Modernes Konstruieren am Beispiel parallel strukturierter Führungsmechanismen

Jörg Müglitz, ZIS Industrietechnik GmbH, 08393 Meerane,
joerg.mueglitz@zis-meerane.de
Maik Berger, TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik,
maik.berger@mb.tu-chemnitz.de
Carsten Teichgräber, TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik,
carsten.teichgraeber@mb.tu-chemnitz.de

Mit dem Vortrag soll gezeigt werden, dass die moderne Industrie immer wieder Aufgaben hervorbringt, die mit Ausdauer, Kreativität und unkonventioneller Herangehensweise zu neuen technischen Lösungen entwickelt werden können. Mitnichten „...ist schon alles erfunden“. Entstehende Lösungen sind häufig schutzfähig und besonders für kleine Unternehmen eine der wenigen Möglichkeiten, sich im globalen Wettbewerb zu behaupten.

0. Einleitung

Mechanismen, d.h. ungleichmäßig übersetzende Getriebe, waren schon im Altertum bekannt, sind von Leonardo da Vinci überliefert und waren in der Zeit der Industrialisierung Bestandteil fast aller Maschinen. Sie dienten der Energie- und Kraftübertragung – das Gestänge einer Dampflokomotive ist hierfür ein typisches Beispiel – einerseits, der Informationsverarbeitung andererseits. Selbst die ersten Computer, z.B. der Z1 von Konrad Zuse, waren nichts Anderes als komplexe Mechanismen.

Durch Elektrifizierung, Elektronisierung und Digitalisierung der Industrie sind Mechanismen fast komplett durch Motoren, Leistungselektronik und Algorithmen verdrängt. Das Fachgebiet wird kaum mehr gelehrt, das spezifische Wissen geht verloren. Trotzdem, und das will der folgende Beitrag zeigen, kann die geschickte Kombination von althergebrachter mit moderner Technik, das Verlassen ausgetretener Pfade zu Lösungen mit verblüffenden Eigenschaften führen. Solche Lösungen sind gefragt zur Erlangung eines Wettbewerbsvorteils, zur Differenzierung, im günstigsten Fall für eine Alleinstellung. Der Konstrukteur ist derjenige, der mit solidem, möglichst breitem Fachwissen, mit Kommunikation, Beharrlichkeit und mit Kreativität dies zu leisten vermag. Er befindet sich auch heutzutage an einer Schlüsselposition im Maschinenbauunternehmen und bestimmt in großem Maße Gebrauchswert und Gestehungskosten des Produktes.

1. Prinzipien und Eigenschaften von Mechanismen

Man unterscheidet zwischen Übertragungs- und Führungsgetrieben. Übertragungsgetriebe wandeln Bewegungen um und leiten diese an einen anderen Wirkungsort. Führungsgetriebe bewegen Punkte, Ebenen oder Körper auf Bahnen. Beide Typen können sowohl in der Ebene als auch im Raum wirken. Mechanismen bestehen aus Gliedern, untereinander verbunden durch Dreh- und Schubgelenke mit einem Freiheitsgrad zwischen 1 und 5.

Ein typisches Führungsgetriebe ist der Industrieroboter, in seiner Standardform bestehend aus drei Positions- und drei Orientierungsachsen zur Bewegung eines Abtriebsgliedes relativ zu einem Bezugssystem, dem Gestell. Gelenkarm- und Portalroboter sind **seriell** aufgebaut, d.h. alle Achsen sind einzeln nacheinander angeordnet und es 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. Das vergrößert den Bau- und Kollisionsraum des Roboters und erfordert Aufwand, um die bewegten Antriebe mit Energie und Information zu versorgen. Naturgemäß werden die Glieder einer seriellen Maschine mit Momenten beaufschlagt und müssen entsprechend dimensioniert werden. Ein großer Arbeitsraum entsteht und umschließt den im Vergleich zu diesem kleinen Führungsmechanismus. Das Übersetzungsverhältnis ist hoch, alle Glieder sind momentenbelastet. Die Steifigkeit des Führungsmechanismus ist gering.

Bei **parallelen** Strukturen existieren zwischen Gestell und Abtriebsglied mehrere Verbindungen aus Gliedern und Gelenken. 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 und die Energie- und Informationszuführung einfach macht. Je nach Struktur sind die meisten, im Idealfall alle Glieder nur durch Normalkräfte beansprucht – das spart Masse und ermöglicht einen schlanken Aufbau. Hier nun umschließt der Mechanismus den im Vergleich zu ihm kleinen Arbeitsraum.

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“ , die Struktur „schnappt“ in eine andere Einbaulage über und befindet sich dann in einem benachbarten Unterarbeitsraum.

