10 Gestaltung, Dimensionierung, Analyse und Bewertung des Gesamtsystems

10.1 Beispiel: Flexible Automatisierung für die wirtschaftliche Bearbeitung von Holzformteilen mit Hexapoden

Mit dem hier beschriebenen Beispiel sollen neue Möglichkeiten für die Automatisierung und Sicherung von Wirtschaftlichkeit bei der Bearbeitung von Holzformteilen auf der Grundlage des „Hexapod einfacher Bauart – Felix“ aufgezeigt werden.

Ausgehend von – unter dem Aspekt der „Individualisierung der Produkte“ – veränderten Anforderungen und Randbedingungen der Fertigung, wird zunächst das relevante Teilespektrum mit zugehörigen Prozess- und Bewegungsanforderungen der Holzformbearbeitung charakterisiert. Anschließend wird der „Hexapod einfacher Bauart“ aufgrund seiner Eigenschaften als flexibel adaptier- und konfigurierbares, preiswertes Bewegungssystem für die wirtschaftliche Lösung von Bearbeitungsaufgaben an Holzformteilen beschrieben. Im Ergebnis werden in den nachfolgenden Kapiteln für drei der vorangehend definierte Teilegruppen Adaptionen bzw. Konfigurationen des Hexapod einfacher Bauart als wirtschaftliche Lösungsmöglichkeiten detailliert vorgestellt und die dabei wesentlichen Problemstellungen der Automatisierung angesprochen.

10.1.1 Charakteristik von Teilespektrum und Hexapod einfacher Bauart

Neue Aspekte zu den Anforderungen und Randbedingungen bei der Bearbeitung von Holzformteilen

Von den aktuellen Trends der Produktionstechnik sind es insbesondere zwei Entwicklungslinien, die sich im Umfeld der Bearbeitung von Holzformteilen schneiden.

Zum einen ist dies die in der Produktionstechnik an Bedeutung gewinnende Individualisierung der Produkte, zum anderen die umweltpolitisch positiv belegte Hinwendung zu nachwachsenden Rohstoffen. Beide Aspekte generieren, insbesondere in ihrer Schnittmenge, neue Anforderungen und Randbedingungen für die wirtschaftliche Bearbeitung von Holzformteilen. Die produktionstechnischen Herausforderungen bestehen vor allem in der Sicherung der Wirtschaftlichkeit für kleine Serien bis zur Stückzahl 1, in der Erarbeitung von Technologien, die die Wertbildung der Produkte über spezifische Design- und Werkstoffeigenheiten ermöglichen sowie in der industriellen Stützung individueller handwerklicher oder künstlerischer Merkmale. Die sich unter diesen Bedingungen unter dem Blickwinkel der Holzbearbeitung ergebenden Aufgaben beziehen sich insbesondere auf die Beherrschung und Beeinflussung des Materials, die Erschließung neuer Anwendungsfelder sowie die Erfüllung der dabei entstehenden Bearbeitungsansprüche.

Die mit den vorangehend charakterisierten Anforderungen und Randbedingungen angesprochenen fertigungsorganisatorischen Strukturen befinden sich im Grenzbereich

zwischen Industrie und Handwerk. Damit sind entsprechende wirtschaftliche Lösungen hinsichtlich Organisation, Technologie und Maschinentechnik für beide Bereiche interessant.

Charakteristik des relevanten Teilespektrums mit den zugehörigen Bearbeitungs- und Bewegungsanforderungen

Unabhängig von Anwendungs-, Funktions-, Gestaltungs-, Abmessungs-, Form- und sonstigen Besonderheiten gilt für alle hier betrachteten Teile, dass sie

- eine eher geringe Wiederholrate (1...100) besitzen,
- vielfach Formen der Variantenfertigung vorherrschen,
- relativ geringe Bearbeitungszeiten auftreten,
- eine geringe Anzahl unterschiedlicher Werkzeuge (1...6) eingesetzt wird,
- Mehrachsbearbeitung (3...5) erforderlich ist und
- Komplettbearbeitung in einer Maschine gewünscht wird.

Derartige Holzformteile treten in unterschiedlichen Branchen der Holzbearbeitung mit verschiedenartigen Bearbeitungs- und Bewegungsanforderungen auf. Sie lassen sich unter den dominierenden Gesichtspunkten der typischen Grundform und umhüllenden Abmessungen grob in die folgend beschriebenen Teileklassen einordnen.

In der Bauelementefertigung, dem Modellbau und der Bildnerischen Kunst sind es vor allem große räumlich ausgedehnte Teile mit Formelementen, wie beispielsweise Holzbauelemente, Gießereimodelle, Fahrzeugmodelle, Skulpturen, usw., mit Abmessungen die von $1m\ x\ 1m\ x\ o,5m$ bis zu $5m\ x\ 2{,}5m\ x\ 1{,}5m$ und darüber hinaus reichen und anspruchsvolle Formelemente bis zu Freiformflächen tragen.

Für die Stilmöbelherstellung, den Musikinstrumentenbau und den Innenausbau sind vorwiegend plattenförmige Teile mit Formelementen typisch, wie beispielsweise Möbelfronten, Gehäuseteile, Türen, Fenster, Treppenelemente, usw., mit Abmessungen die von $0{,}5m\ x\ 0{,}3m\ x\ 0{,}05m$ bis zu ca. $3m\ x\ 2m\ x 0{,}2m$ reichen und vielfältige Formelemente, wie Nuten, Konturen, Profile, „Schnitzreliefs“ und ähnliches aufweisen.

In der Sitzmöbelindustrie, dem Flugzeugbau und dem Automobilbau sind es hauptsächlich mehrfach gekrümmte Freiformteile mittlerer Größe, wie beispielsweise Polstermöbelteile, Sitzschalen, Verkleidungselemente, usw., mit Abmessungen die von $0{,}3m\ x\ 0{,}2m\ x\ 0{,}1m$ bis zu etwa $1{,}5m\ x\ 0{,}8m\ x\ 0{,}5m$ reichen und neben anspruchsvollen Oberflächenformen, Krümmungen und Konturen sowie verschiedenartigste Nebenformelemente besitzen können.

Schließlich sind es in Volkskunst und Handwerk sowie der Spielzeugherstellung vor allem kompakte Freiformteile kleiner Abmessungen, wie beispielsweise Schmuck, Figuren, Griffe, Bedienelemente, Spielzeugteile usw., mit Abmessungen die von $0{,}05m\ x\ 0{,}05m\ x\ 0{,}05m$ bis zu ca. $0{,}4m\ x\ 0{,}4m\ x\ 0{,}4m$ reichen und verschiedenartige Formelemente von Bohrungen und Taschen über Regel- bis zu Freiformflächen enthalten können.

Bild 10.1 zeigt für die handwerkliche bis industrielle Bearbeitung derartiger Teile, d.h. für Bohren, Sägen sowie Profil- und Oberfräsen typische Technologieparameter. Demnach ergeben sich maschinentechnische Forderungen nach Hauptspindeldrehzahlen von 1/min $500 \ldots 36000\ min^{-1}$ und Vorschubgeschwindigkeiten von $0{,}5 \ldots 150\ m/min$. Die Bearbeitung der vorangehend charakterisierten Teileklassen erfolgt aufgrund der Bewegungsanforderungen und notwendigen Arbeitsräume vorwiegend auf investitionsaufwändigen 3- bis 5-Achs-Portal- bzw. Sondermaschinen. Diese Maschinen

besitzen neben ihrem hohen Preis im Allgemeinen eine sehr geringe Flexibilität, was unter der Zielstellung wirtschaftlicher Fertigung im Widerspruch zu kleinen Stückzahlen und großer Formen- und Abmessungsvarianz steht. Daher sollen folgend maschinentechnische und in deren Konsequenz letztlich technologische Alternativen für eine wirtschaftliche Bearbeitung des angesprochenen Spektrums von Holzformteilen aufgezeigt werden.

handwerklich bis industriell	D_W mm	z -	n 1/min	v_c m/s	v_f m/min
Sägen	100 – 600	10 – 120	2000 – 6000	– 120	2 – 150
Profilfräsen	100 – 500	2 – 6	5000 – 8000	40 – 110	5 – 50
Oberfräsen	10 – 100	1 – 4	5000 – 36000	5 – 15	2 – 50
Bohren	3 – 20	1 - 3	500 – 5000		0,5 – 15

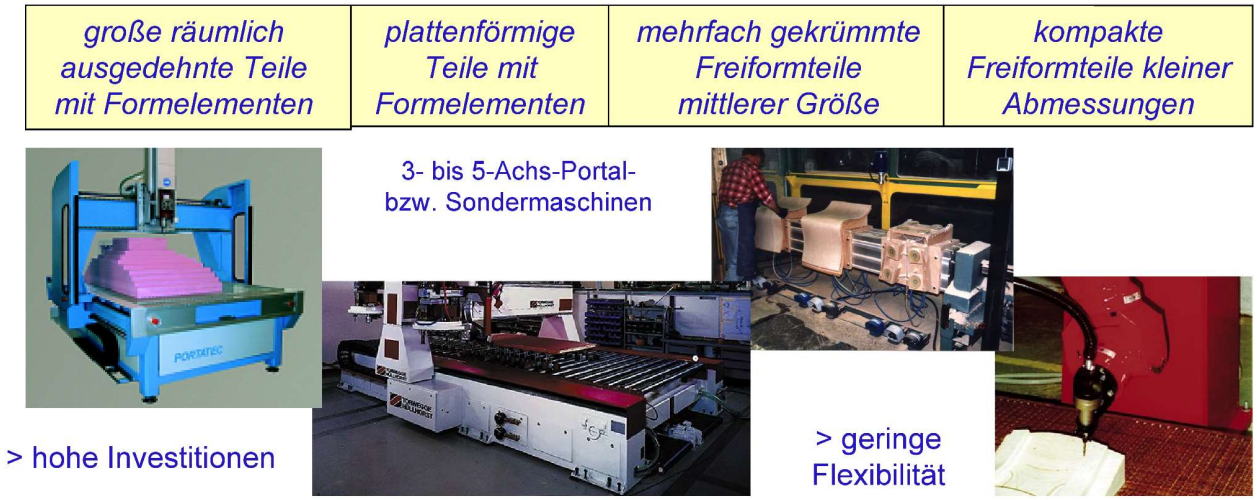


Bild 10.1 Typische Technologieparameter der Holzbearbeitung

Charakteristik des Hexapod einfacher Bauart

Da die maschinentechnische Basis der zu entwickelnden technologischen Alternativen als Bewegungssystem den „Hexapod einfacher Bauart“ nutzt, sei dieser hier zunächst kurz charakterisiert.

Als Hexapod wird eine Parallelkinematik mit 6 längenveränderlichen Stabachsen bezeichnet. Parallelkinematiken besitzen gegenüber seriellen Kinematiken prinzipbedingt das Potenzial zur Realisierung höherer Bewegungsdynamik durch die Minimierung der bewegten Masse und die Parallelisierung der Antriebskräfte.

Während die Vorteile konventioneller Werkzeugmaschinen mit serieller Kinematik in den ausgereiften Komponenten und Systemlösungen einer 150jährigen Entwicklungszeit – verbunden mit umfassender Anwendungserfahrung und –akzeptanz – liegen, resultieren ihre Nachteile aus dem Strukturkonzept, welches dazu führt, dass „ein Antrieb den anderen trägt“ und die Bewegungsgenauigkeit vor allem vom Führungs- und Gestellsystem bestimmt wird, was letztlich auch zu geringer Flexibilität bei hohem Preis führt.

Die möglichen Vorteile der Parallelkinematiken ergeben sich unmittelbar aus der Umkehrung der Nachteile serieller Kinematiken. Allerdings erweisen sich auch die Vorteile serieller Maschinen als Nachteile von Parallelkinematik-Maschinen.

Der Lösungsraum für die prinzipiell möglichen Ausführungen paralleler Kinematiken ist ungleich größer als bei seriellen Strukturen. Dies bietet zwar einerseits vielfältige Lösungsmöglichkeiten, macht aber andererseits eine aufgabenbezogene Optimierung zwingend erforderlich, wie die Erfahrungen an vielen Prototypen der Fertigungstechnik zeigen. Die Auswertung der bisher vorliegenden Anwendungen von Parallelkinematiken als Werkzeugmaschinen zur Metallbearbeitung zeigen eine deutliche Orientierung auf Zielstellungen im Hochgeschwindigkeits- und Hochgenauigkeitsbereich. Dabei ist es jedoch bislang nicht gelungen, überzeugende Kosten- oder Leistungsvorteile nachzuweisen.

Die Holzbearbeitung auf parallelkinematischen Maschinen ist seit Mitte der 90er Jahre Gegenstand von Anwendungsforschung und industriellem Engagement. Die dabei verfolgten Ziele orientierten bislang vorwiegend auf die Hochleistungsbearbeitung plattenförmiger Teile und weniger auf das vorangehend charakterisierte Spektrum der Holzformteile. Für die Bearbeitung derartiger Teile soll folgend das Konzept der Parallelkinematik einfacher Bauart als Hexapod vorgestellt werden, für den Einsatzgebiete denkbar sind, die nicht vordergründig auf „Ablösung“ oder „Verdrängung“ orientieren, sondern neue Anwendungen wirtschaftlich erschließen helfen.

Bild 10.2 markiert qualitativ die Parallelkinematik einfacher Bauart in dem Feld, welches einerseits von den auf die Bearbeitungsqualität bezogenen Leistungsgrößen und andererseits von den auf die Aufwendungen bezogenen Baugrößen aufgespannt wird, als zwischen konventioneller Werkzeugmaschine und Universalroboter liegend.

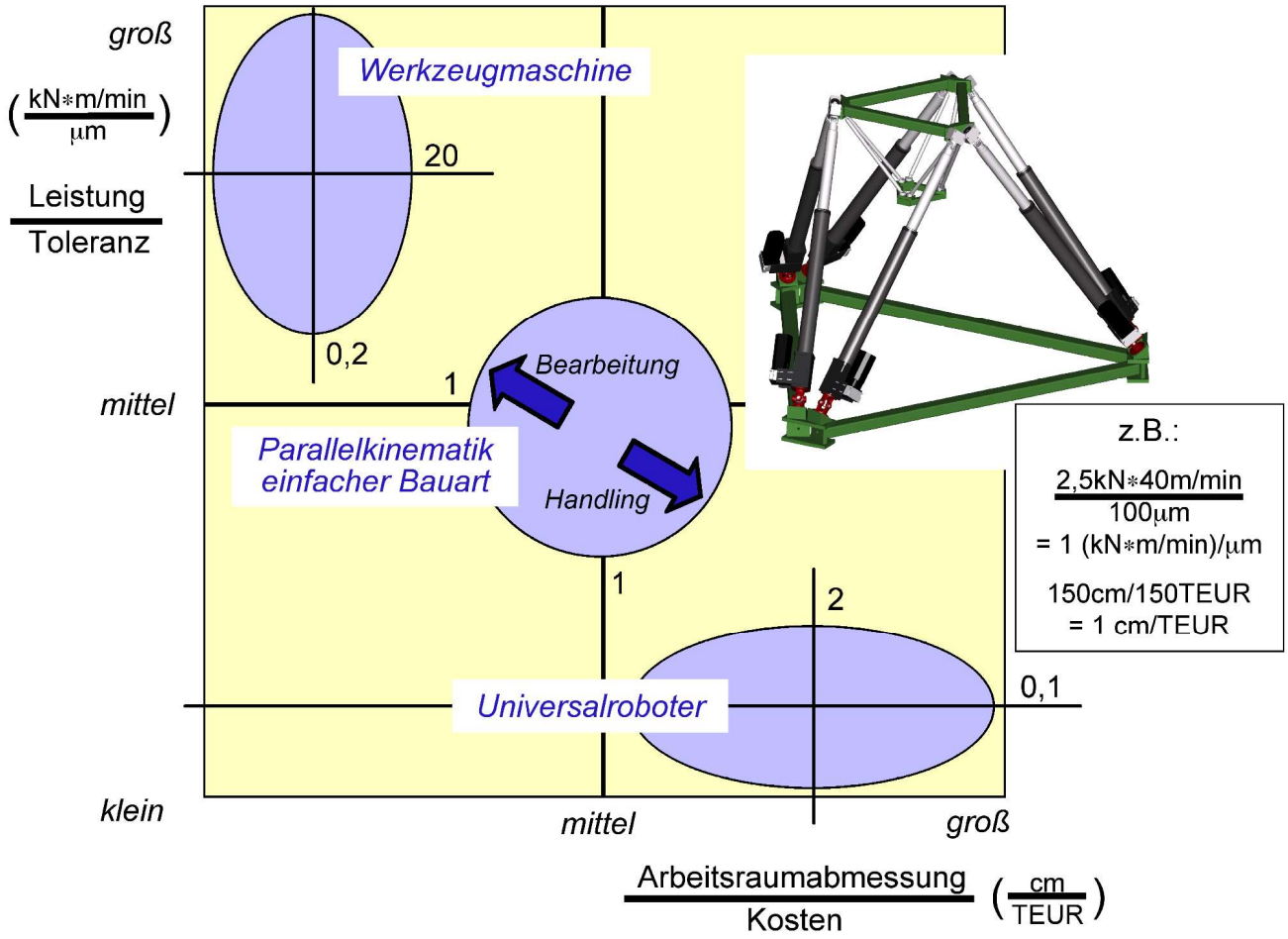


Bild 10.2 Einordnung des Hexapod einfacher Bauart

Der im weiteren zugrunde zu legende Hexapod einfacher Bauart sei demnach wie folgt charakterisiert:

- als Bewegungseinrichtung für eine Klasse von Fertigungsaufgaben mit Bewegungsanforderungen in bis zu 6 Freiheitsgraden unter mittleren Anforderungen an Belastung, Geschwindigkeit und Genauigkeit,
- als realisierbar zu einem geringen Preis durch einfache und robuste mechanische Lösungen unter weitgehender Verwendung kostengünstiger Standardkomponenten sowie
- als in hohem Maße strukturell flexibel und technologisch anpassungsfähig.
- Die wesentlichen konstruktiv-gestalterischen Merkmale des am Institut für Werkzeugmaschinen der TU Dresden entwickelten Hexapod einfacher Bauart „Felix“ sind in Bild 10.3 veranschaulicht und speziell kennzeichnet durch:
    - den Einsatz üblicher Standardkomponenten - wie Profile und Rohre,
    - die Orientierung auf konsequent funktionelle Lösungen – wie einfachste Schraubverbindungen und geringste Fertigungsanforderungen für die Einzelteile,
    - die Verwendung handelsüblicher Kardangelenke aus der Massenfertigung,
    - die Beschränkung auf indirekte rotatorische Messsysteme sowie
    - die Ausführung der Stabachsen mit Kugelgewindetrieben ohne die üblicher Weise erforderlichen zusätzlichen Rotationslager um die Stablängsachsen und Längsführungen der Muttern, durch Ausnutzung des Mutter-Spindel-Kontaktes sowohl als Längsführung als auch Drehfreiheitsgrad.

Die Folge davon ist zwar einerseits die angestrebte äußerst preiswerte Realisierbarkeit einer Bewegungseinrichtung mit breitem Einsatzpotenzial für Bearbeitung und Handling, andererseits jedoch eine damit vorliegende schlechtere Grundgenauigkeit. Die aus dieser Konsequenz resultierende Aufgabe besteht in der Suche nach wirtschaftlichen Lösungen zur Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit, die letztlich nur in einer steuerungsintegrierten und modellgestützten Korrektur der entsprechenden fertigungsrelevanten Eigenschaften gefunden werden können.

