

Praktische Beispiele parallel strukturierter Führungsmechanismen

Jörg Müglitz*; Maik Berger**; Carsten Teichgräber**

* ZIS Industrietechnik GmbH, 08393 Meerane
joerg.mueglitz@zis-meerane.de

** TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik
maik.berger@mb.tu-chemnitz.de carsten.teichgraeber@mb.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

Aufbauend auf den allgemein bekannten Vor- und Nachteilen serieller und paralleler Führungsmechanismen beschreibt der Artikel praktische Anwendungen von parallel strukturierten Führungsmechanismen und die bei ihrer Realisierung und Nutzung gewonnenen Erfahrungen. Die Verwendung von Parallelstrukturen ist kein Selbstzweck, sondern geschieht gezielt zur Nutzung derer positiven Eigenschaften. Im Umkehrschluss wurden die wesentlichen Nachteile paralleler Strukturen von vorn herein bedacht. Die kinematischen und konstruktiven Konzepte wurden derart ausgeführt, dass diese Nachteile nicht negativ in Erscheinung treten.

0. Einführung

Um die Jahrhundertwende herum standen parallel aufgebaute Führungsmechanismen hoch im Kurs. Parallel zum akademischen gab es auch im industriellen Umfeld vielfältige Aktivitäten, die von Maschinenkonzepten (siehe die umfangreiche Sammlung von Strukturentwürfen unter [Mer15]) bis zur Entwicklung spezieller Maschinenelemente (Gelenke, Streben, vgl. z.B. mehrere Artikel in [Par98], [Par00]) reichten. Es wurde prophezeit, dass Parallelstrukturen die Bereiche Robotik und Werkzeugmaschinenbau signifikant verändern werden. Nichts davon ist eingetreten, es dominieren wie eh und je seriell aufgebaute Maschinen und Roboter. Merlet [Mer06] führt hierzu den Gedanken ins Feld, dass die Vervollkommnung serieller Maschinen schon mehr als 100 Jahre stattfindet, ein Vielfaches der Zeitspanne, die auf parallele Strukturen bisher verwendet worden ist. Letztendlich haben nur

wenige parallelkinematische Lösungen den Eingang in die industrielle Praxis gefunden und haben noch weniger dort ihren Platz behauptet [Cla88], [TRI15], [Met15].

Die Autoren wagen die Prophezeiung, dass sich daran in absehbarer Zeit nichts ändern wird. Die Gründe sind rationaler Natur:

- Parallel strukturierte Maschinen sind wie Industrieroboter immer "Spezialisten", sind niemals so universell verwend- und in großen Serien herstellbar wie konventionell seriell aufgebaute.
- Parallele Strukturen erfordern ein Umdenken, nicht nur beim Konzipieren, sondern auch beim Konstruieren und Applizieren. Genauigkeit und Präzision ist nicht nur durch die Fertigung, sondern auch durch Software und Steuerung erzielbar.
- Der "Grad der Nichtlinearität" ist wesentlich größer und muss, nicht nur im Entwicklungslabor, sondern besonders im praktischen Betrieb, sicher beherrscht werden.

Auch nichtrationale Aspekte sind von Bedeutung. So erfordert Nutzerakzeptanz immer das Verstehen des Funktionsprinzips – das ist bei Parallelstrukturen erschwert. Letztendlich scheint auch die Natur zur gezielten Verwendung beider Prinzipien zu tendieren. Sind große Kräfte/Momente in Verbindung mit genauen Bewegungen gefragt, z.B. in der menschlichen Schulter, findet sich ein paralleler Aufbau mit eingeschränktem Bewegungsbereich. Gleichzeitig sind die oberen Extremitäten zur Realisierung einer großen Greifweite seriell aufgebaut.

1. Eigenschaften

Betrachtet man die Struktur serieller Maschinen, so besteht nur eine Verbindung zwischen Gestell und Abtriebsglied. Die kinematische Kette ist offen. Diese Eigenschaft zwingt dazu, die Antriebe zwischen den Gliedern anzuordnen. Mit Ausnahme desjenigen zwischen Gestell und gestellnächstem Glied gehören somit alle Antriebe zu den bewegten Massen. Es vergrößert zudem Bau- und Kollisionsraum und es bedarf technischer Lösungen, um die bewegten Antriebe mit Energie und Information zu versorgen. Naturgemäß werden die Glieder einer seriellen Maschinen mit Momenten beaufschlagt und müssen entsprechend dimensioniert werden.

