiederholt angefahren. Durch mechanische Unregelmäßigkeiten in den Getrieben und durch Verwindung der Bauteile konnte die Genauigkeit, die an den Achsantrieben erreicht wird, nicht an der Werkzeugspitze realisiert werden. Während der Roboterbewegung schwingt die Werkzeugspitze bis zu 2 mm und im Ruhezustand besteht ein Spiel von ca. +/- 0,5 mm.

Die Wiederholgenauigkeit der X- und Y-Achse wurde mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten ermittelt, wobei die Messreihe in XY-Richtung den Zielpunkt in einem Winkel von 45° anfuhr. Hierzu wurde mit 10, 50 und 100% der maximalen Geschwindigkeit von einem Startpunkt zu einem definierten Punkt gefahren. Der Abstand zum Zielpunkt betrug jeweils 1 m. Pro Messreihe wurden acht Messungen aufgenommen.

Gemittelte Positioniergenauigkeit in mm nach 8 Wiederholungen in jeweiliger Richtung								
X-Richtung (0°)			Y-Richtung (90°)			XY-Richtung (45°)		
v=10%	v=50%	v=100%	v=10%	v=50%	v=100%	v=10%	v=50%	v=100%
0,014	0,063	0,070	0,031	0,030	0,025	0,076	0,076	0,084
Gemittelte, geschwindigkeitsunabhängige Wiederholgenauigkeit in jeweiliger Richtung (Millimeter)								
+/- 0,049			+/- 0,029			+/- 0,078		

Tabelle 7-1: Geschwindigkeitsabhängige Wiederholgenauigkeit in X- und Y-Richtung

In X-Richtung ergibt sich insbesondere ab einer Geschwindigkeit von 50% der Maximalgeschwindigkeit eine erhöhte Ungenauigkeit der Positionierung. Hierbei beträgt die im Mittel gemessene Wiederholgenauigkeit ca. +/- 0,05 mm.

In Y-Richtung ist die Wiederholgenauigkeit im Vergleich zur X-Richtung erheblich höher, da der Roboter aufgrund seiner Konstruktion eine höhere Steifigkeit aufweist. Die Wiederholgenauigkeit ist weitgehend geschwindigkeitsunabhängig, es ergibt sich eine gemittelte Wiederholgenauigkeit von ca. +/- 0,03 mm.

Die Wiederholgenauigkeit ist mit ca. +/- 0,08 mm bei einer kombinierten X- und Y-Achsenbewegung von 45° geringer als bei einachsigen Bewegungen.

7.5 Zuordnung der Prozesstechnologie und Parameter

Die Applikation versetzt den Anwender durch die nutzergerechte Struktur in die Lage, die graphische Oberfläche in Kombination mit dem Zeigersystem nach kurzer Einarbeitungszeit problemlos für Programmieraufgaben bedienen zu können. Bei der intuitiven Zuordnung der programmierten Bahnposition können Elementarmakros kombiniert werden, welche elementare Bearbeitungssequenzen repräsentieren. Als Runtime-Plattform für die Technologie-Programmierung wird ein mobiler Computer (wearable computer) mit WLAN-Technik verwendet.

Verschiedene Prozesstechnologien können iconbasiert ausgesucht werden. Die Applikation bietet verschiedene Prozesstechnologien zur Auswahl an. Abbildung 7-15 zeigt die Auswahlparameter für den Schweißprozess.

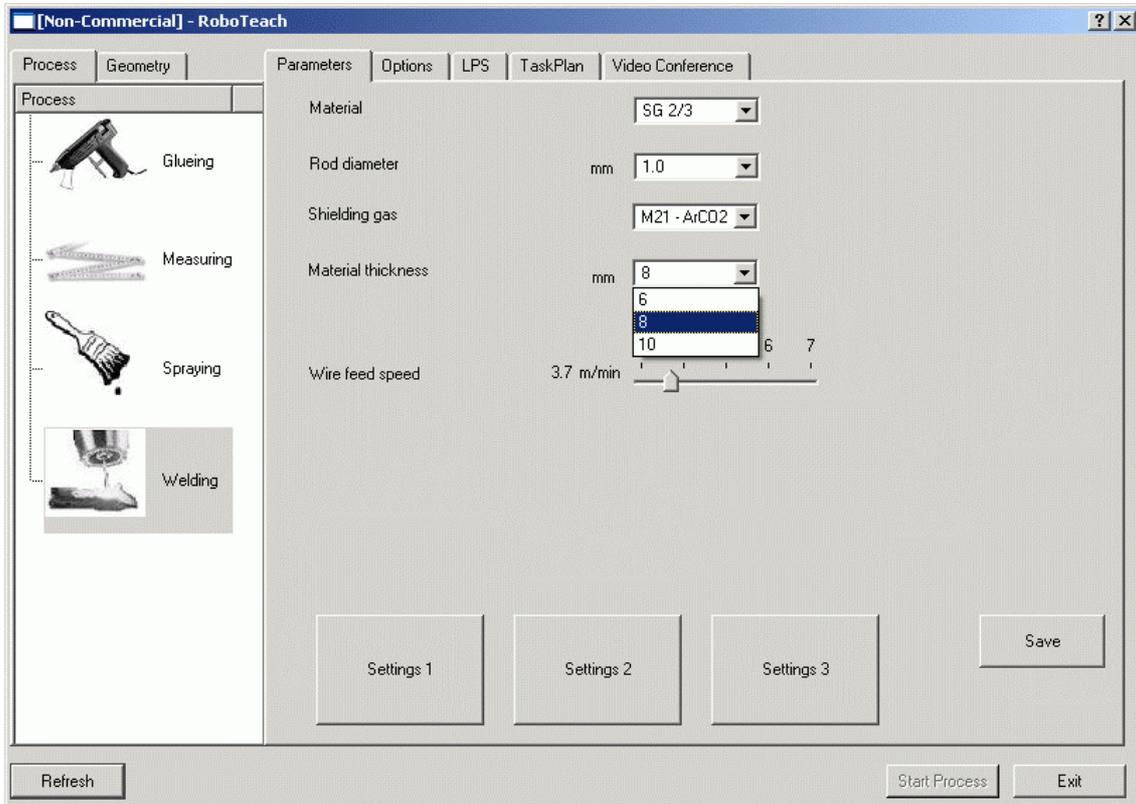


Abbildung 7-15: Auswahl Prozesstechnologien und -parameter

Folgende Parameter stehen für einen Schweißprozess zur Wahl: verwendetes Material, Art des Schweißprozesses, Stromstärke, Spannung, Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters, Drahtvorschub und Schutzgasmenge. Diese Parameter lassen sich in drei Profilen speichern, um einen schnellen Zugriff auf oft benötigte Prozesseinstellungen zu erlauben.

Die Applikation ermöglicht die Prozessdurchführung unterschiedlicher geometrischer Formen (s. Abbildung 7-16 links). Die Werkstückgeometrie ist relevant für die Arbeitsschritte des Knickarmroboters, da die entsprechenden Programme über das Netzwerk aufgerufen werden.

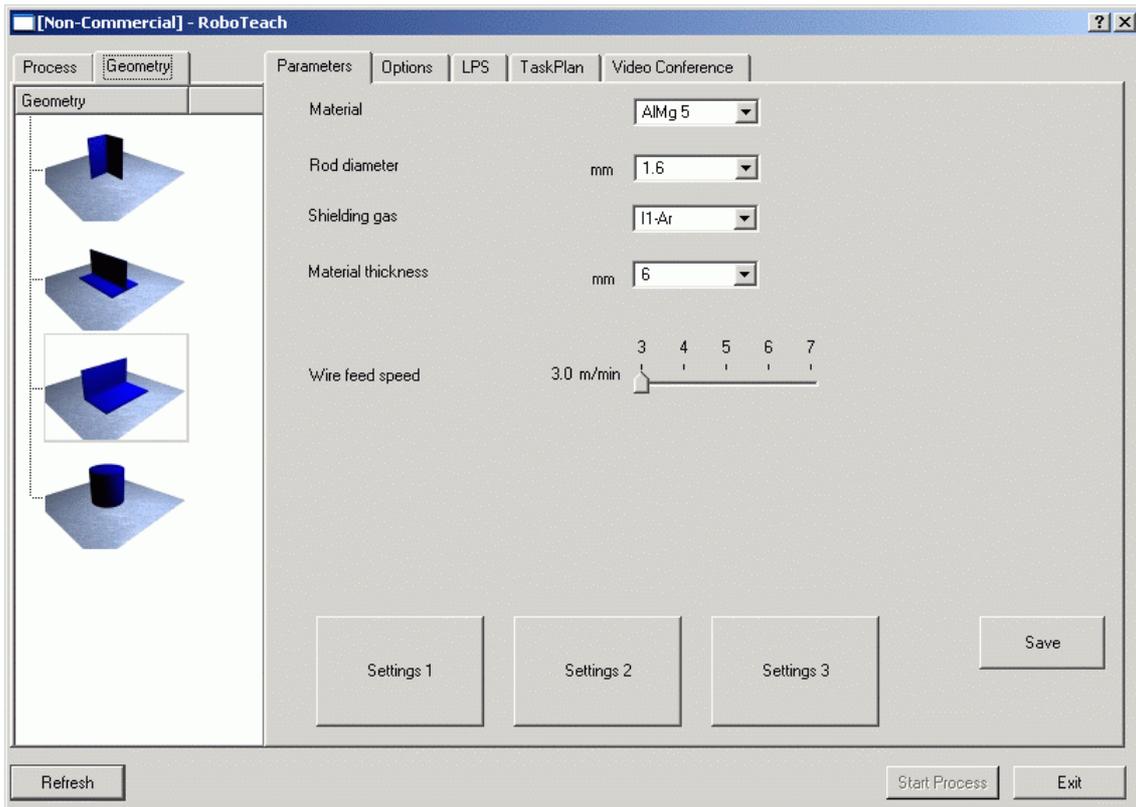


Abbildung 7-16: Auswahl Werkstückgeometrien und Prozessparameter

Die Applikation erlaubt die Ausführung des Schweißprozesses bezogen auf folgende Bauteilgeometrien:

- Steignaht und horizontale Anfahrt einer Ecke
- doppelseitige Kehlnaht
- einfache Kehlnaht
- Schweißen einer Rundnaht

Weitere Einstellungsmöglichkeiten bieten die Reiter. Unter Optionen sind verschiedene Sprachen sowie Netzwerkeinstellungen bezüglich der IP-Adresse des Task-Planers sowie des verwendeten Ports wählbar.