Der geringe Aufwand zur Realisierung des Bewegungssystems ist nur eine Seite des auf überzeugende Wirtschaftlichkeit zielenden Gesamtkonzeptes „Einfach-Hexapod“. Die – auf die Anwendungsmöglichkeiten gerichtete – andere Seite der Wirtschaftlichkeitsorientierung stützt sich auf die Realisierung hoher Flexibilität, Adaptier- und Konfigurierbarkeit. Die Möglichkeiten dafür ergeben sich aus dem im Bild 10.4 schematisch demonstrierten geometrisch-kinematischen Grundkonzept, welches je eine Ebene für die Hand- und Schultergelenke vorsieht, wobei diese Gelenkebenen die Struktur begrenzen.

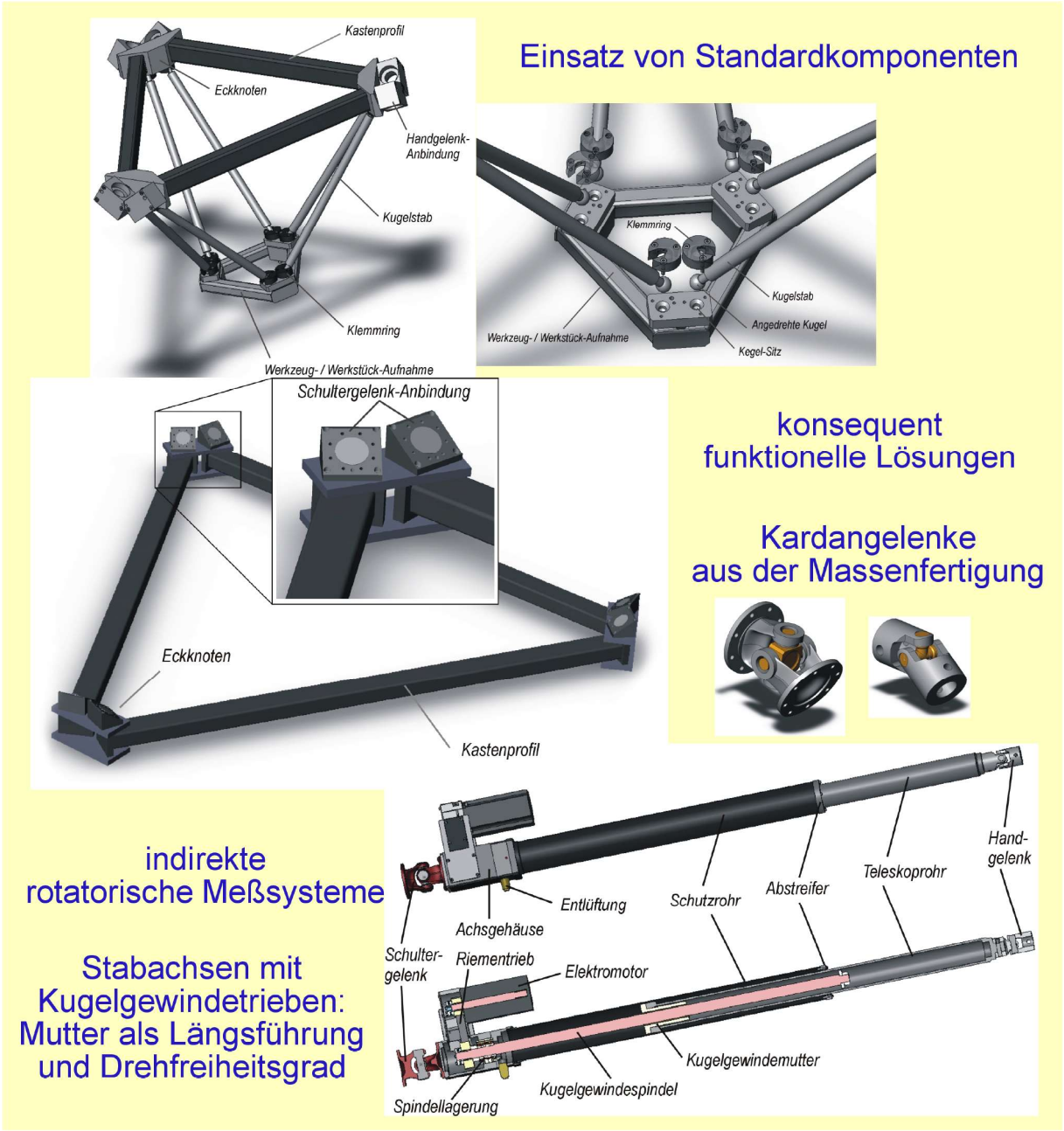


Bild 10.3 Konstruktiv-gestalterischen Merkmale des Hexapod einfacher Bauart

Damit können

- über die Variationen der Basislage Befestigungen am Boden, an der Wand oder der Decke realisiert werden,
- über die Dimensionierung der geometrischen Grundparameter Anpassungen des Bewegungsraumes und der Steifigkeitsverteilung an die technologischen Forderungen vorgenommen werden,
- über die Wahl der Werkstück-Werkzeug-Zuordnung zur Bewegungs- oder Basisplattform optimale Prozesskonfigurationen bis zur Verknüpfung von Handling und Bearbeitung realisiert werden und
- über die Integration von Zusatzachsen das Bewegungsvermögen spezifisch erweitert werden.

Zusammenfassend kann der Hexapod einfacher Bauart demnach als universelle Bewegungseinrichtung mit dem Potenzial für äußerst wirtschaftliche Lösungsmöglichkeiten in einem breiten Anwendungsspektrum bezeichnet werden.

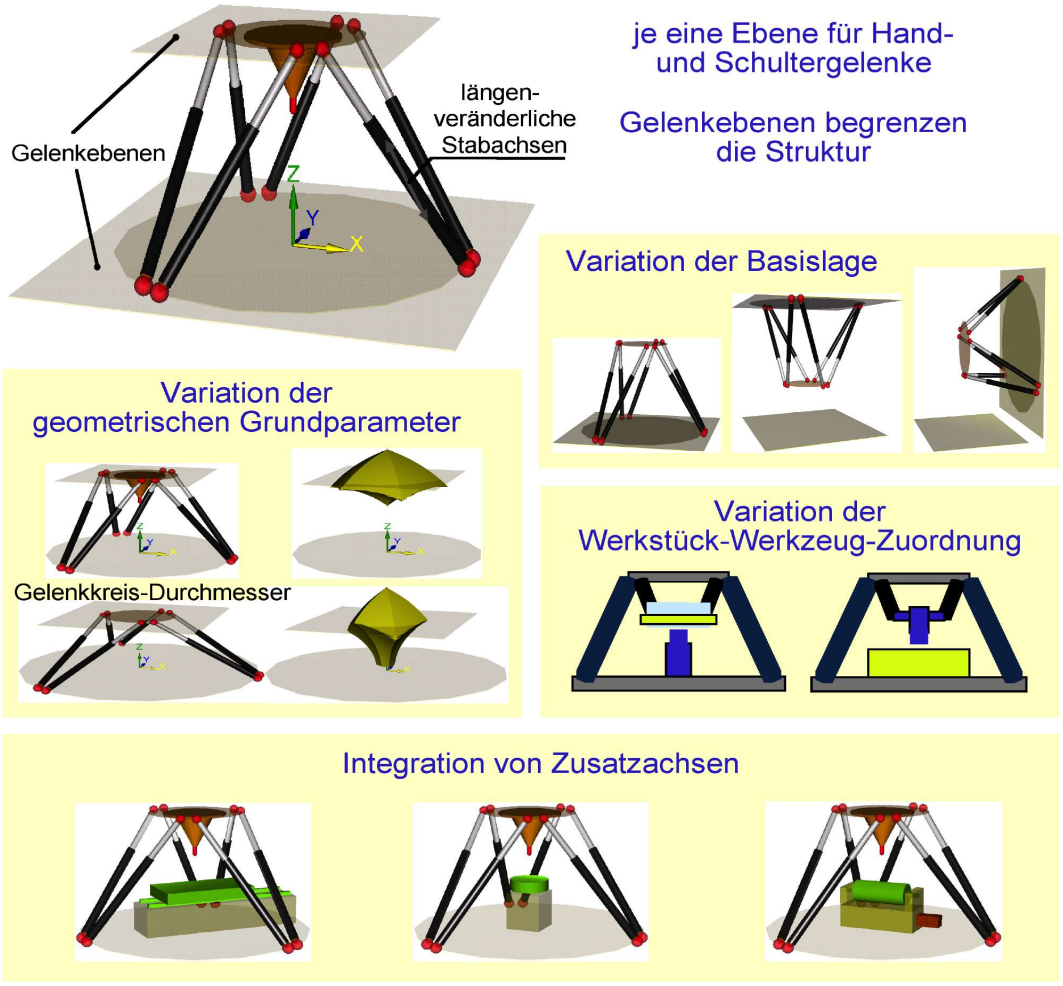


Bild 10.4 Geometrisch-kinematischen Grundkonzept des Hexapod einfacher Bauart

Ansätze für wirtschaftliche Lösungsmöglichkeiten

Die wesentlichen Ansatzpunkte zur Realisierung wirtschaftlicher Bearbeitungsmöglichkeiten auf der Grundlage von Hexapoden einfacher Bauart bestehen - für das vorangehend charakterisierte Spektrum von Holzformteilen – in:

- der Anpassung und Skalierung des Arbeitsraumes,
- der Verknüpfung von Handling und Bearbeitung,
- der Komplettbearbeitung ohne zusätzliche Werkzeug-Wechseleinrichtungen,
- der intelligenten Nutzung des Potenzials von 6 Freiheitsgraden,
- der Flexibilität und Konfigurierbarkeit der Werkstück-Werkzeug-Zuordnung sowie schließlich
- der Adaptierbarkeit bis zur Mobilität.

Die mit der praktisch anwendungsseitigen Umsetzung der genannten Ansätze verbundenen Problemstellungen erfordern die Erfüllung völlig neuer steuerungstechnischer Ansprüche, beispielsweise bei der Bahnplanung für räumlich bewegte Werkstücke, bei der Sicherung der

Kolissionsfreiheit unter den Bedingungen flexibler Arbeitsraumkonfigurationen, beim Umgang mit beliebig wechselnden, räumlich positionierten und orientierten Werkzeug- und Werkstücklagen, u.a.m. Diesen Ansprüchen muss nicht nur durch geeignete Steuerungsfunktionalitäten bzw. -algorithmen - wie z.B. Referenzierungen und Transformationen - Rechnung getragen werden, sondern auch durch die steuerungsseitige Stützung praktikabler und möglichst komfortabler Abläufe und Funktionalitäten der Bedienoberflächen. Das heißt letztlich, dass die strukturelle Flexibilität und Konfigurierbarkeit nur in Verbindung mit der umfassenden Entsprechung und Stützung durch Eigenschaften, Aufbau und Funktionalität der Steuerung praktikable anwendungstechnische Nutzung erfahren kann. Werden die oben definierten vier Teileklassen zugrunde gelegt und mit der Entscheidung für die Werkzeug- bzw. Werkstückbewegung verknüpft, so erhält man die in Bild 10.5 schematisch zugeordneten vier Grundkonfigurationen für Hexapoden einfacher Bauart.

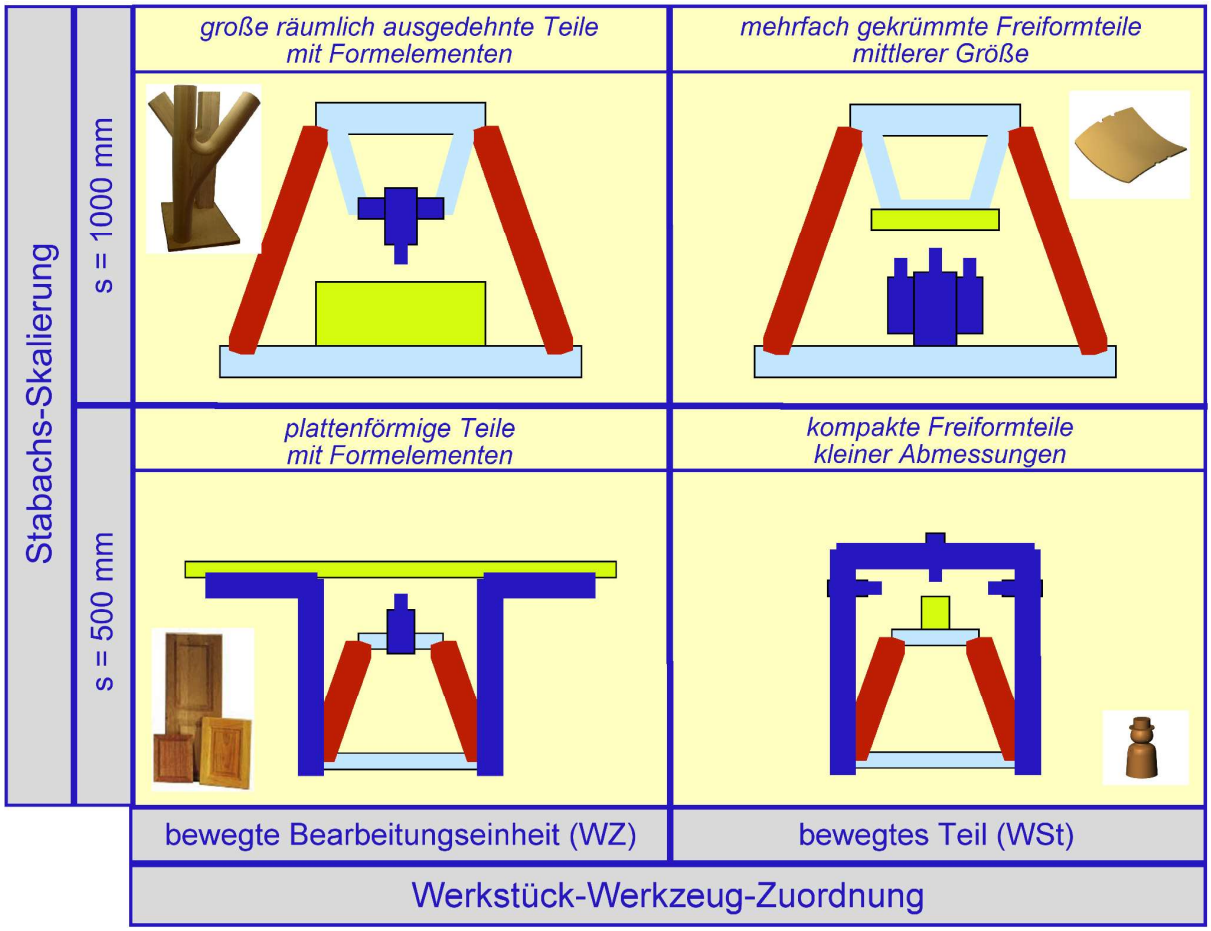


Bild 10.5 Grundkonfigurationen für Hexapoden zur Bearbeitung von Holzformteilen

Bild 10.6 zeigt die beiden Hexapoden einfacher Bauart mit den Stabachs-Verfahrlängen $s = 1000\,mm$ (links) und $s = 500\,mm$ (rechts), die als parallelkinematische Bewegungssysteme in den nachfolgenden Veröffentlichungsteilen die Realisierungsbasis für die praktisch umgesetzten Anwendungsbeispiele zur automatisierten Bearbeitung der Holzformteile entsprechend Bild 10.1 liefern.

Bild 10.6 Hexapoden einfacher Bauart mit $s = 1000\,mm$ (links) und $s = 500\,mm$ (rechts)

10.1.2 Parallelkinematisches Bearbeitungszentrum für Holzformteile

Bearbeitung mehrfach gekrümmter Freiformteile mittlerer Größe

Die hier angesprochene Teileklasse – interessant vorwiegend für die Sitzmöbelindustrie sowie den Flugzeug- und Automobilbau – besitzt umhüllende Abmessungen, deren größte Häufigkeit bei etwa $0{,}5m\ x\ 0{,}5m\ x\ 0{,}3m$ liegt und neben anspruchsvollen Oberflächenformen durch Krümmungen und Konturen sowie verschiedenartigste Nebenformelemente gekennzeichnet ist. Bild 10.7 zeigt derartige Furnierholzteile eines Sitzmöbel-Herstellers.

Bild 10.7 Typisches Teilesortiment (Quelle: Becker KG)

Die spanende Bearbeitung (Fräsen, Bohren) dieser Teile erfolgt üblicherweise mit Technologien, die manuelles Teilehandling (Entstapeln, Ausrichten, Aufspannen,

Abspannen, Abstapeln) mit dem Einsatz von NC-Mehrachs-Sondermaschinen verbinden. Bild 10.8 zeigt eine derartige Situation manueller Beschickung. Der Werker entnimmt das Rohteil einem Stapel, richtet die auf dem Furnierholz während des Pressvorganges eingeprägte Markierung an einem Laserkreuz aus und bringt durch gezielte Schläge mit einem Gummihammer die in die werkstückspezifische Aufnahme integrierten Saugnäpfe für die Vakuumspannung zur erforderlichen Dichtung.

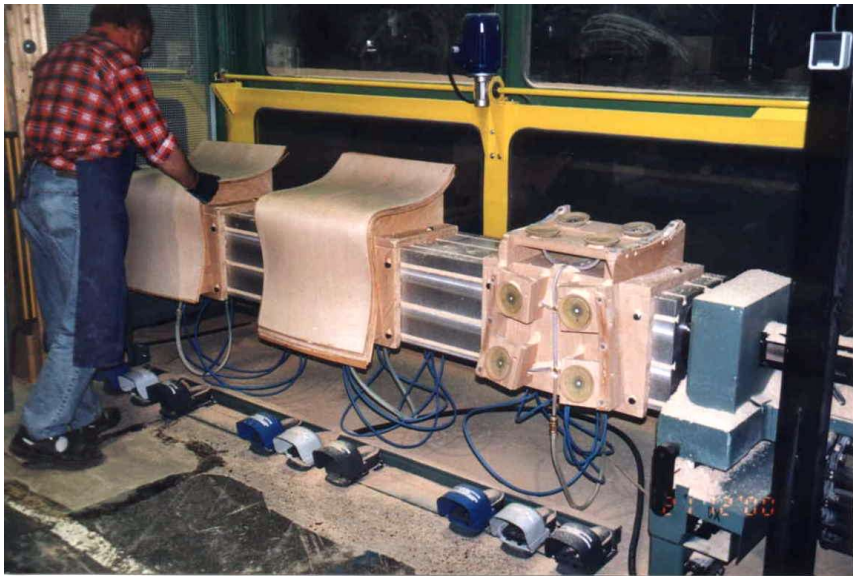


Bild 10.8 Manuelles Teilehandling an einer 4-Achs-3-Spindler-Sondermaschine (Quelle: Becker KG)

Solche produktiven, investitions- und personalaufwändigen Lösungen fordern für ihre Wirtschaftlichkeit hinreichend große Serienstückzahlen. Mit zunehmender Varianz bei sinkenden Losgrößen stellt sich die Frage nach Alternativen für größere Flexibilität.

Bei Einsatz eines Hexapoden einfacher Bauart als Bewegungsbasis für die Bearbeitung der genannten Teileklasse sind verschiedene Arbeitsraumkonfigurationen möglich. Erfolgt die Bearbeitung mit bewegtem Teil und feststehenden, werkzeugtragenden Spindeln, bietet sich die Verknüpfung von Handling und Bearbeitung an. Bei nicht zu großer Werkzeuganzahl kann damit außerdem eine Komplettbearbeitung ohne Werkzeug-Wechselvorgänge realisiert werden.