Bei parallelen Strukturen lassen sich zwischen Gestell und Abtriebsglied mehrere Verbindungen aus Gliedern und Gelenken finden – ihre kinematische Kette besteht immer aus Maschen und ist geschlossen. Die Antriebe können oft gestellfest, zumindest jedoch gestellnah angeordnet werden, was die bewegte Masse klein hält, die Energie- und Informationszuführung ist einfach. Je nach Struktur sind die meisten, im Idealfall alle Glieder nur durch Normalkräfte beansprucht – das spart Masse und ermöglicht einen schlanken Aufbau.

All diesen Vorteilen paralleler Strukturen steht als signifikanter Nachteil ihr kleiner Bewegungsbereich entgegen. Umgekehrt zu seriellen Strukturen ist die Rückwärtstransformation explizit, die Vorwärtstransformation oft nur implizit lösbar.

Eine weitere Herausforderung lässt sich anschaulich wie folgt beschreiben. Serielle Roboter müssen den Arbeitsraum lediglich durch ihre Gliedlängen und den Bewegungsbereich ihrer Antriebe erreichen können. Bei parallelkinematischen Maschinen muss zusätzlich das korrekte Funktionieren der mehrschleifigen räumlichen Mechanismen garantiert sein. Bei Vernachlässigung kann der Fall eintreten, dass das Führungsgetriebe in einer Richtung keine Antriebskräfte mehr auf den Endeffektor überträgt und dieser eine Bewegungsfreiheit hinzugewinnt. Die Maschine „kollabiert“ und führt unvorhergesehene Bewegungen aus. Kinematisch gesehen „schnappt“ die Struktur in eine andere Einbaulage über und befindet sich dann in einem benachbarten Unterarbeitsraum.

2. Strukturen und Variationen

Auf den ersten Blick erscheint strukturell eine riesige Vielfalt paralleler Strukturen möglich – letztendlich verbleiben wenige Grundprinzipien, auf denen realisierte oder vorgeschlagene Strukturen basieren oder auf die sich diese zurückführen lassen.

Das Prinzip **Hexapod** (Sechsbeiner) besticht durch Einfachheit und strukturelle Symmetrie. Seine sechs längenveränderlichen Beine zwischen jeweils zwei Kugelgelenken verbinden in identischer Weise das Gestell und das Abtriebsglied (die Plattform) und werden nur normal beansprucht.

Bei der praktischen Nutzung dieses Prinzips werden seine Tücken offenbar. Alle sechs Bewegungsfreiheiten sind zunächst gleichberechtigt vorhanden, jedoch sind die Bewegungsbereiche erschreckend gering und mit Singularitäten angefüllt. Während sich der translatorische Anteil des

Arbeitsraums durch kinematische Optimierung auf eine vertretbare Größe bringen lässt, scheiterten Versuche, signifikante Schwenkwinkel in zumindest zwei Achsen zu erreichen und damit das Prinzip für einen Schwenkkopf bzw. ein Roboterhandgelenk zu qualifizieren.

Bemerkenswert jedoch ist die zu erzielende Steifigkeit auch bei schlankem, grazilem Aufbau. Dies würde eine Plattform für Positionieranwendungen, z.B. zum Schweißen, sehr geeignet machen, stünden dem nicht die geringen erzielbaren Schwenkwinkel entgegen. Für Aufgaben der Feinstpositionierung findet sich entsprechende Lösungen für extreme Traglasten siehe [Glö98] sowie [Ph15].

Das Ausweichen auf **Pentapoden** (Fünfbeiner) vereinfacht die konstruktive und kinematische Behandlung. Jetzt aber ist ein Bein privilegiert und momentenbelastet. Aus der kugelgelenkigen Verbindung zu Gestell und Abtriebsglied wird eine kreuzgelenkige. Mehr oder weniger gut kann man diejenigen Stäbe identifizieren, die eher für die Position und jene, die eher für die Orientierung des Abtriebsgliedes zuständig sind. Durch geschickte Dimensionierung kann zumindest in einer Richtung ein Schwenkbereich von über 90 Grad erreicht werden [Sch02].