Auch die Natur verwendet gezielt sowohl serielle als auch parallel Prinzipien. Sind große Kräfte/Momente in Verbindung mit genauen Bewegungen gefragt, z.B. in der menschlichen Schulter, findet sich ein paralleler Aufbau für betragsmäßig kleine Bewegungen. Hingegen sind unsere Extremitäten zur Realisierung eines großen Bewegungsbereiches seriell aufgebaut.

Vor etwa 20 Jahren wurde parallel aufgebaute Führungsmechanismen ein breiter Einsatz in Robotern und Werkzeugmaschinen prophezeit. 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. Die Prophezeiungen sind nicht eingetreten, es dominieren wie eh und je seriell aufgebaute Maschinen und Roboter. Die Autoren wagen die Prophezeiung, dass sich daran in absehbarer Zeit nichts ändern wird. Die Gründe sind rationaler Natur:

- Parallel strukturierte Maschinen sind immer "Spezialisten", sind niemals so universell verwend- und in großen Serien herstellbar wie konventionell seriell aufgebaute Industrieroboter.
- Parallele Strukturen erfordern ein Umdenken, nicht nur beim Konzipieren, sondern auch beim Konstruieren und Applizieren. Genauigkeit und Präzision ist weniger durch die Fertigung, mehr 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.

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.

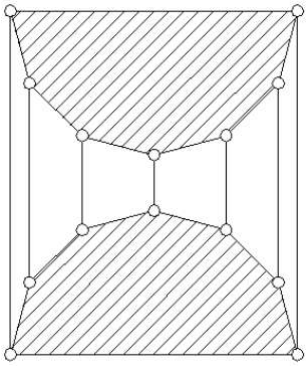

Bild 1- Kinematische Kette Hexapod

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 finden sich entsprechende Lösungen für extreme Traglasten siehe [Glö98] sowie [PhI15].

Bild 2- „Belastungstest“

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].

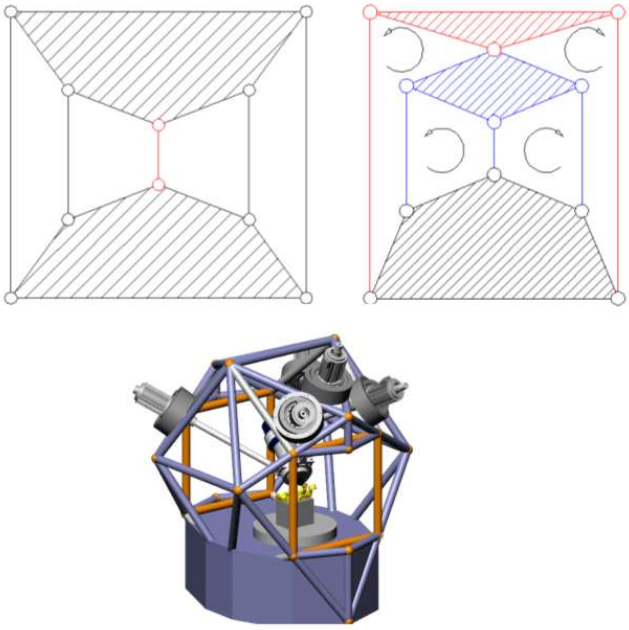

Bild 3- Pentapod

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 ein 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 einachsig der Schwenkwinkel von 120° realisiert werden [Gio04].

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

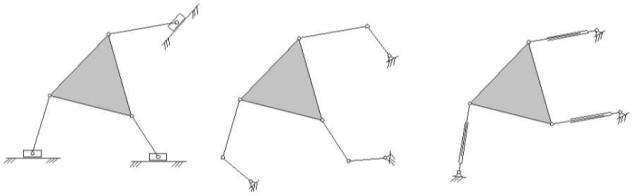

Bild 4- Tripod- Bauformen

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.

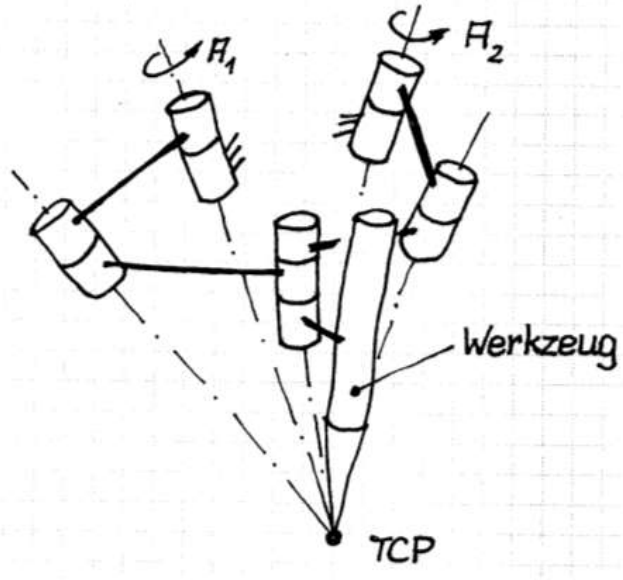

Bild 5- Bipod

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 werkstatttaugliche 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, muss 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