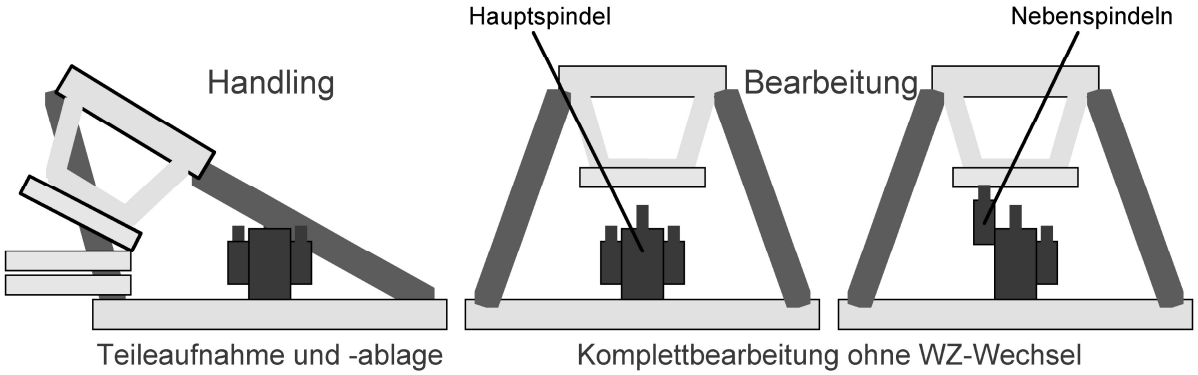


Bild 10.9 Werkstückhandling und Komplettbearbeitung mit einem Bewegungssystem

Bild 10.9 demonstriert schematisch ein derartiges Konzept. Die Bewegungseinrichtung ermöglicht sowohl die Vereinzelung der Teile vom Stapel, ihre sichere Spannung und Zuführung in den Arbeitsraum sowie die spätere Teileablage, als auch die Bearbeitung mit mehreren Werkzeugen durch Haupt- und Nebenspindeln, welche die entsprechenden Werkzeuge tragen, um die das Teil zur Bearbeitung bewegt wird.

Bearbeitungsbeispiel Sitzschale

Die konkrete Umsetzung des im Bild 10.9 schematisch dargestellten Konzeptes zu einem Parallelkinematischen Bearbeitungszentrum soll folgend am Beispiel der Bearbeitung einer Sitzschale demonstriert werden. Bild 10.10 zeigt dazu die auf der Transportpalette gestapelten Furnierholz-Rohlinge, wie sie von der Presse zur spanenden Bearbeitung angeliefert werden sowie ein durch Konturfräsen und Bohren hergestelltes Fertigteil der Sitzschale.

Bild 10.10 Gestapelte Furnierholz-Rohlinge (links) und Fertigteil (rechts) der Sitzschale

Als zentrale Herausforderungen bei der Automatisierung von Handling und Bearbeitung der Sitzschale erwiesen sich das Ausrichten der Rohlinge, das heißt die Referenzierung des Werkstück-Koordinatensystems und das Aufspannen der Rohlinge, das heißt die Gewährleistung einer sicheren Werkstückspannung, beides Aufgaben, die bislang manuell realisiert wurden.

Ausrichten der Rohlinge

Das Ziel des Ausrichtens besteht in der Herstellung einer definierten und damit bekannten Lage des Werkstückbezugssystems – hier mit der gepressten Form verkörperlicht – zum Maschinen-Koordinatensystem, in welchem die Bewegungsvorgabe zur Konturerzeugung erfolgt. Üblicherweise kommen dafür folgende Möglichkeiten zur Anwendung:

Physische Referenzierung durch lagebestimmende Aufnahme der Werkstücke in entsprechenden Vorrichtungen mit bekanntem Bezug zum Koordinatensystem der Maschine oder

Manuelle Referenzierung in der Werkstückaufnahme durch Ausrichten der an den Werkstücken während der Formgebung eingebrachten Markierungen anhand von optisch auf die Werkstückoberfläche projizierten Sollpositionen, beispielsweise mittels eines

Laserkreuzes, welches selbst einen bekannten Bezug zum Maschinen-Koordinatensystem hat.

Die Rohlinge besitzen als Furnierholz-Pressteile eine in relativ groben Grenzen irreguläre, exemplarisch zufällige Berandung sowie keine Bezug liefernden Formelemente, wie Bohrungen, Nuten usw. Damit sind Methoden der physischen Referenzierung, wie beispielsweise die Verwendung von Anlage- oder Aufnahmeflächen oder -punkten bzw. -stiften, zentrierenden Spannelementen und Ähnliches ausgeschlossen.

Die entwickelte automatisierbare Lösung nutzt das in allen 6 Raumfreiheitsgraden gegebene Bewegungsvermögen der an der Hexapod-Plattform installierten Werkstückaufnahme für die Anpassung deren Lage an die der in groben Grenzen beliebig abgelegten Rohlinge in Verbindung mit einer optischen Lagebestimmung der Werkstückmarkierungen über ein ebenfalls an der Bewegungsplattform angebrachtes und damit in Bezug zum Koordinatensystem der Maschine stehendes Kamerasystem.

Bild 10.11 zeigt links die entsprechend realisierte Bewegungsplattform in einer Ansicht von unten mit der teilespezifischen Werkstückaufnahme (einschließlich dem noch zu beschreibenden Greif- und Spannsystem) und den beiden Kameras. Im rechten Bildteil ist ein Ausschnitt der Situation aufgenommen, wo die Bewegungsplattform mit den Kameras die Position zur Erfassung der Markierungspunkte des auf dem Rohling-Stapel liegenden Werkstücks einnimmt.

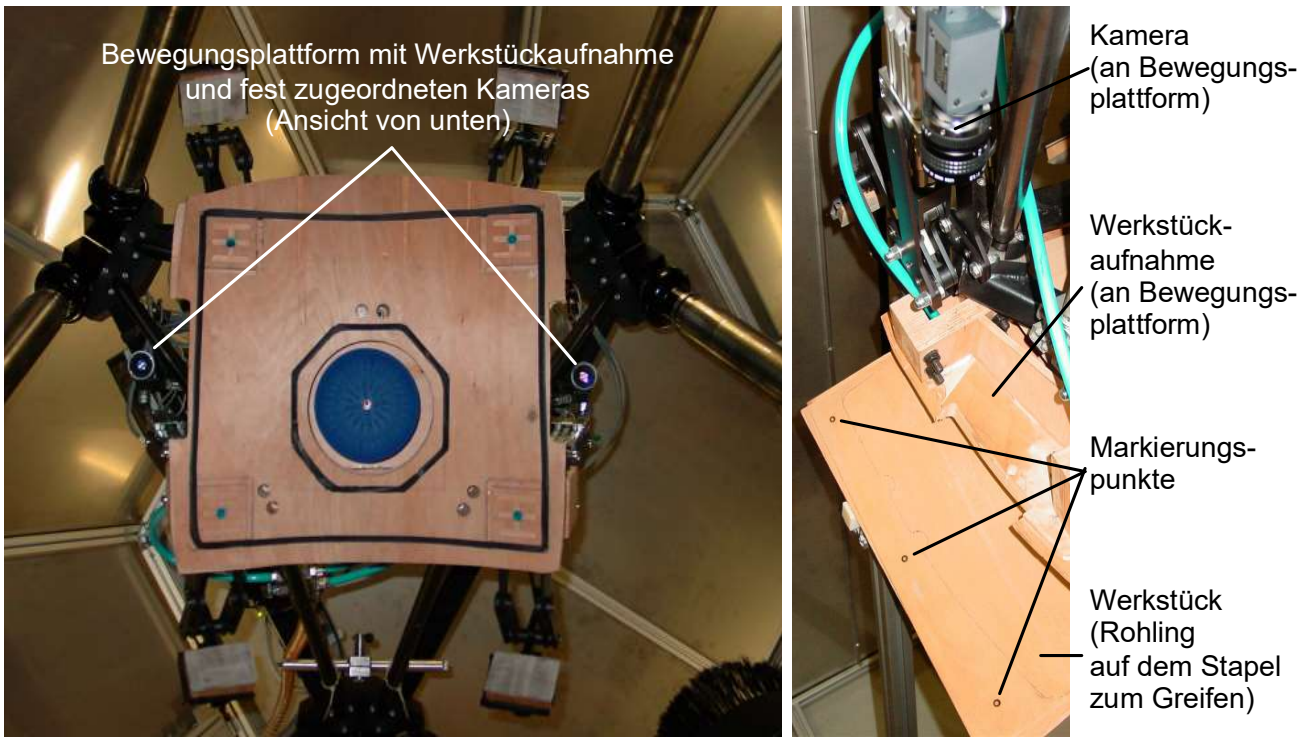


Bild 10.11 Bewegungsplattform mit Werkstückaufnahme, Greif- und Spannsystem sowie Kameras

Ausgehend von den bekannten Werkstück-Koordinaten der während des Formpressens in den Rohling eingebrachten Markierungspunkte (L)und deren mit den Kameras ermittelten Bildkoordinaten (L^*) lässt sich mit den ebenfalls bekannten Lagen und Orientierungen der

Kameras zur Bewegungsplattform sowie deren eigener Pose das Problem der Werkstück-Referenzierung über die folgende Beziehung lösen.

$$\{L_{ik}\}_W = [T_{MW}] * [T_{PM}] * [T_{CkP}] * [T_{ikCk}] * \{L_{ik}^*\}_{lk} \quad i = 1,2,3; \quad k = 1,2$$

Bekannte Größen:

- P Plattformkoordinatensystem
- M Maschinenkoordinatensystem
- C_k Kamerakoordinatensystem
- lk Bildkoordinatensystem
- L_{ik} Markierungspunkte
- W Werksstückkoordinatensystem

- Lage und Orientierung des Plattformkoordinatensystems (P) im Maschinenkoordinatensystem (M) (Ergebnis der kinematischen Maschinenkalibrierung): $[T_{PM}]$
- Lage und Orientierung des Kamerakoordinatensystems (C_k) im Plattformkoordinatensystem (P) (Ergebnis der Kalibrierung des Kameraaufbaues): $[T_{CkP}]$
- Lage des Bildkoordinatensystems (lk) - im Kamerakoordinatensystem (C_k) (Projektionszentrum): $[T_{ikCk}]$
- Lage der Markierungspunkte (L_{ik}) im Werkstückkoordinatensystem (W) (Ergebnis der werkzeugformgebundenen Einprägung beim Furnierpressen): $\{L_{ik}\}_W$

Gemessene Größen:

- Lage der Bildpunkte (L_{ik}^*) im Bildkoordinatensystem (lk) (Kamerabild der Markierungen): $\{L_{ik}^*\}_{lk}$

Gesuchte Größen:

- Lage und Orientierung des Werkstück- im Maschinenkoordinatensystem (Werkstück-Referenzierung): $[T_{MW}]$

Bild 10.12 veranschaulicht die einzelnen Größen und ihre Beziehung.

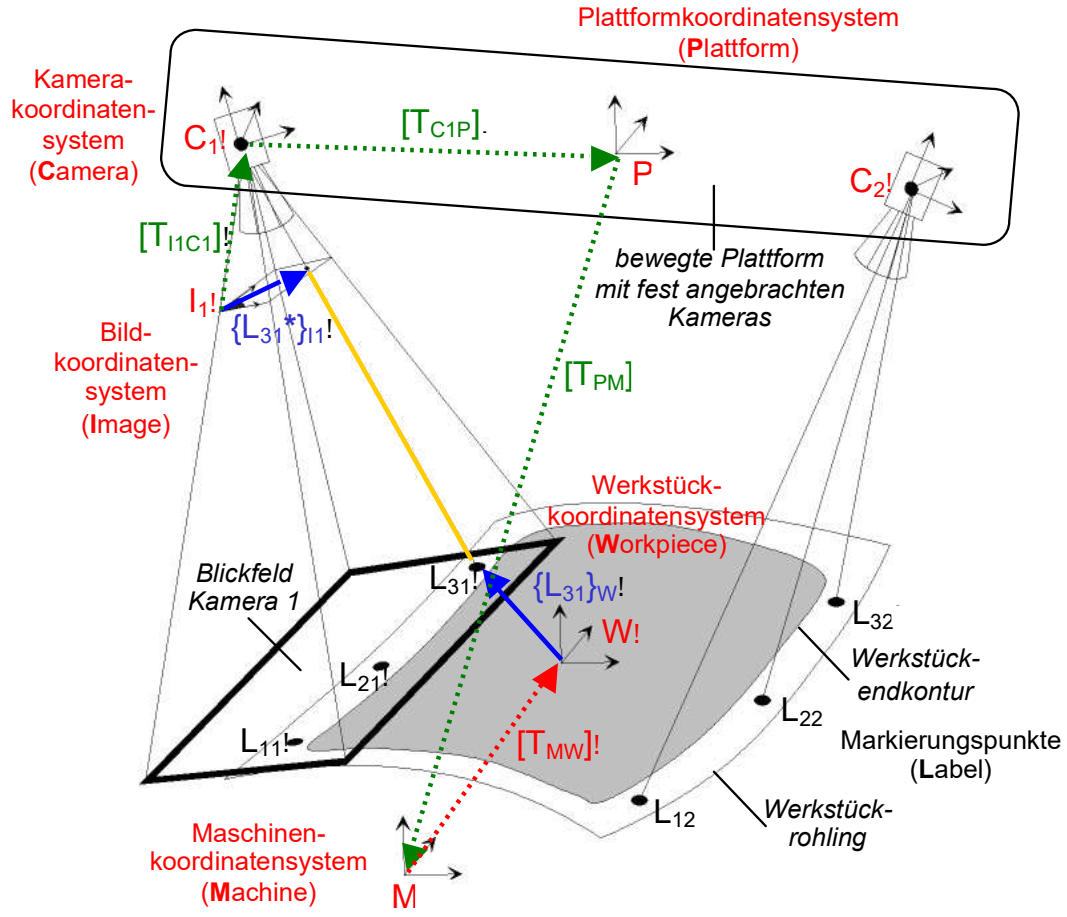


Bild 10.12 Schematische Darstellung der Grundlage zur optischen Werkstück-Referenzierung

10.1.3 Vereinzeln und Spannen der Rohlinge

Im Ergebnis der exemplarischen Werkstück-Lageerkennung und -Referenzierung wird für jeden im Stapel liegenden Rohling unter Ausnutzung aller 6 Freiheitsgrade der Bewegungsplattform die Werkstückaufnahme formgerecht über dem zu greifenden Teil platziert. Zum Vereinzeln greift dann ein – in die Werkstückaufnahme integrierter – Vakuumsauger den Rohling in der Spannlage vom Stapel.

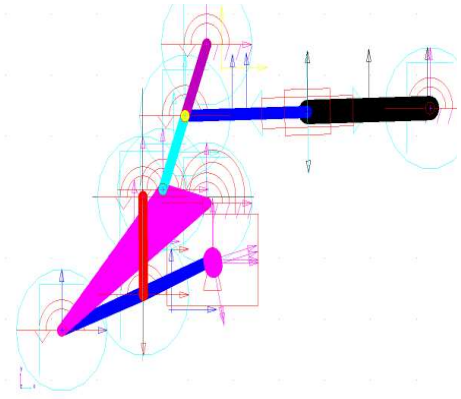


Bild 10.13 Kinematik des Spannelementes

Infolge der angestrebten Schnittkraftsteigerung beim Konturfräsen und einer dementsprechenden Spannkraft bis $2\,kN$ sowie deren Gewährleistung auch bei unzureichender Oberflächenqualität genügt die alleinige Spannung mit dem Vakuumsauger nicht mehr, zumal ein manuelles „Anklopfen“ der Dichtflächen ausscheidet. Eine damit erforderliche werkstückumgreifende mechanische Spannung versperrt jedoch zumindest abschnittsweise den Werkzeugeingriff an der

Bearbeitungskontur. Die Lösung des Problems bestand in der Entwicklung einer „intelligenten“ steuerungsintegrierten Spannvorrichtung, die dadurch gekennzeichnet ist, dass mehrere Spannelemente um die Werkstückaußenkante greifend den Rohling auf die Anlagefläche der Werkstückaufnahme drücken und während der Bearbeitung im Moment der jeweiligen Werkzeugpassage kurzzeitig geöffnet und aus dem Werkzeugeinriffsraum geschwenkt werden.

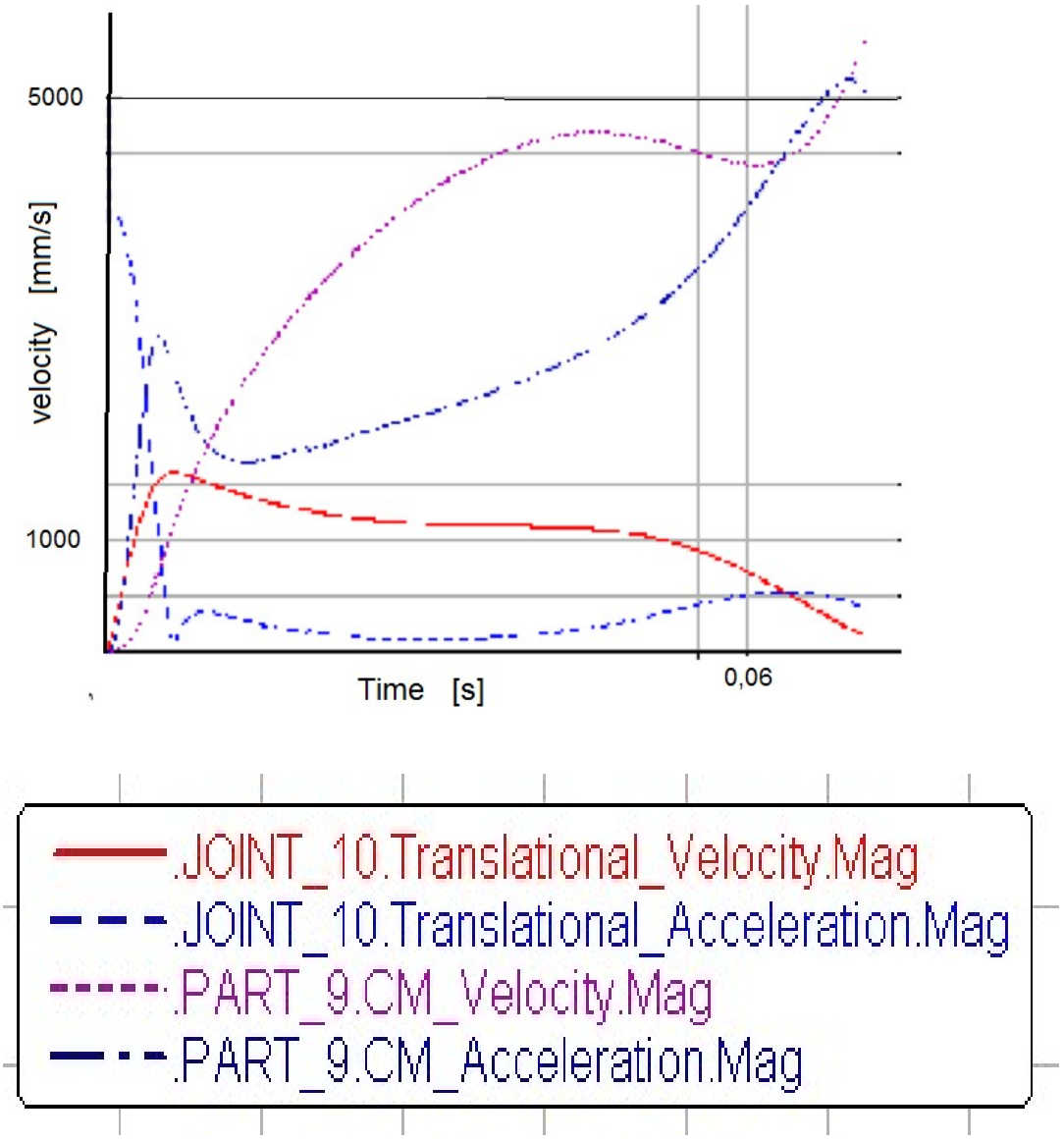


Bild 10.14 Zeitverläufe der Bewegungsgrößen am Spannelement

Das rechnergestützt entwickelte Spannelement erfüllt als mehrgliedriges Koppelgetriebe die Forderung nach senkrechtem Aufsetzen der Spannbacke auf die Werkstückoberfläche mit niedriger Geschwindigkeit ebenso, wie den schnellen und vollständigen Rückzug des Spannmechanismus aus dem Bearbeitungsraum in der geöffneten Endlage. Zudem wird durch einen gestreckten Kniehebel in der geschlossenen Stellung die Aufrechterhaltung der Spannkraft bei Energieausfall gesichert. Über eine massearme Bauweise, kurze Antriebswege, einstellbare Endlagendämpfungen und Drossel-Rückschlagventile konnte ein

Zeitfenster von etwa 0,1 s für das Öffnen und Schließen des Spannelementes erreicht werden.