Eine häufig genutzte konstruktiv-strukturelle Variante ist der Ersatz eines längenveränderlichen Stabes, also eines Schubzylinders, durch eine Koppel mit zwei Kugelgelenken und die Bewegung eines Koppelpunktes über einen Schieber. An der Koppel entsteht eine isolierter Freiheitsgrad, die Drehung der Koppel um ihre Längsachse, der die Lage des Abtriebsgliedes aber nicht beeinflusst. Mit einer solchen Gestaltung konnte an einem Pentapoden einachsiger Schwenkwinkel von 120° realisiert werden [Gio04].

Bei genauerer Betrachtung bestehen vielen Pentapoden aus einem Tripod, einer dreidimensionalen Punktführung und zwei angesetzten Maschen zur Orientierung – Beispiele hierfür sind etwa [Tei12], [PEN06].

Der **Bipod** ist strukturell dem ebenen, fünfgliedrigen Koppelgetriebe mit $F=2$ identisch. Seine Verwendung als Orientierungseinheit, sprich als Handgelenk, bewährt sich, wenn er als sphärisches Getriebe gestaltet wird.

In der technischen Literatur, insbesondere der Patentliteratur, wird eine kaum überschaubare Fülle von Parallelstrukturen beschrieben. Bei genauerer Betrachtung und Analyse werden Variationen, Kombinationen und Erweiterungen der oben genannten Grundstrukturen sichtbar. Häufig werden

weitere Glieder adaptiert, wird aus einem rein parallelen ein hybrid strukturierter Mechanismus – was in der Regel mit stark erhöhter Komplexität einhergeht. Hybrid meint in diesem Zusammenhang Mechanismen, die Merkmale sowohl paralleler als auch serieller Strukturen in sich vereinen.

3. Praxis

Die Überführung einer fertig dimensionierten, kinematisch optimierten Parallelstruktur in eine werkstatthaftige Konstruktion, deren Fertigung, Montage und Inbetriebnahme erscheint als einfache Aufgabe. Die Anforderungen an den Konstrukteur jedoch sind hoch. Er muss die seiner Arbeit vor- und nachgelagerten Prozesse verstehen, müsste sich in kinematische, antriebs-, steuerungs- und fertigungstechnische Belange hineindenken können.

3.1 Konstruktion und Gestaltung

Im Gegensatz zu seriellen Strukturen sind bei parallelen Strukturen vom Konstrukteur zusätzlich spezielle Aufgaben zu lösen:

- Erstens ist die Kollisionsfreiheit aller Glieder zueinander im gesamten Arbeitsraum zu gewährleisten. Das Bewegungsverhalten jedes Gliedes hängt von dem aller anderen ab, das macht diese Aufgabe schwierig und zu einem mühsamen, iterativen Prozess.
- Zweitens ist die Gelenkgestaltung an Parallelstrukturen ein grundlegendes, möglicherweise das essentielle Problem. Alle Gelenke müssen so gestaltet und in die Gesamtkonstruktion eingefügt werden, dass der geforderte Bewegungsbereich gewährt wird. Käufliche Gelenke (Kugelgelenke, Kreuzgelenke) müssen nach wichtigen Eigenschaften, wie Spiel- und Verschleißarmut und Fertigungsgenauigkeit (z.B. exakt schneidende Kreuzgelenkachsen) ausgewählt werden. Trotzdem führt häufig kein Weg am Eigenbau von Gelenken vorbei, z.B. durch Dekomposition eines Kugelgelenkes in drei Drehgelenke mit einander schneidenden Achsen. Gegebenenfalls kann Gelenkredundanz hilfreich sein, z.B. durch Ergänzung eines Kugelgelenkes mit einem zusätzlichen Drehgelenk zur Erhöhung des Bewegungsbereiches. Die statische Gelenksteifigkeit muss für den gesamten Bewegungsbereich so hoch sein, dass sich gegenüber dem Führungsgetriebe keine lokal erhöhte Nachgiebigkeit einstellt.

