



H Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Beyer  
Wiss. Mitarbeiter am LaFT



Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg  
Laboratorium Fertigungstechnik



Prof. em. Dr.-Ing. Arno Behrens  
Laboratorium Fertigungstechnik

# Hybridkinematiken – Alleskönner zwischen Industrieroboter und Werkzeugmaschine?

## 1. Hintergrund

Die Zahl der in Deutschland eingesetzten Industrieroboter (IR) hat laut VDMA mittlerweile die Zahl von 100.000 Stück überschritten [1]. Damit wurde ein neuer Meilenstein im Automatisierungsgrad der Produktion gesetzt, was vor allem durch die stark gefallenen Herstellkosten der flexiblen Helfer begünstigt wurde. Auf diese Weise konnte die Produktivität weiter gesteigert werden, was wiederum Wirtschaftswachstum und damit Arbeitsplätze sichert.

Auf der anderen Seite hatte die Werkzeugmaschinenindustrie in der letzten Dekade insbesondere in den Jahren 1992-94 eine schwere Absatzkrise, so daß erst 1999 wieder der Produktionsumfang von 1990 erreicht wurde [2]. Dies führte neben einer Marktberreinigung in der Folge zur Entwicklung neuer Maschinenkonzepte in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft: Von sog. Parallelkinematiken erhoffte man sich verbesserte Dynamik und Genauigkeit bei gleichzeitig reduzierten Systemkosten. Der Einsatz moderner Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen (WZM) kann zusätzlich eine gesteigerte Flexibilisierung der Produktion unterstützen.

Auch die IR haben sich kontinuierlich weiterentwickelt, vor allem hinsichtlich Traglast, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit, so daß sie heute nicht mehr nur für eher simple Aufgaben wie Punktschweißen oder Handhabung eingesetzt werden, sondern sich viele Spezialanwendungen erschlossen haben, die vorher nicht für einen Robotereinsatz in Betracht kamen, so z.B. das Laserschweißen, Wasserstrahlschneiden oder Rollfalzen.

Auch das Laboratorium Fertigungstechnik hat in der Vergangenheit – insbesondere durch die Steigerung der Arbeitsgenauigkeit von Industrierobotern – seinen

Beitrag zur Erweiterung des Einsatzspektrums von IR geleistet.

Zur Zeit wird nun versucht, durch eine Kombination und Nutzung der spezifischen Vorteile beider o.g. Entwicklungen die Einsatzmöglichkeiten von Robotern, insbesondere von parallelkinematischen, für die hochgenauen, flexiblen Aufgaben zu erweitern, die bisher Werkzeug- oder Spezialmaschinen vorbehalten sind.

## 2. Stand der Technik

Das Problem der statischen Genauigkeitssteigerung konventioneller Knickarmroboter durch Kalibrierung kann heutzutage prinzipiell als gelöst betrachtet werden (siehe z.B. UNIFORSCHUNG 2000). Am LaFT wurden in vielerlei industriellen Anwendungen Arbeitsgenauigkeiten von 0,2 – 0,3 mm realisiert, wodurch oftmals die Offline-Programmierung hochgenauer Fertigungsaufgaben durch graphi-interaktive Simulation (OLP) überhaupt erst ermöglicht wurde. Als Beispiel sei hier das robotergeführte Rollfalzen von Karosserieteilen erwähnt. Außerdem konnten mittlerweile sogar Applikationen zur Bauteilvermessung im Karosseriebau mittels konventioneller Knickarmroboter implementiert werden.

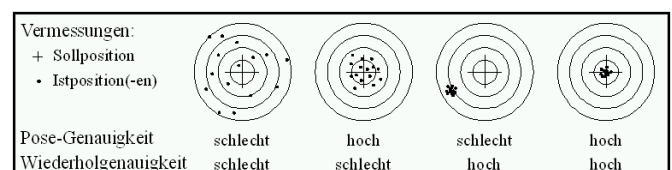


Abb. 1: Absolut- und Wiederholgenauigkeit von IR [3]

Begrenzender Faktor für die Steigerung der absoluten Positioniergenauigkeit von Industrierobotern ist die

sogenannte Wiederholgenauigkeit, die ohne konstruktive Maßnahmen nicht erhöht werden kann (s. Abb. 1).