Bild 10.13 zeigt links schematisch die Getriebekinematik Bild 10.14 die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe über einem Spannvorgang am Element.

!

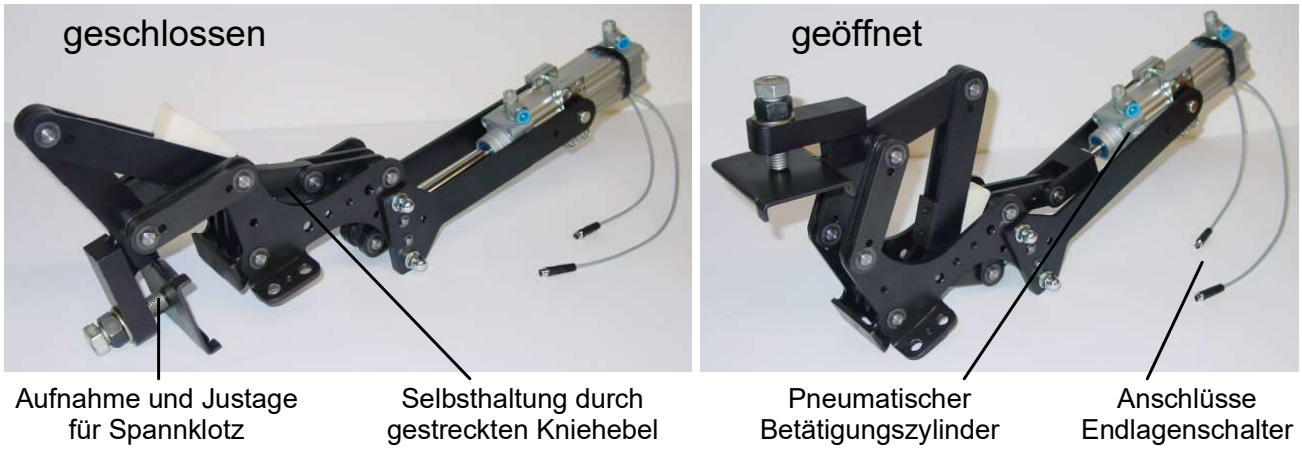


Bild 10.15 Spannelement in geschlossenem und geöffnetem Zustand

Die räumliche Zuordnung der Spannelemente zur Werkstückaufnahme wird aus Bild 10.15 ersichtlich. Die zur Funktion der pneumatischen Betätigungszylinder erforderliche Druckluftverteilung ist an der Bewegungsplattform installiert. Die Steuerung der zugehörigen Ventilinsel (Aktorik) sowie die Auswertung der Endlagenschalter (Sensorik) erfolgt über die SPS der Maschine in Abhängigkeit von der aktuellen Bahnführung zur Konturbearbeitung.

!

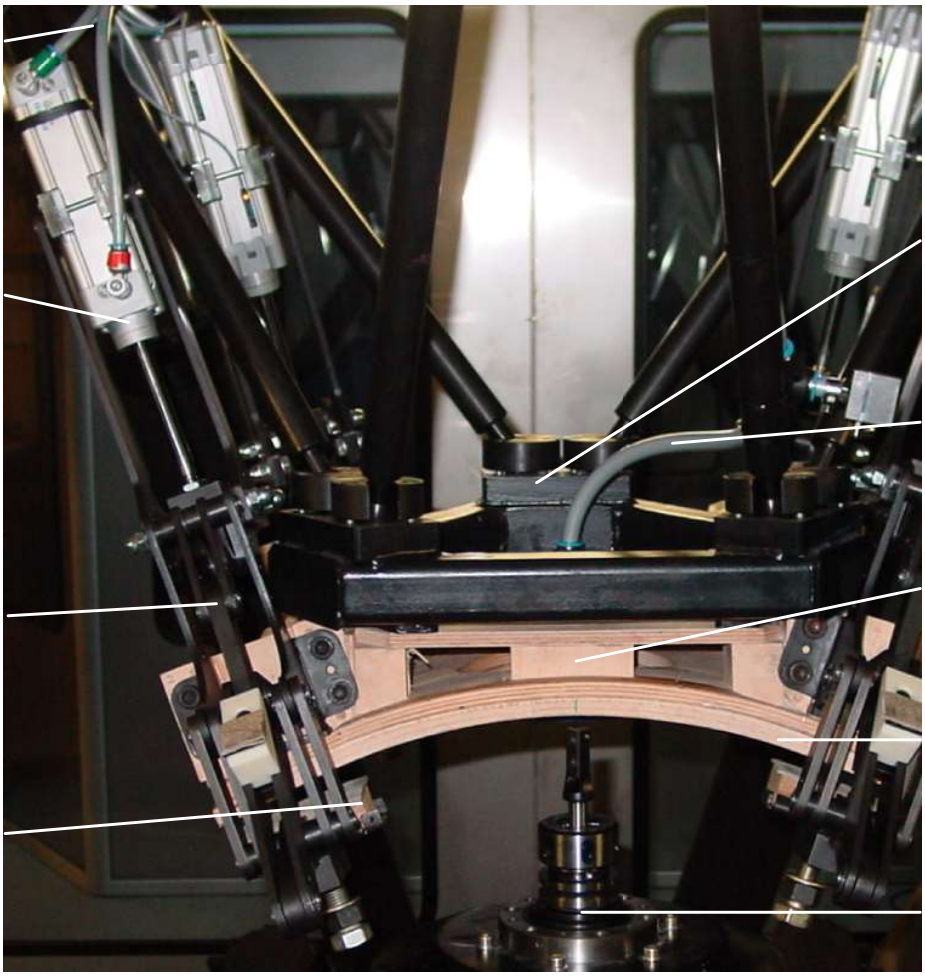


Bild 10.16 Bewegungsplattform mit Werkstückaufnahme, Spannelementen und gespanntem Teil

Komplettierung zum Bearbeitungszentrum

Ausgehend vom Bewegungssystem des Hexapod einfacher Bauart erfolgten die dargestellten Erweiterungen um

- ein Kamera- und Bildauswertungssystem sowie dessen Steuerungsintegration zur Referenzierung und Bahnanpassung,
- eine werkstückspezifische Teileaufnahme, einschließlich Vakuumsauger und Spannelementen sowie Integration deren Ansteuerung in SPS bzw. CNC,
- einen Spindelträger mit einer Hauptspindel für die Konturfräsbearbeitung sowie einer pneumatisch stellbaren Nebenspindel für die Bohrbearbeitung und
- eine komplette Abschirmung durch Installation einer geschlossenen Umhausung.

Infolge der während der spanenden Bearbeitung im Arbeitsraum anfallenden Menge an Holzstaub und -spänen wurden zusätzliche Erweiterungen erforderlich. Diese erfolgten durch

- Abdeckungen der Kardangelenke an den Stabachsen durch Gummimanschetten sowie
- Modifizierung der Hauptspindelaufnahme durch Integration einer Absaugung, die durch optimierte Gestaltung bei kleinstem Platzbedarf und geringsten Strömungsverlusten verbesserte Späneerfassung und -absaugung mit minimaler Arbeitsraumeinschränkung ermöglicht.

!

Bild 10.17 Arbeitsraum des „Parallelkinematischen Bearbeitungszentrums für Holzformteile“

Bild 10.17 zeigt den Arbeitsraum des - den vorangehend beschriebenen Funktionsumfang automatisiert realisierenden - Systems als „Parallelkinematisches Bearbeitungszentrum für Holzformteile“ auf der Grundlage des Hexapod einfacher Bauart. Wesentliche dabei gelöste Teilaufgaben bestanden zusammenfassend in:

- der Übernahme von Teilevereinzelung, -aufnahme und -ablage vom Stapel durch das auch die Arbeitsbewegungen ausführende Bewegungssystem,
- der sicheren Lageerkennung und Referenzierung unausgerichteter Teile auf dem Stapel,
- der Auflösung des Widerspruchs zwischen notwendig konturumgreifender Spannung und erforderlicher Konturbearbeitung,
- der effizienten Ermöglichung des Einsatzes mehrerer Werkzeuge zur Komplettbearbeitung ohne zusätzliche Werkzeugwechseleinrichtung sowie
- der Sicherung einer effektiven Spanabsaugung ohne zusätzliche Arbeitsraumeinschränkungen.

10.1.4 Konfiguration für die Bearbeitung großer Holzformteile

Große räumliche Bauteile

Die hier angesprochene Teileklasse ist für die Bauelementefertigung, den Modellbau und in der Bildnerischen Kunst von Interesse. Typische Vertreter sind Holzbauelemente, Gießereimodelle, Fahrzeugmodelle, Skulpturen, usw., mit Abmessungen die von $1m\ x\ 1m\ x\ 0{,}5m$ bis zu $5m\ x\ 2{,}5m\ x\ 1{,}5m$ und darüber hinaus reichen und anspruchsvolle Formelemente bis zu Freiformflächen tragen. Derartige Teile liegen zudem oft als Einzelstücke oder zumindest in sehr geringer Stückzahl vor. Restaurierungsaufgaben oder die Fertigung von Unikaten im Bereich von Kunst, Architektur und Kultur sowie der industriellen Sonderfertigung liefern hierzu Anwendungsbeispiele, die einerseits große Arbeitsräume erfordern, andererseits aber kaum Investitionen in entsprechend große und teure Maschinen zulassen. Bei großen räumlich ausgedehnten Holzformteilen überschreiten die einhüllenden Abmessungen und zumeist auch ihr Gewicht die entsprechenden Parameter der Werkzeug tragenden Spindel deutlich, sodass ihre Bearbeitung durch die Bewegung der Bearbeitungseinheit bei ruhendem Werkstück zweckmäßig wird.

Bild 10.18 zeigt die entsprechende Konfiguration des Hexapod zur Bearbeitung großer Holzformteile mit feststehendem Werkstück und bewegter Werkzeugspindel.

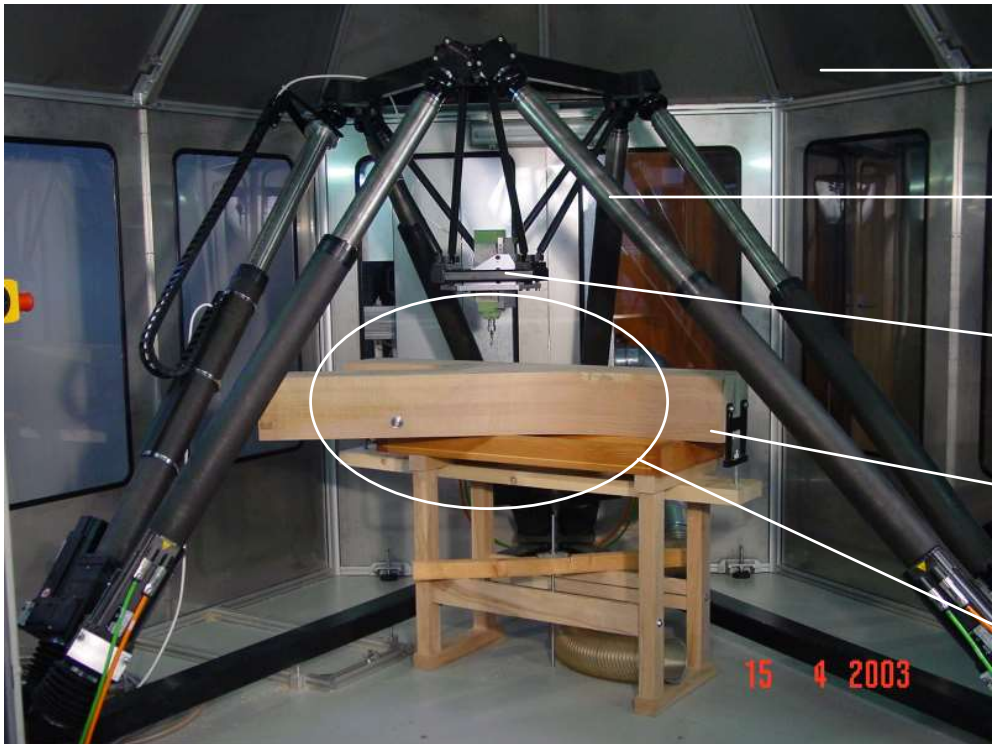


Bild 10.18 Konfiguration des Hexapod einfacher Bauart zur Bearbeitung großer Holzformteile

Beim vorliegenden Demonstrator-Teil, einem gabelförmigen Knotenelement, besteht zudem die Besonderheit, dass die zu bearbeitenden Werkstückabmessungen mindestens in einer Dimension den verfügbaren Bewegungsraum des Hexapod deutlich überschreiten und zudem eine „Rundum-Bearbeitung“ erforderlich ist. Die Konsequenz einer konventionellen Bearbeitung bestünde hier in der Belegung einer 5-Achs-Maschine mit einem sehr großen

Arbeitsraum von mindestens $2500\,x\,1500\,x\,500\,mm^3$. Eine wirtschaftliche Lösung - insbesondere für kleine Stückzahlen - lässt sich mit dem Hexapod finden, indem der mit der Bewegungseinrichtung gegebene Arbeitsraum durch den schrittweisen Versatz des mindestens in einer Dimension größeren Werkstückes während der Bearbeitung „aneinandergesetzt" wird. Der konkrete Lösungsansatz besteht also in der Anpassung des – hinsichtlich des zu bearbeitenden Werkstückraumes – zu geringen Hexapod-Arbeitsraumes durch Mehrfachpositionierung der Werkstück-Werkzeug-Zuordnung.

Bearbeitungsbeispiel aus dem Holzbau

Bild 10.19 zeigt das im Folgenden verwendete Demonstrator-Teil, ein Knotenelement des innovativen Holzbaues, auch als „Künstliche Astgabel" bezeichnet, vor und nach der spanenden Bearbeitung als typisches Applikationsbeispiel eines derartigen großen Holzformteils.

!

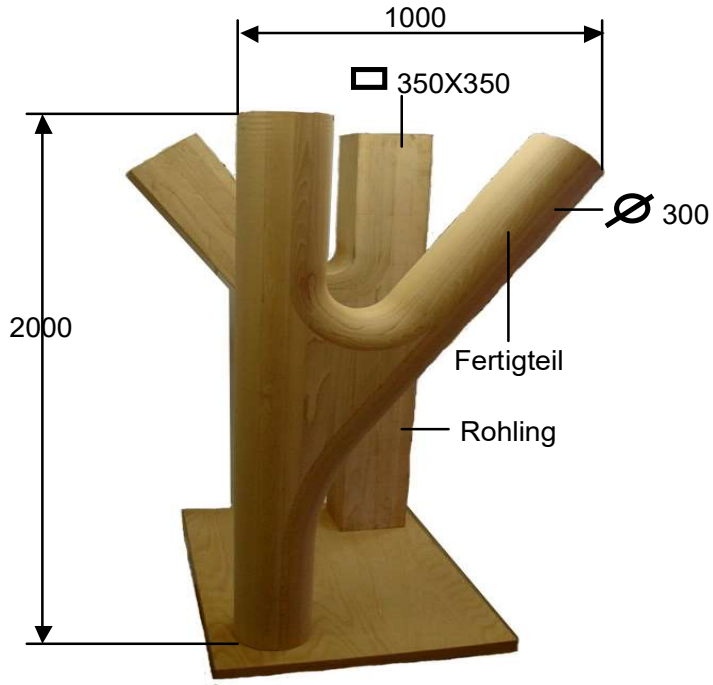


Bild 10.19 „Künstliche Astgabel" als Rohling und Fertigteil

In Bild 10.20 werden die Verwendung des Knotenelementes als Verzweigungsstück für die Realisierung von Holzbau-Strukturen auf der Grundlage von vorverdichteten Vollholz-Rohrprofilen sowie die Herstellung des dafür erforderlichen Rohlings demonstriert.

Die Bearbeitung vom quadratischen Querschnitt des Rohlings zum Kreisquerschnitt des Fertigteils erforderte eine schrittweise Fräsbearbeitung bei mehrfacher Veränderung der Werkstücklage relativ zum Werkzeugbezugssystem:

- Wenden zur Bearbeitung der Ober- und Unterseite des Werkstückes sowie
- Verschieben zur Bearbeitung der über den Arbeitsraum ragenden Abmessungen.

Zur Sicherung der Maß- und Formgenauigkeit sowie Oberflächenqualität am Werkstück ist dabei die Entwicklung und Beherrschung einer ausreichend genauen aber auch einfach realisierbaren Vorgehensweise zur Referenzierung der Werkstücklagen zum Werkzeugbezugssystem erforderlich, was letztlich die Bestimmung lokaler Koordinatensysteme und deren Transformation zur entsprechenden Bahnkorrektur für die einzelnen Bearbeitungsschritte voraussetzt.

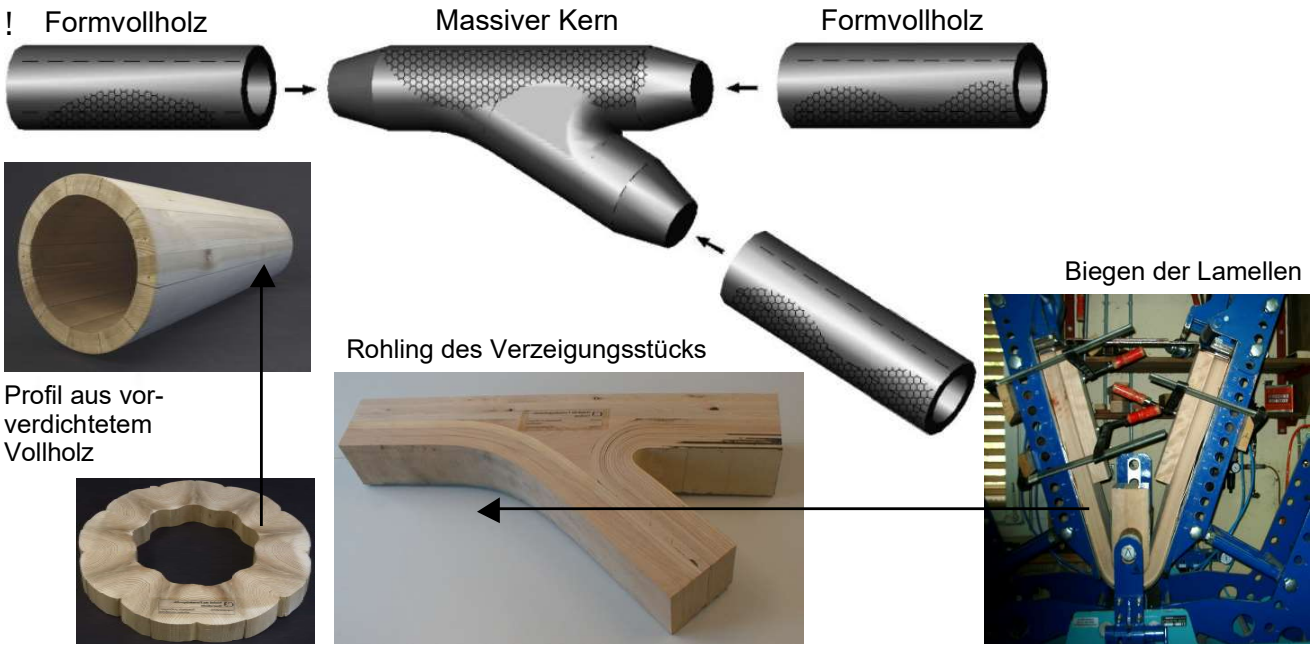


Bild 10.20 Innovative Holzbaustrukturen mit Kreisringquerschnitten aus verdichtetem Vollholz und Verzweigungsmöglichkeit mittels „Künstlicher Astgabel“

Spannung und Referenzierung des Werkstücks

Aufgrund des Einzelstück- bzw. Kleinseriencharakters der zu bearbeitenden Werkstücke, der erheblichen Teileabmessungen und der zur Bearbeitung zwingend erforderlichen Umspannvorgänge sowie nicht zuletzt infolge des zugrunde gelegten Konzepts des „Einfach“-Hexapod, verbietet sich der Einsatz einer aufwändigen teilespezifischen Spannvorrichtung. Es wurde daher ganz bewusst eine Universal-Hobelbank, wie sie in jedem Tischlerbetrieb zu finden ist, als Werkstückauflage verwendet und um eine einfache Möglichkeit zur Werkstück-Klemmung ergänzt. Bild 10.18 zeigt die Anordnung der Hobelbank im Arbeitsraum des Hexapod und aus Bild 10.21 ist das Prinzip der einfachen Spannung ersichtlich.