- Drittens ist besonders der Gestaltung der Endlagenbegrenzungen aller Antriebe hohe Priorität einzuräumen. Meistens darf eine Antriebsachse ihren gesamten Bewegungsbereich nicht uneingeschränkt nutzen, ist ein Teil desselben in Abhängigkeit der Stellung der anderen Antriebe verboten. Das muss steuerungstechnisch begrenzt, sicher überwacht und vorteilhaft durch Kollisionsschutzeinrichtungen abgefangen werden.
- Viertens ist die Art des an den Antrieben genutzten Messsystems bedeutsam. Konventionell inkrementell messende Systeme benötigen einen Referenzbezug durch einen Schalter, einen Nocken oder dergleichen. Diese sind wegen der geometrischen Nichtlinearität der Strukturen u.U. zu ungenau, benötigen (meist nicht vorhandenen) Bauraum und zusätzliche Verkabelung. Im Moment des Einschaltens der Maschine kennt die Steuerung die Stellung des einzelnen Antriebes nicht. Eine übliche Strategie ist dann das Anfahren eines Endschalters, der aber (siehe Punkt 3) im aktuell verbotenen Bewegungsbereich liegen kann. Es wird deshalb die Verwendung absolut messender Antriebe angeraten, bei denen der Referenzierungszyklus entfällt.

3D-CAD-Systeme sind hervorragende Werkzeuge zur Lösung aller beschriebenen Teilaufgaben. Jedoch ist dazu ein tiefes Verständnis von Dreidimensionalität und räumlicher Geometrie erforderlich, das nur bei wenigen Konstrukteuren vorhanden ist.

Folgende Vorgehensweise, hier exemplarisch unter Verwendung von MathCAD und dem CAD-System Creo demonstriert, hat sich nach Erfahrung der Autoren bewährt [Tei12]:

- Auswahl der Antriebe und ihres Wirkprinzips,
- Ermittlung des statischen und kinetostatischen Kraftfeldes,
- Gelenkanordnung und Nachweis der Einhaltung des Bewegungsbereiches,
- gegebenenfalls konstruktive Veränderungen am Gelenk,
- Grobmodellierung der Glieder,
- Abschätzung der Antriebsleistung,
- qualitative Untersuchung der Gliedverformung,
- Suche nach einfachen und kostengünstigen Fertigungsmöglichkeiten,
- Test auf Kollisionsfreiheit,

- Schaffung von Messkanten und Messflächen zur Kontrolle und Analyse der Maschine im zusammengebauten Zustand,
- Detailkonstruktion.

3.2 Steuerung

Die kinematischen Zusammenhänge an Parallelstrukturen sind i.A. nichtlinear, die inverse kinematische Transformation von Objekt- in Achskoordinaten ist immer erforderlich. Die kinematische Struktur überführt einen Antriebs- oder Achskoordinatenvektor \underline{a} in Abtriebs-, Werkstück- oder Objektkoordinaten \underline{o} , in der Regel in kartesischen Koordinaten, bezogen auf den TCP des zum Einsatz kommenden Werkzeugs oder Arbeitsorgans.

Für serielle Strukturen gibt es allgemein gültige Ansätze, in der Regel nach Hartenberg-Denavit aufgebaut. Die Transformation ist mit dem Parametrisieren von Transformationsmatrizen getan.

Für parallele Strukturen hingegen ist ein allgemeingültiger Ansatz zu komplex, es braucht spezielle, zugeschnittene Algorithmen. Zunehmend steht seitens des NC-Kernes der verwendeten Steuerung mit dokumentierten Schnittstellen die Möglichkeit zur Programmierung durch den Anwender zur Verfügung. Es braucht, in der Regel in einer Hochsprache wie C geschrieben, eine Transformation T von Achs- in Objektkoordinaten (Direkte Kinematik) und deren Umkehrung T^{-1} als Transformation von Objekt- in Achskoordinaten (Inverse Kinematik). Die kinematischen Abmessungen l (Abstände, Winkel, Vektoren) der Struktur sind die Parameter der Transformation. Damit gilt:

$$\underline{o} = T(l) * \underline{a}$$

und in der Umkehrung

$$\underline{a} = T^{-1}(l) * \underline{o} \quad .$$

Zur Bereinigung der vielfältig auftretenden Mehrdeutigkeiten der Lösungen – so existieren zum Beispiel beim Hexapod dutzende Lösungen des direkten kinematischen Problems – muss sich der Entwickler seine eigenen Gedanken machen. Gefordert ist z.B. die Identität

$$\underline{o} = T(l) T^{-1}(l) * \underline{o}$$

im gesamten Arbeitsbereich. Um die Algorithmen im Interpolationstakt der Steuerung ausführen zu können sind Rekursionen verboten und müssen Iterationen so weit als möglich vermieden bzw. derart gestaltet werden, dass in limitierter Rechenzeit eine Konvergenz garantiert ist.

