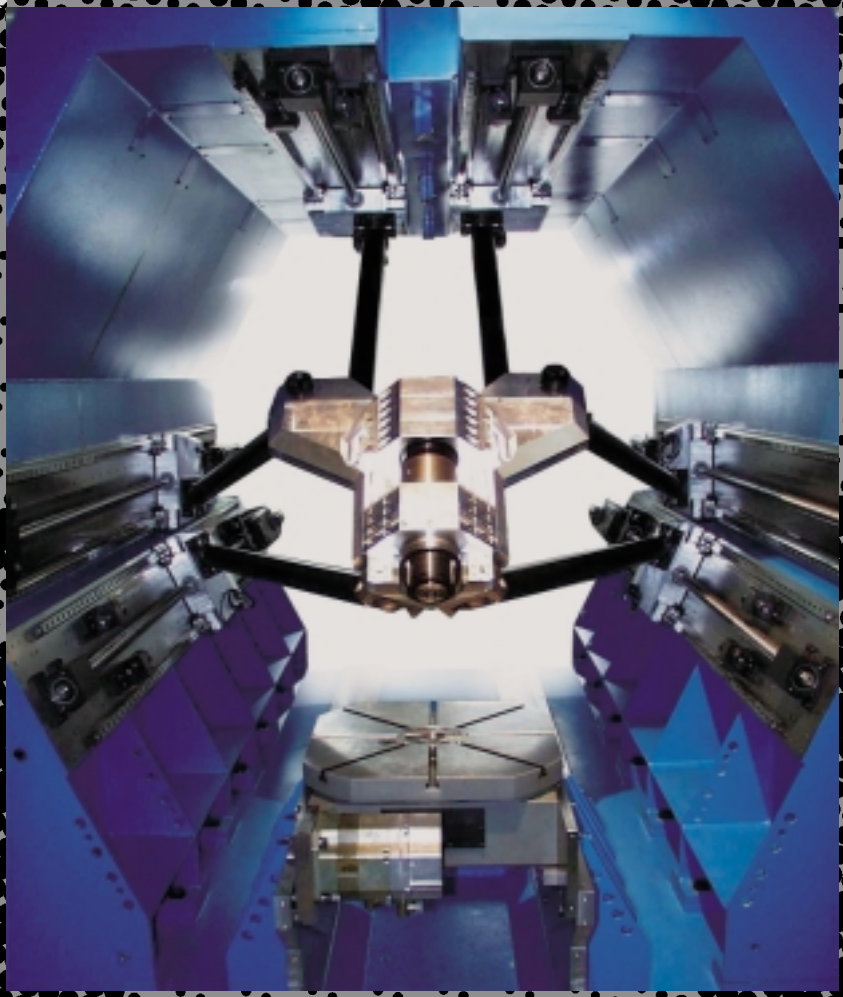
Uwe Heisel
Thomas Stehle
Walther Maier

Werkzeugmaschinen mit Beinen – die Hexapod-Maschinen



Kaum eine andere Entwicklung im Werkzeugmaschinenbau hat das Aussehen und die konstruktive Struktur der Maschinen so sehr verändert wie die Einführung einer neuen Kinematik, die nicht mehr auf den gewohnten, seit jeher unverändert kartesisch zueinander angeordneten Maschinenachsen beruht, sondern auf einem Bewegungsgebilde aus miteinander verbundenen Antriebsstreben und Gelenkstäben, den „Vielbeinern" oder – wie sie in der Fachwelt genannt werden – den Tripoden beziehungsweise den Hexapoden. Die Bezeichnung Hexapod hat sich inzwischen im internationalen Sprachgebrauch zum Oberbegriff der gesamten Maschinengattung entwickelt. Die neuen Maschinen bieten völlig neue Perspektiven in der Bewegungsflexibilität und Dynamik und eröffnen bezüglich der Bemühungen um die Verbesserung und Weiterentwicklung der Werkzeugmaschinen weitreichende Perspektiven.

Die ersten Maschinen, die mit Hilfe von Gelenkstäben betrieben wurden, waren Bewegungssimulatoren. So wurde bereits 1949 von Gough [1] ein Reifenprüfstand bekannt, mit dem verschiedene, realitätsgerechte Belastungen für Fahrzeugreifen erzeugt werden konnten. In der Folge beschrieb D. Stewart [2] 1965 eine Parallelkinematik, deren Plattform sechs Freiheitsgrade besitzt und die unter der Bezeichnung Stewart-Plattform in die Literatur Eingang gefunden hat. Das Einsatzgebiet der Stewart-Plattform sollten Flug- und Fahrsimulatoren sein. Diese wurden während der 70er Jahre vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik genutzt. Andere Simulatoren kennt man zum Beispiel auch für Straßen- und Schienenfahrzeuge sowie für Schiffe. Selbst Simulatoren für medizinische Therapien wie beispielsweise die Behandlung von Rückenerkrankungen durch die Simulation von Pferdebewegungen sind bekannt geworden. Neben Simulatoren sind Maschinen mit Gelenkstabantrieben auch als Messmaschinen, vor allem aber auch als Handhabungseinrichtungen und Manipulatoren bekannt geworden. Aus der Robotik kommen daher auch eine Reihe der inzwischen gebräuchlichen Fachbegriffe, wovon die heute gängigste Bezeichnung der Hexapod-Maschinen abgeleitet wurde: Parallelkinematik- oder PKM-Maschinen beziehungsweise Parallel Kinematic Mechanism Machine Tools. Diese Bezeichnung bedeutet, dass anstelle einer seriellen, voneinander unabhängigen Achsanordnung der Maschinen alle Achsantriebe stets zeitgleich (parallel) und direkt auf den zu positionierenden Endeffektor beziehungsweise das Werkzeug wirken.

Bereits mit der Veröffentlichung von Stewart diskutierte man auch schon über die Möglichkeit einer Hexapod-Werkzeugmaschine. Diese Anwendungsmöglichkeit wurde Mitte der 80er Jahre wieder aufgegriffen, weil erst zu dieser Zeit die erforderliche hohe und schnelle Rechnerleistung für die komplexen Mehrachsensteuerungen verfügbar war.

Uwe Heisel / Thomas Stehle / Walther Maier ■
Werkzeugmaschinen mit Beinen – die Hexapod-Maschinen ■

Seit der ersten Präsentation von Hexapod-Werkzeugmaschinen durch die amerikanischen Werkzeugmaschinenbauer Ingersoll Milling Machine Company und Giddings & Lewis Inc. auf der internationalen Werkzeugmaschinenausstellung IMTS 1994 in Chicago sind parallele Kinematiken auch im Werkzeugmaschinenbau Gegenstand zahlreicher Diskussionen. Eine große Zahl bisher eingereichter und auch bereits erteilter Patente, zahlreiche nationale und internationale Kongresse und übergreifende, öffentlich geförderte Forschungsprogramme, eine zunehmende Zahl von Neukonstruktionen von PKM-Werkzeugmaschinen, die von der Industrie sowohl als Bearbeitungszentren für die Bohr- und Fräsbearbeitung als auch als Drehmaschinen auf verschiedenen Ausstellungen in der jüngsten Vergangenheit präsentiert worden sind, spiegeln diese Situation wider. Dennoch erfordert die neue Konstruktionsweise noch große Anstrengungen, um mit konventionellen, klassisch aufgebauten Maschinen am Markt konkurrieren zu können.

Heute bestimmen noch Maschinenkonzepte vor allem für eine leistungsstarke, hochproduktive Bearbeitungstechnologie die Neuentwicklungen der Werkzeugmaschinen. Gefordert sind schnelle, dynamische und wirtschaftliche Produktionsmaschinen, die den gegenwärtigen und zukünftigen Genauigkeitsanforderungen gerecht werden. Mit dem Einsatz von neuen, innovativen Antrieben wie zum Beispiel von Direktantrieben und elektromechanischen Antrieben für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, der so genannten HSC-Technologie (Abb. 1), ist es möglich, hohe Achsgeschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen von bis zu drei g (m/s^2) und mehr zu realisieren. Neben leistungsfähigen Antrieben richtet sich das Interesse zur Steigerung der Dynamik auch auf geeignete Leichtbaukonstruktionen der bewegten Maschinenbaugruppen. Eine Reduzierung der bewegten Massen lässt sich dabei durch gezielte Strukturoptimierungen sowie auch durch den Einsatz von neuen Leichtbauwerkstoffen erreichen. Im Zuge dieser Entwicklungen und unter Nutzung der neuen Perspektiven von Hexapod-Maschinen zeichnen sich bereits heute weitreichende Veränderungen im Werkzeugmaschinenbau ab.

Konventionelle Werkzeugmaschinen arbeiten meist mit linearen Achsen. Die Bewegung des Werkzeugs verläuft dabei entlang von geführten Bahnen. Die Bahnen sind gewöhnlich rechtwinklig zueinander angeordnet, weshalb man auch von kartesischen Werkzeugmaschinen spricht. Die drei kartesischen Grundachsen können durch zusätzliche Linear- und Rundachsen zu Werkzeugmaschinen mit fünf und mehr Achsen erweitert werden, wobei stets eine oder mehrere Achsen von einer anderen getragen werden müssen. Hierdurch ist die Massenverteilung der Maschinenbaugruppen und die für eine bestimmte Bahnbewegung des Werkzeugs notwendige Verteilung der Antriebskräfte ungleich.

In PKM-Werkzeugmaschinen erfolgt die Bewegung der Werkzeugspindel über Streben, die entweder mit festen Kopf- und Fußpunkten über Antriebe in ihrer Länge verändert werden oder über längenunveränderliche Streben, deren Fuß- oder Kopfpunkte entlang von Bahnen bewegt werden. Die Lage der Werkzeugspindel beziehungsweise deren Bezugspunkt TCP (Tool Center Point) muss mit einer mathematischen Transformation bestimmt werden. Für eine freie Bewegung der Streben sind an den Enden der Streben Gelenke notwendig. Daraus leitet sich auch der Begriff Gelenkstab-Kinematik für PKM-Maschinen ab.

Hexapod-Maschinen an der Universität Stuttgart

Erste Projekte im Bereich der Parallelkinematiken wurden im Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) bereits Anfang der 90er Jahre an ebenen, scherenartigen Bewegungsmechanismen unter dem Gesichtspunkt der Linear-Direktantriebstechnik durchgeführt (Abb. 2).

Nach 1994 arbeiteten sowohl das Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) als auch das von einigen fertigungstechnischen Instituten der Universität Stuttgart unter der Schirmherrschaft des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg und einem Stifterkreis von Industrieunternehmen betriebene Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart (ZFS) intensiv an der Entwicklung, Untersuchung und Optimierung von Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik. Im Folgenden werden diese neuen Maschinenkonzepte, die an der Universität Stuttgart zusammen mit Partnern aus Forschung und Industrie entwickelt wurden, vorgestellt.