Unter dem Reiter LPS befindet sich die Maske zur Eingabe der Referenz- und Arbeitspunkte. Die Bedienung und Funktion der graphischen Oberfläche ist detailliert in Kapitel 4.4 beschrieben.

7.6 Interaktive Organisation der Arbeitsprozesse

Für eine Ablaufoptimierung des Roboters zwischen verschiedenen Arbeitspositionen kann der Werker mit dem 6D-Zeiger innerhalb des Arbeitsraums die Abfolge der Arbeitsschritte an verschiedenen Werkstücken programmieren. Die Arbeitsschritte können entweder hintereinander in der Reihenfolge durchgeführt werden, wie sie eingegeben wurden. Oder es wird eine Reihenfolge gewählt, die gemäß dem Problem des Handlungsreisenden (engl. Traveling Salesman Problem) eine möglichst kurze Gesamtstrecke ergibt. Nach Beendigung eines Arbeitsprozesses kann das Werkzeug ausgetauscht werden und ein neuer Prozess ausgeführt werden.

Es gibt verschiedene Lösungsverfahren. In dieser Arbeit wurde ein sogenannter Task-Planer mittels der Nearest-Neighbor-Heuristik (nächster-Nachbar-Suchmethode) implementiert (s. Abbildung 7-17). Dabei steht ein Punkt jeweils für einen Standort des Flächenportalroboters. Dieses Simulationsmodul ist unabhängig von den verwendeten Robotersystemen.

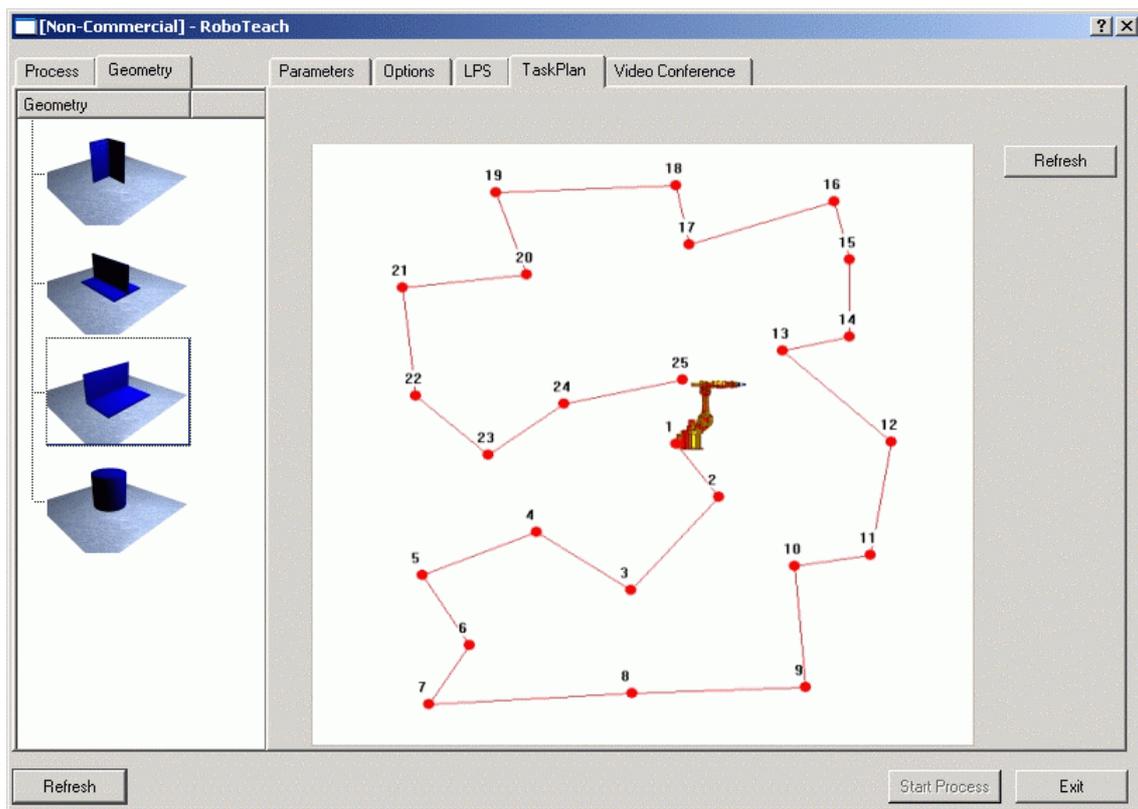


Abbildung 7-17: Heuristisches Optimierungsverfahren

Ein Notebook mit einem Centrino 1.8GHz Prozessor und 750 MB RAM benötigt für die Berechnung von 20 Bahnpunkten etwa 2 Sekunden, die Berechnungszeit steigt jedoch mit zunehmender Anzahl von Punkten exponentiell an (s. Abbildung 7-18).

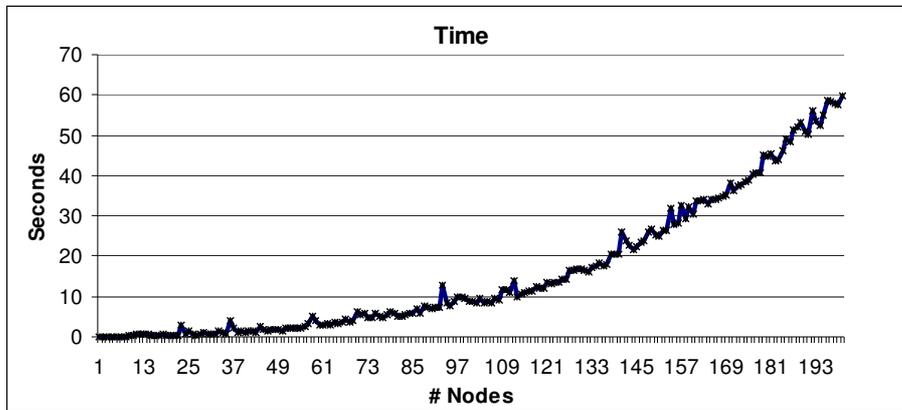


Abbildung 7-18: Zeitbedarf des Optimierungsverfahren

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass das vorgestellte Verfahren für die gewählten Arbeitsprozesse hinreichend schnell ist.

7.7 Prozessüberwachung mit tragbarer Kommunikationsplattform

Die Monitoring-Funktion (s. Abbildung 7-19) dient als Kontroll- und Überwachungseinheit. Hier werden die maschinenspezifischen Echtzeitdaten, wie z.B. Schweißstromstärke und -spannung sowohl graphisch als auch numerisch angezeigt. Neben diesen Parametern werden auch Werkstückdicke und Drahtvorschub dargestellt.

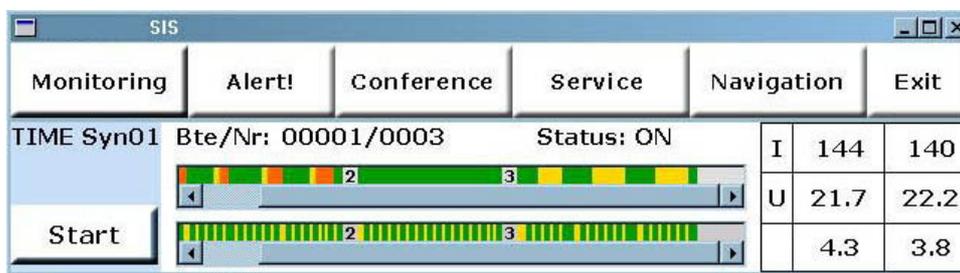


Abbildung 7-19: Kontroll- und Überwachungseinheit

Der Nutzer erkennt anhand der Balkenanzeige, wie groß die Abweichung von Soll- und Istwert ist. Rote Werte kennzeichnen eine große Abweichung, dabei können die Grenzen je nach Art des verwendeten Schweißprozesses angepasst werden. Die Zahlen innerhalb des Balkens kennzeichnen die jeweilige Schweißnaht.

Diese Daten werden exemplarisch über eine RS232-Schnittstelle als ASCII-Klartext (American Standard Code for Information Interchange) von einer T.I.M.E. TWIN Schweißanlage ausgegeben, die in dieser Forschungsarbeit als Demonstrationsanlage fungiert. Dieser ASCII-Text wird in einer Log-Datei gespeichert, interpretiert und dann mittels Server über eine TCP/IP-Verbindung an das Service-Interface gesendet. Dort werden die Daten graphisch und numerisch dargestellt.

Wird eine Störung bei einer der Maschinen von der Kontrollfunktion des Service-Interface erkannt, so wird automatisch eine optische und akustische Warnmeldung ausgegeben (s. Abbildung 7-20). Das Interface schaltet automatisch auf die Alarmanzeige um. In dem Dialogfenster wird der Fehler dargestellt. Der von der Anlage übermittelte Fehlercode wird mit einer Fehlerbeschreibung erläutert. Zusätzlich sind in der Datenbank Informationen zur Störungsbeseitigung enthalten, die bei Bedarf ebenfalls Hilfestellung leisten können. Die Daten des fehlerhaften Prozesses werden abgespeichert, um bei etwaigen späteren Störungen auf dokumentierte Erfahrungswerte zurückgreifen zu können.

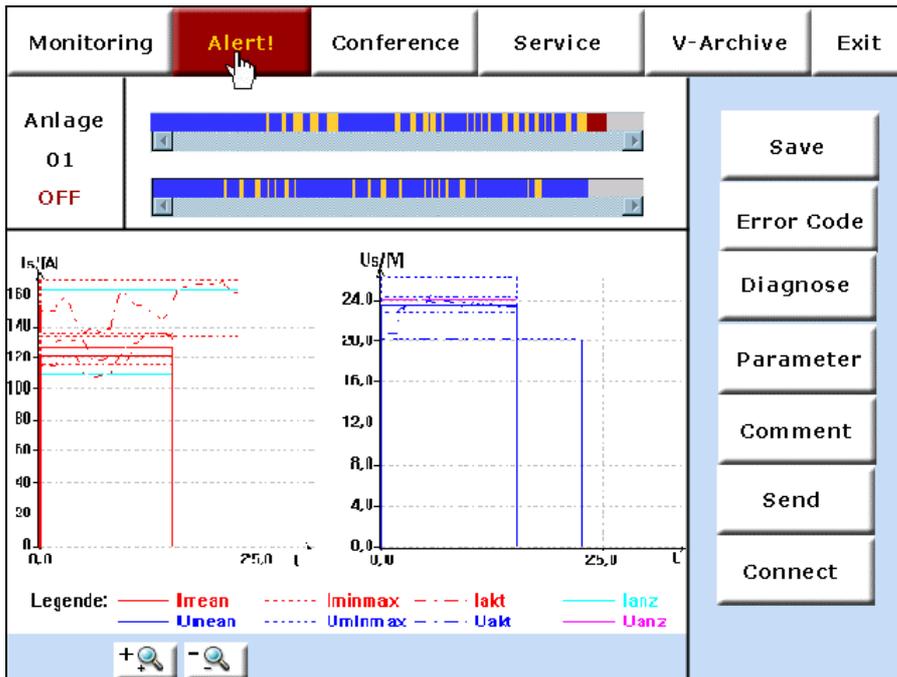


Abbildung 7-20: Warnanzeige

Das System erzeugt eine detaillierte Auflistung der erfassten Prozessdaten. Nach Behebung des Fehlers kann die Dokumentation um die Fehlerbeschreibung erweitert werden, sodass dieser Fehler bei erneutem Auftreten leichter identifiziert und behoben werden kann.