Deshalb war die logische Konsequenz zur Realisierung einer weiter gesteigerten Arbeitsgenauigkeit die Suche nach alternativen kinematischen Strukturen, die auf Grund Ihrer konstruktiven Eigenschaften eine höhere Steifigkeit und damit eine bessere Wiederholgenauigkeit ermöglichen können. Hierbei kamen schnell die neuen Konzepte parallelkinematischer Maschinen ins Visier, da sie eine Verbesserung hinsichtlich Dynamik, Steifigkeit und erreichbarer Genauigkeit erwarten ließen. Denn anders als bei konventionellen Maschinenkonzepten, welche eine offene kinematische Kette mit bis zu sechs Gelenken darstellen, bei der ein Antrieb den nächsten trägt, weisen parallele Bauformen mehrere geschlossene kinematische Ketten auf. Grundformen sind beispielsweise Tripod- und Hexapod-Strukturen (s. Abb. 2).

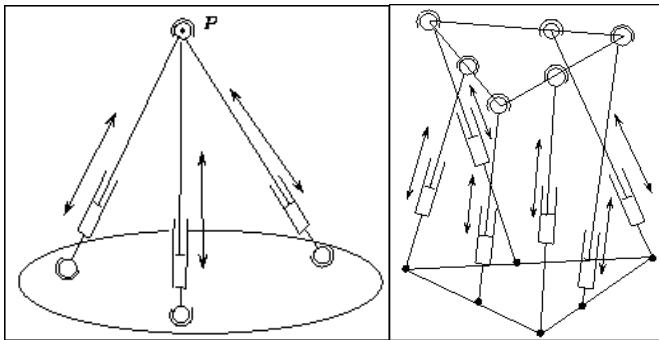


Abb. 2: Tripod und Hexapod [4]

### 3. Entstehungsgeschichte der Parallelkinematiken

Nach den ersten Ansätzen zur Realisierung paralleler Mechanismen durch Gough (1949) und Stewart (1965) [5] wurde es zunächst wieder ruhiger um deren Anwendungsmöglichkeiten, abgesehen von einzelnen Flug- und Fahrsimulatoren und einigen Entwicklungen in der UdSSR, die international aber erst später bekannt wurden. Erst ab Mitte der 80er Jahre wurden erste Werkzeugmaschinen mit Hexapod-Kinematik konzipiert und dann erstmals auf der IMTS 1994 in Chicago präsentiert. Ein Grund für diese langsame Entwicklung war die bis dahin zur Steuerung komplexer paralleler Kinematiken noch unzureichende Rechenleistung gängiger Prozessoren.

Seitdem wurde nicht nur die Diskussion, sondern auch die Entwicklung und Anwendung derartiger alternativer Maschinenkonzepte auf breiterer Basis wieder aufgenommen. Die Vorteile dieser Kinematiken liegen dabei hauptsächlich in ihrer Steifigkeit, Wiederholgenauigkeit und Geschwindigkeit sowie in der kostensparenden Möglichkeit der Verwendung von Gleichteilen. Die Nachteile gegenüber konventionellen Strukturen sind ein beschränkter Arbeitsraum im Verhältnis zum Bauraum, ein oft geringer Schwenkbereich sowie ein hoher rechnerischer Aufwand zur Steuerung und Regelung des Systems.