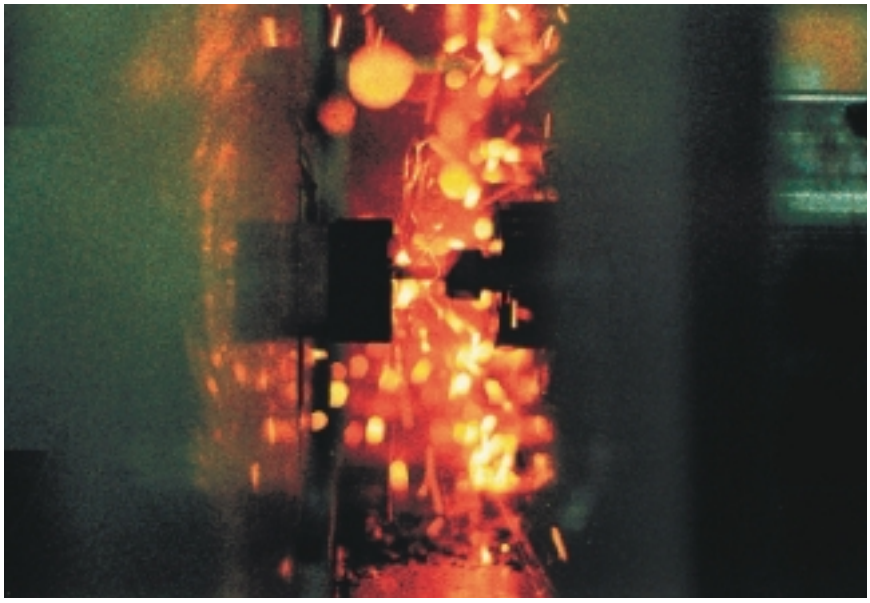


Abb. 1: Hochgeschwindigkeitsfräsversuch mit Hartmetallfräser in Stahl bei einer Drehzahl von 60.000 min^{-1}.

Auf der weltgrößten Werkzeugmaschinen-Messe, der EMO in Hannover, zeigte das Institut für Werkzeugmaschinen 1997 im Rahmen einer Gemeinschaftspräsentation der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik mit der Unterstützung des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. zum ersten Mal eine neuartige Parallelkinematik mit der Bezeichnung HEXACT® (Abb. 3). Daneben war eine vom ISW in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Dynamil-Gemeinschaftsprojekt entwickelte, erste Versuchsmaschine LinaPod I sowie die in einem Industriearbeitskreis des Zentrums Fertigungstechnik Stuttgart (ZFS) entstandene Versuchsmaschine Hexadiod auf der Messe zu sehen.

HEXACT®

Die vom IfW in Zusammenarbeit mit der Firma Ina Wälzlager Schaeffler KG entwickelte HEXACT®-Maschine mit längenveränderlichen Antriebsstreben zeichnet sich durch eine besonders hohe Stabilität dadurch aus, dass die Streben ähnlich den Speichen eines Rades zwischen Felge und Nabe gegeneinander verschränkt angeordnet sind. Die genannte Anordnung der Antriebsstreben ist darüber hinaus sehr platz- beziehungsweise raumsparend, was zu einer kompakten Maschinenstruktur führt. Die Anordnung lässt sich sowohl auf ein horizontales wie auch vertikales Maschinenkonzept anwenden. Über diese Anordnung der Antriebsstreben beziehungsweise die konstruktive Struktur der Maschine wurden inzwischen ein europäisches Patent sowie ein US-Patent erteilt. Ein wesentliches Ziel der Untersuchungen war es, entsprechend den Radspeichen auf die Antriebsstreben eine Zugbelastung zu beaufschlagen, um auf diese Weise die Steifigkeit der Maschinenspindel und damit des Werkzeugs an der Wirkstelle zu erhöhen [3]. Dazu war vorgesehen, die einzelnen Antriebe mit einer gesteuerten Verzögerung, dem so genannten Schleppabstand, zu betreiben.

Mittels gezielt berechneter und gesteuerter Schleppabstände der Antriebe sollte so das gesamte kinematische System auf definierte Weise vorgespannt werden, was gleichzeitig zu einer optimalen und gleichmäßigen Steifigkeit über den gesamten Arbeitsraum der Maschine führt sollte.

Die Anwendungsbereiche sind außer in den spanenden Bearbeitungstechnologien, wie zum Beispiel Bohren, Drehen, Schleifen und Fräsen sowie in der Roboter- und Handhabungstechnik (Schweißen, Entgraten und Messen), auch in der Laser- und Wasserstrahlbearbeitungstechnologie denkbar.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich für die genauigkeits- und steifigkeitsbestimmenden Gelenke und Streben in gleichem Maße wie für das statische, dynamische und thermische Verhalten dieser Maschinen und nicht zuletzt auch für die Kalibriertechnik, mit der die Basisgenauigkeit einer solchen Maschine sicherzustellen ist. Die Antriebstreben weisen – ob längenveränderlich oder nicht – große thermische Wirklängen auf. Sind die Vorschubantriebe in den Streben zum Beispiel als elektromechanische Kugelrollspindeln in Teleskoparmen ausgeführt, tritt Verlustwärme durch Reibung in der Spindelmutter und den Lagerungen direkt in diesen Streben auf. Die Summe der thermischen Verformungen der einzelnen Maschinenkomponenten bewirken Abweichungen von den Soll-Positionen durch Relativabweichungen, die abhängig von der räumlichen Stellung der Antriebstreben sind. Diese Nichtlinearität muss auch bei der Betrachtung der statischen und dynamischen Steifigkeit sowie der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsübersetzung im Arbeitsraum berücksichtigt werden und ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten im Bereich der Konstruktion der Maschinen sowie ihrer Steuerung.

Abb. 3: Versuchsmaschine HEXACT® des Instituts für Werkzeugmaschinen mit paralleler Kinematik.

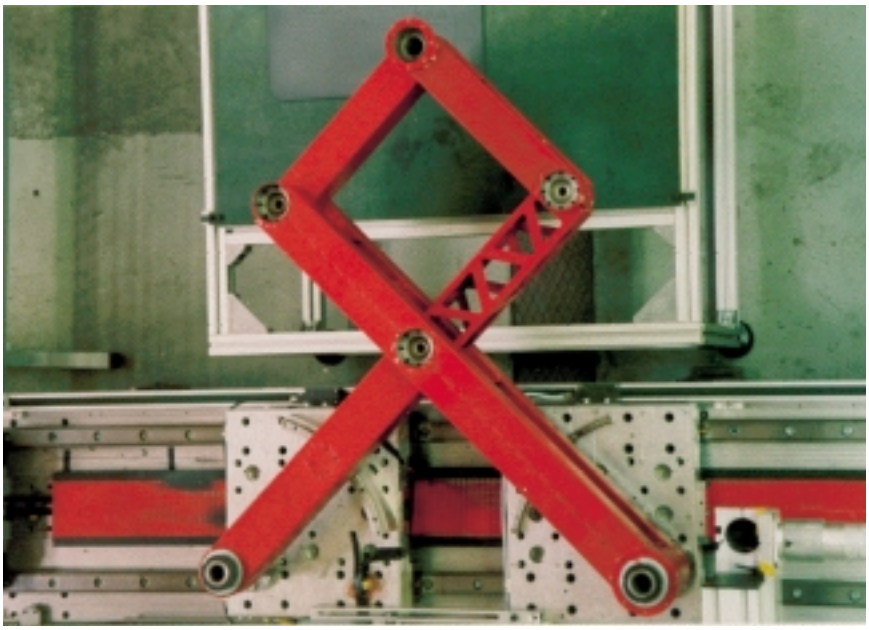


Abb. 2: Versuchseinrichtung einer Scherenkinematik des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) aus dem Jahre 1990 mit Linear-Direktantrieb.

LinaPod

Das erste in der Bundesrepublik Deutschland geförderte Forschungsvorhaben zu Fragen der Gestaltung, der maschinentechnischen Eigenschaften und der Steuerung von PKM-Werkzeugmaschinen war ein seit 1995 vom BMBF finanziertes Projekt mit der Bezeichnung „Dynamil", im Rahmen dessen das ISW in Stuttgart eine neuartige Parallelkinematik mit längenunveränderlichen Gelenkstäben zunächst als Versuchseinrichtung für steuerungstechnische Studien an der Kinematik und später als mehr und mehr praxistaugliche PKM-Maschinen LinaPod III (Abb. 4) entwickelte und untersuchte [4]. Es handelt sich bei diesem fünfachsigen Fräsmaschinentyp um eine Parallelkinematik mit sechs am Fußpunkt beweglichen Gelenkstäben. Die Spindel ist in alle Richtungen um mindestens 15° schwenkbar. Wie bei allen Hexapod Parallelkinematiken ist die Arbeitsraumgröße und -form in besonderem Maße abhängig von der Orientierung der Basisplattform. Der Arbeitsraum des LinaPod III entspricht bei einer 0° Spindelorientierung einem Zylinder mit einem Durchmesser d = 800 Millimeter und einer Höhe h = 600 Millimeter.

Die Positionierung und Orientierung der Basisplattform wird über sechs am Fußpunkt bewegliche Gelenkstäbe realisiert. Jeder dieser Gelenkstäbe besteht aus einem stabilen und gegen thermische Einflüsse resistenten CFK-Rohr. Die Einstellung der Fußpunkte der Gelenkstäbe geschieht über sechs senkrecht geführte Schlittensysteme. Dabei befinden sich jeweils zwei der Schlitten an einer in 120°-Kreisteilung um den Arbeitsraummittelpunkt angeordneten Gestellsäule. Angetrieben werden die Schlitten über Doppelkamm-Lineardirektantriebe. Die Sekundärteile befinden sich auf der Innenseite der Schenkel des U-förmig ausgeführten Querschnittes der Gestellsäulen. Jeder dieser Schlitten hat eine Nennvorschubkraft von F_N = 6 kN und einen maximalen Schub von F_{max} = 11 kN. Damit wird am TCP eine Bahngeschwindigkeit von v_B = 60 Meter pro Minute (m/min) und eine Beschleunigung von a = 1,5 g erreicht.

PARALIX

Da die Auswirkung der vorerwähnten Nichtlinearitäten auf das statische, dynamische und thermische Verhalten bei längenunveränderlichen Streben grundsätzlich besser beherrschbar ist, wurde im Rahmen des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Verbundforschungsprojektes „Innovative Werkzeugmaschinen mit Stabgelenkkinematik" unter Federführung des ZFS zusammen mit dem IfW ein neuer Hexapod mit längenunveränderlichen Streben, der sogenannte PARALIX (Abb. 5), als Prototyp und Versuchsmaschine gestaltet. Die Maschine ist mit einer vertikal liegenden, über einem Rundtisch mit großem Schwenk- und Kippbereich angeordneten Hauptspindel für Bohr- und Fräsoperationen ausgeführt. Dabei liegt die Spindelachse um 90° gedreht zur Flächennormalen der Stewart-Plattform, die mit sechs nach hinten weisenden Gelenkstäben verbunden ist. Diese sind wiederum an ihren Fußpunkten auf je einem geführten Schlitten angeordnet, der wahlweise durch einen Kugelrollspindel- oder einen Lineardirektantrieb bewegt werden kann.