7.8 Unterstützung der Nutzer im Service-Fall

Das Conference-Modul bietet eine integrierte Lösung zur Kommunikation zwischen Vor-Ort-Personal und Service-Center (s. Abbildung 7-21). Hierbei können neben direkter Internettelephonie auch Bilder, kommentierte Videos sowie Textmitteilungen verschickt werden. So ergibt sich eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise beim Einrichten von Maschinen, für Schulungszwecke sowie bei der expertengeführten Problembehebung.

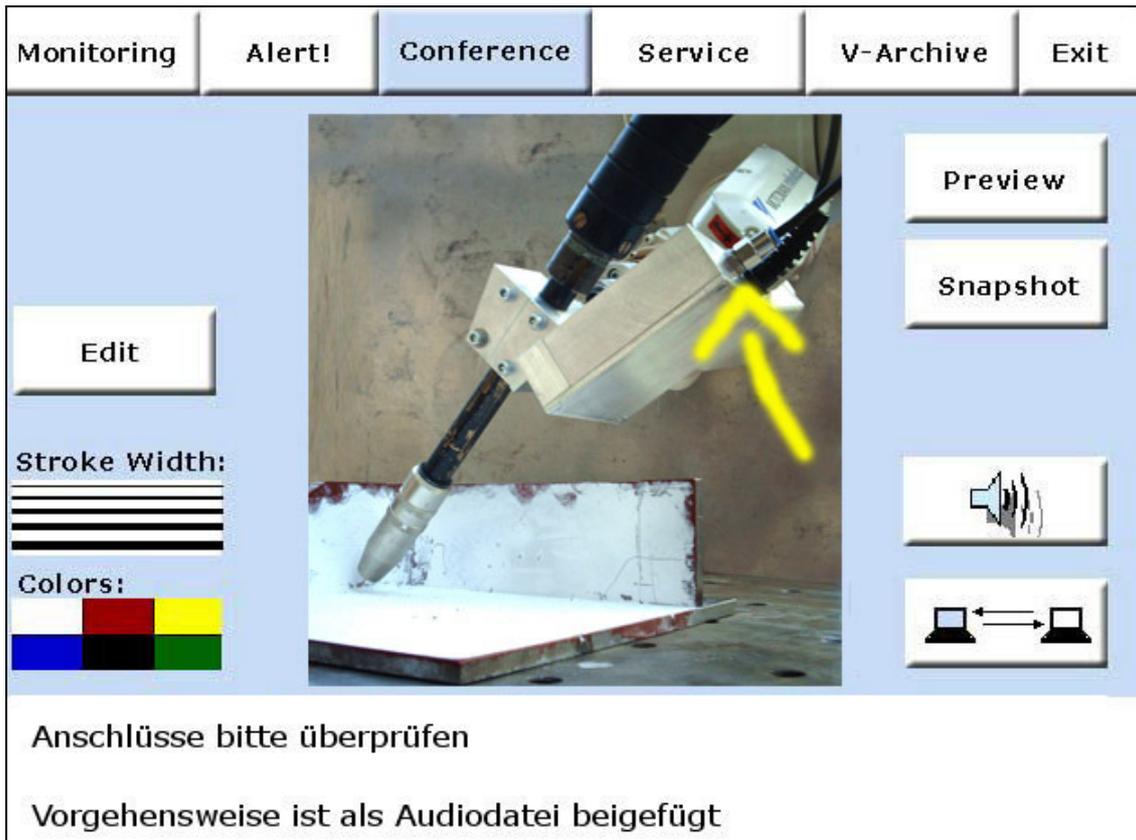


Abbildung 7-21: Virtueller Flipchart

Gelingt es beispielsweise dem Nutzer vor Ort nicht, die Störung an der Maschine zu beseitigen, so kann er über das Service-Interface direkt einen Kontakt mit dem Experten im Service-Center herstellen. Zur zielgerichteten Erläuterung des Sachverhalts bieten sich unterschiedliche Arten der Dokumentation an. Mit der am Headmounted Display befestigten Kamera wird die Situation visuell erfasst. Hieraus wird eine Filmszene oder ein stationäres Bild generiert. Die Filmsequenz oder das Bild können mit einem gesprochenen Kommentar versehen und dem Service-Center übermittelt werden. Der dortige Experte verfügt über ein virtuelles Flipchart, mit dessen Hilfe er das Bildmaterial bearbeiten und mit Anweisungen zurücksenden kann. Aus dem übermittelten Bildmaterial können multimediale Fehlerdokumentationen erstellt werden, die im Videoarchiv des Service-Interface gespeichert werden können.

7.9 Evaluierung der Ergebnisse

7.9.1 Messbereich und Kalibrierung der Werkstücke

Der Messbereich des 6D-Zeigers besitzt die Form eines Kugelsegments. Er ist nach oben und unten durch den Messbereich des Neigungssensors begrenzt, der einen Winkel von 15 Grad ober- und unterhalb der Horizontalen umschließt. Die minimale und maximale Entfernung wird durch den minimalen und maximalen Messbereich des Lasersensors von 100 mm bis 8 m bestimmt. Rotatorisch ist der Messbereich wenig eingeschränkt, da der Richtungssensor lediglich beim Übergang von 360 Grad zu 0 Grad keine Messdaten liefert.

Die Kalibrierung der Werkstücke ist abhängig von der Genauigkeit des 6D-Zeigers. Dessen Genauigkeit hängt wiederum maßgeblich von der Genauigkeit der einzelnen Sensoren ab.

Der Richtungssensor ist ein variabler Widerstand. Die über ihm abfallende analoge Spannung wird von einem Mikrocontroller in digitale Daten umgewandelt. Die Genauigkeit ist von der Auflösung dieser Wandlung abhängig. Der integrierte 10-Bit-AD-Wandler teilt den Vollkreis in 1024 Inkremente. Dementsprechend liegt die Auflösung bei 0,3515°/LSB bzw. 0,00612/LSB im Bogenmaß. Dies entspricht einer horizontalen Bogenlänge von 3,209 mm am inneren Messbereichsrand, die bis auf einen Wert von 48,566 mm am äußeren Rand des Messbereichs ansteigt.

Der Neigungssensor wandelt intern eine analoge Spannung mittels eines 12-Bit-AD-Umsetzers von analog zu digital. Durch die höhere Auflösung wird eine Auflösung von 0,009°/LSB bzw. $1,5707 \cdot 10^{-4}$ /LSB erreicht. Dies entspricht einer vertikalen Bogenlänge von 0,0823 mm am inneren und 1,2566 mm am äußeren Messbereichsrand.

Die Genauigkeit des Lasersensors hängt von der gemessenen Entfernung zum Objekt sowie dessen Oberflächenfarbe ab. Je weiter ein Objekt entfernt und je dunkler dessen Oberfläche ist, desto ungenauer wird die Messung (s. Tabelle 7-2).

Messabstand	1 m	2 m	4 m	6 m	8 m
Reproduzierbarkeit					
Weiß, 90 % Remission	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm	25 mm
Grau, 18 % Remission	2 mm	5 mm	25 mm		
Schwarz, 6% Remission	5 mm	25 mm			
Genauigkeit					
Weiß, 90 % Remission	±5 mm	±5 mm	±10 mm	±20 mm	±30 mm
Grau, 18 % Remission	±5 mm	±10 mm	±30 mm		
Schwarz, 6% Remission	±10 mm	±20 mm			

Tabelle 7-2: Reproduzierbarkeit und Genauigkeit des Lasersensors

Durch die Kombination der einzelnen Sensoren addieren sich deren Messfehler. Mit steigender Distanz nehmen die Messfehler zu und die Präzision sinkt. Da die erreichbare Genauigkeit sowohl von der Entfernung des einzulesenden Punktes als auch von der Entfernung zu den Referenzpunkten abhängig ist, wurden Bahnpunkte im gesamten Messbereich bei unterschiedlichen Abständen zu den Referenzpunkten erfasst. Die Bahnpunkte und Referenzpunkte wurden zuvor manuell eingemessen und fixiert.

Zur Ermittlung des absoluten Messfehlers wurden beide Referenzpunkte im Abstand von einem Meter zum 6D-Zeiger erfasst und anschließend Bahnpunkte im gesamten Messbereich im Abstand von einem, drei, fünf und sieben Metern eingelesen. Der Abstand zu den Referenzpunkten wurde auf drei Meter verändert und die Bahnpunkte wurden erneut mit einem Abstand von einem, drei, fünf und sieben Metern eingelesen. Dieses Vorgehen wurde mit einem Abstand von fünf und sieben Metern des 6D-Zeigers zu den Referenzpunkten wiederholt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 7-3 dargestellt.

		Bahnpunkt Abstand			
		1 m	3 m	5 m	7 m
Referenz- punkt Abstand	1 m	15,5 mm	24,6 mm	39,8 mm	46,0 mm
	3 m	22,0 mm	31,1 mm	48,3 mm	55,7 mm
	5 m	32,1 mm	40,5 mm	55,6 mm	67,8 mm
	7m	42,8 mm	55,9 mm	65,1 mm	73,3 mm

Tabelle 7-3: Messabweichungen mit dem 6D-Zeiger

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der Messfehler mit zunehmendem Abstand sowohl zu den Referenzpunkten als auch zu den Bahnpunkten ansteigt. Eine minimale Abweichung von ca. 16 mm ergibt sich bei einer Distanz von je einem Meter zu Referenzpunkten und Bahnpunkt und erreicht mit ansteigender Distanz bei sieben Metern eine maximale Messabweichung von ca. 74 mm (s. Abbildung 7-22).