Eine Klassifizierung von Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematik läßt sich zunächst grob nach den verwandten Konstruktionsprinzipien vornehmen:

- Anzahl der Freiheitsgrade
- Veränderliche Stablängen oder Fußpunkte
- Translatorische oder rotatorische Antriebe
- Rein parallele oder hybride Struktur

Da es hier eine nahezu unendliche Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und Größenverhältnissen gibt, ist jeweils eine mehrkriterielle Optimierung der Konstruktion im Hinblick auf ihren Einsatzzweck erforderlich. Da es sich hier um ein multidimensionales, nichtlineares und konfliktäres Problem handelt, ist die Lösung denkbar vielfältig und komplex.

Weitere Probleme tauchten in den letzten Jahren bei der Umsetzung der theoretischen Konzepte in reale Maschinen auf: Zum einen ergaben sich Schwierigkeiten bei der Steuerung der Hexapoden auf Grund ihrer nicht-kartesischen Struktur, wegen Kollisionsgefahren und Singularitäten (multiple Achsstellungen für bestimmte Raumpositionen), zum anderen war die geforderte Arbeitsgenauigkeit oftmals nur schwierig oder nicht zu erreichen.

Für den ersten Problemkreis konnten inzwischen durch intensive wissenschaftliche Arbeit zufriedenstellende Lösungen gefunden werden, wie auch deterministische Methoden zur Strukturanalyse und -synthese im Rahmen von Auslegung und Entwicklung. Die geforderten Toleranzen können jedoch bisher nur in Einzelfällen für alle Betriebszustände garantiert werden. Dies hat zwei Hauptgründe: Zunächst ist die Kinematik paralleler Maschinenstrukturen auf Grund ihrer nichtlinearen Eigenschaften, der Abhängigkeiten der Einzelantriebe untereinander und der hohen Anzahl an geometrischen Parametern (bis zu 132) mathematisch ungleich schwieriger zu behandeln als die kartesischer Maschinen. Darüber hinaus konnten im konventionellen Werkzeugmaschinenbau jahrzehntelang Erfahrungen hinsichtlich optimaler Auslegung, Fehlerkompensation und intelligenter Steuerung gemacht werden, die für Parallelkinematiken wegen ihrer relativ kurzen Entwicklungsgeschichte einfach noch nicht vorliegen.

Deshalb wird am LaFT versucht, die vorhandenen Kenntnisse hinsichtlich der Kalibrierung von Knickarmkinematiken auf Parallelstrukturen zu übertragen und diese durch eine deutliche Erhöhung ihrer Arbeitsgenauigkeit für bestimmte hochgenaue Anwendungen zu qualifizieren.

### 4. Zielsetzung

Neuartige Lösungsansätze können sich in der Produktionstechnik nur langfristig durchsetzen, wenn sie gegenüber den bislang verwandten Methoden eine Effizienzsteigerung, also eine Erhöhung der Produktivität bzw. eine Reduktion der Stückkosten bei gleichbleibender oder verbesserter Qualität erwarten lassen. Dazu muß die Fertigungseinrichtung entweder geringere Herstellkosten aufweisen oder eine entsprechend höhere Leistung erbringen. Am Beginn

der Anstrengungen stand deshalb die Suche nach einer geeigneten *Maschinenart*, die innerhalb bestimmter Nischen die o.g. Voraussetzungen erfüllen könnte.

Da parallelkinematische WZM auf Grund ihrer geringen Stückzahlen und des hohen Entwicklungsaufwandes bisher kaum zu konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden können, richtete sich der Blick rasch auf Parallelkinematiken einfacher Bauart. Da hier die Fertigungstoleranzen der einzelnen Komponenten im Lastenheft nicht an erster Stelle stehen, lassen sie sich zum einen zu relativ niedrigen Kosten herstellen, zum anderen bieten sie viel Spielraum zur Genauigkeitssteigerung. Aus diesem Grund und wegen der bisherigen Forschungsschwerpunkte am Institut erschienen parallelkinematische Industrieroboter (PKI) ein erfolgversprechendes Forschungsobjekt zu sein. Sie haben die Chance, in der Lücke, die bezüglich Toleranzen und Kosten zwischen herkömmlichen Industrierobotern und Werkzeugmaschinen besteht, für bestimmte Spezialanwendungen gewinnbringend eingesetzt zu werden und sich davon ausgehend neue Applikationen zu erschließen (s. Abb. 3).