In Kooperation mit namhaften Industriepartnern wurde das Pflichtenheft für die zu entwickelnde Maschine mit dem Ziel erarbeitet, eine praxisgerechte Umsetzung des Hexapod-Konzeptes für die HSC-Bearbeitung zu verwirklichen.

An diesem Objekt wurden auch umfangreiche, praxisnahe Studien durchgeführt, wie derartige Maschinen unter Berücksichtigung der Herstell- und Montagetoleranzen mit Blick auf die hohen Anforderungen der Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine im µm- Bereich montiert, justiert und kalibriert werden können. Bei der Montage des PARALIX wurde nämlich nur beim Ausrichten der zwei jeweils nebeneinander liegenden Führungen auf Geradheit, Ebenheit und Parallelität geachtet. Alle anderen Komponenten wurden ohne besondere Genauigkeitsjustagen montiert, welche sonst mit einem außerordentlichen Aufwand verbunden wären. Die daraus entstandenen Abweichungen konnten mittels neu entwickelter und am Objekt er-

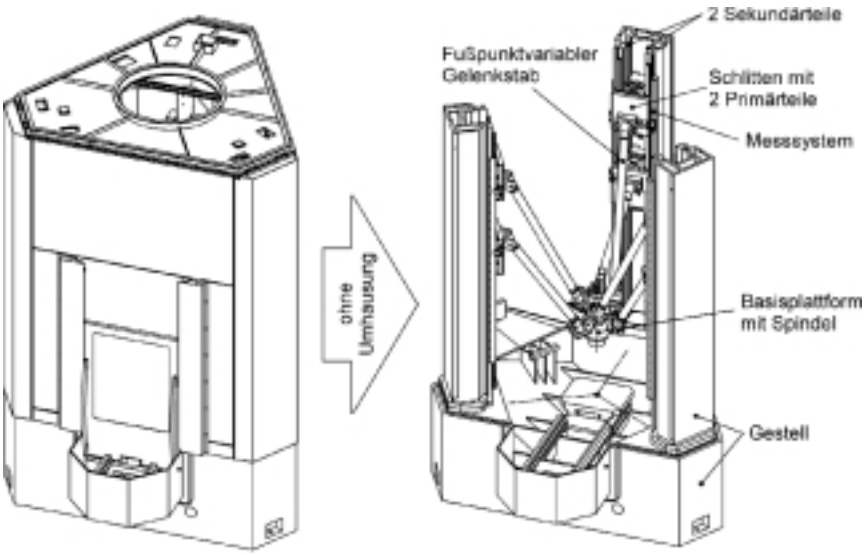


Abb. 4: Parallelkinematik LinaPod III mit und ohne Umhausung.

probter Kalibrierverfahren ausgeglichen werden, was allgemein bei PKM-Maschinen zu einer deutlichen Reduktion des Fertigungs- und Montageaufwands beizutragen vermag [5]. Schließlich erlaubte die besondere konstruktive Ausführung der Maschine nach einem entsprechenden Umbau erstmals in einer kompletten Maschinenstruktur einen direkten Vergleich der Eigenschaften von Kugelrollspindel- und Lineardirektantrieben für die Vorschubbewegung.

Holzbearbeitungsmaschine mit λ-Kinematik

Eine weitere Bearbeitungsmaschine mit Parallelkinematik für die Holzbearbeitung wurde vom IfW in Zusammenarbeit mit dem bekannten Holzbearbeitungsmaschinen-Hersteller Homag Maschinenbau AG in dem von der EU geförderten Projekt „SAM" entwickelt und der Öffentlichkeit präsentiert. Die Maschine hat eine ebene Parallelkinematik mit einer scherenförmigen Konstruktion für die Bewegung des Werkzeugs in einer x-y-Ebene. Die Anordnung der bewegten Komponenten entspricht in der Draufsicht dem griechischen Buchstaben λ. Der in der Abbildung 6 dargestellte, gekröpft ausgebildete Hauptarm mit seiner vertikalen Arbeitsspindel unter der gelben Abzugshaube stellt den langen Schenkel des Lambda-Symbols dar. Die rohrförmige Verbindungsstrebe entspricht dem kurzen Schenkel des λ. Die Bewegung der λ-Arme erfolgt über zwei getrennte Schlitten in vergleichsweise massenarmer Fachwerkbauweise, die beide jedoch auf ein und demselben Lineardirektmotor angeordnet sind. Bei einer gleichgerichteten Schlittenbewegung führt die Maschine eine x-Bewegung, bei einer entgegengesetzten Bewegung der beiden Schlitten eine y-Bewegung aus. Diese konstruktive Anordnung bildet die Grundlage für eine besonders hohe Dynamik.

Die Skizze in Abbildung 7 zeigt die Schwenkbewegung mit den zwei möglichen Endpositionen des Hauptarms. Mit dem Aufbau dieser Parallelkinematik konnte gegenüber einer vergleichbaren

Abb. 6: Holzbearbeitungsmaschine mit λ-Kinematik und Lineardirektantrieben.

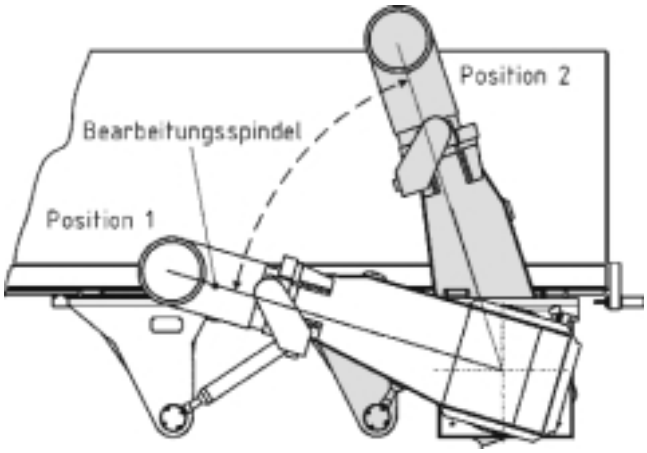
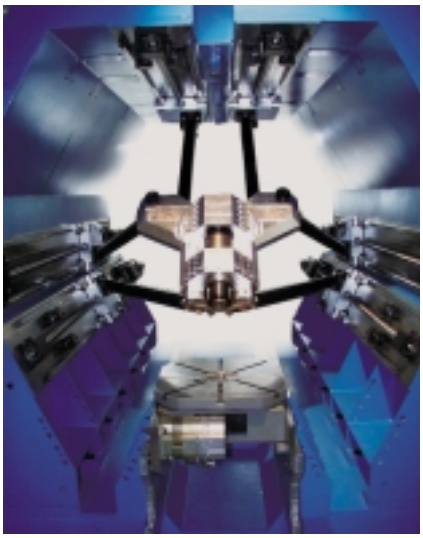


Abb. 7: Endpositionen und Schwenkbewegung des Hauptarmes der λ-Kinematik in der Draufsicht.



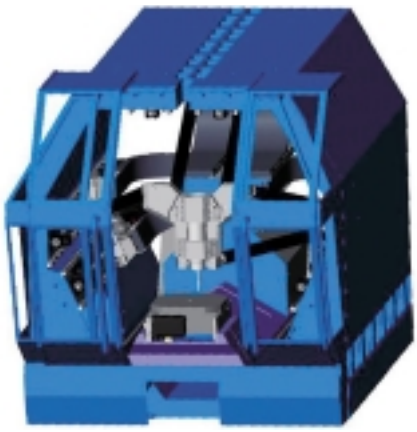
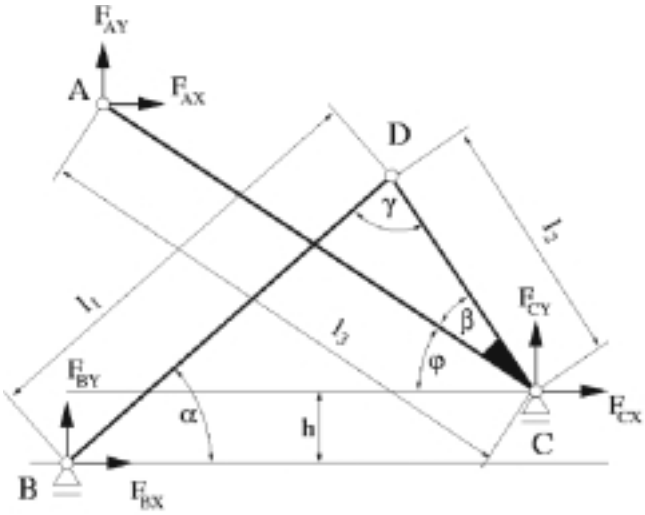


Abb. 5: Darstellung der vom ZFS in Kooperation mit dem IfW entwickelten Hexapod-Maschine PARALIX.

kartesischen Maschine die Vorschubgeschwindigkeit v_f und Beschleunigung a der Hauptachsen um das Doppelte auf v_f = 120 m/min und a = 1 g erhöht werden. Die sechs Meter lange und zwei Meter breite Maschine ist mit einer Hochleistungs-Bearbeitungsspindel mit einer maximalen Drehzahl von 30.000 min^{-1} ausgerüstet. Diese Maschine wird zur Zeit für Versuche zur Optimierung der Hochleistungszerspanung von Massivholz und Holzwerkstoffen wiederum in einem weiteren vom BMBF geförderten Forschungsprojekt eingesetzt.

Zur Realisierung der Maschine wurde die λ-Kinematik [6] für einen verbesserten Kraftübertragungsfaktor optimiert. In Kooperation mit dem Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart wurden hierzu analytische Berechnungen verbunden mit Mehrkörpersimulationen durchgeführt. In einem iterativen Prozess konnte der anfänglich durch die geometrischen Gegebebheiten der Konstruktion bestimmte Übertragungsfaktor von ca. ε_{max} = 1:5 auf unter 1:2 gesenkt werden. Durch Versetzung der Anlenkpunkte auf den Schlitten und im λ- Gelenk können mittels der genannten Optimierungen gleichmäßigere Kraft-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe im Arbeitsraum erzielt werden (Abb. 8).