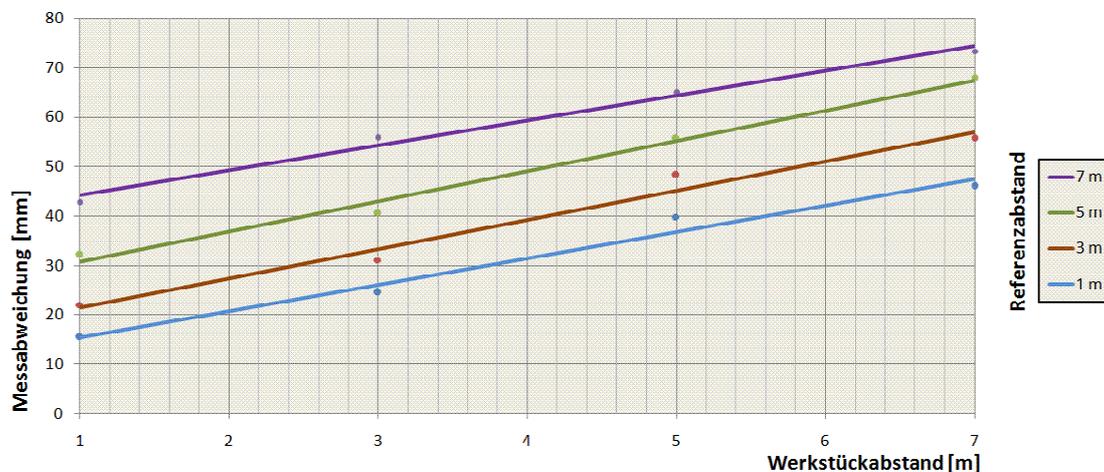


Abbildung 7-22: Entfernungsabhängige Messabweichungen

In der praktischen Anwendung ist es empfehlenswert, einen kleinen Abstand zu den Referenzpunkten zu wählen, da der Referenzierungsprozess mit zwei Messungen entgegen der einmaligen Einmessung eines Bahnpunktes in den Gesamtfehler eingeht.

7.9.2 Verifikation der Werkstückposition und Trajektoriengenerierung

Die Genauigkeit des Robotersystems wurde in zahlreichen Experimenten validiert. Diese werden im Folgenden beschrieben und ihre Ergebnisse dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der Messreihen findet sich im Anhang.

Um die sensorisch unterstützten Suchoperationen zur Verifikation der Werkstückposition zu testen, wurden verschiedene Suchprogramme mehrfach durchlaufen und die Position des Roboters bei angefahrenem Nahtanfangspunkt ausgelesen. Hierfür wurden sowohl mit maximaler systembedingter Geschwindigkeit als auch mit halber Geschwindigkeit zehn identische Operationen gefahren, um festzustellen, wie sich die Verfahrensgeschwindigkeit auf die Wiederholgenauigkeit auswirkt.

- Nahtanfang am freien Werkzeugende

Die Operation zur Verifikation der Werkstückposition und Anfahrt des Nahtanfangs am freien Werkstückende (SUCH_SG) benötigt bei größtmöglicher Verfahrensgeschwindigkeit 6 Sekunden. Die Position der Schweißbrennerspitze variiert hierbei in X-Richtung um maximal 0,12 mm, in Y-Richtung um maximal 0,2 mm und in Z-Richtung um maximal 0,15 mm. Die Winkelabweichungen bezüglich der drei Raumachsen betragen maximal 0,02°. Bei halbiertes Verfahrensgeschwindigkeit variiert die Position in X-Richtung um maximal 0,12 mm, in Y-Richtung um maximal 0,18 mm und in Z-Richtung um maximal 0,16 mm. Die Winkelabweichungen um die drei Raumachsen betragen unverändert maximal 0,02°. Durch die höhere Dauer von 11 Sekunden gegenüber 6 Sekunden bei nur geringfügiger Verbesserung der Wiederholgenauigkeit ist das Fahren der Operation mit halber Geschwindigkeit nicht gerechtfertigt.

- Nahtanfang in einer Ecke

Die Operation zur Verifizierung und Anfahrt des Nahtanfangs in einer Ecke (SUCH_ECKE) dauert bei maximal möglicher Verfahrensgeschwindigkeit ungefähr 6 Sekunden. Die Position der Schweißbrennerspitze variiert in X-Richtung maximal 0,22 mm, in Y-Richtung maximal 0,18 mm und in Z-Richtung maximal 0,2 mm. Die Winkelabweichungen um die Raumachsen betragen unverändert 0,02°. Bei halbiertes Verfahrensgeschwindigkeit variiert die Position in X-Richtung um maximal 0,2 mm, in Y-Richtung maximal 0,18 mm und in Z-Richtung maximal 0,2 mm. Somit

- Integration und Erprobung in einer Schweißfertigungszelle -

ergibt sich: Durch die längere Dauer von 13 Sekunden bei nur geringfügig verbesserter Wiederholgenauigkeit ist das Verfahren mit halber Geschwindigkeit nicht gerechtfertigt.

- Automatische Nahtende-Detektion

Zur Überprüfung der Wiederholgenauigkeit bei der Nahtende-Detektion wurde der Schweißbrenner mit einer Geschwindigkeit von 30 cm/min (Geschwindigkeit beim Schweißen) und aktiver Pendelbewegung entlang der Schweißnaht gefahren und ermittelt, in welcher Distanz zum Nahtende der Sensor das Werkstückende oder die Ecke detektiert.

- Nahtende am freien Werkstück-Ende

Das freie Werkstückende wurde mit einem Vorlauf von 49,2 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 0,15$ mm detektiert. Die Pendelbewegung des Schweißbrenners hat keinen Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit, da die Pendelbewegung parallel zur Werkstückkante ist.

- Nahtende in einer Ecke

Das Nahtende in einer Ecke wurde mit einem Vorlauf von 47,6 mm detektiert. Die Wiederholgenauigkeit beträgt $\pm 0,17$ mm. Die Pendelbewegung des Schweißbrenners hat keinen Einfluss auf das Resultat, da die Brennerspitze parallel zur Werkstückkante pendelt.

- Steignaht

Die obere Werkstückkante wurde beim Fahren einer Steignaht mit einem Vorlauf von 25,2 mm gefahren, dabei wurde eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,34$ mm ermittelt. Aufgrund der Pendelbewegung des Schweißbrenners ist bei diesem Anwendungsfall die Ungenauigkeit höher als in den vorangegangenen Fällen, da die Werkstückkante je nach Stand der Pendelbewegung in unterschiedlicher Höhe vom Laserlichtpunkt überstrichen wird.

7.9.3 Genauigkeit des Gesamtsystems

Die Genauigkeit des Gesamtsystems bestehend aus Flächenportalroboter und Industrieroboter ist abhängig von der Genauigkeit der ermittelten Werkstückposition des 6D-Zeigers sowie von der Positioniergenauigkeit des Flächenportalroboters und des daran angebrachten Knickarmroboters. Die Positioniergenauigkeit des Flächenportalroboters liegt bei +/- 0,2 mm und die des Knickarmroboters bei +/- 0,02 mm. Diese Werte sind vernachlässigbar klein gegenüber der Messungenauigkeit des 6D-Zeigers von 15,6 mm bei einem Meter und 73,5 mm bei sieben Meter Abstand zu Werkstück und Referenzpunkten. Diese Ungenauigkeiten beeinträchtigen nicht die Lokalisierung des Werkstücks. Die Verifikation der Werkstückposition erfolgt mit einer Genauigkeit von 0,22 mm in den drei Raumrichtungen und einem Winkelfehler von 0,02°. Das Werkstückende wird durch den Sensor mit einer Genauigkeit von 0,34 mm detektiert. Die Verifikation der Werkstückposition dauert je nach Roboterprogramm zwischen 6 und 7 Sekunden.

7.9.4 Arbeitsraumüberwachung und Ausweichbewegung

Die Arbeitsraumüberwachung basiert auf der sensorbasierten Positionserfassung von Personen und Objekten im Arbeitsraum. Für die Erfassung der Messgenauigkeit wurde ein zylindrisches Objekt im Arbeitsraum platziert und die von den beiden Lasersensoren ermittelten Daten aufgenommen. Diese Daten sind zusammen mit dem realen sowie dem berechneten Objektmittelpunkt in Abbildung 7-23 dargestellt.

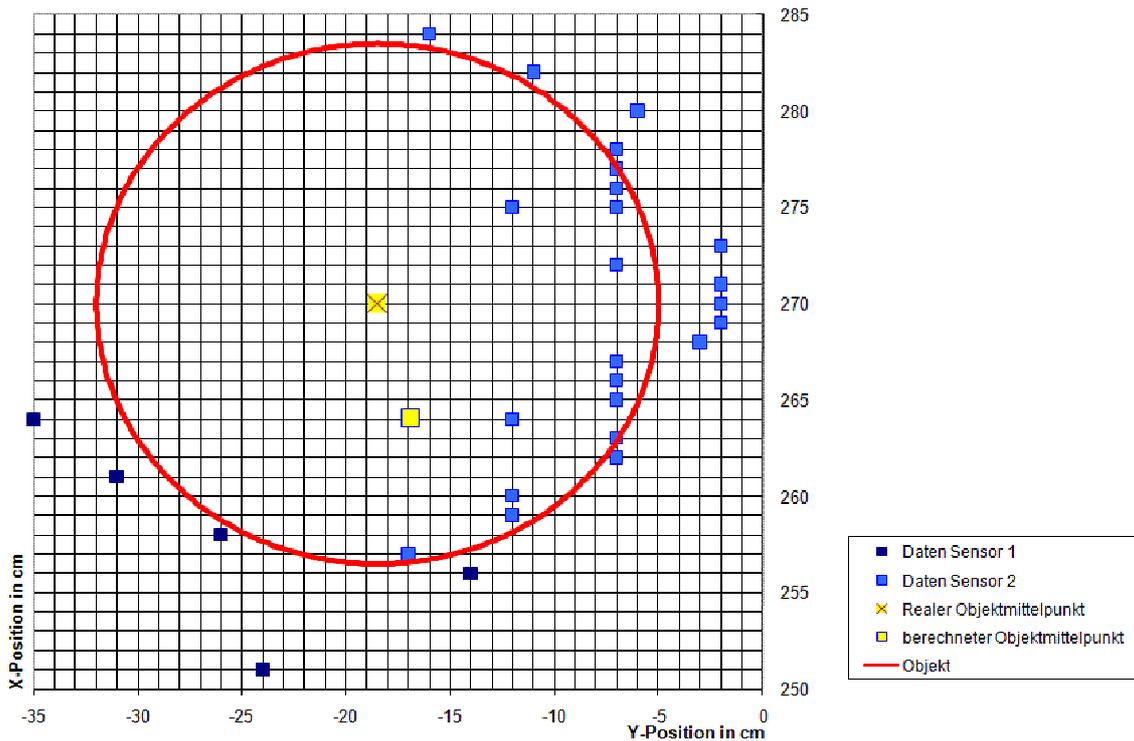


Abbildung 7-23: Genauigkeit der Objektdetektion

Das Diagramm zeigt eine Abweichung der von den Laserscannern ermittelten Punkte gegenüber der realen Position des Objektes. Auch der berechnete Objektmittelpunkt weicht gegenüber dem realen Objektmittelpunkt um ca. 80 mm bei einem Objektdurchmesser von 350 mm ab. Dies ist begründet in der Mittelung der Messwerte und der Erfassung des Objektes von unterschiedlichen Seiten.