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

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 l 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 "starren 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. Drei Beispiele

4.1 Ein Pentapod zur Herstellung figuraler Konturen an Rohren

Rohre werden in der Regel mit thermischen Verfahren (Plasma-, Autogen-, Laserschneiden) zugeschnitten. 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 fünfachsigen Maschinen ist aber wirtschaftlich nicht vertretbar. Folglich wurde begonnen, eine kleine, kostengünstige Maschine zum HSC-Fräsen zu konzipieren. Die notwendigen Randbedingungen hinsichtlich Arbeitsraum, erforderliche Schwenkwinkel und Bearbeitungsgeschwindigkeit sprachen für eine Parallelstruktur. Der TCP liegt im Schnittpunkt der Kreuzgelenkachsen, damit ist die Position des TCP von der Stellung der „Orientierungsachsen“ A4 und

A5 entkoppelt und wird nur von den Achsen A1, A2 und A3 festgelegt.

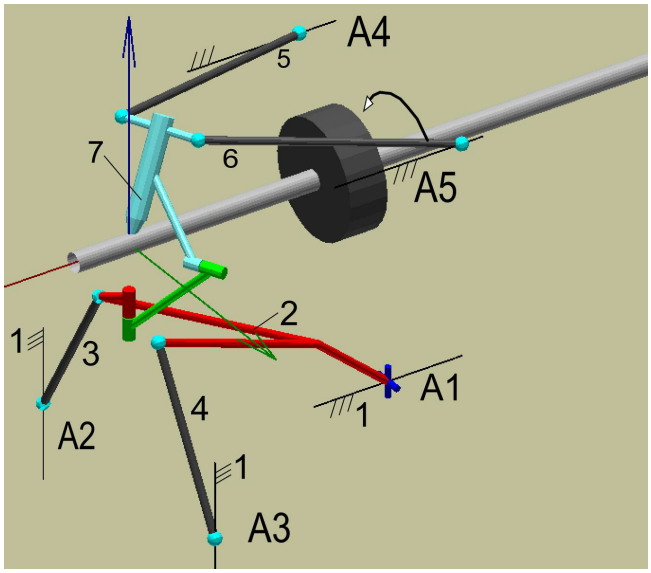

Bild 6- Kinematische Struktur der Rohrfräsmaschine

Die Achse A1 ist parallel zur Rohrachse, die Achsen A2 und A3 lotrecht zu dieser angeordnet. Damit ist im geforderten Arbeitsraum eine günstige Übersetzung und eine weitgehende Entkopplung der Achsen vorhanden, die Nichtlinearität ist sehr gering. Auf Anhieb und ohne Parameteridentifikation ist im Arbeitsraum eine Positioniergenauigkeit von etwa +/- 0.15mm erreicht worden, die für die Applikation völlig ausreichend ist.

An der seit 2014 zweischichtig produzierenden Maschine 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=3kW.

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist zu der der thermischen Verfahren vergleichbar.

4.2 Ein Bipod als doppelt sphärisches Handgelenk

Zur Herstellung von Fasen für die Nahtvorbereitung zum Schweißen werden Fasenaggregate verwendet. Um zwei orthogonal aufeinander stehende, sich schneidende Drehachsen wird das Werkzeug, ein Autogen-, Plasma- oder Laserschneidkopf, verschwenkt. Mit Hilfe von Mechanismen gelingt es, den TCP im Schnittpunkt der Drehachsen zu platzieren (vgl. Bild 5). Geringe bewegte Massen und ergo hohe Dynamik, hohe Genauigkeit und einfache Steuerung sind zu nennende Vorteile. Zur Kollisionsfreiheit erforderlich sind virtuelle Drehachsen, um die der Mechanismus „herum gebaut“ werden muss. Aufwendige und vor allem wenig steife konstruktive Lösungen entstehen [Mue11].

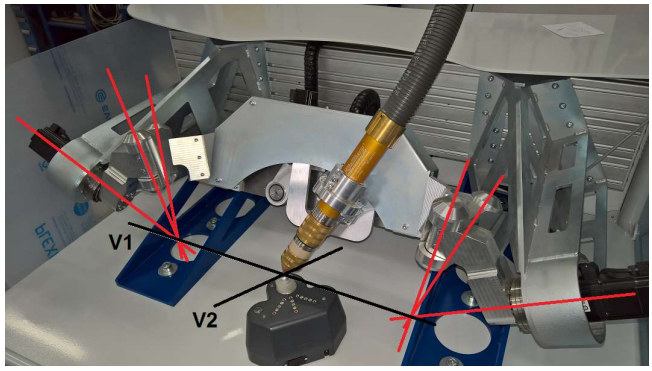

Bild 7

Mit einer Parallelstruktur, aufgebaut aus zwei sphärischen Teilgetrieben, entsteht eine unerwartet steife, allerdings überbestimmte Struktur, die das Werkzeug um die virtuelle Drehachse V1 schwenkt.