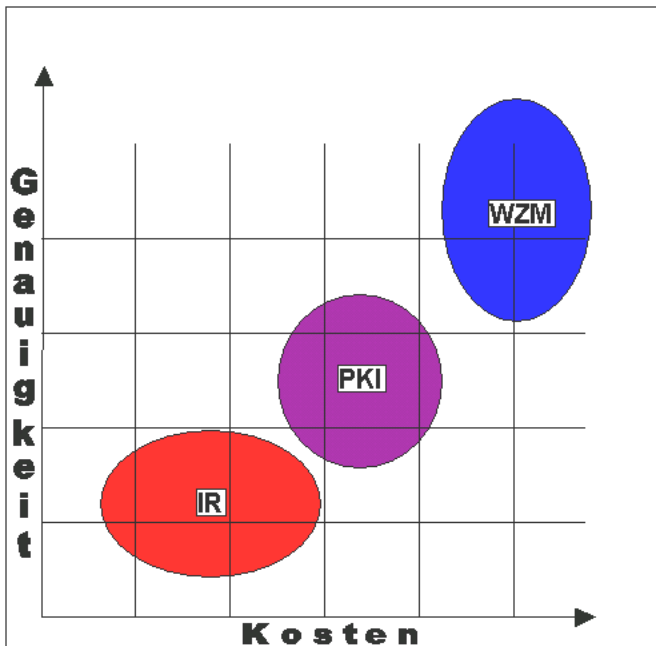


Abb. 3: Einteilung von WZM, PKI und konventionellen IR hinsichtlich Genauigkeit und Kosten [6]

Weiterhin war zu ermitteln, welche *kinematische Struktur* am erfolgversprechendsten erschien, um bestimmte Aufgaben schneller, genauer oder günstiger und damit besser als bisher zu erfüllen.

Da Spezialapplikationen zumeist eine hohe Flexibilität der Produktionseinrichtung bedingen, lag auf der Hand, daß die Maschine über sechs Freiheitsgrade verfügen muß, um mit dem Endeffektor innerhalb ihres Arbeitsraumes beliebige Positionen und Orientierungen (sog. Posen) einnehmen zu können. Damit grenzten sich die Auswahlmöglichkeiten prinzipiell auf zwei Grundstrukturen ein: entweder einen vollparallelen Hexapoden oder eine Hybridkinematik, die aus einem Tripoden und einem konventionellen seriellen Handgelenk besteht.

Nun haben Hexapoden, wie bereits eingangs erwähnt, meist den Nachteil eines recht beschränkten Arbeitsraumes und eines eher geringen Schwenkwinkels, was eine echte Fünf-Seiten-Bearbeitung eines Werkstückes oft verbietet. Die Hybridstruktur vermeidet diese Einschränkungen dadurch, daß mittels des parallelen Teils hauptsächlich die Position im Raum grob eingenommen wird, wohingegen durch die frei drehbare Hand ein großer Orientierungsbereich abgedeckt wird. So kann z.B. ein halbkugelförmiges Werkstück überall senkrecht zu seiner Oberfläche bearbeitet werden.

Darum fiel die Wahl des bevorzugten Versuchsobjektes auf den parallelkinematischen Industrieroboter *Tricept* der Firma Neos Robotics. Es handelt sich hier um eine sechssachsig Hybridstruktur mit einem hemisphärischen Arbeitsraum von ca. 1800 mm Durchmesser, welche hohe Bahngeschwindigkeiten und darüber hinaus die Ausübung von Druckkräften bis



Abb. 4: Tricept TR600 der Firma Neos Robotics [7]

15 000 kN erlaubt. Das Gerät wird etwa zum dreifachen Preis eines normalen Knickarmroboters angeboten, was für bestimmte Anwendungen durchaus

konkurrenzfähig und durch notable Stückzahlen belegt ist.