Die Kollisionsvermeidung beruht auf der Ausweichgleichung (s. Kap. 5.6). Der Faktor k beeinflusst den Mindestabstand des Roboters zum berechneten Mittelpunkt eines detektierten Objekts im Arbeitsraum. Um diesen Faktor k zu ermitteln, wurden dem Ausweichsystem die Koordinaten eines Objektes direkt im Quellcode vorgegeben, damit die Ungenauigkeiten der Objekterfassung der Lasersensoren umgangen werden konnten.

Der Arbeitsraum wurde mittels PTP-Bewegung ausgehend von verschiedenen Startpunkten durchquert. Bei einem Faktor $k=100$ und einer Sollgeschwindigkeit von 50% (0,1775 m/s) hat die Schutzzone einen Radius von ca. 1,1 m (s. Abbildung 7-24). Das Durchqueren des Raumes in gerader Linie ist nicht möglich, der Roboter stoppt genau vor der Schutzzone des Objekts, da der Ausweichvektor direkt entgegengesetzt zu der Bewegungsrichtung des

Roboters gerichtet ist. Bei Startpunkten, die sich in Y-Richtung weiter vom Mittelpunkt des Hindernisses befinden, wird eine sichere Ausweichbewegung durchgeführt. Eine Beeinflussung der Bewegungsbahn ist auch außerhalb der virtuellen Schutzzone bemerkbar. Diese Beeinflussung wirkt sich auf die Positioniergenauigkeit des Roboters bei Anfahren des Zielpunktes insofern aus, dass die Antriebe der Achsregelung nicht abschalten. Dies konnte durch automatisches Abschalten der Ausweichfunktion bei einer Annäherung von 200 mm an den Zielpunkt korrigiert werden. Jedoch ist dadurch eine achssynchrone Roboterbewegung am Zielpunkt nicht gewährleistet, wodurch der Roboter kurzfristig über den Zielpunkt hinausfährt.

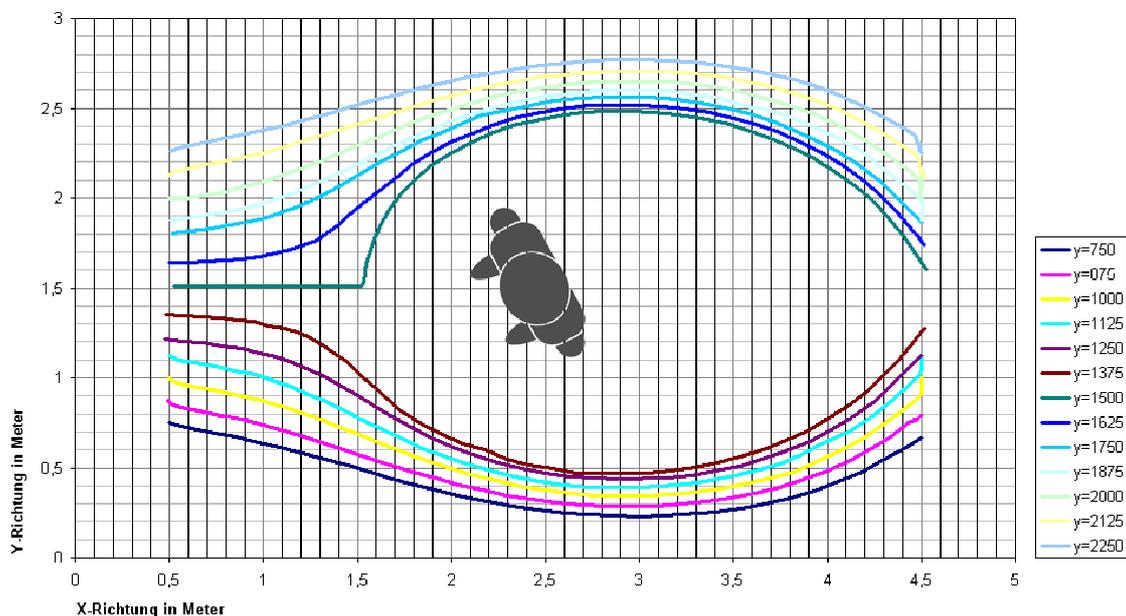


Abbildung 7-24: PTP-Bewegung mit k=100

Der gleiche Test wurde auch mit einem verringerten Faktor von $k=80$ durchgeführt (s. Abbildung 7-25). Das direkte Durchqueren von einem Startpunkt mit identischem Y-Wert wie dem des Hindernisses ist möglich, der Roboter fährt eine Ausweichbewegung. Die Abbildung zeigt weiterhin deutlich, dass die Fernwirkung des Systems im Gegensatz zu der Ausweichbewegung mit $k=100$ geringer ist. Bei Startpunkten, die um mindestens 250 mm in Y-Richtung vom Hindernis verschoben sind, ist die Fernwirkung des Systems am Zielpunkt deutlich geringer.

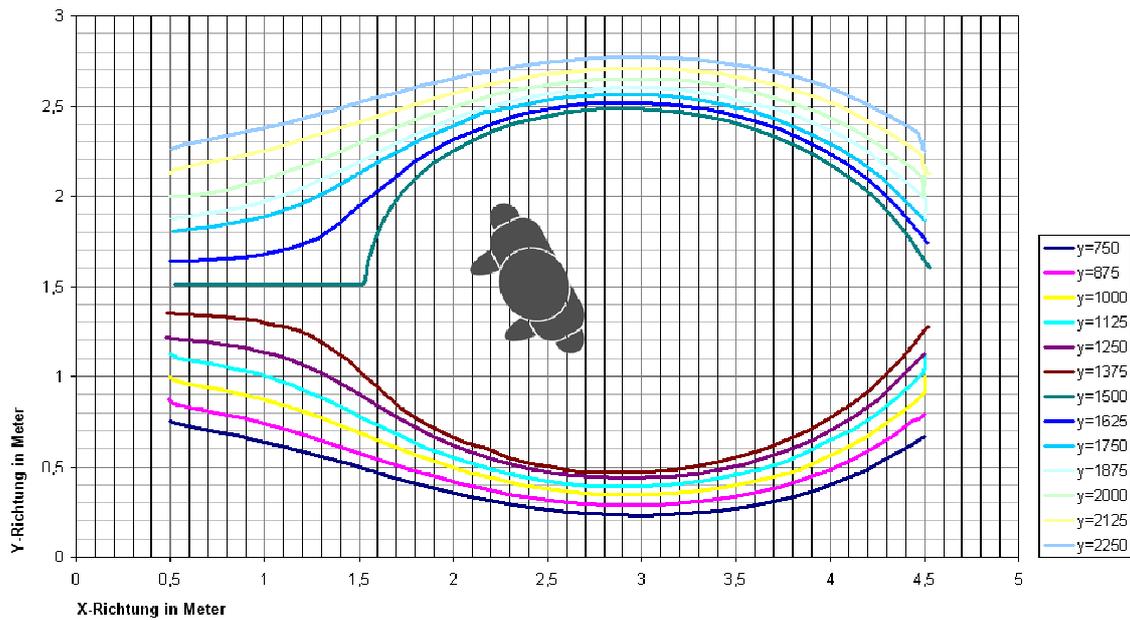


Abbildung 7-25: PTP-Bewegung mit k=80

Die Wirkung der Ausweichbewegung ist nicht nur vom Faktor k abhängig, sondern gemäß der Formel in Kapitel 5.6 auch von der Geschwindigkeit des Roboters. Deshalb wurde die Ausweichbewegung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten untersucht. Hierzu wurde ein Objekt zentral im Arbeitsraum platziert und der Roboter diagonal durch den Arbeitsraum verfahren (s. Abbildung 7-26). Die Geschwindigkeit betrug hierbei 10, 50 und 100 % der Maximalgeschwindigkeit. Es stellte sich heraus, dass die Ausweichbewegung nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit ist.

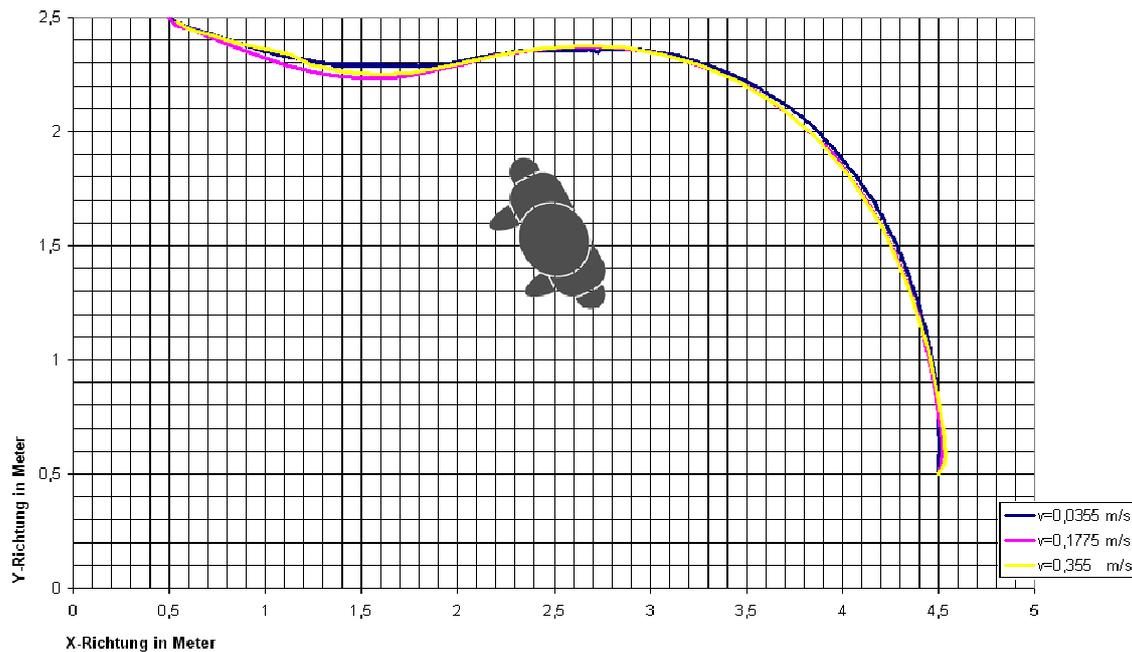


Abbildung 7-26: Ausweichbewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

7.9.5 Integrierte Sicherheitsvorkehrungen bei der Mensch/Roboter-Koexistenz

Da sich bei dem vorgestellten Konzept Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum befinden, muss der Mensch vor einer Störung des Ausweichsystems geschützt werden. Deshalb muss bei Ausfall von wichtigen Systemkomponenten automatisch ein sicherer Zustand durch Anhalten des Roboters und Abschalten der Servomotoren erreicht werden. Mögliche Störszenarien beinhalten dabei (a) Ausfall des Laserscanner-PCs beziehungsweise der Datenübertragung, (b) Ausfall der Laserscanner, (c) Ausfall des Portal-PCs oder der seriellen Verbindung zwischen Portal-PC und Mikrocontroller oder (d) Ausfall des Mikrocontrollers.