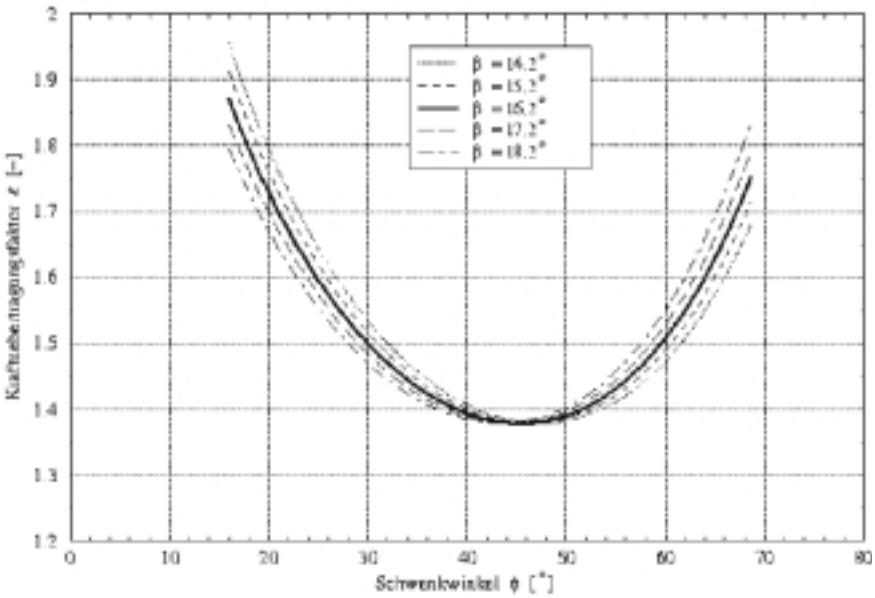


Abb. 8: Kräfte, Winkel und Längen der realisierten Bearbeitungsmaschine und der Kraftübertragungsfaktor ε im Arbeitsraum der λ-Kinematik.

Hochdynamisches Maschinenkonzept zur Laserbearbeitung

Eine höchst aktuelle Gemeinschaftsarbeit findet derzeit im Kreise einiger Institute der Universität Stuttgart sowie der Firma Trumpf statt. Ziel ist es, mittels einer so genannten hybriden Kinematik, also einer Kombination von kartesischen Achsen und einer PKM-Struktur, zu einem hochdynamischen Maschinenkonzept für die Laserbearbeitung zu gelangen.

Bei der modernen Laserbearbeitung sind große flächige Arbeitsräume sowie eine hohe geforderte Maschinendynamik typisch. Beispielsweise kommen beim Laserstrahlschneiden häufig kleine Eckenradien oder Kreisdurchmesser vor, bei denen zur vollen Nutzung der verfügbaren Laserleistung die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung anzuwenden ist. Hierbei können kombinierte Kinematiken besonders vorteilhaft sein.

Die Gestaltung einer derartigen Maschine mit hybrider Kinematik erfordert die ganzheitliche Betrachtung der Maschinenkinematik, der Antriebs- und Regelungstechnik sowie des Leichtbaus der bewegten Strukturbauteile. Die ganzheitliche Betrachtungsweise ermöglicht ein zielgerichtetes Entwickeln völlig neuartiger Maschinenkonzepte, die den Anforderungen zur Steigerung der Dynamik bei neuen Bearbeitungssystemen gerecht werden.

In der Folge zu den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 349 „Hochdynamische Strahlführungs- und Strahlformungseinrichtungen für die räumliche Bearbeitung mit Laserstrahlen" wurde der DFG-Transferbereich 27 (Deutsche Forschungsgemeinschaft) eingerichtet, in dem im Teilprojekt F2 in Zusammenarbeit zwischen IfW und dem Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, dem Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen ISD, dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen ISW und der Firma Trumpf ein modulares, konfigurierbares Leaserbearbeitungszentrum auf der Basis geschlossener kinematischer Ketten entwickelt wird.

Die Abbildung 9 zeigt die Anordnung einer Scherenkinematik für hohe Beschleunigungen in einem kleinen Teilarbeitsraum in Kombination mit der Querachse einer neuartigen Laserbearbeitungsmaschine auf der Basis einer konventionellen, kartesischen Achsanord-

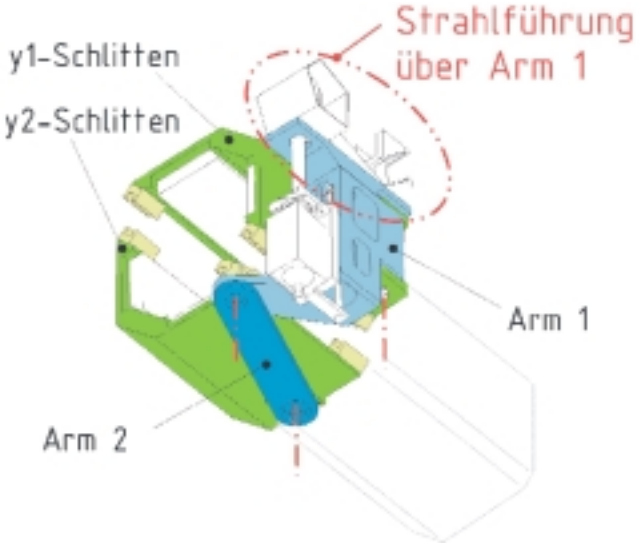


Abb. 9: Scherenkinematik in Kombination mit der Querachse einer konventionellen Laserbearbeitungsmaschine.

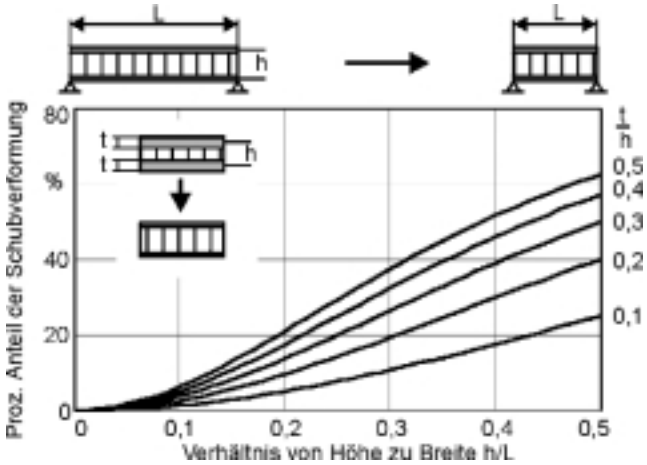


Abb. 10: Anteil der Schubverformung an der Gesamtverlagerung [8].

nung. Eine auf die notwendigen Freiheitsgrade mit Hilfe eines Baukastensystems reduzierte Kinematik ermöglicht so hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Beschleunigungen bei gleichzeitig minimalen Anlagenkosten.

Forschungsaktivitäten des IfW auf dem Gebiet der Hexapod–Maschinen

Leichtbaukonstruktionen für hochdynamische Maschinen und Parallelkinematiken

Bereits in einem vor 12 Jahren begonnenen Teilprojekt des Ende 2001 abgeschlossenen Sonderforschungsbereichs SFB 349 beschäftigten sich Forschungsarbeiten des IfW mit Leichtbaukonstruktionen für Werkzeugmaschinen, wobei hier in der Hauptsache extrem massearme Blechleichtbaukonstruktionen für voluminöse, bewegte Maschinebaugruppen sowie sandwich- beziehungsweise schalenartige, dünnwandige Blechkonstruktionen betrachtet wurden [7].

Blechleichtbaustrukturen für Werkzeugmaschinen

Die Eigenschaften der Blechleichtbauelemente werden durch deren Leichtbauweise bestimmt [8]. Diese ist charakterisiert durch den Strukturaufbau und durch deren Herstellung. Der Schubanteil als maßgebliche Belastungsgröße wirkt sich direkt auf die Verformung zum Beispiel einer Sandwichplatte aus. Der Einfluss des Schubanteils ist von den geometrischen Maßen der Sandwichplatte abhängig. Je nach Verhältnis von Kernhöhe zur Sandwichbreite und dem Verhältnis von Deckplattendicke zur Kernhöhe ergeben sich unterschiedliche prozentuale Anteile der Schubverformung an der Gesamtverlagerung (Abb. 10).

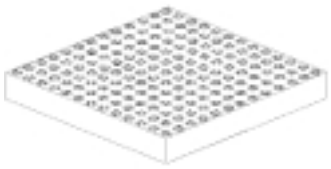
Die einzelnen Schichten zur Übertragung des Schubanteils müssen steif miteinander verbunden sein. Mit Hilfe von Laserschweißverfahren beim Fügen der Kern- und der Trägerstrukturen lassen sich die Steifigkeiten derartiger Blechleichtbaukonstruktionen zum Beispiel im Vergleich zu Klebeverbindungen deutlich erhöhen. Im Bereich der Leichtbaustrukturgestaltung, -berechnung und -optimierung wurden ebenfalls im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 349 am Institut für Maschinenelemente (IMA) umfangreiche Grundlagen erarbeitet. Die praktische Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse über die Konstruktion von Blechleichtbaugruppen wurde schließlich systematisch in Form von Konstruktionskatalogen zur Gestaltung und Auslegung von Werkzeugmaschinen umgesetzt.

Als Beispiel für den Einsatz von Blechleichtbauelementen ist in Abbildung 11 eine Grundspannplatte in Blechleichtbauweise zum Aufspannen vorn Werkstücken in Hochgeschwindigkeits-Fräszentren dargestellt. Die patentierte Spannplatte wurde in Sandwichbauweise mit Rohren als Kernstruktur aufgebaut, wobei alle Verbindungen lasergeschweißt sind. Dabei konnte die Masse der Platte im Vergleich zu einer massiven Aluminium-Konstruktion bei annähernd gleicher Steifigkeit um 60 Prozent reduziert werden.

Bei der industriellen Umsetzung dieser Bauweise von Sandwichplatten konnten Spannplatten mit einer Größe bis zu 1200 x 1000 x 60 Millimeter (mm) realisiert werden (Abb. 12). Zur Verbesserung der Dämpfung lassen sich die Hohlräume der Konstruktion durch geeignete Materialien (zum Beispiel Kunststoffe oder Metallschäume) ausfüllen.

Anwendung als Schlitten

Eine weitere technische Umsetzung zu den entwickelten Blechleichtbauplatten besteht in ihrer Anwendung als Werkzeugmaschinen-Schlitten. In Abbildung 13 links ist eine als Werkzeugmaschinen-Schlitten ausgeführte Blechleichtbauplatte dargestellt und rechts im eingebauten Zustand in der im Rahmen des SFB 349 entwickelten und aufgebauten hochdynamischen Laserbearbeitungsmaschine.