Moderne Implementierungen des Standard- NC- Codes gehen weit über das hinaus, was in der Norm DIN ISO 66025 definiert ist. Der NC-Code hat sich dabei fast zu einer eigenen Programmiersprache entwickelt, mit Winkelfunktionen, Kontrollstrukturen, Variablen. Auch in diesem Code kann eine Transformation geschrieben sein. Das wird immer ein eher provisorischer Ansatz bleiben, der weder den Zugriff auf die Bahnplanung noch das Verhalten der einzelnen Antriebe ermöglicht. Für prototypische Anwendungen ist man jedoch in kürzester Zeit arbeitsfähig. Dazu kommt, dass nach unseren Erfahrungen die dazu in der Steuerung zusätzlich benötigte Rechenleistung überraschend gering ist.

3.3 Theoretisches Modell und reale Maschine

In der Phase der Konstruktion ist Vorsorge zu treffen, dass sich die reale Maschine toleranzarm montieren und möglichst einfach vermessen lässt. Das schließt ein:

- Messflächen und Messkanten, mit Messwerkzeugen oder Lehren gut zugänglich,
- Einstelllehren für Einzelbaugruppen, z.B. für Koppeln,
- Schaffung von Möglichkeiten, um Baugruppen oder im Idealfall die Gesamtmaschine auf einer 3D-Messmaschine vermessen zu können. Hierzu müssen relevante Flächen (Zylinder, ebene Flächen) schon von vornherein als Messflächen vorgesehen, gut zugänglich und so toleriert sein, dass verwertbare Messergebnisse entstehen.

Das Vermessen auf einer Messmaschine ist der schnellste und einfachste Weg, um die Parameter einer realen, fertig montierten Maschinenstruktur zu ermitteln. Ist die Vermessung der Maschinenstruktur nicht ausreichend oder überhaupt nicht möglich, dann muss eine Parameteridentifikation stattfinden. Dabei wird das Übertragungsverhalten des Mechanismus vermessen, um auf Basis der Modellparameter I mit numerischen Methoden das theoretische Modell an die reale Maschine anzupassen.

Aus dem geometrischen Modell wird dazu eine diskrete Anzahl gegebener Achs- oder Objektkoordinaten mit idealen kinematischen Parametern transformiert. Die Maschine wird in die entsprechende Pose verfahren und es werden die Transformationsergebnisse mit den an der realen Maschine gemessenen verglichen. Algorithmisch muss man der Gefahr begegnen, mit der Optimierung nur ein lokales Optimum zu finden. Monte-Carlo- Verfahren mit Schrittweitensteuerung und/oder kombiniert mit Gradientenverfahren sind nach unseren Erfahrungen besonders geeignet.

Diese Vorgehensweise ist in der Literatur vielfach beschrieben, aber erst bei praktischer Anwendung zeigen sich deren Limitierungen. Zunächst basiert das gesamte Modell auf der Annahme der "starrten Maschine". Verformungen, Gelenkspiel oder Anlagewechsel sind nicht inkludiert, beides jedoch ist in den Messdaten enthalten.

Das Berechnungsmodell sollte einerseits so wenig als möglich Parameter enthalten, das verbessert das Konvergenzverhalten und reduziert Rechenzeit. Letzteres erscheint zunächst bedeutungslos. Das wird aber dann sehr relevant, wenn die Parameteridentifikation direkt in der Steuerung vorgenommen wird, indem sich die Maschine nach dem Wechsel eines Werkzeugs oder nach einer Kollision selbst neu vermessen und kalibrieren kann.

Das Berechnungsmodell muss andererseits so viele Parameter enthalten, dass alle relevanten Fehlereinflüsse abgedeckt sind. Das erfordert praktisches Wissen, z.B. über die verwendeten Gelenke und deren Toleranzen, Intuition und Erfahrung, Tests und Experimente an und mit der Maschine. Der Arbeitsaufwand zur Adaption an die reale Maschine wird in der Regel unterschätzt, wie immer „steckt der Teufel im Detail“.

4. Zwei Beispiele

4.1 Der "Krabbler"

Zum MSG- Schweißen übergroßer Konstruktionen, bevorzugt aus der Windenergie-Branche, und zum Ersatz des dort noch immer praktizierten manuellen Schweißens wurden Anstrengungen zur Roboterisierung dieser Arbeit unternommen. Der erforderliche Arbeitsraum ist schlauchförmig entlang der Schweißnaht, mit einem Querschnitt, dessen Diagonale kleiner als 100mm ist.