Sollte der Laserscanner-PC beispielsweise durch einen Programm- oder Betriebssystemfehler ausfallen, werden keine neuen Punkte an den Portal-PC gesendet. Dies könnte zu einer Kollision zwischen Roboter und Mensch führen. Deshalb wird im Portal-PC bei Empfang von Positionsdaten softwareseitig eine Zählroutine gestartet, die nach 1,5 Sekunden den Roboter stoppt und eine Warnmeldung an den Maschinennutzer ausgibt, falls während dieser Zeit keine weiteren Daten empfangen werden. Dieser Zähler wird bei neuerlichem Empfang von Positionsdaten zurück auf Null gesetzt. Allerdings kann der Roboter während dieser Zählschleife mit der Maximalgeschwindigkeit von

0,355 m/s noch 0,5325 m zurücklegen. Das PC-Programm auf dem Laserscanner-PC durchläuft bei jedem korrekten Datenempfang eine Auswertefunktion und sendet ein Telegramm mit aktuellen Positionen an den Portal-PC. Bei Ausfall beider Scanner wird kein Telegramm an den Portal-PC gesendet. Dadurch wird wie bei obiger Situation der Roboter automatisch nach 1,5 Sekunden angehalten. Sollte eine Störung innerhalb dieser Zeit beendet sein, wird der Roboter nicht angehalten. Bei Störungen wird eine Meldung der Laserscanner-Software ausgegeben und somit eine Reaktion auf die Störung nutzerseitig ermöglicht. Ist die Kommunikation auf lediglich einen Laserscanner beschränkt, wird kein Stoppsignal an den Roboter ausgegeben, da die Erkennung auch mit nur einem Laserscanner möglich ist. Im Mikrocontroller wird bei Eintreffen von Positionen ebenfalls eine Zählschleife gestartet. Der Mikrocontroller stoppt ebenfalls den Roboter, falls nicht innerhalb von 1,5 Sekunden neue Daten empfangen werden.

Das vorliegende Konzept erlaubt eine sichere Koexistenz von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum. Allerdings sollte bei der vorliegenden Konfiguration keine Maximalgeschwindigkeit gefahren oder die virtuelle Schutzzone von derzeit 500 mm zum Objekt erhöht werden.

Sollten sich viele Objekte im Arbeitsraum befinden, können sich Objekte im Sensorschatten anderer Objekte befinden. Dann kann die Sicherheit nicht gewährleistet werden. Um diesen Sicherheitsmangel zu beseitigen, sollten mehr als zwei Laserscanner eingesetzt werden.

7.9.6 Prozessüberwachung mit tragbarer Computerplattform

Die Prozessüberwachung mittels einer tragbaren Computerplattform verschafft dem Werker den Vorteil, dass er über einen ortsunabhängigen Zugriff auf relevante Informationen verfügt. Durch eine optimierte multimediale Prozessdatenpräsentation wird ihm die Möglichkeit gegeben, eine Vielzahl von Informationen, die mit dem Betrieb der Maschine zusammenhängen, aufzunehmen und umzusetzen. Dabei ist insbesondere eine Verknüpfung von aktuellen Prozessinformationen mit den maschinenbezogenen Daten relevant, um den Nutzer beispielsweise auf einen kritischen Prozesszustand hinzuweisen. Als Ergebnis ist ein System verfügbar, das den Zugriff auf prozessrelevante Informationen während des laufenden Betriebes ermöglicht, ohne dass die physische Präsenz des Werkers an der Maschine notwendig wäre.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der nutzer- und aufgabengerechten Bedienbarkeit, die die intuitive Benutzung der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten gestattet. Deshalb wurde eine einheitliche Schnittstellenstruktur geschaffen, welche es erlaubt, Prozessparameter von verschiedenen Fertigungsprozessen an die Applikation zu transferieren. Weiterhin wurde eine umfassende multimediale Kommunikation zwischen mobilem Service-Interface und stationärem Service-Center integriert. Hierzu wurde eine direkte Bewegtbildübertragung zwischen den Anwendern gestaltet, welche es im Gegensatz zu auf dem Markt erhältlichen Lösungen ermöglicht, direkt auf die Bildinhalte zuzugreifen. Dadurch können die Bilder sowohl mit grafischen und textgebundenen Anweisungen als auch mit Audiokommentaren versehen werden, um dadurch zielgerichtete Handlungsanweisungen multimedial zu übermitteln. Damit steht ein System zur Verfügung, welches Serviceprozesse entscheidend vereinfachen und beschleunigen kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Individualisierung und Komplexität von Produkten und Produktvarianten sowie abnehmende Produktlebenszyklen stellen eine Herausforderung für produzierende Unternehmen dar, wenn es darum geht, sich dynamisch an Marktveränderungen anzupassen. Denn die Fähigkeit, schnell und flexibel auf veränderte Marktbedürfnisse reagieren zu können, bedeutet oftmals einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Daher sind besonders für die Klein- und Kleinstserienfertigung neue, innovative Fertigungskonzepte gefragt, um die Herausforderungen der Globalisierung meistern zu können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht deshalb darin, ein Konzept für die individuelle, kundenspezifische Kleinserienfertigung mittels Fertigungsmitteln aus der Massenproduktion zu erarbeiten. Hierzu wurde prototypisch ein möglicher Einsatz von Robotern in einer werkstattorientierten Fertigung vorgestellt.

Ausgehend von dem derzeitigen Stand der Produktions- und Automatisierungstechnik in der Klein- und Kleinstserienfertigung wurde ein neuartiges Automatisierungskonzept entwickelt, das eine Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Interaktionsraum vorsieht. Dieses Konzept besteht aus dem intuitiven Programmieren der Robotertrajektorien mit einem 6D-Zeiger, der nutzerorientierten Zuordnung der Prozesstechnologie, der Programmgenerierung, der automatischen Generierung von Roboter-Arbeitsprogrammen, der Prozessüberwachung, der sicheren Mensch-Roboter-Koexistenz in einem gemeinsamen Arbeitsraum sowie der Unterstützung von Service-Tätigkeiten.

Die technische Machbarkeit wurde in einer Pilotanlage bestehend aus einem Flächenportalroboter mit Industrieroboter verifiziert und beispielhaft an einem Schweißprozess erprobt. Damit konnte die Möglichkeit einer intuitiven Programmierung von Robotertrajektorien durch Zeigen an beliebig im Arbeitsraum verteilten Werkstücken nachgewiesen werden. Die Prozesszuordnung und Parametrisierung wurde mittels eines tragbaren Computersystems umgesetzt. Eine sichere Koexistenz von Mensch und Roboter ist mit dem vorliegenden System beispielhaft demonstriert worden. Ein tragbares Computersystem gestattet eine Maschinen- und Prozessüberwachung durch eine kontinuierliche Erfassung der Maschinenparameter in Quasi-Echtzeit.

Dadurch werden sowohl langfristige Trends wie auch sprunghafte oder transiente Zustandsänderungen erfasst und lückenlos dokumentiert. Somit wird ein Zugriff auf prozessrelevante Informationen während des laufenden Betriebs ermöglicht, während der Nutzer beispielsweise mit der Programmierung von Robotertrajektorien beschäftigt ist. Das tragbare Computersystem vernetzt die beteiligten Instanzen für den Service-Fall über verschiedene multimediale Kommunikationssysteme, so dass bei Servicetätigkeiten wie Instandsetzung oder Wartung eine erhöhte Effizienz in Bezug auf Zeit und Kosten erzielt werden kann.

Mit dem vorgestellten System können Mensch und Roboter kooperativ interagieren. Es werden Synergien erzeugt durch die bewusste Einbeziehung spezifisch menschlicher Fähigkeiten wie Lernfähigkeit, Kreativität, Geschicklichkeit und Sensorik, sowie den spezifischen Vorteilen des Roboters wie Präzision, Wiederholbarkeit und Schnelligkeit.

Aufgrund des modularen Aufbaus ist die Übertragbarkeit des vorgestellten Systems möglich.

Die folgend aufgeführten weiteren Entwicklungen stellen einen Beitrag dar, um einen Einsatz solcher Robotersysteme in der Produktion zu ermöglichen:

- Die Messpräzision des 6D-Zeigers kann durch Verwendung eines genaueren Entfernungsmessgeräts erhöht werden.
- Ein realer Einsatz eines Kollisionsvermeidungssystem sollte aus zwei unabhängig agierenden Systemen bestehen. Ein optisches System an der Werkzeugaufnahme des Roboters würde eine sinnvolle Ergänzung darstellen.
- Das Laserscannersystem besteht derzeit aus zwei Scannern. Hier ist eine Erweiterung um weitere Scanner sinnvoll, um Abschattungseffekte zu minimieren.
- Das vorgestellte System der ortsunabhängigen Produktion ist auf den Arbeitsraum des Flächenportalroboters beschränkt. Der Aktionsradius kann mittels einer mobilen Roboterplattform und darauf angebrachtem Industrieroboter vergrößert werden.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Schnittansicht eines Folienpotentiometers	27
Abbildung 4-2: Neigungssensoren SCA 103-D04 der Firma VTI	27
Abbildung 4-3: Entfernungssensor DME3000-211 der Firma Sick	28
Abbildung 4-4: Mess- und Transformationsprozess	30
Abbildung 4-5: Transformation zwischen Sensor- und Stativkoordinatensystem	31
Abbildung 4-6: Überblick über den Referenzierungsprozess	33
Abbildung 4-7: 2D-Aufsicht und Vektoraddition	34
Abbildung 4-8: Übersicht über die graphische Bedienoberfläche	36
Abbildung 5-1: Ausweichbewegung des Flächenportalroboters	38
Abbildung 5-2: Ablenkung der Roboterbahn durch die virtuelle Schutzzone	39
Abbildung 5-3: Ermittlung des Objektschwerpunktes	41
Abbildung 5-4: Bedienoberfläche der Objekterkennung	42
Abbildung 5-5: Bahnsteuerung einer stetigen Bewegung	43
Abbildung 5-6: Vektoransicht der Ausweichbewegung	44
Abbildung 6-1: Überwachung mehrerer Fertigungseinheiten	48
Abbildung 6-2: Detailansicht der Fertigungsparameter	49
Abbildung 7-1: Überblick über das Gesamtsystem	51
Abbildung 7-2: Motoman SV3X	52
Abbildung 7-3: Flächenportalroboter mit montiertem Roboter	53
Abbildung 7-4: Modulare Darstellung der Portalsteuerung	54
Abbildung 7-5: Glättung des Sensorsignals mit Interferenz- und Tiefpassfilter	58
Abbildung 7-6: Bestückung des Sensorgehäuses	59
Abbildung 7-7: Sensorausrichtung am Schweißbrenner	60
Abbildung 7-8: User-Koordinatensystem	61
Abbildung 7-9: Verifikation der Position und Anfahrt am Werkstück	62
Abbildung 7-10: Verifikation der Position und Anfahrt einer Ecke	63
Abbildung 7-11: Verifikation des Nahtendes	65
Abbildung 7-12: Anfahrt einer Ecke	66
Abbildung 7-13: Verifikation und Anfahrt am Nahtende	67
Abbildung 7-14: Ablauf der Unterprogramme	68

- Abbildungsverzeichnis -

Abbildung 7-15: Auswahl Prozesstechnologien und -parameter	71
Abbildung 7-16: Auswahl Werkstückgeometrien und Prozessparameter	72
Abbildung 7-17: Heuristisches Optimierungsverfahren	73
Abbildung 7-18: Zeitbedarf des Optimierungsverfahren	74
Abbildung 7-19: Kontroll- und Überwachungseinheit	74
Abbildung 7-20: Warnanzeige	76
Abbildung 7-21: Virtueller Flipchart	77
Abbildung 7-22: Entfernungsabhängige Messabweichungen	80
Abbildung 7-23: Genauigkeit der Objektdetektion	84
Abbildung 7-24: PTP-Bewegung mit $k=100$	85
Abbildung 7-25: PTP-Bewegung mit $k=80$	86
Abbildung 7-26: Ausweichbewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten	87

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-1: Geschwindigkeitsabhängige Wiederholgenauigkeit in X- und Y-Richtung	70
Tabelle 7-2: Reproduzierbarkeit und Genauigkeit des Lasersensors	79
Tabelle 7-3: Messabweichungen mit dem 6D-Zeiger	80

11 Abkürzungsverzeichnis

µC	Mikrocontroller
3D	Dreidimensional
AD	Analog/Digital
AR	Augmented Reality
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BmBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CP	Continuous Path
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DME	Distance Measuring Equipment
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FuE	Forschung und Entwicklung
GUI	Graphical User Interface
I/O	Input/Output
IT	Informationstechnik
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MAG	Metall-Aktiv-Gasschweißen
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches-System
PLS	Proximity Laser Scanner

- Abkürzungsverzeichnis -

PTP	Point-to-Point
RAM	Random Access Memory
RRS	Realistic Robot Simulation
SFB	Sonderforschungsbereich
SPI	Serial Peripheral Interface
SSI	Synchron Serial Interface
TCP	Tool-Centre-Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TSP	Travelling Salesman Problem
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
WLAN	Wireless Low Area Network
XML	eXtensible Markup Language

12 Literaturverzeichnis

- 1 World Robotics 2006 – Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment
ISBN No. 92-1-1011000-05
- 2 H. Armbruster, E. Kirner, S. Kinkel
Neue Kundengruppen für Industrieroboter - Wo liegen unausgeschöpfte Anwendungspotenziale für Roboter im deutschen Verarbeitenden Gewerbe?
Mitteilungen aus der Produktionserhebung, Nr. 38, März 2006, Karlsruhe, Fraunhofer ISI
- 3 W. Wahlster
Dialogue Systems Go Multimodal: The SmartKom Experience
Wolfgang Wahlster (Hrsg.), SmartKom - Foundations of Multimodal Dialogue Systems, Springer, ISBN: 978-3-540-23732-7, 2006
- 4 A. Stopp, T. Baldauf, R. Hantsche, S. Horstmann, S. Kristensen, F. Lohnert, C. Priem, B. Ruescher
The Manufacturing Assistant: Safe, Interactive Teaching of Operation Sequences
Proceedings of the 11th IEEE Int. Workshop on Robot and Human interactive Communication, ROMAN2002, Berlin, September 25-27, 2002, S.386-391
- 5 B. Rooks
Mobile robots walk into the future.
Industrial Robot: An International Journal. Volume 29 Number 6, ISSN: 0143-991X, 2002, S. 517-523
- 6 P. Steinhaus, R. Becher, R. Dillmann
Sonderforschungsbereich 588 Humanoide Roboter - Lernende und kooperierende multimodale Roboter
it – Information Technology 46, Oldenbourg Verlag, 2004

- 7 O. Kerpa, D. Osswald, S. Yigit, C. Burghart, H. Wörn
Arm-Hand-Control by Tactile Sensing for Human Robot Co-operation
Proceedings of Humanoids 2003, Karlsruhe, Germany, 2003
- 8 R. Zöllner, O. Rogalla, J. M. Zöllner, R. Dillmann
Dynamic Grasp Recognition within the Framework of Programming by
Demonstration
The 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive
Communication, Roman2001, France, 2001
- 9 A. T. Bjerrum, Meyer, F. Wernerus, Fr.-W. Bach, P. Margenfeld, R.
Verseemann, Chr. Redeker, I. Sousa Pinto, A. Bordalo e Sá, W. Simpson
Autonomous Underwater Lander for sampling and monitoring
Conference Proceedings: 13th International Conference and Exhibition of
the Hydrographic Society and the DhyG, 8th to 10th Oct. 2002, S. 270-
278, 2002
- 10 R. Verseemann, Fr. W. Bach, Chr. Walter, P. Marty, A. A. Bordalo, Fr.
Wernerus, Th. Meyer
Application of Autonomous Underwater Vehicles – SEABEE
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics '04, S. 1647-
1651, Aachen 2004
- 11 U. Thomas, F. M. Wahl
Sonderforschungsbereich 562: Robotersysteme für Handhabung und
Montage
Zwischenbericht Teilprojekt B4: Roboterprogrammierung, Institut für
Robotik und Prozessinformatik, 2003
- 12 U. Thomas, F. M. Wahl
A General and Uniform Notation for any Kinematic Structure
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics '04, S. 587-
582, Aachen 2004
- 13 M. Naumann, K. Wegener, R. D. Schraft
Control Architecture for Robot Cells to Enable Plug and Produce.
Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and
Automation, ICRA 07, S. 287-292, Rom, April 2007

- 14 M. F. Zäh, St. Clarke, B. Petzold, J. Schilp
Achieving Flexible Micro-assembly Systems through Telepresence
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1473-1479, Aachen 2004
- 15 M. F. Zäh, B. Petzold, B. Färber, B. Deml, H. Egermeier, J. Schilp, St. Clarke
A Study on Visual, Auditory, and Haptic Feedback for Assembly Tasks
Presence
Volume 13, Number 1, MIT Press, 2004
- 16 J. Gausemeier, U. Frank, A. Redenius, D. Steffen
Developing Self-Optimizing Systems
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1163-1168, Aachen 2004
- 17 J. Gausemeier, W. Müller, V. Paelke, J. Bauch, Q. Shen, R. Radkowski
Virtual Prototyping of self-optimizing Mechatronic Systems
International Design Conference - DESIGN 2004, Dubrovnik, Kroatien
2004
- 18 J. Gausemeier
Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung
20th CAD-FEM Users Meeting 2002, Friedrichshafen
- 19 B. Denkena, Fr.-W. Bach, B.-A. Behrens, N. Kramer, K. Möhwald, T. Deißer, M. Biströn
Manufacturing of Ceramic Reinforced High Precision Forging Dies
4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Çeşme, Türkei, 2007
- 20 Fr.-W. Bach, A. Beniyash, K. Lau, R. Versemann
Nonvakuum-Elektronenstrahlfügen von dünnwandigen Strukturbauteilen
Tagungsband DVM-Tagung 2005, Dünnwandige Bauteile, 27.-29.04.2005, Berlin, DVM-Bericht 672, S. 103-112, ISSN 0946-5987
- 21 M. Guillaume, A. Konnov, T. Längle, H. Wörn
Service-Engineering in Productive Industry with the "PROSERV"
Architecture
Proceedings of the "International IMS Forum 2004"

- 22 M. Guillaume, T. Längle, H. Wörn
PROSERV: An Integrated Environment for Diagnosis and Service in Industry
Proceedings of the 17th IAR/ICD Annual Meeting 2002
- 23 H. Gouveia, M. J. Barata, V. Ferreira, H. Soares
Development of a Welding Robotic Cell for Surface Regeneration using an Intelligent Reverse Engineering System
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 676-681, Aachen 2004
- 24 M.W. de Graf, R.G. Aarts, J. Meijer, J.B. Jonker
Modeling the seam teaching process for robotic laser welding
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 732-737, Aachen 2004
- 25 E. Helms, R. D. Schraft
rob@work – Assistenzroboter als Helfer in der Produktion
ATP – Automatisierungstechnische Praxis, 45 (2003), Nr.2, S. 67-72
- 26 S. Thiemermann
Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2005, (IPA-IAO Forschung und Praxis 411). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2005
- 27 S. Thiemermann, J. Spingler
team@work - Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage
atp, 45 (2003), Nr. 11, S. 31-35
- 28 K. Beumelburg
Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2005, (IPA-IAO Forschung und Praxis 413). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2005