Jedoch ist die Absolutgenauigkeit des PIR nicht ganz so gut, wie der Hersteller angibt: Es wird der Wert 0,2 mm genannt, der jedoch nicht eingehalten werden kann. Am LaFT wurden eigene Vermessungen in Anlehnung an den Standard ISO 9283 durchgeführt, welcher Anforderungen für die Ermittlung unterschiedlicher Kenngrößen für Industrieroboter festlegt. Dabei wurden bei fabrikneuen wie auch bei älteren Geräten an Hand von 40 Meßpositionen ein mittlerer Fehler zwischen 0,67 und 0,98 mm festgestellt. Somit liegt auf der Hand, daß hier noch einiges zu leisten ist, um diese Hybridkinematik hinsichtlich ihrer Arbeitsgenauigkeit zu verbessern, so daß die folgenden drei Kernziele mittels Kalibrierung erreicht werden:

- Ermöglichung der Offline-Programmierung durch graphische Simulation ohne aufwendige Programmanpassungen vor Ort
- Verbesserung der Austauschbarkeit durch die Generierung kinematisch identischer Roboter
- Realisierung hochpräziser Applikationen auf CAD-Datenbasis

Angestrebt ist dabei die Reduktion von AP (accuracy of pose, Absolutgenauigkeit) auf Werte unter 0,1 mm. Somit stünde eine hochgenaue Universalmaschine zur Verfügung, welche die Vorteile der seriellen und der parallelen Kinematik vereint, flexibel einzusetzen ist und dadurch die Preis-/Leistungslücke zwischen IR und WZM ausfüllen kann.

## 5. Stand der Entwicklungen

Die Kalibrierung kinematischer Strukturen erfolgt im allgemeinen in drei Schritten:

- Vermessung der Struktur durch Ermittlung der kartesischen Abweichungen an einer hinreichenden Anzahl von Meßpositionen
- Identifikation der Fehlerparameter durch numerische Minimierung der Summe der Abweichungen
- Korrektur von Maschinendaten oder Verfahrogramm an Hand der ermittelten realen Kinematikparameter

Die Parameteridentifikation präsentiert sich hierbei als nichtlineares unrestringiertes multidimensionales Optimierungsproblem. Dessen Robustheit und Konvergenz sind in großem Maße von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Aus diesem Grunde ist darauf zu achten, daß der Meßfehler sowie stochastische Einflüsse („Rauschen“) möglichst klein gehalten werden.

Deshalb wurde am LaFT ein Meßwerkzeug zur exakten videostereometrischen Erfassung der Positionsabweichungen entwickelt. Das Gerät ist portabel, robust, bedienfreundlich und aus handelsüblichen Komponenten aufgebaut. Dennoch konnte durch Verwendung intelligenter

Bildverarbeitungsalgorithmen eine Meßgenauigkeit von 3 µm erreicht werden.