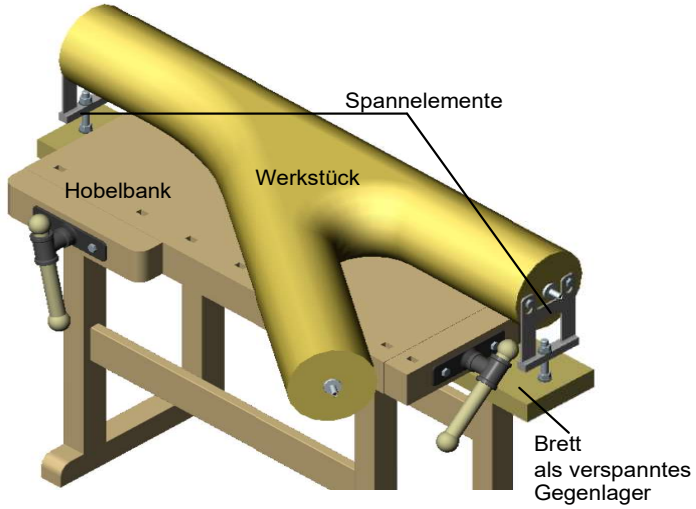


Bild 10.21 Einfache Spannung des Werkstücks auf der Hobelbank

Die Referenzierung einer derart „beliebigen“ Lage des Werkstückes im Arbeitsraum der Maschine, das heißt die Herstellung einer definierten und damit bekannten Lage des Werkstückbezugssystems zum Maschinen-Koordinatensystem, in welchem die Bewegungsvorgabe zur Formbearbeitung erfolgt, stellte die eigentliche Herausforderung für das Vorhaben dar, da durch die Notwendigkeit „aneinandergesetzter“ Bearbeitung in verschiedenen Aufspannlagen sowohl ein erheblicher Genauigkeitsanspruch an diese Referenzierung besteht, als auch

Forderungen nach einem möglichst schnellen, robusten und aufwandsarmen Verfahren erfüllt werden müssen.

Während sich für die unter Abschnitt 10.1.2 vorgestellte automatisierbare Lösung zur Werkstückreferenzierung die an den Rohlingen der Sitzschalen eingeprägten Markierungen für eine optische Lagebestimmung mit einem Kamerasystem anboten, besitzen die hier vorliegenden Rohteile weder entsprechend nutzbare Markierungen, noch ist mit dem einfachen Spannprinzip ohne erhöhten Zusatzaufwand und Einschränkung der Flexibilität die Realisierung eines gesicherten Lagebezuges über die Spannvorrichtung möglich. Die großen Abmessungen und das Fehlen von vorbearbeiteten Bezugsflächen lassen schließlich auch das üblicherweise benutzte Antasten mit einem Messtaster ausscheiden. Die entwickelte automatisierbare Lösung nutzt auch hier das in allen 6 Raumfreiheitsgraden gegebene Bewegungsvermögen der Hexapod-Plattform zur Ausführung der für die Lagebestimmung eines im Werkstück festgelegten Referenzpunktes erforderlichen Messbewegungen. Die Grundidee des mit Bild 10.22 veranschaulichten Verfahrens besteht in der Ermittlung der Lage von mindestens drei derartigen im Werkstück-Koordinatensystem (L) definierten Punkten (Q_1, Q_2, Q_3) im Maschinenkoordinatensystem (B), woraus sich dann Lage und Orientierung des Werkstück- zum Maschinen-Koordinatensystem bestimmen lassen.

.

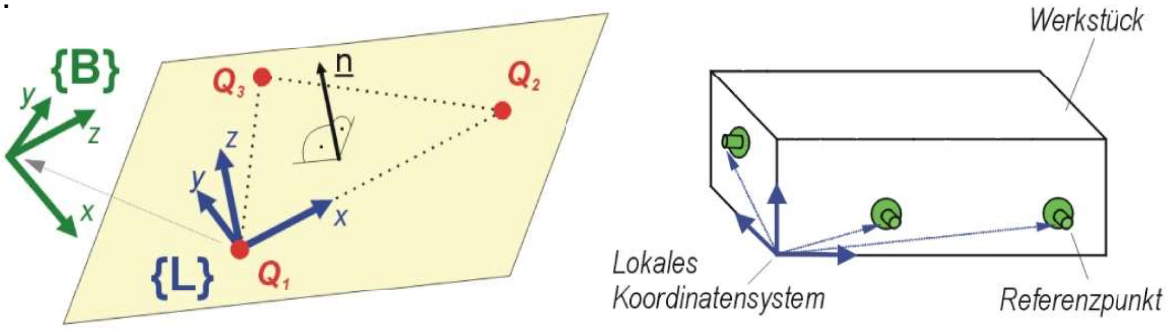


Bild 10.22 Definition des Werkstück-Koordinatensystems mit drei Referenzpunkten

Die für die Umsetzung des Verfahrens erforderliche einfache, hinreichend genaue und messtechnisch zugängliche physische Repräsentation der Punkte am Werkstück wurde durch Verwendung magnetischer Dreipunktaufnahmen realisiert. Diese lassen sich beispielsweise in den Aufmassbereich des Rohlings schrauben und können mit hoher Genauigkeit Präzisionskugeln durch leichtes Einklicken aufnehmen (Bild 10.23, unten). Die Mittelpunkte dieser Kugeln sind dann mit sehr hoher Wiederholbarkeit aus (nahezu) beliebiger Raumrichtung messtechnisch zugänglich.

Die Vermessung selbst erfolgt mit einem Double-Ball-Bar (DBB). Der DBB ist ein relatives Längenmessgerät (Messbereich +/- 1 mm, Auflösung 0,1 □m, Abtastrate 250 Hz) zur Erfassung der linearen Abstandsänderung zwischen den beiden an seinen Enden angebrachten Präzisionskugeln (Bild 10.23 $\pm\, 1mm$, oben). Wird eine der Kugeln im Arbeitsraum fixiert – hier ist dies einer der Referenzpunkte – und die andere durch die Bewegungseinrichtung auf einer Kreisbahn um die feststehende Kugel bewegt, dann entspricht die quasikontinuierlich erfassbare Abstandsänderung der beiden Kugelmittelpunkte der radialen Bahnabweichung.

!

Double-Ball-Bar (DBB) zur Messung der Radiusabweichung
an einer Kreisbahn bzw. der Bahn auf einer (Halb-)Kugeloberfläche

Werkstück mit magnetischen Dreipunktaufnahmen
für die Fixierung der DBB-Kugel des Referenzpunktes

Bild 10.23 Equipment für die Referenzierung der Werkstück-Lage im Arbeitsraum mit dem Double-Ball-Bar

Die Ermittlung der Koordinaten eines Referenzpunktes beruht darauf, eine Bewegungsbahn für die bewegte Kugel zu finden, die an jedem Bahnpunkt den gleichen Abstand zum Referenzpunkt hat. Mit dem DBB wäre dann keine Abstandsänderung über der Bahn messbar. Solche Bahnen müssen auf einer Kugelsphäre liegen, die den gesuchten Referenzpunkt q als Mittelpunkt und den DBB-Messradius r_q als Kugelradius hat. Diese Anforderung erfüllen alle Kreise, die sich als Schnitt zwischen einer Ebene E_k deren Normale durch den Kugelmittelpunkt geht und der Kugelsphäre ergeben.

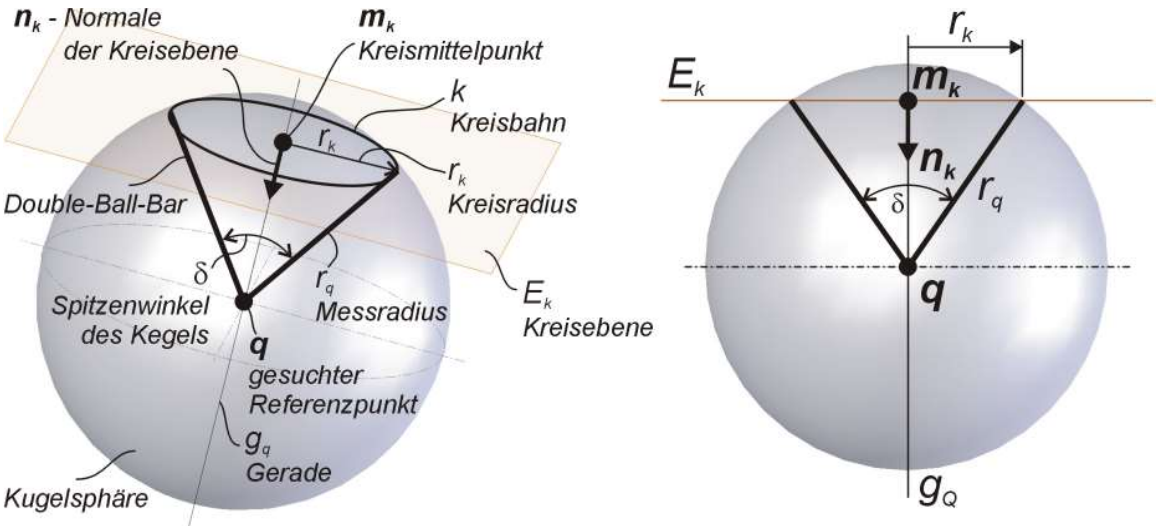


Bild 10.24 Räumliche Kreisbahn k um den Referenzpunkt q

Der DBB bewegt sich dann während der Vermessung auf einem Kegelmantel mit der Kreisbahn k als Grundfläche und dem Referenzpunkt q als Spitze (Bild). Aus den Parametern einer solchen Kreisbahn k lassen sich die Koordinaten des Referenzpunktes q direkt bestimmen.

Da jedoch zur Generierung der Kreisbahn k als NC-Programm für die DBB-Messung die Koordinaten von q benötigt werden, ist ein iteratives Vorgehen erforderlich. Ausgehend von einer Schätzung q_0 und den damit über der Bahn mit dem DBB messbaren Abstandsänderungen lässt sich gezielt und mit guter Konvergenz eine iterative Verbesserung für q bestimmen. Das Verfahren ist – bis auf minimale Bedieninteraktionen – vollständig automatisierbar. Die Umsetzung auf der Maschinensteuerung erforderte jedoch erhebliche Erweiterungen. So mussten Funktionalitäten als Algorithmen und Oberflächen implementiert werden, welche die Koordination der Ansteuerungen von DBB und Hexapod sicherstellen, die Erfassung der Messdaten, deren Aufbereitung und Auswertung durchführen sowie die Berechnung und Generierung geeigneter Messbewegungen für den Hexapod übernehmen.

Mehrseitenbearbeitung des Knotenelementes

Die Praxistauglichkeit des Referenzierungsverfahrens konnte bei der Bearbeitung des Eingangs erläuterten Knotenelementes auf dem Hexapod demonstriert werden.

Bewegtes Werkzeug (Frässpindel an der Bewegungsplattform)

Werkstück in „beliebiger“ Aufspannung (in den Arbeitsraum gestellte Tischler-Hobelbank)

Vorbearbeitung in der ersten von vier für die Komplett-bearbeitung erforderlichen Aufspannlagen

Magnet-Aufnahmen für die fixe DBB-Kugel (eingeschraubt in das „verlorene“ Werkstückmaterial)

Bild 10.25 Schruppbearbeitung in der ersten Aufspannlage

Die Rundumbearbeitung der Freiformflächen erforderte vier verschiedene Aufspannungen des Werkstückes, von denen drei mitBild 10.25, Bild 10.26 und Bild 10.27 gezeigt sind. In jeder neuen Aufspannlage ist eine Referenzierung des Werkstückes nach dem oben beschriebenen Verfahren erforderlich. In Bild 10.25 und Bild 10.26 sind jeweils zwei der drei für die Fixierung der DBB-Kugeln (Referenzpunkte) verwendeten Magnetaufnahmen sichtbar. Der Zeitbedarf für die Vermessung eines Referenzpunktes liegt deutlich unter einer Minute.

Bild 10.26 Schlichtbearbeitung in der zweiten Aufspannlage

Die bei der Referenzierung erreichte Genauigkeit für die Lagezuordnung der einzelnen Bearbeitungssegmente war so gut, dass Überlappungen der in verschiedenen räumlichen Aufspannlagen bearbeiteten Flächensegmente am Fertigteil (Bild 10.27) nicht mehr sichtbar waren und somit keine zusätzliche Nacharbeit erforderten.

Bild 10.27 Fertigteil in der vierten Aufspannlage

10.1.5 Variable Fertigungsumgebung für kompakte Kleinteile

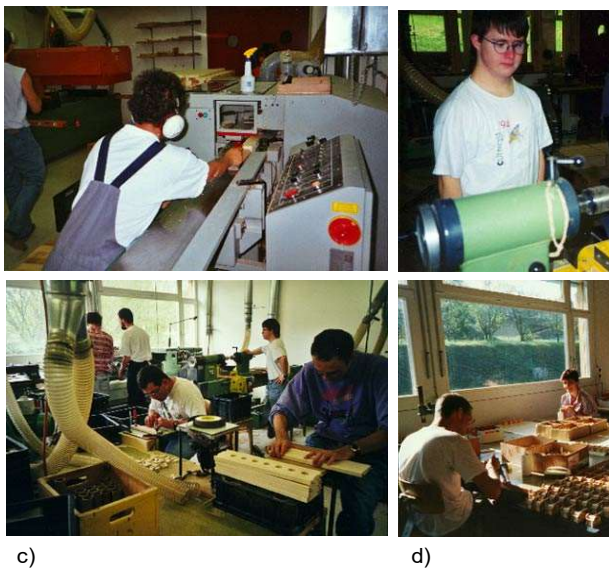
Kompakte Freifomteile kleiner Abmessungen

Die hier angesprochene Teileklasse ist besonders für die Spielzeugherstellung, aber auch für das Handwerk und die Vorbearbeitung in der Volkskunst von Interesse. Typische Vertreter sind demzufolge Spielzeugteile, Bedien- und Griffelemente, Figuren, Dekoration, Schmuck, usw., mit Abmessungen, die von $0{,}05m * 0{,}05m * 0{,}05m$ bis zu maximal $0{,}4m * 0{,}4m * 0{,}4m$

reichen und die verschiedenartige Formelemente der Bohr- und Fräsbearbeitung umfassen. Bild 10.28 zeigt Beispielteile und typische Grundformen für Kleinkinder-Spielzeug. Die Halbzeuge für derartige Bauteile liegen häufig in Kugel-, Scheiben-, Zylinder- oder Kegelform als Drehteile vom Stangen-Drehautomat oder der Drechselbank vor. Im Rahmen der Drehbearbeitung erfolgt meist auch das Einbringen einer axialen Bohrung. Neben der funktionellen Nutzung dieser Bohrung zur festen oder beweglichen Aufnahme anderer Bauteile, beispielsweise mit Dübeln oder Seilzügen, wird damit auch die Richtung der Maserung am fertigen Produkt vorgegeben und die Möglichkeit für eine einfache Referenzierung des Rohteiles für die weitere Bearbeitung geschaffen. Die folgenden Prozessschritte bestehen im Fräsen Gestalt bildender Formen und Flächen zur Befestigung anderer Bauelemente sowie dem Einbringen von Bohrungen mit verschiedenen Orientierungen. Danach erfolgt das Schleifen zum Entgraten der Kanten und Glätten der Oberfläche. Abschließend kann mit Farbe oder transparentem Lack beschichtet werden.

Bild 10.28 Beispiele für Holzspielzeug und typische Grundformen der Drehteil-Halbzeuge

! a) b)



c) d)

Bild 10.29 Prozessschritte der Kleinteilbearbeitung (KARO Holzspielwaren):

a) Herstellung der Rundstäbe;
b) Drehen der Halbzeuge;
c) Bearbeitung der Kleinteile;
d) Bemalen und Montage

Mit den Fotos von Bild 10.29 werden typische Prozessschritte der Fertigung von Kleinteilen für Holzspielzeug demonstriert, woraus der hohe manuelle Anteil ersichtlich wird. Dies betrifft insbesondere die Phase der spezifischen Weiterbearbeitung der Halbzeuge (

Bild c). Folgend soll daher auf der Grundlage der unter Abschnitt 10.1.1 als Hexapod einfacher Bauart beschriebenen parallelkinematischen Bewegungseinrichtung mit der Stabachs-Verfahrlänge von $500\,mm$ eine variable Fertigungsumgebung zur automatisierten Komplettbearbeitung derartiger Kleinteile vorgestellt werden.

Bearbeitungsbeispiel und Lösungskonzept

Als Beispiel zur Entwicklung und Realisierung einer konkreten Fertigungsumgebung wird im Weiteren die symmetrische Bohr- und Fräsbearbeitung von Holzkugeln verfolgt. Dazu sind Lösungen für die Zuführung, Vereinzelung und Referenzierung der Kugeln sowie zum Greifen, Spannen und Umgreifen einschließlich der Mehrseitenbearbeitung der Werkstücke mit Bohr- und Fräswerkzeugen zu finden und umzusetzen.

Als Halbzeuge liegen Holzkugeln von $40\,mm$ Durchmesser mit einer mittigen Durchgangsbohrung vor, deren Komplettbearbeitung entsprechend der in Bild 10.30 gezeigten Endform automatisch, d.h. NC-gesteuert, auf dem Hexapod erfolgen soll.

!