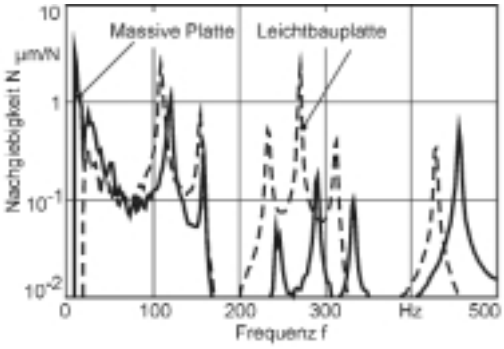


Massive Platte

Statische Steifigkeit:
k = 68 N/µm
Masse m = 40 kg

Leichtbauplatte

Statische Steifigkeit:
k = 100 N/µm
Masse m = 16 kg



Mode	Leichtbauplatte		Massive Platte	
	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
1	110,4	0,89	120,1	0,61
2	155,7	0,47	160,2	0,51
3	234,5	0,34	246,2	0,31
4	271,6	0,20	291,3	0,26

Abb. 11: Vergleich des dynamischen Verhaltens der Leichtbau- zur Massivplatte.

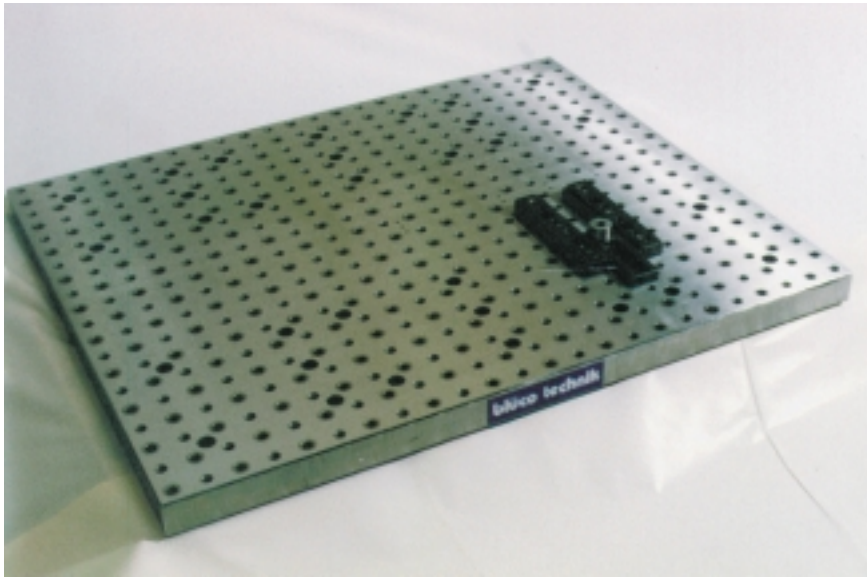


Abb. 12: Grundspannplatte in Blechleichtbauweise [8].

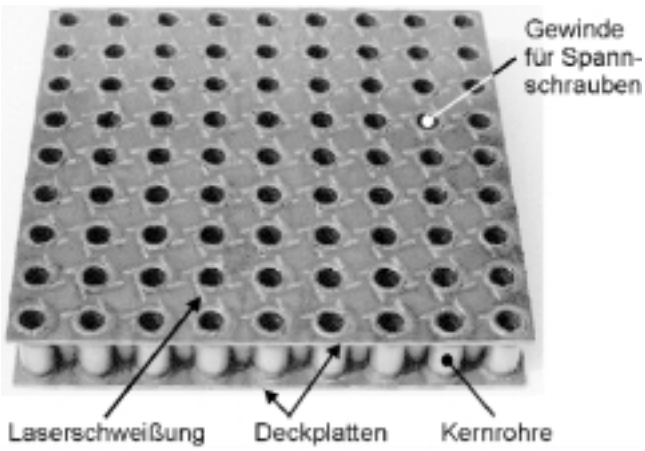


Abb. 13: Anwendung von Blechleichtbauplatten als Werkzeugmaschinen-Schlitten.

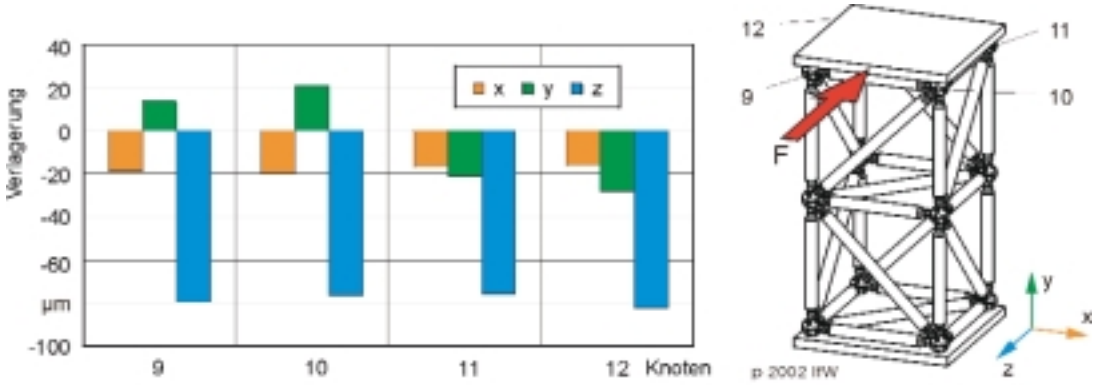


Abb. 14: Verlagerungswerte der Knoten in den drei Raumrichtungen einer Teststruktur bei einer Schubbelastung von 1000 N.

Fachwerkstrukturen für Werkzeugmaschinen-Baugruppen

In der Fortführung der zuvor beschriebenen Arbeiten war es ein weiteres Ziel des von der EU-„SAM-Projekts" der λ-Maschine, Fachwerkstrukturen aus standardisierten, gegebenenfalls einfach verschraubbaren Baukastenelementen als Baugruppen für Werkzeugmaschinen zu untersuchen [9]. Das Prinzip eines Fachwerkaufbaus beruht dabei auf der Einleitung der äußeren Belastungskräfte in die tragfähige, gleichzeitig aber massenarme Struktur. Standardisierte geschraubte Fachwerkelemente bestehen aus den eigentlichen Tragelementen (Streben), den Kombinationselementen (Knoten) und den notwendigen Verbindungselementen (zum Beispiel Schrauben). Kubische Raumfachwerkgeometrien müssen mit diagonalen Streben stabilisiert, das heißt zu statisch bestimmten oder überbestimmten Tragwerken versteift werden. Hierbei werden die physikalischen und werkstoffspezifischen Eigenschaften der Tragkonstruktion so ausgelegt, dass die Streben nur auf Zug oder Druck belastet werden. Vorteile von standardisierten geschraubten Fachwerk-Komponenten werden allgemein in einer hohen Modularität der verwendeten Bauteile und der Baugruppen sowie auch einer möglichen, sehr rasch realisierbaren Umgestaltung (Rekonfigurierung) der Maschine gesehen [10].

Für den Einsatz von Fachwerkelementen in Werkzeugmaschinen ist die Belastungsrichtung der Struktur und die Lage der Krafteinleitungsstellen entscheidend. Eine räumliche Teststruktur mit den Abmessungen von 500 mm x 500 mm x 1000 mm bestand aus zwei aneinander gereihten Würfelelementen und einem Gesamtgewicht von lediglich ca. 70 Kilogramm (kg). Sie wurde für drei Belastungsfälle (Zug-, Druck- und Schub-/Biegebelastung) untersucht und die Kraft-/Verlagerungswerte ermittelt. Die gemessenen Verlagerungswerte der einzelnen Knoten für die Schub-/Biegebelastung sind in Abbildung 14 dargestellt. Zu erkennen ist im vorliegenden Test neben der Verformung in der Belastungsrichtung aufgrund der unsymmetrischen dreidimensionalen Anordnung der Streben ein Verkippen und ein seitlicher Versatz der Struktur in x-Richtung.

Bei einer Zugbelastung wurde eine Steifigkeit von 220 N/µm (Newton/Mikrometer), für eine Druckbelastung eine Steifigkeit von 125 N/µm und bei der Schub-/Biegebelastung eine mittlere Steifigkeit von 14,8 N/µm gemessen. Es zeigt sich damit, dass Fachwerkstrukturen als Elemente für Maschinenbaugruppen im Werkzeugmaschinenbau aufgrund der realisierbaren Steifigkeiten grundsätzlich Anwendung finden können. Da solche Fachwerkstrukturen einen unsymmetrischen dreidimensionalen Aufbau aufweisen, ist jedoch bei ihrer Auslegung und Dimensionierung besondere Aufmerksamkeit auf die wirkenden Krafteinleitungsrichtungen und den sich einstellenden dreidimensionalen Verlagerungen (Beachtung der Kreuzsteifigkeiten) zu legen.

Thermische Optimierungen von Parallelkinematiken

Die im Rahmen des DFG-Vorhabens He 1656/46-1 durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für parallele Kinematiken hinsichtlich des thermischen Verformungsverhaltens eine sehr starke Abhängigkeit der absoluten Genauigkeit vom thermischen Zustand der Achsstreben besteht. Wegen der großen Wirklängen und der geringen Wärmekapazitäten infolge der kleinen Massen der Streben ist die thermische Drift verhältnismäßig groß. Eine gute Wiederholgenauigkeit wird im thermischen Beharrungszustand erreicht, die Zeitkonstanten sind jedoch für Erwärmung und Abkühlung besonders bei Stabkinematiken sehr kurz und damit wird eine genaue Kalibrierung erschwert. Weiter werden im betreffenden Vorhaben steuerungstechnische und konstruktive Kompensationsmaßnahmen ausgearbeitet, untersucht und im Experiment verifiziert.

Um den Einfluss eines Gelenkstabs mit indirektem Wegmesssystem auf das thermische Verhalten von gesamten Parallelstrukturen zu untersuchen, wurde unter anderem ein Messaufbau zur Erfassung thermisch bedingter Längenänderungen von längenveränderlichen Gelenkstäben entwickelt und aufgebaut (Abb. 15). Der Aufbau erlaubt die Untersuchung des Gelenkstabs unter realen Randbedingungen im eingebauten Zustand in der Maschine.

Die ermittelten Verlagerungsverläufe zeigen, dass in der Aufwärmphase bereits schon nach etwa drei Stunden und in der Abkühlphase auf die Ausgangstemperatur nach ca. vier Stunden ein quasistationärer Zustand erreicht wird. Die Beharrungsverlagerungen steigen proportional zur Größe der unter anderem als Parameter variierten Vorschub- beziehungsweise Bewegungsgeschwindigkeit an. Dabei ist der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Höhe der Beharrungsverlagerung dominanter und deutlich größer als der Einfluss der Weglänge. Diese experimentellen Untersuchungen waren gleichzeitig auch Grundlage für die Erstellung thermischer Verformungsmodelle für parallele Kinematiken.