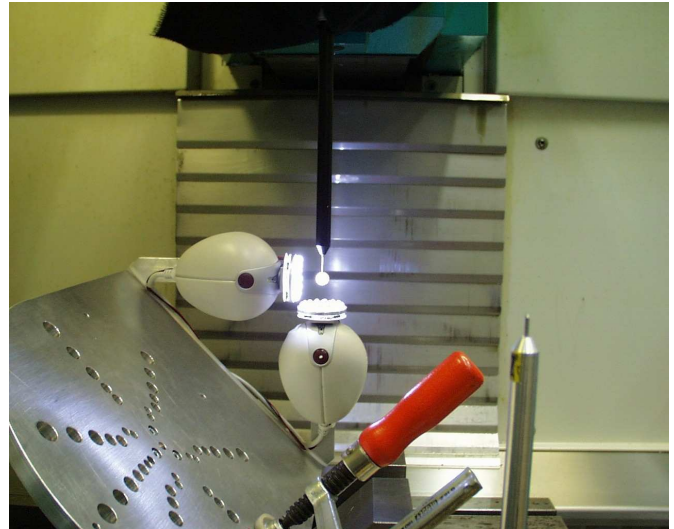


Abb. 5: Meßwerkzeug bei Tests auf einer Fräsmaschine

Da die Roboterkalibrierung letztendlich durch normale Werker an der Maschine durchgeführt werden muß, ist die Bedienfreundlichkeit des Systems von ausschlaggebender Bedeutung. Deshalb wurde am LaFT das Softwaresystem ROSY (Robot Optimization SYstem) entwickelt, welches dem Benutzer die komplizierten mathematischen Zusammenhänge erspart und die Kalibrierung von PIR durch wenige Tastendrucke und Mausklicks ermöglicht. Der gesamte Vorgang läßt sich von einem eingewiesenen Bediener in deutlich weniger als einer halben Stunde abschließen. Darüber hinaus bietet ROSY weitere Features wie Werkstückkalibrierung, Berechnung der Werkzeugdaten und Anpassung bestehender Roboterprogramme für verschiedene Steuerungen und Programmiersprachen.



Abb. 6: Vermessung eines Knickarmroboters mit ROSY

Eine besondere Schwierigkeit bei der Entwicklung des Systems stellte die Implementierung der kinematischen Algorithmen für den Tricept dar. Das erste Problem ergab sich durch die Tatsache, daß sich die

Kugelrollspindeln der drei Linearachsen in Abhängigkeit von der Position im Raum um einige Grad verdrehen, was wiederum zu einer geringen Längenänderung führt, die jedoch am Werkzeugarbeitspunkt (Tool Center Point, TCP) bei extremen Randlagen zu Abweichungen im Millimeterbereich führen kann. Dieser Effekt konnte durch das Einfügen einer Unterfunktion in die kinematischen Transformationen berücksichtigt werden, welche die jeweilige Verdrehung und die daraus resultierende Ablage berechnet und kompensiert.

Weiterhin mußte festgestellt werden, daß der kinematische Algorithmus, der in der Steuerung Verwendung findet, statt der mindestens erforderlichen 39 Parameter nur 11 aufwies. Das Modell mußte also um die fehlenden „Einstellmöglichkeiten“ erweitert werden. Da auf Grund der geringen Parameterzahl eine steuerungsseitige Kalibrierung nicht zu den gewünschten Ergebnissen führt, was durch verschiedene Untersuchungen belegt wurde, war es notwendig, eine Methode zu entwickeln, mit Hilfe deren das off-line generierte Verfahrprogramm entsprechend angepaßt werden kann. Durch diese *Programmkorrektur* wird – einfach ausgedrückt – dem falschen Roboter ein falscher Pfad vorgegeben, den er wegen seiner kinematischen Fehler wiederum richtig abfährt. Durch die Summe der o.g. Maßnahmen konnten inzwischen Fehlerreduktionen von bis zu 90% realisiert werden, womit der Anspruch, das avisierte Ziel von unter 0,1 mm mittlerer Positionsabweichung zu erreichen, erfüllbar erscheint.