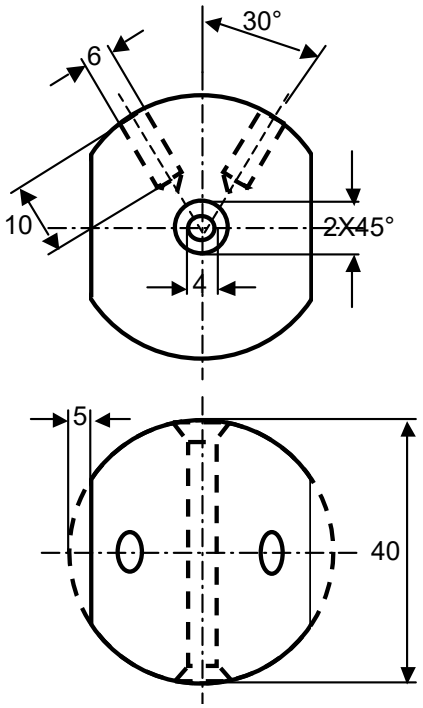


Bild 10.30 Bearbeitungsbeispiel Holzkugel

Dafür ist der Einsatz von drei unterschiedlichen Werkzeugen erforderlich. Die hier angestrebte Lösung ohne Werkzeugwechsler benutzt für jedes Werkzeug eine Arbeitsspindel, welche im Stellbereich der Bewegungsplattform auf einem Werkzeug-Trägergestell befestigt ist. Wegen der geringen Bearbeitungskräfte bei den Kleinteilen ist der Einsatz preiswerter Standardspindeln mit manueller Werkzeugspannung möglich. Auf Befestigungsschienen um den Arbeitsraum können die Spindeln für eine optimale Stellung zum Werkstück geschwenkt und verschoben werden, wodurch eine individuelle und flexible Anpassung möglich wird. Das Werkstück ist auf der Bewegungsplattform zu spannen und zur Bearbeitung entsprechend relativ zu den ortsfesten Werkzeugen zu

bewegen.

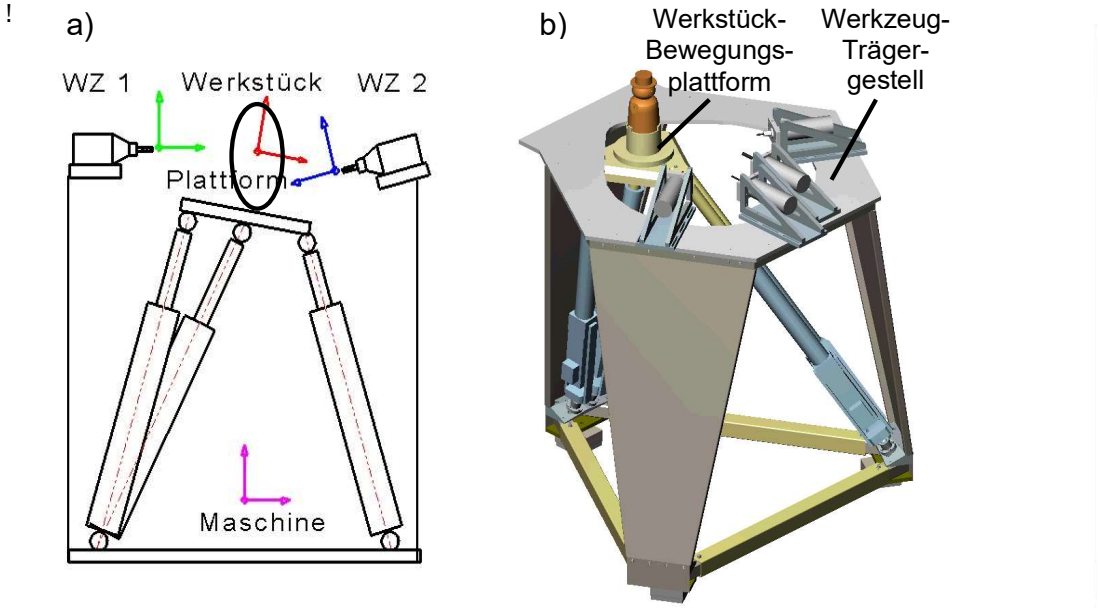


Bild 10.31 veranschaulicht das prinzipielle Lösungskonzept für die Werkzeug- und Werkstückzuordnung am Hexapod.

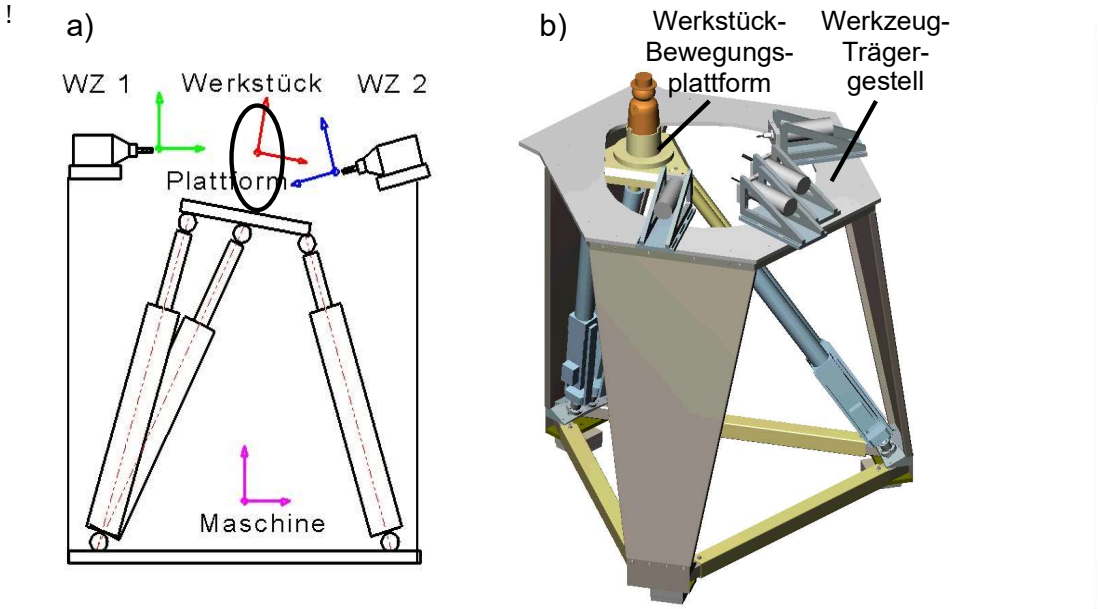


Bild 10.31 Konzept für eine variable Fertigungsumgebung am Hexapod:

- lokale Koordinatensysteme für Werkstück und Werkzeuge;
- konstruktive Studie für einen Realisierungsentwurf

Zuführung, Vereinzelung und Referenzierung der Werkstücke

Bei Kleinteilen, wie den Holzkugeln, muss davon ausgegangen werden, dass sie in größerer Anzahl als Halbzeuge in geeigneten Transport- und Speicherbehältnissen vorliegen. Für die automatisierte Bearbeitung sind diese Teile daher zunächst der Bearbeitungseinrichtung zuzuführen und dabei zu vereinzeln sowie in eine definierte Lage für die nachfolgende

Werkstückspannung und -bearbeitung zu bringen. Bild 10.32 zeigt drei grundsätzliche Möglichkeiten für die Lösung des Zuführungs- und Vereinzelungsproblems.

! a) b) c)

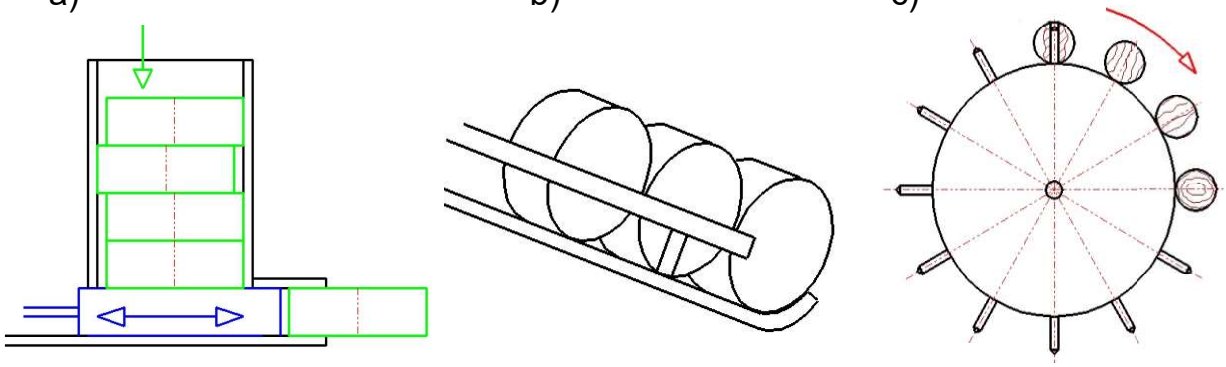


Bild 10.32 Lösungsmöglichkeiten für die Zuführung und Vereinzelung der Werkstücke:

a) Schachtmagazin mit Schieber;
b) Rollbahnmagazin;
c) Scheibenmagazin

Für die genaue Positionierung der zu bearbeitenden Formelemente am Werkstück ist die exakte und wiederholgenaue Lagezuordnung der Werkstücke beim Spannen auf der Werkstück-Bewegungsplattform notwendig. Diese definierte Lagezuordnung des Werkstückes zur Bewegungsplattform ermöglicht die Referenzierung des Werkstück- zum Maschinen-Koordinatensystem. Damit kann die Transformation der Werkstück- in die Maschinen-Koordinaten erfolgen und so, in Verbindung mit den ebenfalls zur Maschine referenzierten Koordinatensystemen der einzelnen Werkzeuge, das NC-Programm für die zur Bearbeitung erforderliche Bewegungsführung der Plattform generiert werden. Soll die Bearbeitung in einer bestimmten Richtung zur Maserung erfolgen, so muss am Halbzeug ein für die Lageerkennung auswertbares Merkmal vorhanden sein. Üblicher Weise erfolgt dies über Bohrungen, welche bereits bei der Erstellung des Halbzeuges eingebracht werden. Da auch die Kugel-Halbzeuge über eine derartige zentrale Bohrung verfügen, mit der das Werkstück-Koordinatensystem orientiert ist, wird für Zuführung, Vereinzelung und Lagebestimmung des Bearbeitungsbeispiels ein Scheibenmagazin (Bild 10.32 c) gewählt.

Greifen, Spannen und Umgreifen zur Mehrseitenbearbeitung

Durch die Ausführung der Arbeitsbewegungen mit dem Werkstück bei ortsfester Werkzeuganordnung und die gezielte Ausnutzung des mit dem Hexapod gegebenen Bewegungsvermögens in allen 6 Raumfreiheitsgraden ist die prinzipielle Möglichkeit zur Verknüpfung von Handling und Bearbeitung in einer Maschine gegeben. Für die Realisierung einer derartigen Zielstellung wird ein entsprechend geeignetes Greif- und Spannsystem für die Werkstücke notwendig. Das Handhaben und Spannen von sphärischen Kleinteilen mit großer Formvariation (Kugel, Scheibe, Zylinder oder Kegel) erfordert speziell auf die Bauteilform zugeschnittene Greifer. Bei Bauteilen mit ähnlichen Grundabmessungen reicht meist der Austausch der Greifereinsätze aus. Bild 10.33 zeigt verschiedene Grundprinzipien zum Greifen und Spannen der Werkstücke.

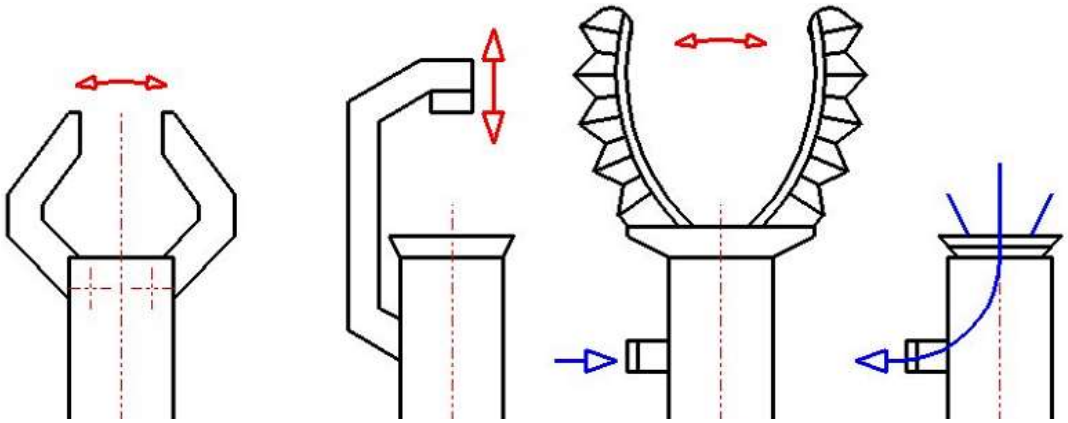


Bild 10.33 Lösungsmöglichkeiten für Greifen und Spannen der Werkstücke:

a) Zangengreifer;
b) Klemmgreifer;
c) Überdrückgreifer;
d) Vakuumgreifer

Zum sicheren Spannen sollten am Werkstück möglichst parallele Spannflächen vorhanden sein, um einen günstigen und idealer Weise auf einer Linie liegenden Kraftfluss durch das Werkstück zu erzeugen. Der rein kraftschlüssigen Spannung sind durch den Reibungsbeiwert der Wirkflächen Grenzen gesetzt. Deshalb ist es zweckmäßig, Greifer mit Formpaarungselementen einzusetzen. Der Einsatz von Kniehebelspannern ist problematisch bei Teilen mit großen Toleranzen, da sie kaum Wegreserven aufweisen und die hohen Druckkräfte im Spannbereich schlecht dosierbar sind. Für den Einsatz bei der Kleinteilebearbeitung aus Holz schieden sie deshalb aus.

Aufgrund der einfachen Gestaltungsmöglichkeit bei hoher Steifigkeit, günstigem Kraftfluss und geringsten Einschränkungen hinsichtlich der Zugänglichkeit der Werkstückoberfläche wurde zur Realisierung der Greif- und Spannoperationen das Prinzip des Klemmgreifers (Bild 10.33 b) gewählt.
Da die Holzkugeln als Halbzeuge keine Passflächen besitzen, wurde die Einspannung an der Kugeloberfläche mit einem Kreisring und einem Gegendruckpunkt realisiert. Die ringförmige Auflage befindet sich im unteren Bereich, während der Gegendruckpunkt beweglich an einem hakenförmigen Zuganker angebracht ist. Die schlanke Ausführung des Greiferkörpers gestattet eine gute Zugänglichkeit der Werkzeuge zum Werkstück. Die Betätigung des Zugankers erfolgt durch einen, im Greiferkörper liegenden, Pneumatikzylinder, der gegen eine Spannfeder arbeitet, welche das Werkstück bei Ausfall der Druckluft sichert. Die Druckflächen bestehen aus Holz, auf das zur gleichmäßigen Druckverteilung und zur Erhöhung der Reibung Gummi, Leder und Filz aufgebracht wurde.

Um eine vollständige „Rundumbearbeitung“ zu ermöglichen, kann die entwickelte Greifer- und Spannlösung auch zum Umgreifen des Werkstückes verwendet werden. Dazu wurde ein zum Hauptgreifer baugleicher Umgreifer in horizontaler Lage im Arbeitsraum am Werkzeug-Trägergestell installiert. Durch wechselseitiges Umspannen zwischen diesen beiden Greifern ist die definierte Veränderung der Zuordnung von Werkstück- und Maschinen-Koordinatensystem automatisch realisierbar. Damit ist beispielsweise eine elegante Möglichkeit zur Bearbeitung von am Werkstück symmetrisch gegenüberliegenden Formelementen mit denselben Werkzeugen und demselben NC-Programm gegeben.

Bild 10.33 zeigt den realisierten Haupt- und Umgreifer auf der Bewegungsplattform und am Trägergestell und demonstriert das Umgreifen des Werkstückes.

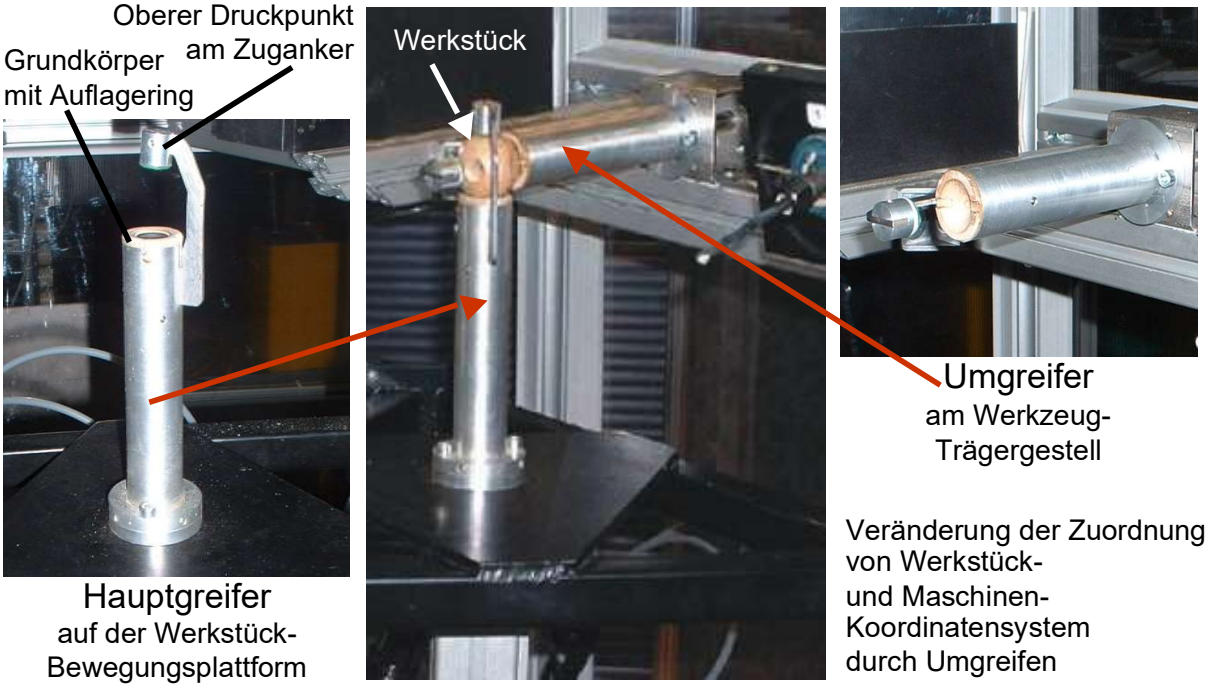


Bild 10.34 Universelle Verwendung des Klemmgreifers für die Werkstückhandhabung

Gesamtlösung für Handhabung und Bearbeitung

Die nachfolgenden Abbildungen illustrieren die als Gesamtlösung um den Hexapod gestaltete flexible Fertigungsumgebung zur automatisierten Bearbeitung von Holzkleinteilen in der konkreten Konfiguration für das Bearbeitungsbeispiel der Holzkugeln Bild 10.30

Im ersten Prozessschritt entnimmt der Hauptgreifer das Werkstück aus dem Scheibenmagazin. Die in Bild 10.35 dargestellte Situation zeigt, wie dazu der Hauptgreifer mit der Bewegungsplattform die definierte Greifpose (Position und Orientierung) eingenommen hat und der Zuganker das Werkstück mit dem Druckpunkt gegen den Auflagering spannt. Nachfolgend wird das im Greifer gespannte Teil mit der Bewegungsplattform vom lagebestimmenden Magazinstift gezogen und den Bearbeitungseinheiten zugeführt.

Bild 10.36 zeigt die Bearbeitung der ersten Seitenfläche an der Kugel mit dem Fräswerkzeug.
Danach folgt die Fertigung der ersten Fase (2x45°) an der zentralen Durchgangsbohrung mit dem Bohrwerkzeug 1. Schließlich wird an der dritten Bearbeitungsstation mit dem Bohrwerkzeug 2 das erste Sackloch unter $30°$ mit $10\,mm$ Tiefe gebohrt. Damit ist der in Bild 10.37 a) dargestellte Zwischenstand der Bearbeitung erreicht.

Zur Fertigung der symmetrischen Gegenseite am Werkstück erfolgt der bereits erwähnte Umspannvorgang. Bild 10.37 b) zeigt die Spannsituation nach dem horizontalen Umgreifen um 180° vor dem zweiten Bearbeitungszyklus mit der gleichen Bearbeitungsfolge.