Abbildung 16 zeigt die mit Thermoelementen an unterschiedlichen Strukturpunkten gemessenen Temperaturen der Antriebsstreben und die TCP-Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung für eine linear oszillierende y-Bewegung (l = 100 mm) mit einer Vorschubgeschwindigkeit v_f = 8 m/min. Die Antriebsstreben Nr. 3 und Nr. 5 liegen in der y-z-Ebene. Sie werden während einer y-Bewegung am meisten beansprucht. Diese Tatsache wird durch das ermittelte Temperaturverhalten untermauert. Eine höhere Temperaturbelastung hat eine größere thermoelastische Längenausdehnung zur Folge. Die Ausdehnungen der Antriebsstreben Nr. 3 und Nr. 5 bewirken eine Verdrehung der Arbeitsplattform und somit eine effektive Verschiebung des TCP in die negative y-Richtung. Änderungen in der x- und z-Richtung durch Überlagerungseffekte waren ebenfalls festzustellen, sind aber vergleichsweise gering.

Überlagert man unter Beibehaltung aller Randbedingungen der y-Bewegung zusätzlich eine gleichgroße z-Bewegungskomponente, verdoppelt sich etwa die TCP y-Abweichung. Die Beträge der x- und z-Abweichungen bleiben nahezu unbeeinflusst. Signifikant ist in beiden Versuchen die Temperaturpaarbildung der Streben.

Wärmebedingte Verformungen einer Bewegungsachse verursachen bei Parallelkinematiken translatorische und rotatorische Abweichungen des TCP in und um alle Raumachsen. Der Betrag der Soll-Ist-Differenz ist dabei stark positions- und richtungsabhängig und zeichnet sich durch hohes nichtlineares Verhalten aus. Verschiedene Effekte einzelner Komponenten wirken sich jeweils unmittelbar auf den TCP aus und erschweren damit die Auswertung experimenteller Untersuchungen. Wegen der großen Anzahl der

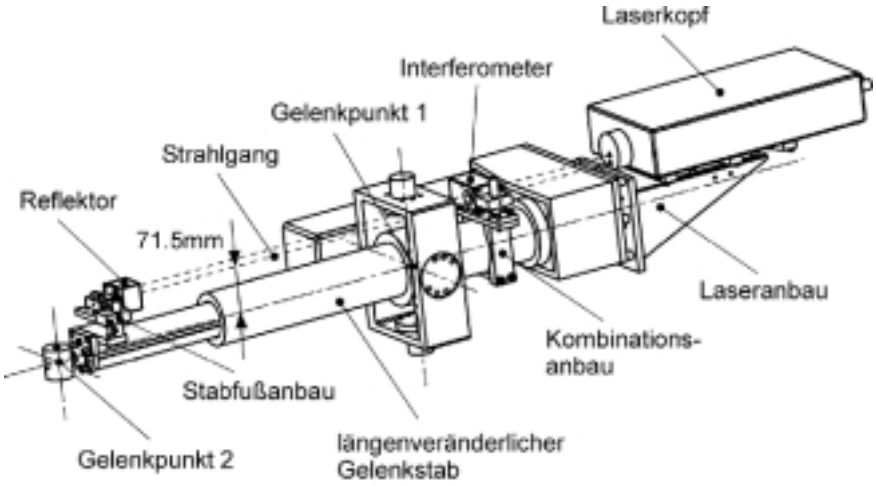


Abb. 15: Messaufbau zur Erfassung thermisch bedingter Längenänderung von Gelenkstäben.

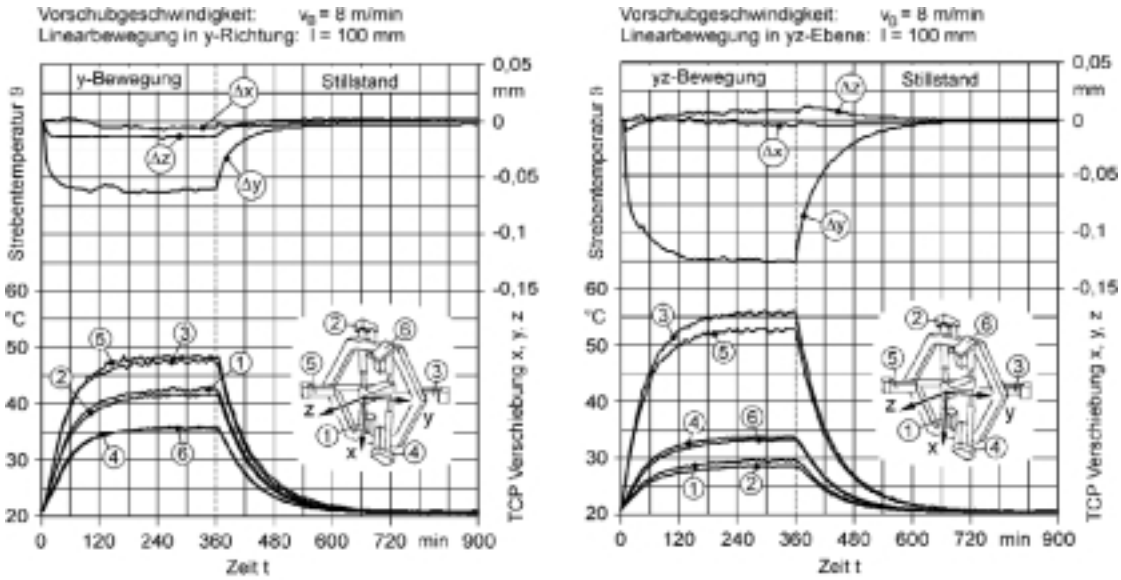


Abb. 16: Experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens der Parallelkinematik HEXACT.

üblicherweise bei solchen Untersuchungen anfallenden, gemessenen Verformungsdaten musste eine Möglichkeit zur visuellen und qualitativen Auswertung der Verformungsdaten geschaffen werden. Die entwickelte Software erlaubt die räumliche Darstellung der gemessenen Daten, die Simulation der Auswirkungen von konstruktiven Änderungsmaßnahmen sowie die Nutzung der experimentellen Ergebnisse zum thermischen Verformungsverhalten der Gelenkstäbe zu kompensatorischen Maßnahmen an Parallelkinematiken [11].

Abb. 17: Gelenkarten für Parallelkinematik-Maschinen.

Thermische Einflüsse auf das dynamische Verhalten von Parallelkinematiken

Im Zusammenhang mit den gerade genannten Forschungsarbeiten beschäftigt sich das IfW in enger Kooperation mit dem Institut B für Mechanik der Universität Stuttgart im Rahmen des durch die DFG geförderten Forschungsprojektes He 1656/52-2 als weltweit erste Institutionen erstmals auch mit Grundlagenuntersuchungen zum thermischen Einfluss auf das dynamische Verhalten von parallelen Kinematiken.

Thermisch bedingte Deformationen, die durch äußere Wärmequellen und innere Wärmeverluste verursacht werden, haben grundsätzlich die Veränderung der Maschinengeometrie verbunden mit einer Minderung der Arbeitsgenauigkeit zur Folge [12]. Zum Erhalt der Arbeitsgenauigkeit von Maschinen, insbesondere auch solcher mit paralleler Kinematik, werden in den laufenden Forschungsvorhaben Maßnahmen zur Verminderung der Auswirkungen thermischer Störungen auf das Verhalten der Maschinen und ihrer Genauigkeit entwickelt.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung dieses Verhaltens besteht in der Verwendung der elastischen Mehrkörper-Systemanalyse, die für die Untersuchung thermischer Effekte entsprechend erweitert werden muss. Arbeiten mit diesem Ziel werden derzeit im Rahmen des laufenden DFG-Schwerpunktprogramms „Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematiken" am IfW gemeinsam mit dem Institut B für Mechanik durchgeführt.

Es wurden dazu mehrere unterschiedlich detaillierte Modelle zwei- und dreidimensionaler Maschinen mit paralleler Kinematik erstellt. Ein Vergleich zeigt, dass die großen nichtlinearen Bewegungen durch relativ einfache Modelle mit masselosen Streben wiedergegeben werden können, während elastische Strukturschwingungen der Maschine jedoch eine genauere Modellierung mit massebehafteten Streben erfordern. Für hochdynamische Bewegungsverläufe oder bei der Berücksichtigung hochfrequenter, äußerer Anregungen müssen auch die Streben als elastische Körper modelliert werden. Dafür wurden die schlanken Teile der Streben mit der FEM diskretisiert und in das starre Mehrkörpersystem integriert, so dass damit ein elastisches Mehrkörpersystem vorliegt. Das FEM-Modell der Streben wird derzeit noch weiter verfeinert und mit Messergebnissen aus experimentellen Versuchsreihen abgeglichen.

Anhand von Simulationen mit diesen Modellen konnte auch der thermische Einfluss auf die Genauigkeit der Werkzeugposition untersucht werden. Es zeigt sich dabei, dass die statische Längenänderung den größten Einfluss auf die Position des Werkzeuges hat. Eine Erwärmung der Streben um 10° Kelvin (K) führt bei einer untersuchten Kreisfahrt des Werkzeuges zu einer Abweichung von mehreren Hundert Mikrometern. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist, dass sich nicht nur die Position des Werkzeuges mit der Temperatur verändert, sondern auch die inneren Kräfte in den Gelenken und Streben.

Sowohl die statischen als auch die dynamischen Elastizitäten sind temperaturabhängig veränderlich. Darüber hinaus verändern sich bedingt durch thermische Deformationen der Bauteile nicht nur die Geometrie, sondern auch die Vorspannung und die Dämpfung der Struktur in den Fügestellen, Lagerungen, Führungen und Passungen. Zur Modellerstellung werden gegenwärtig daher zahlreiche experimentelle Untersuchungen zur thermischen Wirkung auf das dynamische Verhalten unterschiedlicher PKM-Bauteile und -gruppen durchgeführt. Das Ziel ist es, ein Mehrkörpersystem-Modell der gesamten PKM-Maschine zu erstellen, mit dessen Hilfe die Simulation der Maschineneigenschaften unter dem Einfluss stationärer und instationärer thermischer Zustände und damit eine zielsichere, optimierte Auslegung von PKM-Strukturen hinsichtlich ihrer statischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften bereits in der Konzeptionsphase ermöglicht wird.

Optimierung der PKM-Gelenke

Die statischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften von PKM-Strukturen werden ganz wesentlich auch von den Eigenschaften der Gelenke bestimmt. Bereits 1995 durchgeführte Untersuchungen der maschinentechnischen Eigenschaften im IfW an dem als schwedisch-italienische Gemeinschaftsproduktion von Neos Robotics und Comau hergestellten Tripod „Tricept HP" beinhalteten umfangreiche Experimente auch an den damals verfügbaren Gelenken (Abb. 17).