Ein weiterer Hauptpunkt im Projektplan war die Entwicklung einer praxisnahen Möglichkeit für die eigentliche Programmerstellung. Hochgenaue Anwendungen erfordern in den meisten Fällen eine Generierung des Verfahrprogramms mit Hilfe eines graphisch-interaktiven Simulations- und Programmiersystems, idealerweise auf Basis der CAD-Daten des zu bearbeitenden Werkstücks. Solche Softwaresysteme sind üblicherweise Unix-basiert und sehr teuer – zusammen mit der erforderlichen Workstation und der Ausbildung der Bediener können hier schnell Kosten von 150 000 € entstehen. Da dieser Betrag noch über den Anschaffungskosten eines PIR liegt, kommt für viele Betriebe solch eine Investition nicht in Frage. Auf Grund dessen wurde nach einer Möglichkeit gesucht, eine einfache off-line-Programmierung zu wesentlich geringeren Kosten zu ermöglichen. Durch intensive Recherche wurde das vom Leistungsumfang her ausreichende PC-basierte Simulationswerkzeug *Easy-Rob* gefunden. In diesem System wurden zunächst die gewünschten Tricept-Typen mit dem eingebauten CAD-Modul exakt modelliert. Mittels vorhandener API-Schnittstellen konnten die entwickelten kinematischen Algorithmen in das System eingebunden werden, so daß ein voll parametrisierbares Modell zur Verfügung steht, das mit der realen Maschine kongruent ist. Den letzten, noch ausstehenden Schritt dieser Teilaufgabe stellt die Programmierung eines Postprozessors dar, der die in der systemspezifischen Sprache erzeugten Verfahrprogramme in das Format der jeweiligen Steuerung übersetzt. Damit steht dann ein einfach zu

bedienendes, preisgünstiges und portables off-line-Programmiersystem zur Verfügung, mit dem der Roboterbediener ggf. direkt neben der Anlage die nächste Aufgabe erstellen kann, während der aktuelle Prozeß noch läuft.

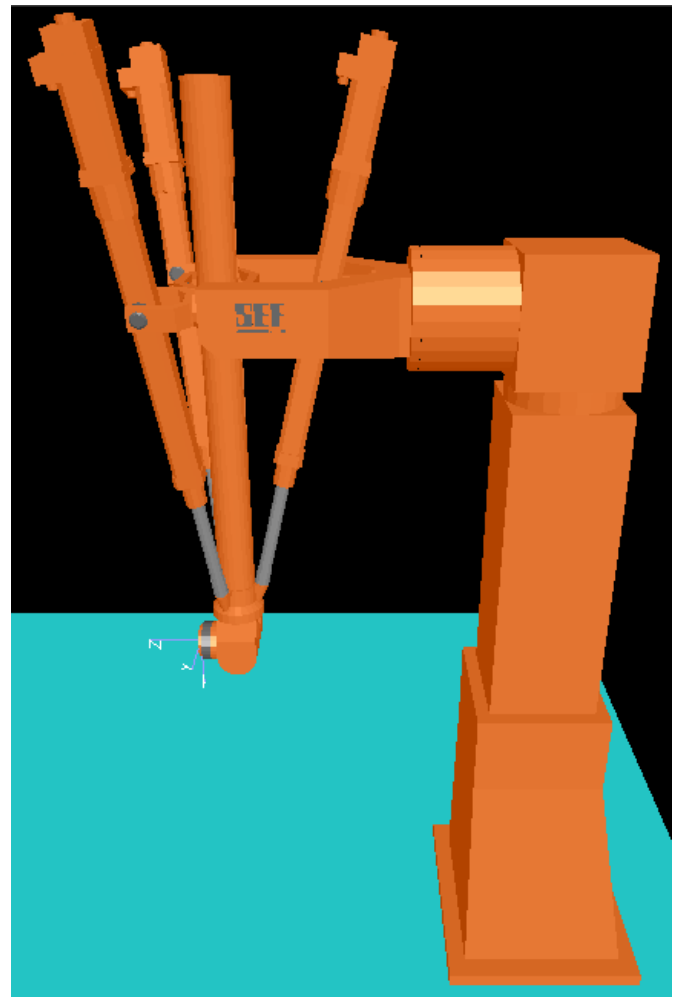


Abb. 7: Tricept SRT60 in Easy-Rob [8]