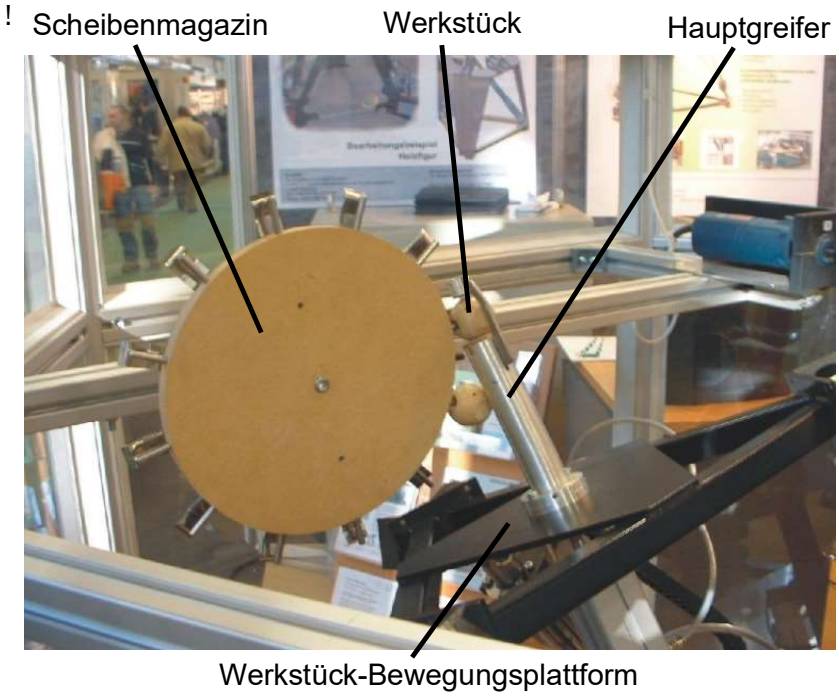


Bild 10.35 Entnahme des Werkstücks vom Scheibenmagazin

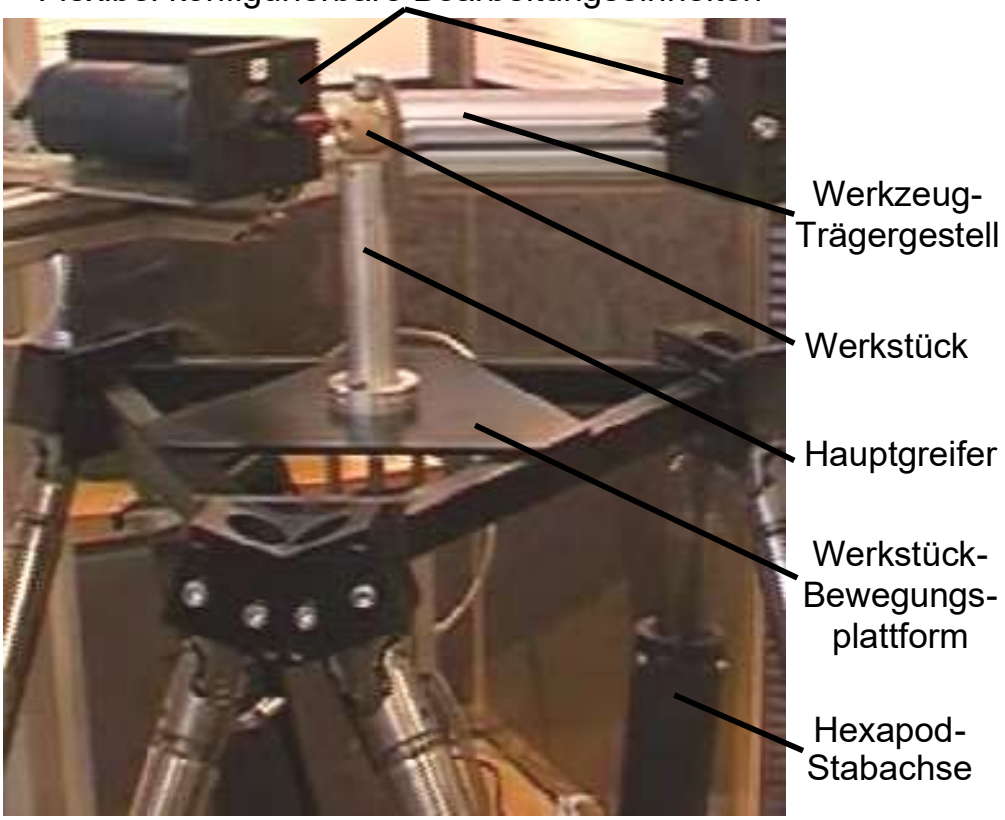


Bild 10.36 Fräsbearbeitung

!

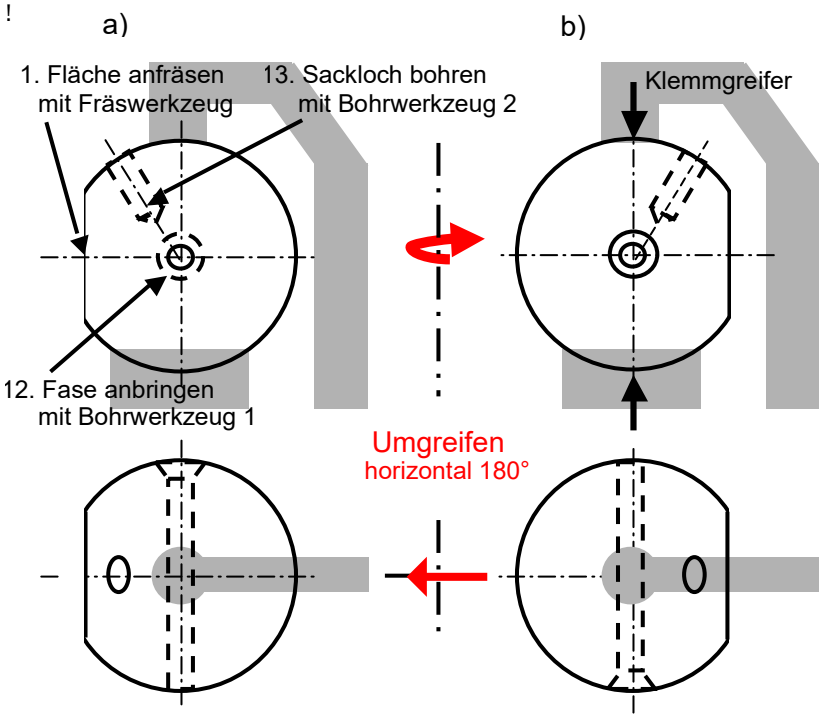


Bild 10.37 Mehrseitenbearbeitung durch Umgreifen des Werkstückes:

a) erste Spannlage nach dem ersten Bearbeitungszyklus;
b) zweite Spannlage vor dem zweiten Bearbeitungszyklus

Das Foto in Bild Bild 10.38 zeigt einen Blick auf die Komponenten im Arbeitsraum der Applikation in der Situation des Technologieschrittes „Umgreifen“.

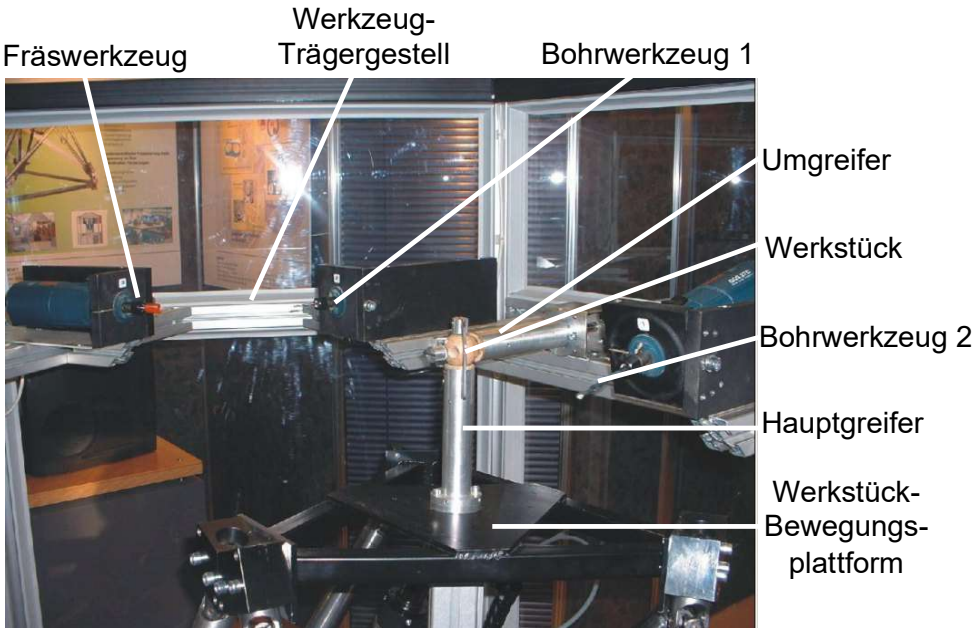


Bild 10.38 Arbeitsraum des Hexapod mit variabler Fertigungsumgebung für Kleinteile

10.2 Beispiel: Entwicklung eines Versuchsträgers für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine

10.2.1 Zum Grunddilemma von Dynamik und Genauigkeit

Steigerung von Dynamik und Genauigkeit als Konsequenz wachsender Produktivitätsforderung

Die anhaltende Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist Quell stetigen Antriebs für produktionstechnische Entwicklung. Hauptinstrumentarium dafür findet sich in der Steigerung der Produktivität. Das bedeutet zunächst einen Zuwachs an Mengenleistung bzw. die Reduzierung der Stückzeiten zu erreichen. Die dazu erforderliche Verkürzung der Hauptzeiten führt über die notwendige Erhöhung des Zeitspanvolumens bei begrenzten Spanungsquerschnitten ebenso zur Forderung nach gesteigerten Geschwindigkeiten der Antriebe, wie die zur Senkung der Nebenzeiten notwendige Beschleunigung der Werkzeug- und Werkstück-Wechselvorgänge. Eine erhöhte Mengenleistung wirkt allerdings nur produktivitätssteigernd, wenn dabei die anstehenden und in ihrer Grundtendenz ebenfalls stetig wachsenden Genauigkeitsforderungen eingehalten werden. Im Zusammenhang mit den steigenden Bahngeschwindigkeiten wird damit die Einhaltung und Erhöhung der Bahngenauigkeiten zum Problemschwerpunkt. Eine Lösung ist nur über die Verbesserung des Stellvermögens der Vorschubantriebe, das heißt die Steigerung deren Beschleunigungsvermögens erreichbar.

Damit zielen letztlich sowohl die Leistungs- als auch die Genauigkeitsforderungen auf eine Steigerung der Antriebsdynamik der Werkzeugmaschine. Bild 10.39 fasst die erläuterten Zusammenhänge schematisch zusammen.

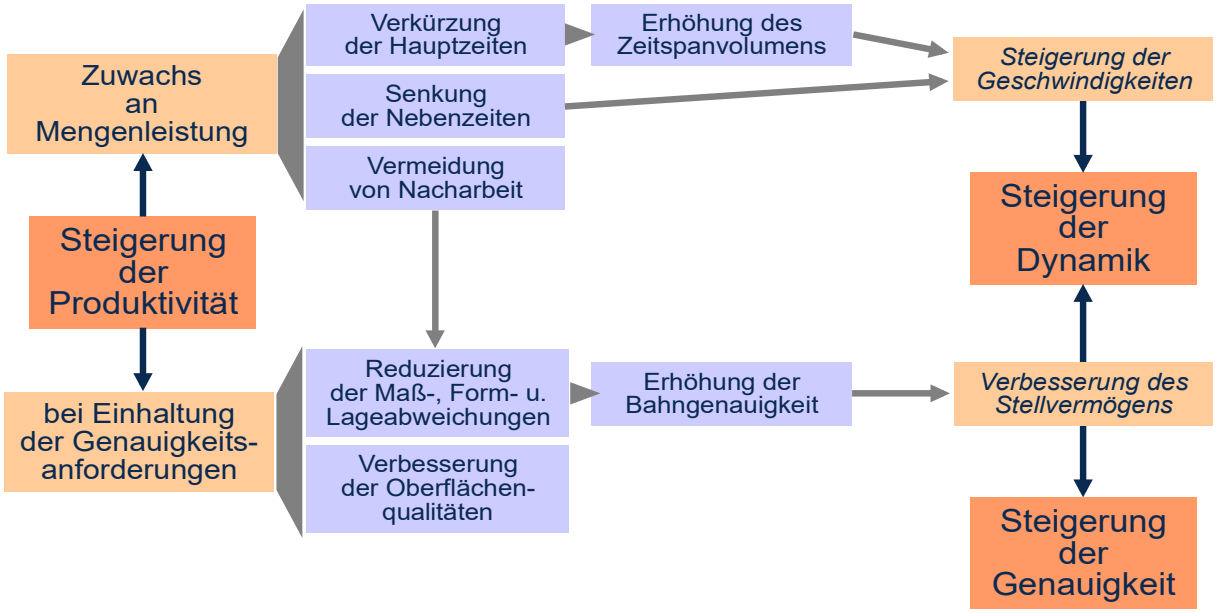


Bild 10.39 Steigerung von Dynamik und Genauigkeit als Konsequenz wachsender Produktivitätsforderung; Zielkonflikt bei der gleichzeitigen Umsetzung der Forderungen nach erhöhter Dynamik und Genauigkeit

Die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeiten erfordert höhere Beschleunigungen, dies ist infolge $a = F/m$ durch größere Antriebskräfte und geringere bewegte Massen erreichbar. Da der Kraftsteigerung am Einzelantrieb mit dem Maximalstrom Grenzen gesetzt sind, können durch Parallelisierung der Antriebe Lösungsmöglichkeiten gefunden werden. Problematischer gestaltet sich die Reduktion der bewegten Massen, da dies nur über Materialschwächungen und Einsatz von Leichtbauwerkstoffen an den Vorschubschlitten realisierbar ist. Dies hat jedoch bei konventioneller Gestaltung Steifigkeitsminderungen der unmittelbar im Kraftfluss liegenden Baugruppen und Verbindungsstellen zur Folge und führt so zu genauigkeitsbeeinträchtigenden Verformungen am TCP. Die für die Verbesserung des Stellvermögens der Achsen notwendigen schnelleren Beschleunigungsänderungen werden mit den hohen Stromänderungsgeschwindigkeiten der Lineardirektantriebe ermöglicht. Infolge des damit gegebenen hohen „Ruckvermögens“ werden allerdings starke Kraftimpulse einerseits in der Antriebsebene in die Maschinenstruktur eingeleitet und andererseits als Reaktion im Schwerpunkt der bewegten Baugruppe wirksam. Dies führt insgesamt zu Kraft- und Momentenanregungen der Struktur und damit zu Schwingungen am TCP, die sich negativ auf die Bearbeitungsgenauigkeit auswirken. Die auch in Werkzeugmaschinen zum Einsatz kommenden Standardausführungen der Lineardirektantriebe sind eisenbehaftete Flachbauformen, die zum Teil erhebliche Rastkräfte aufweisen und darüber hinaus die Wälzführungen über den magnetischen Zug mit mehr als der Nennkraft zusätzlich belasten.

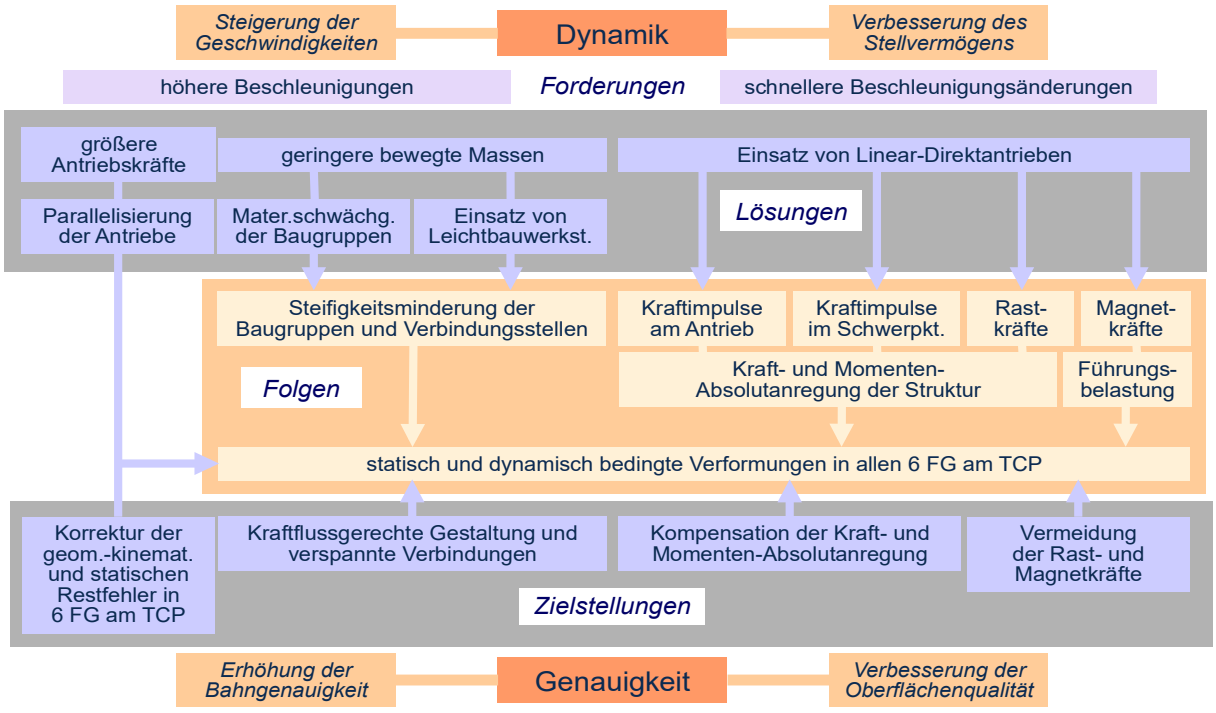


Bild 10.40 Lösungen und Folgen bei der Umsetzung der Dynamik-Forderungen und daraus resultierende Zielstellungen für die Sicherung der Genauigkeit

Bild 10.40 zeigt die für die Umsetzung der Forderungen nach höherer Antriebsdynamik möglichen Lösungen und deren Folgen sowie die erforderlichen Zielstellungen zur Erfüllung der Genauigkeitsansprüche.

10.2.2 Zu Lösungsansätzen und Konsequenzen

Die sich aus den prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten für die Steigerung der Vorschubdynamik ergebenden Folgen, wie die Steifigkeitsminderung der Baugruppen und Verbindungsstellen sowie die Kraft- und Momenten-Absolutanregung der Struktur, führen über statisch und dynamisch bedingte Verformungen am TCP ohne ein Gesamtkonzept an Gegenmaßnahmen zu drastischen Genauigkeitseinbußen.

Die Zielstellungen für ein derartiges Gesamtkonzept zur Vereinbarkeit von Dynamik und Genauigkeit orientieren auf folgende Schwerpunkte:

Lösungen für kraftflussgerechte Baugruppengestaltung und steife Verbindungsstellen bei Einsatz von Leichtbauwerkstoffen unter Berücksichtigung geringer Fertigungs-, Montage- und Umbauaufwendungen,

Lösungen zur Kompensation der Kraft- und Momenten-Absolutanregung durch Verwendung von Kompensationsantrieben und Einleitung der resultierenden Antriebskräfte in den Schwerpunkten der bewegten Massen sowie Vermeidung der Rast- und Magnetkräfte durch Einsatz eisenloser Doppelkamm-Bauformen für die Lineardirektantriebe,

Lösungen zur Parallelisierung der Antriebe für die Realisierung eines trägheitsproportionalen Antriebsvermögens in Verbindung mit der Korrekturfähigkeit für Bewegungsfehler in allen 6 Freiheitsgraden am TCP.