Im Blickfeld stand neben einer hohen statischen und dynamischen Steifigkeit auch die Größe der möglichen Schwenkwinkel, mit denen die Raumflexibilität der PKM-Maschinen begrenzt wird. Daneben interessierten auch die thermischen Eigenschaften verschiedener Gelenktypen und die damit verbundenen Vorspannungs- und Steifigkeitsänderungen.

Es konnte unter anderem herausgefunden werden, dass beispielsweise Kugel- und Kardangelenke sehr unterschiedliche Empfindlichkeiten auf Temperatureinflüsse aufweisen. So ändert sich die statische Steifigkeit eines Kardangelenkes bei einem Temperatursprung von 15°C um über 16 Prozent (Abb. 18), während die Steifigkeit des Kugelgelenkes nur um zehn Prozent gegenüber seiner Grundsteifigkeit variiert.

Weiterhin wurde auch der Einfluss von Vorspannungszuständen auf das Nachgiebigkeitsverhalten der Gelenke untersucht. Hierzu wurden zunächst ohne den Einfluss von Temperaturschwankungen Nachgiebigkeitsfrequenzgänge der Baugruppen im vorgespannten Zustand gemessen. Hier zeigte das Kugelgelenk eine größere Empfindlichkeit auf die aufgebrachten Vorspannkräfte. So wurden Resonanzen im Frequenzbereich um 200 Hz (Hertz) durch eine Erhöhung der Zugspannung deutlich bedämpft und dadurch die Nachgiebigkeit erheblich verringert (Abb. 19).

Untersuchungen der dynamischen Nachgiebigkeit der verschiedenen Gelenke unter Variation der Umgebungstemperatur zeigten sowohl für das Kardan- als auch für das Kugelgelenk, dass eine Erhöhung der Temperatur eine höhere Nachgiebigkeit zur Folge hat.

Während aber die einzelnen Gelenke auch in einem Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz die genannten Einflüsse auf den Nachgiebigkeitsfrequenzgang erkennen lassen, ergaben Nachgiebigkeitsuntersuchungen an der Gesamtstruktur am Beispiel von der Versuchsmaschine HEXACT®, dass sich hier Temperaturänderungen erst oberhalb einer Frequenz von 500 Hz nachhaltig auswirken. In diesem Zusammenhang kam es hauptsächlich zu Verschiebungen der Resonanzfrequenzen hin zu höheren Frequenzen, während die maximalen Nachgiebigkeitsamplituden unverändert blieben [13].

Modellierungstool zur dynamisch optimierten Auslegung von Fertigungsmaschinen mit paralleler Kinematik

Im Rahmen des erwähnten DFG-Schwerpunktprogramms wird auch ein Modellierungstool für die Auslegung von Hexapod-Maschinen am IfW erstellt [14]. Die geschlossene kinematische Kette verknüpft die kartesischen Freiheitsgrade des Raums auf eine nicht lineare Weise. Daher kann die Maschinenbewegung nicht durch die einfache Summe von Bewegungen entlang der Achsen eines kartesischen Koordinatensystem beschrieben werden. Die Bewegung der Maschine bedingt Veränderungen der Maschinenstruktur, die zu unterschiedlichen Verteilungen der Kräfte an den Antriebsstreben führt. Dadurch ergibt sich ein direkter Zusammenhang der Maschinensteifigkeit mit der Position im Arbeitsraum, wobei die Steifigkeit beziehungsweise die Nachgiebigkeit im Arbeitspunkt des Werkzeugs, der so genannten Wirkstelle, ein Maß für die Genauigkeit der Bearbeitung darstellt.

Der Entwurf und die Konstruktion einer PKM-Maschine mit definiertem Arbeitsraum und vorgegebenen Leistungskenngrößen erfordert einen iterativen Prozess. Ausgehend von einer intuitiv vorgeschlagenen Anfangsstruktur sind der erreichbare Arbeitsraum beziehungsweise das Maschinenverhalten und die Maschinenfähigkeiten unter Berücksichtigung der Leistungskenndaten zu berechnen. Die Maschineneigenschaften sind im iterativen Prozess für jede modifizierte Struktur erneut zu berechnen. Eine sorgfältige Analyse der Wechselwirkung zwischen konstruktiven Änderungen und dem jeweiligen Maschinenverhalten versteht sich dabei von selbst.

Der beschriebene Auslegungs- und Konstruktionsprozess bedarf ohne Frage einer Rechnerunterstützung und eines nützlichen Tools. Im IfW wird derzeit ein Modell für eine rechnerunterstützte dynamisch optimierte Auslegung von PKM-Werkzeugmaschinen entwickelt. Das Modell selbst basiert wiederum auf der Mehrkörper-System-Formulierung. Damit das Modell für jede beliebige PKM-Struktur anwendbar ist, wurde eine parametrische Beschreibung für eine schnelle und eindeutige Bestimmung von Hexapod-Werkzeugmaschinen unterschiedlicher Bauart generiert.

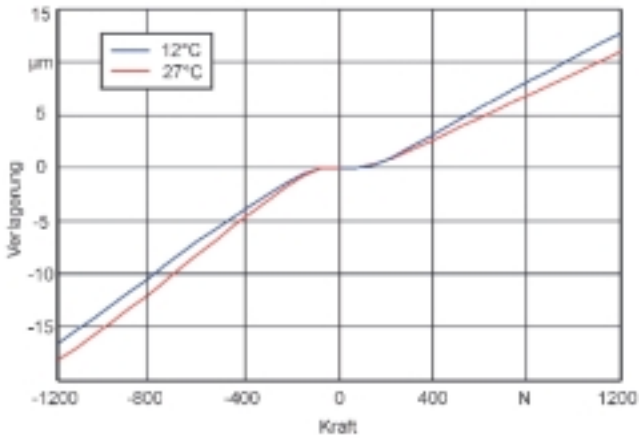


Abb. 18: Kraft-Verlagerungs-Diagramm eines Kardangelenkes in Abhängigkeit der Temperatur.

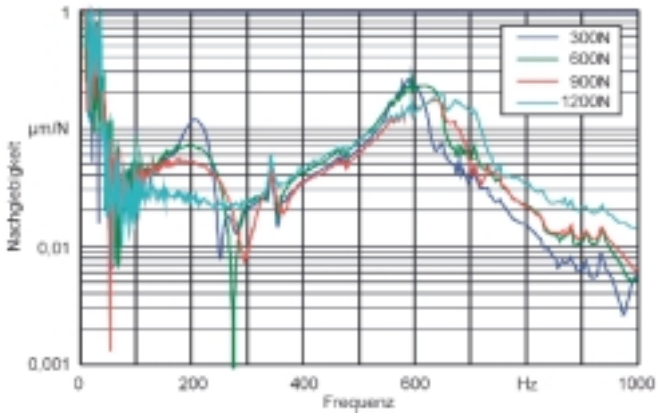


Abb. 19: Einfluss verschiedener Zugvorspannkräfte auf die dynamische Nachgiebigkeit des Kugelgelenkes bei 14° Celsius.

Die mathematische Bestimmung der TCP-Position im Arbeitsraum erfolgt allgemein mittels zweier kartesischer Koordinatensysteme [15]. Das eine dient als absolutes System mit ortsfesten Koordinaten, daher kann es beliebig lokalisiert werden. Das andere dient als relatives System und ist am TCP der Spindel lokalisiert. Die bekannte Rückwärts-Transformation bietet eine lineare Formulierung für die Berechnung der zu einer TCP-Position der Maschine entsprechenden Strebenlänge. Diese Berechnung erfordert die Kenntnis der Position der absoluten Koordinaten aller Gelenke. Die Position der Gelenke am Gestell ist konstant und die absoluten Koordinaten der Gelenke an der Plattform können für jede Maschinenposition durch Umwandlung ihrer relativen Lokalisation bestimmt werden. Als Folge dieser Vorgehensweise ergibt sich, dass für die eindeutige Beschreibung einer PKM-Struktur in einer bestimmten Bauart ausschließlich die absoluten Koordinaten der ortsfesten Gelenke und die relativen Koordinaten der an der Spindel lokalisierten Gelenke notwendig sind.
Die Berechnung des Arbeitsraumes resultiert ausschließlich aus geometrischen Betrachtungen. Drei konstruktive Gegebenheiten begrenzen hierbei den erreichbaren Arbeitsraum: Der Verfahrweg der Antriebsstreben ist durch ein Maximum und Minimum begrenzt. Es muss daher überprüft werden, dass die erforderlichen Strebenlängen zum Erreichen jeder gewünschten Position im Arbeitsraum gegeben sind. Zum zweiten bildet der maximal mögliche Schwenkwinkel der Gelenke eine weitere Begrenzung. Realisierte Konstruktionslösungen zeigen, dass mit größer werdender Steifigkeit der Gelenke ihre maximal möglichen Schwenkwinkel geringer werden. Der dritte einschränkende Faktor bezieht sich auf die möglichen Kollisionen im Arbeitsraum. Für jede Maschinenposition muss daher geprüft werden, dass keine Kollisionen zwischen den Streben untereinander oder den Streben und der Hauptspindel der Maschine stattfinden.

Die Berücksichtigung der beschriebenen, einschränkenden Faktoren führt zu einem unregelmäßigen Arbeitsraum. Bereits kleine konstruktive Veränderungen der Strebenanordnung können dabei große Auswirkungen auf die Gestalt des Arbeitsraumes haben. Eine Änderung der erforderlichen Schwenkwinkel der Stewart-Plattform beeinflusst zudem die Gestalt der erreichbaren Punkte im Arbeitsraum. In Abbildung 20 ist beispielhaft der berechnete Arbeitsraum einer Hexapod-Struktur für Schwenkwinkel $\theta = \varphi = 0°$ dargestellt.

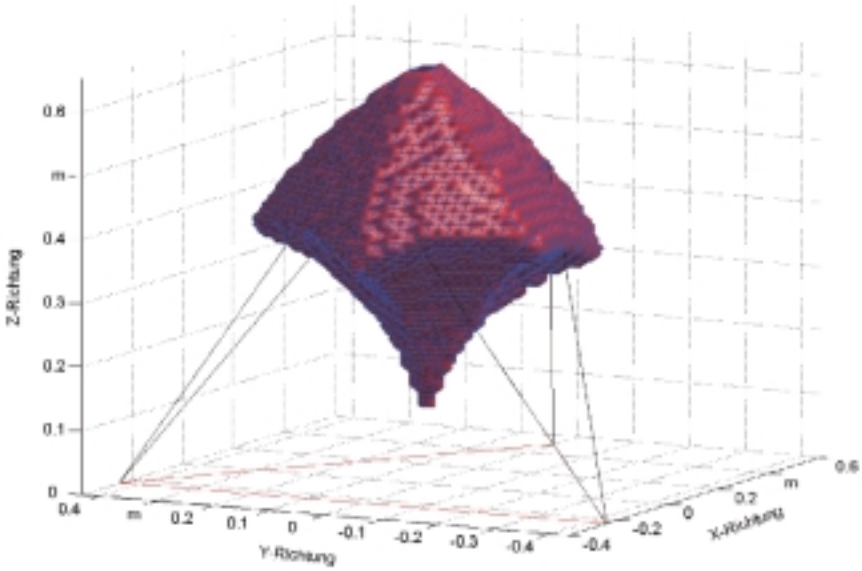


Abb. 20: Beispiel des Arbeitsraums einer PKM-Struktur für einen Schwenkwinkel $\theta = \varphi = 0°$.