Eine zweidimensional gekrümmte Schiene wird entlang der Schweißnaht installiert, auf ihr fährt entlang eines Zahnstangenantriebes eine

roboterähnliche Maschine, bestehend aus einer "Lokomotive" und mindestens einem "Waggon", miteinander durch eine Deichsel verbunden. Die erforderlichen Funktionalitäten (Vorschub-, Ausgleichsbewegung, Steuerung, Drahtvorschub...) sind auf jeweils einen Wagen aufgeteilt, der aus einem Baukasten ausgewählt und nach Bedarf mit anderen kombiniert werden kann. Die Schweißposition kann beliebig sein, von Wannelage bis Überkopfposition, einzige Limitierung ist ein minimaler Krümmungsradius von etwa 250mm. Deshalb ist eine flach über der Bauteiloberfläche liegende Schiene, genauso wie eine käferähnliche Form, erforderlich, um den Schwerpunkt der Maschine nahe an die Bauteiloberfläche zu bringen und Lastmomente, die Schiene und Schienenbefestigung aufnehmen müssen, klein zu halten. Eine gedrungene, kompakte Bauweise mindert darüber hinaus das Risiko der Kollision mit anderen Bauteilen und berücksichtigt die in der Schweißtechnik herrschenden rauen Umweltbedingungen.

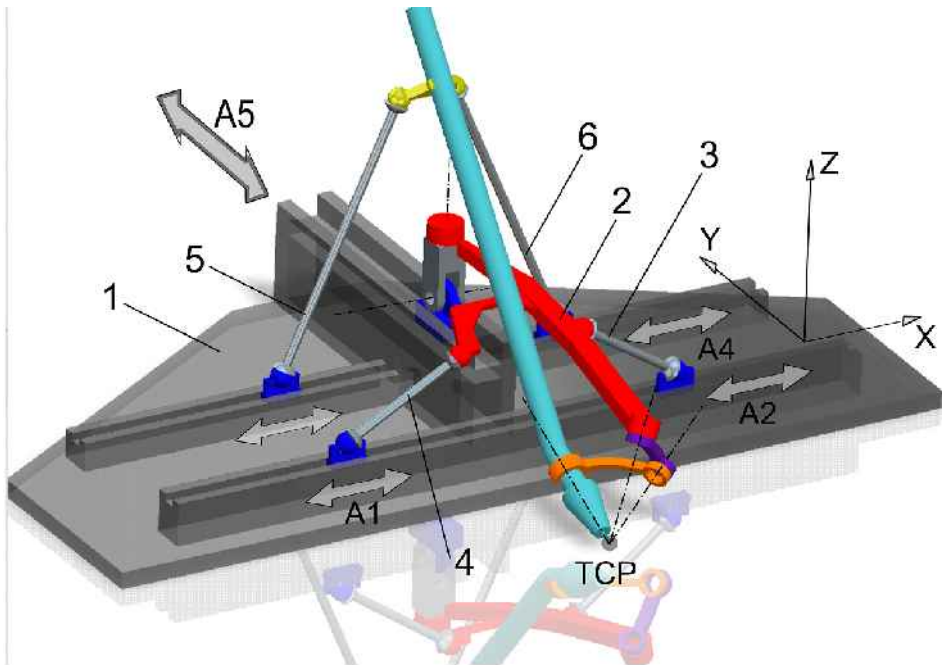


Bild 1 – Struktur „Krabbler“

Eine flache, käferähnliche Form schließt aus, sich hinsichtlich der kinematischen Struktur an konventionellen, seriell aufgebauten Robotern zu

orientieren. Parallele Strukturen erscheinen hinsichtlich Steifigkeit, Baumasse und Robustheit deutlich besser für die Aufgabe geeignet. Für den Einsatz von Parallelstrukturen spricht, dass die von der Maschine zu leistenden Nebenbewegungen nur geringe Beträge haben müssen. Sie belaufen sich auf etwa $\pm 50\text{mm}$ in den Positionachsen X, Y und Z und etwa ± 15 Grad in den Orientierungsachsen A und C. Nicht immer werden alle fünf kinematisch erforderlichen Bewegungsfreiheiten benötigt, häufig sind weniger (2...4) ausreichend.