4.3 Ein miniaturisierter Tripod

Die Übertragung der Bewegungsaufgabe auf kleinere Dimensionen, initiiert durch Anwendungsfelder in der Medizintechnik, erforderte zunächst eine angepaßte Gestaltung der Gelenke und zwang darüber hinaus zum Nachdenken über grundsätzlich andere Wirkprinzipien.

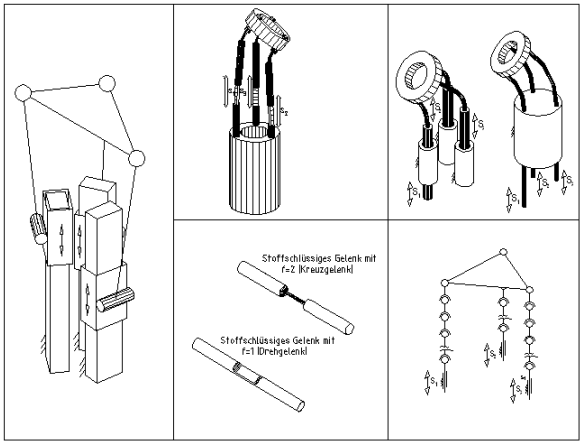

Bild 8

Bild 8 zeigt Denk- und Entwurfsschritte bei der Entwicklung einer miniaturisierten Plattform.

Ausgehend von einem Tripod wurde zunächst in Erwägung gezogen, die Dreh- und Kugelgelenke durch stoffschlüssige Gelenke zu ersetzen und den Antriebsschieber, die Koppel und die beiden Gelenke in einem monolithischen Bauteil zu vereinigen. Die Gelenke werden gebildet durch lokale Steifigkeitsunterschiede und verkörpern, je nach ihrer Gestaltung, ein Dreh- bzw. ein Kreuzgelenk. Um die Gelenke für

einen nennenswerten Gelenkdrehwinkel tauglich zu machen sind Werkstoffe mit hoher elastischer Dehnung, hoher Festigkeit und nicht zu geringer Steifigkeit erforderlich. Vorteilhaft verwendbar sind superelastische Legierungen aus Nickel-Titan (NiTi). Deren elastisches Dehnvermögen reicht bis zu 8% [Due90].

Der nächste Schritt beinhaltete die Abkehr von der für die traditionelle Mechanismentechnik typischen Trennung zwischen Glied und Gelenk zugunsten von komplett elastischen Gliedern. Jedes Bein ist eine Biegefeder und wird als eine hochgradig statisch unbestimmte Gelenkkette betrachtet. Durch die Rückstellkräfte der drei Biegefedern stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein und erhält die Plattform eine definierte Lage. Da die inneren im Vergleich zu den äußeren Kräften sehr hoch sind wird eine erstaunliche Steifigkeit und Tragfähigkeit bei einem sehr einfachen Aufbau möglich [Mue00].

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

[Due90] Duerig,T.W.; Melton,K.N.; Stöckel,D.; Wayman,C.M.: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butter worth-Heinemann, 1990, S.400-413

[Gio04] Giovanola, J. u.a.: Spherical Joints with 3 and 4 Degrees of Freedom for 5-Axis Parallel Kinematics Machine Tool. In: 4. Chemnitzer Parallelstruk tur 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

[Mue00] Müglitz,J.; Schönherr,J.: Mechanismen und Manipulatoren mit stoffpaarigen Gelenken- Bauformen, Auslegung, Beispiele. VDI- Getriebetagung 2000, Veitshöchheim, 26./27.9.2000, VDI- Berichte Nr.1567, S.299-318, VDI - Verlag Düsseldorf, 2000

[Mue11] Müglitz, J., Berger, M., Wegert, E.: Roboterhandgelenke zum thermischen Schneiden. Tagungsband 9. Kolloquium Getriebetechnik, Chemnitz 2011

[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

[PhI15] Hexapoden und SpaceFAB. Physik Instrumente (PI), www.physik-instrumente.de/produkte/... parallelkinematischehexapoden.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 Tech nology, Volume 51, Issue 1, 2002, S. 293-296.

[Tei12] Teichgräber, C.; Müglitz, J.; Berger, M.: Antriebsauslegung parallelkine matischer Maschinen. VDI Bewegungstechnik, 2012.

[TRI15] PKM TRICEPT S.L, 04.08.2015. http://www.pkmtricept.com