Trends industrieller PKM-Werkzeugmaschinen

PKM-Werkzeugmaschinen befinden sich noch immer in einer Einführungsphase für industrielle Anwendungen. Die zuverlässig erreichbare Arbeitsgenauigkeit, die Dynamik und die Thermik der Maschinen sowie die Kalibrierbarkeit und Kompensationsmöglichkeit von Störeinflüssen sind Gegenstand der Diskussionen und eine anhaltende wissenschaftliche Herausforderung.

Dennoch sind von der Industrie in den letzten Jahren zunehmend realisierte Maschinen und zukunftsweisende Konzepte präsentiert worden. Mit Hybridlösungen, Tripod-Konfigurationen und Scherenkinematiken finden einige PKM-Maschinen bereits heute eine erfolgreiche kommerzielle Anwendung:

Die Tricept-Baureihe der Firma Neos Robotics mit den Typen TR 605, TR 805 und TR 845 stellt derzeit mit ca. 150 verkauften Systemen die am meisten industriell eingesetzte PKM-Werkzeugmaschine dar. Durch das direkte Messsystem im Bewegungsmodul kann eine Genauigkeit von zur Zeit 50 µm erreicht werden.

Die Dreiachs-Bearbeitungseinheit SKM 400 der Firma Starrag/Heckert ist ebenfalls ein Tripod-Typ, bei dem die Drehfreiheitsgrade durch eine zweite, patentierte Koppelkinematik gesperrt werden. Die Maschine ist mit keinem direkten Messsystem ausgerüstet, daher hängt die Arbeitsgenauigkeit unmittelbar von der Genauigkeit und dem Verhalten der Streben, Gelenke und Antriebe ab.

Eine weitere PKM-Werkzeugmaschine wird von der spanischen Firma Fatronik mit der „Ulyses" am Markt angeboten. Es handelt sich dabei um einen Tripod mit einer Sperrung der Freiheitsgrade mittels einer seitlichen Schwinge.

Der Aufbau mit dreiachsigen Glide-Strukturen bietet bestimmte Vorteile gegenüber den Streben mit veränderlicher Länge. Ein Beispiel dieser Konstruktionsart ist der „Triglide V100" der Firma INDEX. Vertikal ausgerichtete Führungen und Kugelgewindetriebe bilden ein Vertikaldrehzentrum mit stehendem Werkzeug und bewegtem Werkstück.

Hybridmechanismen bilden einen weiteren Ansatzpunkt für den industriellen Einsatz von PKM-Maschinen. Ein Beispiel eines Hybridkonzepts ist der „Z3"-Bearbeitungskopf der Firma DS-Technologie. Es handelt sich dabei um ein 3-Achs-Schwenkmodul für große Portalmaschinen zur Bearbeitung flächiger Strukturbauteile. Dieses Modul ist nur für Schwenk- und Zustellbewegungen in der z-Richtung ausgelegt. Die Bewegungen in x- und y-Richtung erfolgen durch zwei kartesische Maschinengrundachsen.
Als weitere interessante PKM-Maschinen sind der „Specht Xperimental" der Firma Hüller-Hille, die „HVS-5000" der Firma Honda Engineering, das High-Performance-Fertigungszentrum der Firma Chiron sowie die 5-Achs-Fräsmaschine P 800 der aus dem Fraunhoferinstitut in Chemnitz neu gegründeten Firma Metrom oder auch die von der Firma Reichenbacher als Oberfräse für die Holzbearbeitung entwickelte Maschine „Pegasus" zu nennen.

Literatur

[1] Gough, V.; Whitehall, S.: Universal Tyre Test Machine. IX Int. Techn. Congr. F.I.S.I.T.A. 1962, S. 123-145

[2] Stewart, D.: A Platform with Six Degrees of Freedom. Proc. Instn. Mech. Engrs. 1965-66, Vol. 180, S. 371-378

[3] Heisel, U.: Innovationen im Werkzeugmaschinenbau. In: Innovative Produktionstechnik/Krause, F.-L., Uhlmann, E. München; Wien: Hanser, 1998, S. 349 - 365

[4] Pritschow, G.; Laetitia, D.; Garber, T.: Aktuelle Erkenntnisse beim Einsatz von Stabkinematiken. In: ZWF, Carl Hanser Verlag, München, Jahrg. 94 (1999) 6, S. 316-319

[5] Heisel, U.; Hestermann, J.-O.; Böhler, H.; Plischke, N.; Thaysen, O.: Fünf-Seiten-Bearbeitung mit Parallelkinematik-Werkzeugmaschinen. In: VDI-Z 142 (2000), Nr. 6, S. 33 - 37

[6] Pritschow, G.: Neue Wege für Parallelkinematikkonzepte. In: Stuttgarter Impulse, Tagungsband zum Fertigungstechnischen Kolloquium Stuttgart, 26./27.09.2000, S. 97-114

[7] Heisel, U.; Ziegler, F.: Laserbearbeitung: Integration aller Komponenten in Demonstrator. In: Berichte des Industriekolloquiums SFB 349 vom 28.September 2000, Universität Stuttgart, 2000, S. 133 – 151

[8] Heisel, U.; Ziegler, F.: Sheet Metal Lightweight Design for Direct Driven Machine Tools. In: Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol. VII/1 (2000), S. 73 – 76.

[9] Heisel, U., Maier, W.: Investigation of Truss Structures as Light Weight Elements for Use in Parallel Kinematic Machines, Conference Proceedings of Parallel Kinematics Seminar 2002, 23-25.04.2002

[10] Koren, Y. et al.: Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Annals of CIRP, 48 (1999) 2, pp. 527-540

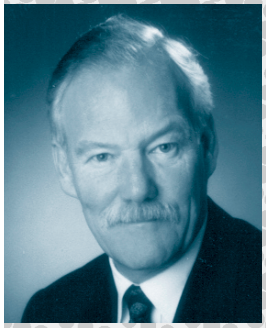
[11] Heisel, U.; Hund, A.: Thermisches Verhalten von Parallelkinematiken. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000) H. 10, S. 450-454

[12] Heisel, U.; Hestermann, J.-O.; Ziegler, F.: Genauigkeitsanforderungen an Hexapod-Maschinen und Untersuchungsergebnisse. In: wt- Werkstattstechnik (1998), Nr. 9/10, S. 408 - 412

[13] Heisel, U.; Schiehlen, W.; Dignath, F. Hempelmann, D.: Zwischenbericht zum DFG Forschungsvorhaben 1656/52-2, Grundlagenuntersuchung zum thermischen Einfluss auf das dynamische Verhalten von parallelen Kinematiken und zu Möglichkeiten der Optimierung; DFG Schwerpunktprojekt „Fertigungsmaschinen mit paralleler Kinematik" (2002)

[14] Heisel U.; Esteban I.: Zwischenbericht des DFG Forschungsvorhabens 1656/60-1: Entwicklung eines Modellierungstools für die dynamisch optimierte Auslegung von Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematiken (2002)

[15] Neugebauer R.; Kirchner J.: Mehrkriterielle Optimierung von Parallelkinematiken (2000), Berichte aus dem IWM Band 12



Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Uwe Heisel

wurde am 6. Juli 1945 in Brannenburg/Inn geboren. Er studierte Maschinenbau und Fertigungstechnik in Hamburg und Berlin, wo er 1974 sein Diplom erhielt. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin promovierte er bei Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Günter Spur mit einer Arbeit über die Kompensation thermischer Störeinflüsse an Werkzeugmaschinen im Jahre 1979. Ab 1980 war er bei der Firma Fritz Werner in Berlin verantwortlich für die Konstruktion und Entwicklung von Bearbeitungszentren. 1988 wurde er auf den Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart berufen und leitet seither das gleichnamige Institut. Uwe Heisel ist Mitglied unter anderem in der International Institution for Production Engineering Research (CIRP) und in der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP). Im Jahre 1993 wurde ihm die Ehrendoktorwürde von der Technischen Universität Klausenburg verliehen. 1994 bis 1996 war er Dekan der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität Stuttgart. An der Baotou University of Iron & Steel Technology wurde er 1999 mit der Würde eines Professors honris causa geehrt und im Jahr 2000 verlieh ihm die TU Sofia gemeinsam mit der TU Plovdiv eine weitere Ehrendoktorwürde. Prof. Heisel widmet sich heute in der

Forschung zahlreichen aktuellen Themen in der Zerspanungstechnologie von Metallen und Holzwerkstoffen. Außerdem beschäftigt er sich mit der Konstruktion und der methodischen Verbesserung sowie der maschinentechnischen Untersuchung und Optimierung von Werkzeugmaschinen in allen Bereichen der Statik, Dynamik, Thermik, Akustik, Sicherheit und Umweltverträglichkeit.

Dr.-Ing. Thomas Stehle

1962 in Reutlingen geboren, studierte Maschinenwesen an der Universität Stuttgart. Von 1989 bis 1992 war er im Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, wobei er sich im Schwerpunkt mit dem statischen, dynamischen und thermischen Verhalten von Werkzeugmaschinen sowie der Entwicklung und Durchführung von deren Abnahmeprüfungen beschäftigte. Seit 1992 nimmt Thomas Stehle die Aufgaben des Oberingenieurs im Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart wahr. In Vertretung des Institutsleiters obliegt ihm hierbei die Verantwortung für die Organisation und Koordination der Forschungsprojekte des Instituts. Er promovierte 1997 mit einer Dissertation zum Thema „Das thermische Verhalten von Werkzeugmaschinen – Neue Anwendungen und Berechnungsverfahren". Im Jahr 1999 wurde Dr. Stehle der Ehrentitel „Honorary Professor" durch die Technische Universität Klausenburg verliehen.

Dipl.-Ing. Walther Maier

absolvierte 1991 sein Maschinenbau Studium an der Universität Karlsruhe (TH). Nach Tätigkeiten in der Industrie und als Dozent an der Fachschule für Technik am Berufsförderungswerk in Schömberg kam der am 29. November 1962 in Heidenheim/Brenz geborene Walther Maier 1998 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an das Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den im vorliegenden Beitrag beschriebenen Themen. Unter anderem leitete er am Institut für drei Jahre das internationale Brite-Euram Projekt „SAM" und übernahm danach die Leitung der Forschungsgruppe „Maschinenkonstruktion".