Entsprechend Bild 1 wurde der Maschine ein Pentapod zu Grunde gelegt. Strukturell gesehen ist dies ein Tripod aus den Gliedern 2, 3 und 4. Glied 2 ist momentenbelastet, mit dem Gestell kreuzgelenkig verbunden und trägt an seinem distalen Ende, wieder kreuzgelenkig verbunden, das Werkzeug. Das Kreuzgelenk ist aufgelöst in einen sphärischen Zweischlag mit jeweils etwa $30\text{...}40$ Grad Öffnungswinkel, in dessen Achsschnittpunkt der TCP angeordnet ist. Orientierung und Position sind „halb entkoppelt“. Das heißt, die Orientierung des Werkzeugs wird von der Position entkoppelt und mit den Antrieben A3 und A4 festgelegt. Umgekehrt ist dies nicht gegeben.



Bild 2 – Krabber- Bauformen

Das Bild 2 zeigt zwei Prototypen, jeweils nur als Tripoden, ohne sphärisches Handgelenk, ausgebildet. Der in Bild 2 rechts gezeigte Prototyp hat

längenveränderliche Beine anstatt der Schieber A1, A2, A5 links, was den erzielbaren Arbeitsraum vergrößert.

4.2 Rohrfräsmaschine

Rohre werden in der Regel mit thermischen Verfahren (Plasma-, Autogen-, Laserschneiden) zugeschnitten.

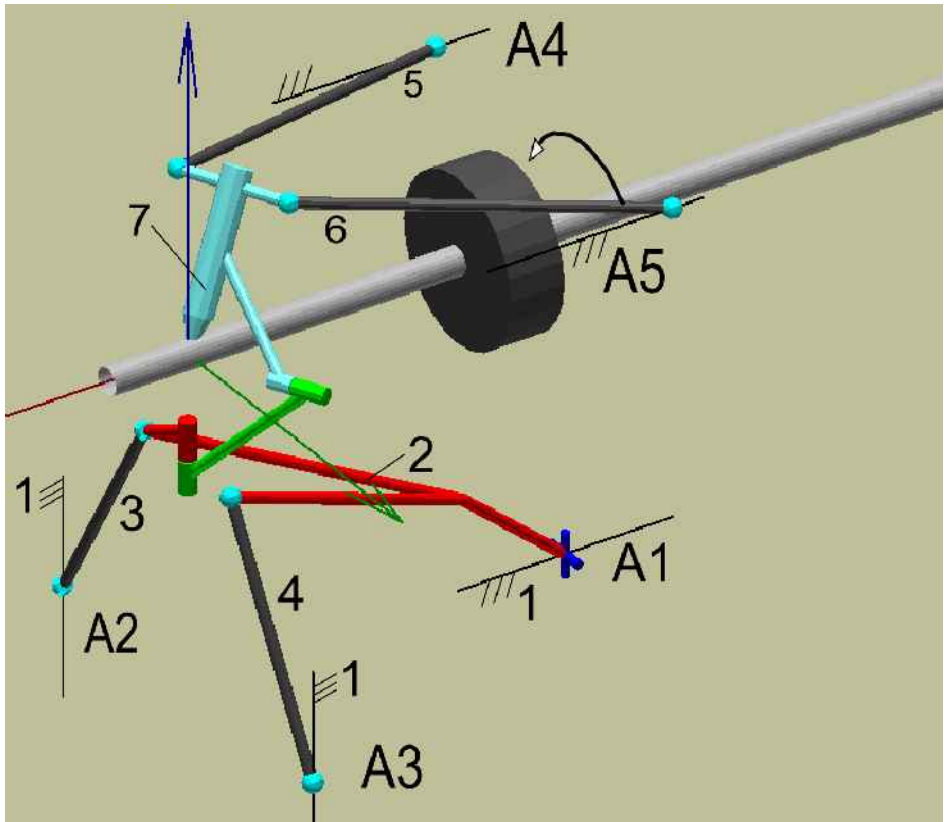


Bild 3 – Strukturschema der Rohrfräsmaschine

Bei sehr kleinen Rohrdurchmessern (ca.30...60mm), Werkstoffen hoher Güte (Feinkorn- Baustahl) und den hohen Qualitätsanforderungen im Kranbau ist das Bearbeitungsresultat nicht optimal. Gefräste Schnittkonturen erfüllen alle