- 29 T. Strasser, F. Auinger, C. Eberst, M. Gusenbauer, M. Schüpany
Intelligente verteilte Systeme auf Basis modularer smarterer Komponenten
3. Internationales Symposium Mechatronik, Linz, Österreich, 2004
- 30 A. Pichler, M. Vincze, H. Anderson, O. Madsen, K. Häusler
A Method for Automatic Spray Painting of Unknown Parts
IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington
DC, USA 2002
- 31 C. Eberst, H. Bauer, J. Minichberger, H. Nöhmayer, A. Pichler, G. Umgeher
Self-programming Robotized Cells for Flexible Paint-Jobs
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, Aachen
2004
- 32 M. Sallinen, T. A. Heikkila, M. Sirviö
A Robotic Deburring System of Foundry Castings based on Flexible
Workobject Localization
Proceedings of the International Society for Optical Engineering SPIE,
2001
- 33 A. During, M. Komischke, C. Wittenberg, U. Berger
A vision for an Information Management Tool for Plant Engineering –
Functionality and User Interface
Proceedings of the Fifth International Symposium on Tools and Methods
of Competitive Engineering (TMCE 2004), Horváth and Xirouchakis (ed.),
Lausanne, Switzerland, Millpress Rotterdam, 2004
- 34 M. Weyrich, J. Cai, U. Berger
Digital Factory Triggered Virtual Machining Process Planning for
Powertrain Production in Extended Enterprise
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1077-
1082, Aachen 2004
- 35 R. Lepratti, U. Berger
Improving e-Manufacturing Efficiency through the Ontological Filtering
System
Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Information Control
Problems in Manufacturing, Salvador da Bahia, Brasil, 2004

- 36 J. Cai, M. Weyrich, U. Berger
STEP-Referenced Ontological Machining Process Data Modelling for
Powertrain Production in Extended Enterprise
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 241-
246, Aachen 2004
- 37 B. Matthias, C. Brecher, B. Schröter, et. al.
Porthos – Ein hochflexibles Robotersystem für Beschickungsaufgaben
Tagungsband 3. Paderborner Workshop „Intelligente mechatronische
Systeme“, 17.-18. März 2005
- 38 C. Brecher, B. Schröter, C. Almeida, F. Dai, B. Matthias, S. Kock
Intuitiv bedienbare Programmiersysteme zur effizienten Programmierung
von Handhabungsaufgaben
VDI Berichte Nr. 1841, „Robotik 2004“, S. 303-310 (2004)
- 39 D. Mages, B. Hein, H. Wörn
Introduction of additional information to heuristic path planning algorithms
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1028-
1033, Aachen 2004
- 40 R. Apitz
Roboter spürbar einfach programmieren
PHI Ausg. 4 (2004), S. 6-7, Zeitschrift der produktionstechnischen Institute
in Hannover, ISSN 1616-2757
- 41 W. H. Schaaf
Automatisiertes Modellieren großflächiger Sandgussformen
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2005, Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau,
Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2005
- 42 E. Westkämper, R. D. Schraft, W. Schaaf, T. Schäfer
Roboshaping - Flexible inkrementelle Blechumformung mit
Industrierobotern
Wt Werkstattstechnik 93, Nr. 1/2, S. 7-11, 2003

- 43 M. Ehrenmann, R. Becher, B. Giesler, R. Zöllner, O. Rogalla, R. Dillmann
Interaction with Robot Assistants: Commanding ALBERT
Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent
Robots and Systems (IROS), September 2002, Lausanne, Schweiz, 2002
- 44 A. Ferscha
Collaboration and Coordination in Pervasive Computing Environments
Proceedings of the 12th International Workshops on Enabling
Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises, WETICE 2003,
IEEE Computer Society Press, 2003
- 45 K. Dey
Understanding and Using Context. Personal and Ubiquitous Computing
Special Issue on Situated Interaction and Ubiquitous Computing, 5(1),
2001
- 46 G. Kaefer, G. Prochart, R. Weiss
Wearable Alertness Monitoring for Industrial Applications
ISWC 2003, S. 254-255, 2003
- 47 Y. Okumoto, K. Hiyoku, O. Suzuki, R. Iseki
Study of Digital Manufacturing in Shipbuilding (1st Report) Application for
Pipe Unit Assembly
Nihon Zosen Gakkai Ronbunshu/Journal of the Society of Naval Architects
of Japan. Vol. 195, S. 95-101, 2004
- 48 M. Boronowsky, T. Nicolai, C. Schlieder, A. Schmidt
Winspect: A Case Study for Wearable Computing Supported Inspection
Tasks
Proceedings of the Fifth International Symposium on Wearable Computers
(ISWC'01). IEEE-Press, 2001
- 49 J. F. Knight, C. Baber
Assessing the physical loading of wearable computers
Applied Ergonomics, Volume 38, Issue 2, März 2007, Seite 237-247

- 50 L. Barnard, J. Soo Yi, J. A. Jacko, A. Sears
An empirical comparison of use-in-motion evaluation scenarios for mobile computing devices
International Journal of Human-Computer Studies, Volume 62, Issue 4, April 2005, Seite 487-520, 2005
- 51 G. Tröster
Kleidsamer Gesundheitsassistent — Computer am Körper, im Körper
Die Informatisierung des Alltags, Springer, ISBN 978-3-540-71454-5 Teil II, Seite 103-126, 2007
- 52 J. F. Knight, C. Baber
A Tool to Assess the Comfort of Wearable Computers Human Factors, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Volume 47, Number 1, S. 77-91(15), 2005
- 53 L. Gong, M. Boronowski
towards the Empowered Mobile Worker through wearIT@Work
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1579 - 1582, Aachen 2004
- 54 Wolfgang Friedrich, Hrsg.
ARVIKA - Augmented Reality in Entwicklung, Produktion und Service
ISBN 3-89578-239-4, 2004
- 55 H. Wuest, F. Vial, D. Stricker
Adaptive Line Tracking with Multiple Hypotheses for Augmented Reality
ISMAR 2005, Proceedings of the Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Wien, Österreich S. 62-69, 2005
- 56 B. Hillers, D. Aiteanu, P. Tschirner, M. Park, A. Gräser, B. Balazs, L. Schmidt
TEREBES: Welding Helmet with AR capabilities
Tagungsband: International Status Conference "Virtual and Augmented Reality", Februar 19-20, 2004, S. 1-10, 2004

- 57 A. Sarwal, C. Baker, D. Filipovic
Head-Worn Display-Based Augmented Reality System for Manufacturing
Proceedings of the SPIE, Volume 5800, S. 115-122, 2005
- 58 W. Lee, J. Park
Augmented Foam, A Tangible Augmented Reality for Product Design
ISMAR 2005, S. 106-109, 2005
- 59 N. Navab
Developing Killer Apps for Industrial Augmented Reality,
IEEE Computer Graphics and Applications 24(3), S. 16-20, 2004
- 60 P. Boulanger
Application of Augmented Reality to Industrial Tele-Training
CRV, S. 320-328, 2004
- 61 J. Fründ, J. Gausemeier, C. Matysczok, R. Radkowski
Using Augmented Reality Technology to Support the Automobile
Development
Lecture Notes in Computer Science, Band 3168, S. 289-298, Springer
Verlag LNCS, 2005
- 62 D. Aiteanu, B. Hillers, A. Gräser
A Step Forward in Manual Welding: Demonstration of Augmented Reality
Helmet
ISMAR 2003, S. 309-310, 2003
- 63 T. Pettersen, J. Pretlove, C. Skourup, T. Engedal, T. Løkstad
Augmented Reality for Programming Industrial Robots
ISMAR 2003, S. 319-320, 2003
- 64 Sichere Kooperation zwischen Mensch und Roboter
Messen Prüfen Automatisieren, b-Quadrat Verlags GmbH & Co. KG, März
2005, S. 20-25
- 65 Virtuelle Wände legen den Roboter lahm
Industrieanzeiger 14/2005, Konradin Mediengruppe, S. 43-44, 2005

- 66 S. Tiermermann
Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter
Jost-Jetter-Verlag, 2005, IPA-IAO Forschung und Praxis, Bandnummer 411, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, ISBN: 3-936947-50-3, Diss. 2005
- 67 W. Dai
PC-basierte, interaktive Off-line-Programmierung von Schweißrobotern mit verbesserter Nutzerunterstützung
Schriftenreihe APS, 2000
- 68 P. Drews, C. Cichon
Methoden für die autonome Durchführung simulationsgestützter Planungsschritte
SFB 368, Arbeits- und Ergebnisbericht 2002
- 69 M. Kampker
Werkzeuge für die nutzerorientierte Werkstattprogrammierung von Schweißrobotern
TWB 32, RWTH-Aachen, Juli 2000
- 70 M. Kampker
New ways of User oriented Robot Programming
IECON '98 Conference Proceedings, Aachen 1998
- 71 G. Starke, M. Kampker
Verbesserte Roboterprogrammierung für die werkstatorientierte Fertigung
Roboter '99, DVS-Bericht 199, DVS-Verlag Düsseldorf
- 72 G. Starke
Robotereinsatz in der Werftindustrie
Tagungsband ManiRob 2003, 11./12. Nov. 2003 , Bonn, VDI-Gesellschaft Energietechnik + DBCM GmbH, Sankt Augustin

- 73 C. Cichon, G. Starke
Advanced Man-Machine-Interface Technologies for new Kind of Robot
Kinematics in Unstructured Welding Environments
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 379-
383, Aachen 2004
- 74 D. Hahn, G. Starke
Wearable User-Interface for Online Process Monitoring and Remote
Expert Consulting
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 162-
165, Aachen 2004
- 75 S. Yinda, C. Dreyer
Simulating and Controlling an industrial Robot out of a Virtual Reality
Environment
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 1350-
1355, Aachen 2004
- 76 M. Hackel, G. Starke
Integrated Surface Digitalisation Enabling Flexible Automation at small
Batch Sizes
IEEE International Conference of Mechatronics & Robotics `04, S. 277-
281, Aachen 2004
- 77 X. Tang
Entwicklung eines interaktiven, sensorunterstützten Programmier- und
Simulationswerkzeugs für das Mehrlagenschweißen mit Industrierobotern
Shaker-Verlag Aachen, 2003
- 78 P. Drews, G. Starke, M. Hackel, S. Kremer-Wasmuht
Automated surface welding for the repair of forming tools, Welding and
Cutting 3
DVS-Verlag, Issue 1/2004
- 79 M. Hackel, S. Kremer-Wasmuht, G. Starke
Design and Implementation of a System for Autonomous Repair Welding
Proceeding of the „WISES“ Workshop (Intelligent Solution in Embedded
Systems“), Technische Universität Wien, Juni 27, 2003

80 I. Rügge

Technologische und anwendungsorientierte Potenziale mobiler, tragbarer
Computersysteme

TZI-Bericht Nr. 24, Technologie-Zentrum Informatik (TZI), Universität
Bremen, Bremen, 2002, S. 18

81 D. Norman

The invisible computer

MIT Press ISBN: 0262640414, 1998

82 M. Weiser

The computer for the 21st century.

Scientific American 3 (1991), S. 94-104

83 E. Aarts

Ambient intelligence: A multimedia perspective

IEEE Multimedia 11 (2004), S. 12-19