## 6. Weiterführende Ziele

Trotz des bisher Erreichten sind noch einige Punkte offen, deren Abarbeitung jedoch zumeist der intensiven Zusammenarbeit mit den verschiedenen Steuerungsherstellern bedarf. So wäre zur Berücksichtigung zeitvarianter Einflüsse wie z.B. der Temperatur eine on-line-Kompensation insofern notwendig, als daß der PIR in bestimmten Zeitabständen eine oder mehrere Referenzpositionen vermisßt. Die von ROSY errechneten Parameterkorrekturen müßten dann an die Steuerung übergeben und aktiviert werden. Hierzu wie auch für die wünschenswerte Maschinendatenkorrektur wäre allerdings eine Implementierung der neuentwickelten erweiterten kinematischen Transformationen in die Steuerung notwendig. Darüber hinaus wäre eine Berücksichtigung der kinetischen Einflüsse sinnvoll, da es insbesondere bei hohen Traglasten und Geschwindigkeiten zu

Bahnfehlern des IR auf Grund von Reglerabweichungen kommen kann.

Letzendlich könnte auch die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf eine Hexapod-Struktur die Funktionalität des Prinzips unterstreichen und weitere Einsatzgebiete erschließen.

## 7. Praxisbezug

Mit verschiedenen Industriepartnern werden z.Zt. Anwendungen der entwickelten Technologien untersucht:

- AUDI AG, Neckarsulm (IR-Kalibrierung zwecks Austauschbarkeit)
- AUDI AG, Ingolstadt (Tricept-Kalibrierung zum Laserlöten)
- GKSS, Geesthacht (Reibrührschweißen mit Hybridkinematiken)
- INGEMAT, S.A., Bilbao (Roboterkalibrierung zum Rollfalzen)
- SEF Roboter GmbH, Scharnebeck (Kalibrierung von Tricept-Robotern)
- Volkswagen AG, Wolfsburg (Roboterkalibrierung zur Karosserievermessung)
- Medical Intelligence GmbH, Schwabmünchen (Medizinrobotik)

Durch die Zusammenarbeit mit der Industrie können die aktuellen Entwicklungen jeweils mit den Erfordernissen der Praxis abgeglichen werden. Diese Erkenntnisse können dann ihrerseits wiederum in die Forschungsergebnisse einfließen.

## 8. Ausblick

Chancen für Hybridroboter [6]:

- Großes Marktpotenzial für Bearbeitungs- und Handhabungsaufgaben mit mittleren Anforderungen an Leistung, Geschwindigkeit und Genauigkeit bei akzeptablem Preis
- PIR sind wie IR flexibel konfigurierbar und anpassungsfähig, wodurch nachhaltige Wirtschaftlichkeit gesichert wird
- Einfache Konstruktion und preisgünstige Komponenten führen in Verbindung mit intelligenter Steuerung zu Genauigkeits- und Produktivitätssteigerung

## 9. Literatur- und Bildnachweis

[1] [www.vdma.de](http://www.vdma.de)

[2] [www.cecimo.be](http://www.cecimo.be)

[3] Behrens, A.; Beyer, L.: Kalibrierung von Parallelrobotern zur Erhöhung der Absolutgenauigkeit bei offline programmierten Applikationen. Forschungsantrag bei der

Deutschen Forschungsgemeinschaft, Hamburg 2001

[4] Merlet, J.-P.: Les robots parallèles. Hermès, Paris 1990

[5] Stewart, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180 (1965), part 1/15, p. 371-386

[6] Großmann, K.: Zielstellungen und Anwendungsbereiche für Parallelkinematiken einfacher Bauart. Tagungsband zum 3. Dresdner WZM-Fachseminar, Dresden 2001

[7] [www.neosrobotics.com](http://www.neosrobotics.com)

[8] Beisch, T.: Kostenoptimale Industrieroboterprogrammierung am Beispiel von Tricept-Robotern der Firmen Comau und SEF. Studienarbeit, Universität der Bundeswehr, Hamburg 2001

[9] Uniforschung, Forschungszeitschrift der Universität der Bundeswehr, Hamburg 2000