Qualitätsanforderungen, deren Herstellung auf handelsüblichen fünfachsigem Maschinen ist aber wirtschaftlich nicht vertretbar. Folglich wurde der Versuch unternommen, eine kleine, kostengünstige, mit einem Stangenvorschub versehene Maschine zum HSC-Fräsen zu bauen. Die notwendigen Randbedingungen hinsichtlich Arbeitsraum, erforderliche Schwenkwinkel und Bearbeitungsgeschwindigkeit sprachen für eine Parallelstruktur. Strukturell ist die Fräsmaschine dem „Krabbler“ in Bild 1 identisch – vgl. Bild 3. Wieder liegt der TCP im Schnittpunkt der Kreuzgelenkachsen, ist die Position des TCP von der Stellung der „Orientierungsachsen“ A4 und A5 entkoppelt, wird also nur von den Achsen A1, A2 und A3 festgelegt.

Die Achse A1 ist parallel zur Rohrachse, die Achsen A2 und A3 lotrecht zu dieser angeordnet. Damit ist im zulässigen Bewegungsbereich eine günstige Übersetzung und eine weitgehende Entkopplung der Achsen vorhanden, die Nichtlinearität ist sehr gering. Auf Antrieb und ohne Parameteridentifikation ist im Arbeitsraum eine Positioniergenauigkeit von etwa $\pm 0.15\text{mm}$ erreicht worden, die für die Applikation völlig ausreichend ist.

An der seit 2014 zweischichtig produzierenden Maschine in Bild 4 konnten durch Nutzung einer Parallelstruktur folgende Eigenschaften erreicht werden:

- unerwartet geringe Gestehungskosten,
- einfache Stahlbau-Schweißkonstruktion ohne Präzisionsbearbeitung,
- Maschinenmasse ca. 600kg, keine Fundamentierung notwendig, Grundfläche nur 1800x900mm,
- geringe bewegte Masse von weniger als 100kg, Antriebsleistung pro Achse nur 200W, Frässpindel $P=3\text{kW}$.

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist zu der der thermischen Verfahren vergleichbar.



Bild 4 – Rohrfräsmaschine

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass parallele Führungsgetriebe, geschickt appliziert, einen erheblichen praktischen Nutzen entfalten und Eigenschaften ermöglichen können, die sich mit seriellen Strukturen nicht realisieren lassen. Das werden immer „Nischenanwendungen“ bleiben. Trotzdem findet sich gerade im Sondermaschinenbau eine nicht geringe Anzahl von technisch und wirtschaftlich plausiblen Einsatzfällen.

Literaturverzeichnis

- [Cla88] Clavel, R.: DELTA, a fast robot with parallel geometry. 18th Symposium on Intelligent Robots, Lausanne, 1988
- [Gio04] Giovanola, J. u.a.: Spherical Joints with 3 and 4 Degrees of Freedom for 5-Axis Parallel Kinematics Machine Tool. In: 4. Chemnitzer Parallelstruktur Seminar. Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2004.
- [Glö98] Glöß, R: Hexapod-Strukturen mit Mikrometer Genauigkeit. In: [Par98].
- [Mer15] Merlet, J.-P.: 178 drawings of parallel robots, 04.08.2015. www-sop.inria.fr/members/Jean-Pierre.Merlet/Archi/archi_robot.html
- [Mer06] Merlet, J.-P.: Parallel Robots. Second Edition. Dordrecht: Springer Verlag, 2006.
- [MET15] Schwaar, M.: METROM Mechatronische Maschinen, 04.08.2015. www.metrom-mobil.com
- [Par98] Neugebauer, R., Hrsg. Chemnitzer Parallelstruktur Seminar. Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 1998.
- [Par00] Neugebauer, R., Hrsg. 2. Chemnitzer Parallelstruktur Seminar. Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 2000.
- [PEN06] Merz, M.: "PenTec" - ein neues Parallelstruktur-Konzept. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Essen: Vulkan Verlag, 2006
- [Ph15] Hexapoden und SpaceFAB. Physik Instrumente (PI), www.physikinstrumente.de/produkte/...parallelkinematische-hexapoden.html 04.08.2015
- [Sch02] Schwaar, M. u.a.: New approaches to machine structures to overcome the limits of classical parallel structures. In: CIRP Annals Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 1, 2002, S. 293-296.
- [Tei12] Teichgräber, C.; Müglitz, J.; Berger, M.: Antriebsauslegung parallelkinematischer Maschinen. VDI Bewegungstechnik, 2012.
- [TRI15] PKM TRICEPT S.L, 04.08.2015. <http://www.pkmtricept.com>