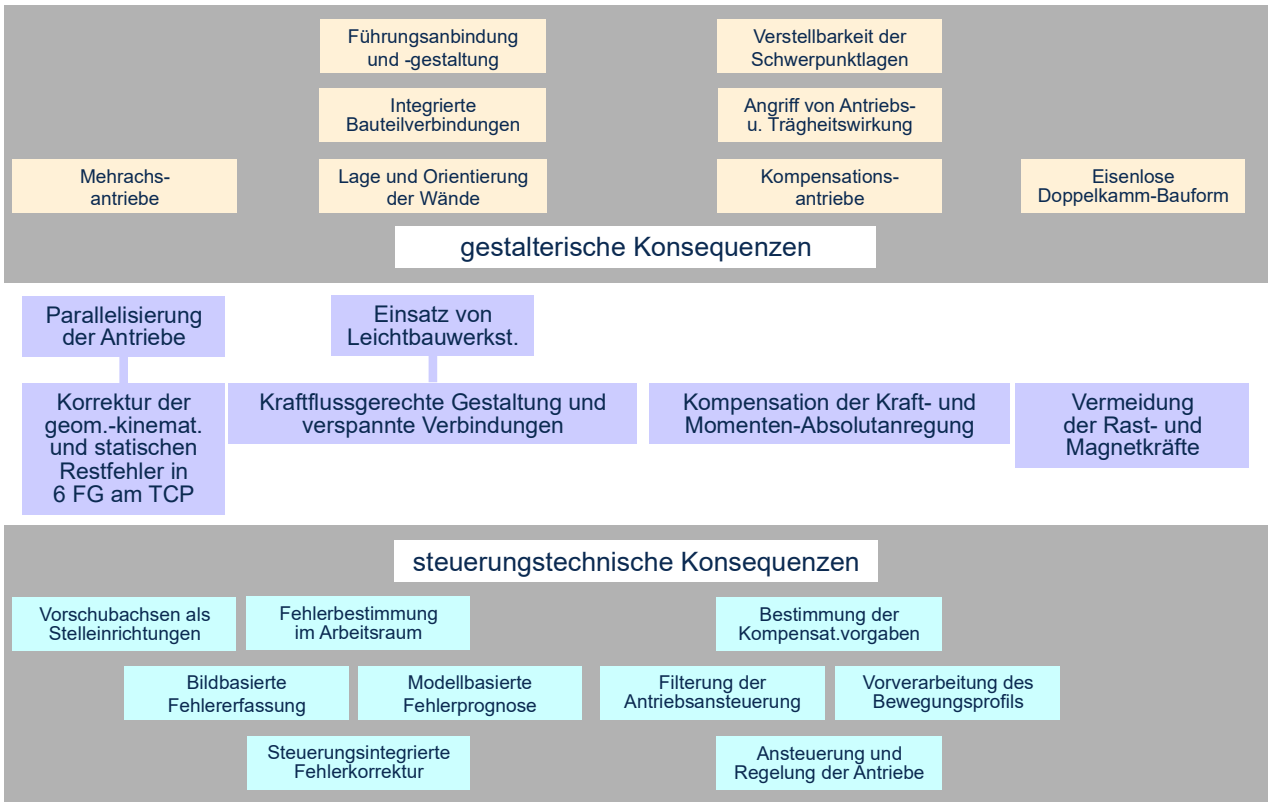


Bild 10.41 Gestalterische und steuerungstechnische Konsequenzen zur Erfüllung der Zielsetzungen

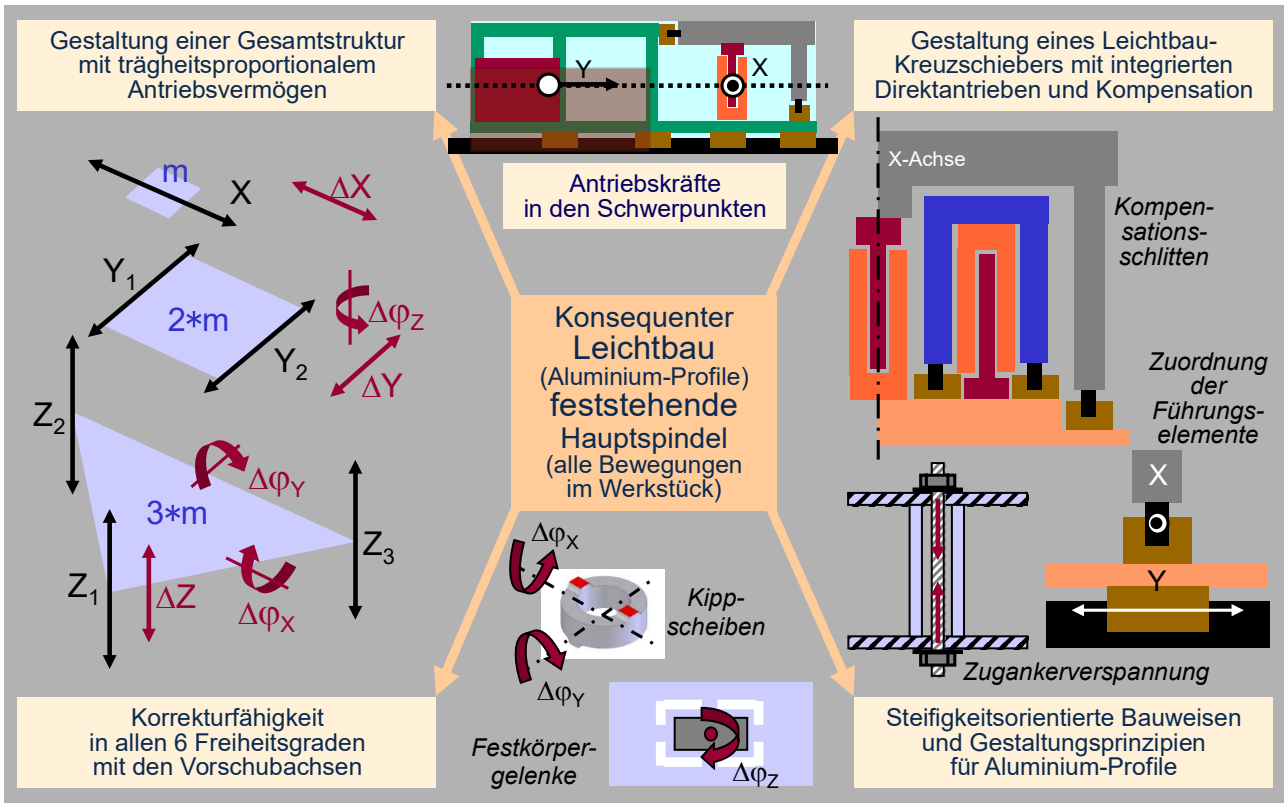


Bild 10.42 Aufgabenschwerpunkte und Lösungselemente

Bild 10.41 stellt gestalterische und steuerungstechnische Konsequenzen zur Erfüllung dieser Zielstellungen zusammen und liefert damit die Grundlage für die Teilaufgaben im Rahmen der Entwicklung eines Gesamtkonzeptes.

In Bild 10.42 sind den im Rahmen einer Umsetzung entstehenden Aufgabenschwerpunkten schematisch wesentliche Lösungselemente zugeordnet, die im Folgenden näher betrachtet und erläutert werden sollen.

10.2.3 Zum Gesamtkonzept für den Versuchsträger

Zunächst sind mit Bild Bild 10.43 noch einmal die einzelnen Aufgabenschwerpunkte für die Ausgestaltung des Gesamtkonzeptes für den Versuchsträger – Max – zusammengestellt und Orientierungsgrößen für technische Parameter angegeben sowie die zu berücksichtigenden Rand- und Nebenbedingungen notiert.

Die folgenden Darstellungen wollen Schwerpunkte der gestalterischen Umsetzung der vorgenannten Zielstellungen bis zur Baugruppenkonstruktion vertiefen.

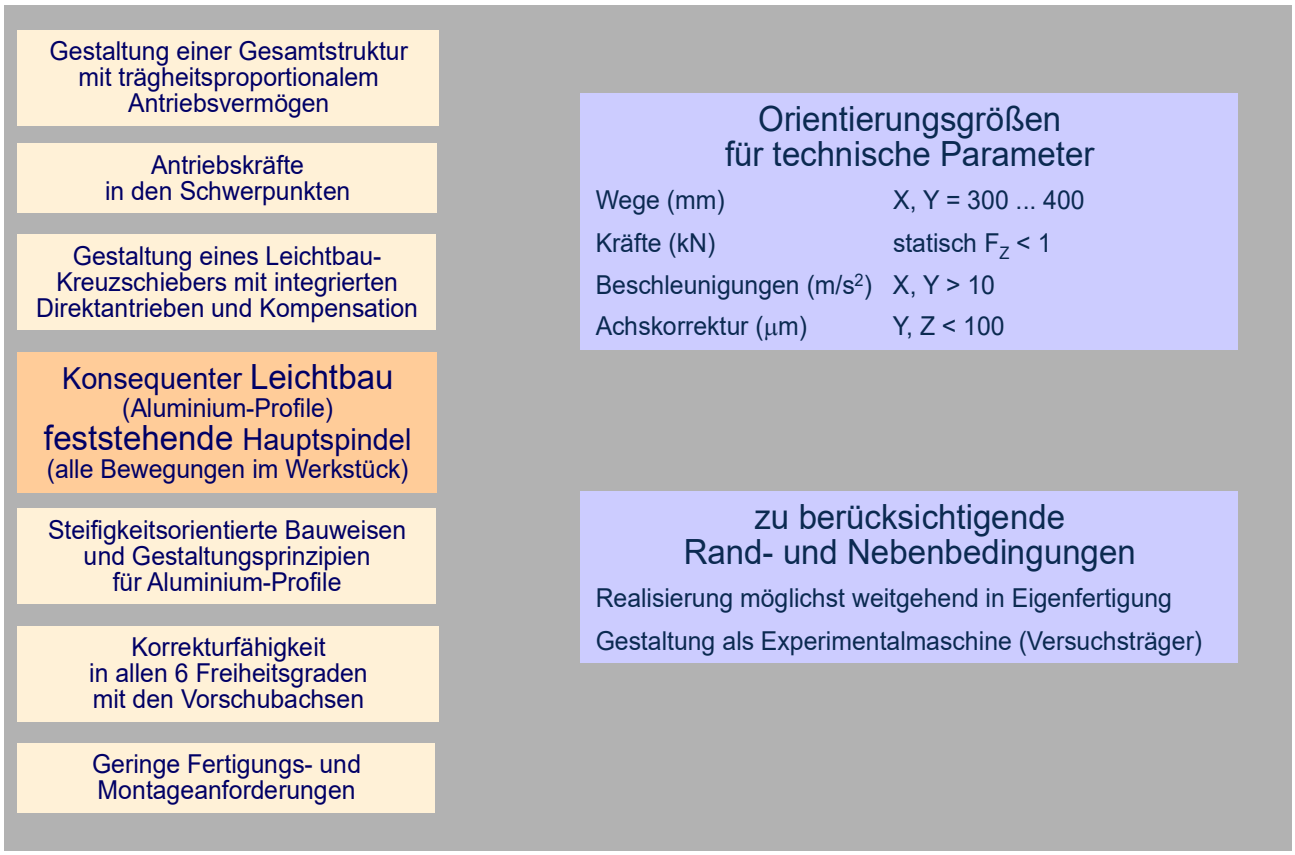


Bild 10.43 Aufgaben, Orientierungsgrößen und Bedingungen für das Gesamtkonzept

Struktur- und Antriebskonzept

Das Struktur- und Antriebskonzept orientiert sich an den Prämissen:

- Parallelisierung der Einzelantriebe zur Gewährleistung eines trägheitsproportionalen Antriebsvermögens und der Stellbarkeit von Korrekturbewegungen in allen 6 Freiheitsgraden mit den Vorschubachsen sowie
- Realisierbarkeit des Zusammenfalls der Schwerpunktlagen mit den resultierenden Antriebskräften.
- Zusätzlich soll Flexibilität in der Auswahl der Arbeitsspindel und deren Zuordnung zum Bewegungsraum ermöglicht werden.

Die Forderungen sind prinzipiell erfüllbar, wenn alle Bewegungen aufeinander aufbauen und auf der Werkstückseite liegen, wobei zur Verstellung in X-Richtung ein, für die Y -Richtung zwei und die Z -Richtung drei Antriebe parallel Verwendung finden.

Bild 10.44 stellt die daraus resultierenden Grundüberlegungen schematisch zusammen.

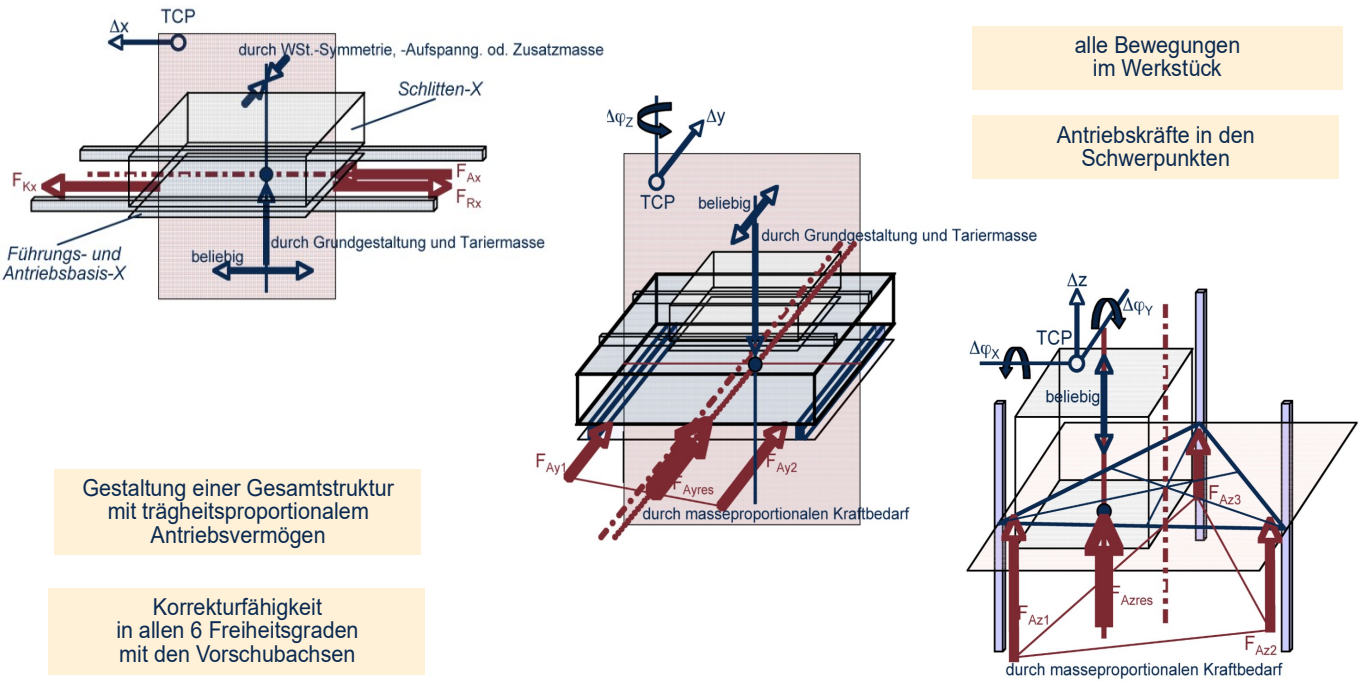


Bild 10.44 Struktur- und Antriebskonzept zur Erfüllung der Forderungen nach trägheitsproportionalem Antriebsvermögen, Lage der Antriebskräfte in den Schwerpunkten und Korrekturfähigkeit in allen 6 Freiheitsgraden mit den Vorschubachsen

Bild 10.44 veranschaulicht die Untersetzung des Strukturkonzeptes mit der X - und Y - Antriebe sowie -Schlitten tragenden Z -Plattform, die über drei Kugelgewindetriebe vertikal verstellbar ist und in einem aus Winkelprofilen bestehendem Säulengestell über Profilschienenführungen mit integrierten Messsystemen geführt wird.

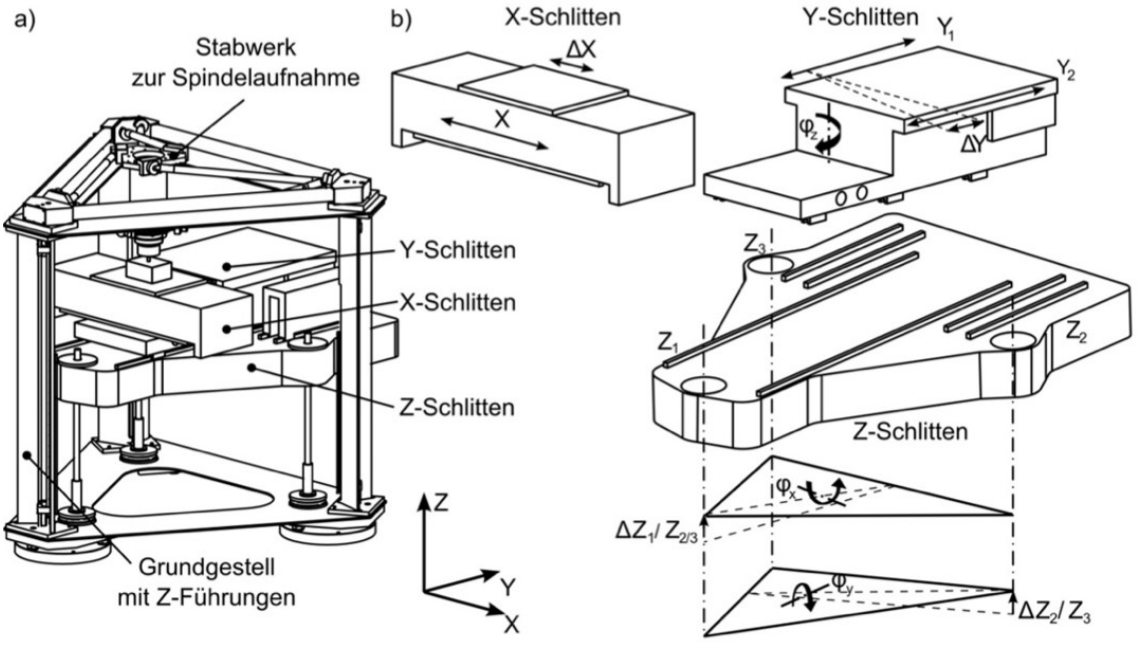


Bild 10.45: Untersetzung des Strukturkonzeptes

a) für das Gesamtsystem;
b) für die X-, Y - und Z -Bewegung sowie Korrekturen

Gestaltung des Kreuzschlittens

Eine der größten Herausforderungen bei der Umsetzung der formulierten Ansprüche liegt in der konkreten Gestaltung des X- Y -Kreuzschlittens.

Die Lösungsidee für die Vereinbarkeit von Bauraumrestriktionen, Lage der Antriebsebenen und Baugruppenschwerpunkte sowie steifer Kraftflüsse bei Leichtbaugestaltung besteht darin, den X-Schlitten und -Antrieb nicht „auf“ sondern „vor“ dem Y-Schlitten bzw. -Antrieb anzuordnen und eine günstige Zuordnung von Wagen und Schienen der Führungen zu Basis- und Bewegungseinheiten der Schlitten vorzunehmen.

Ein weiterer am X- Y-Kreuzschlitten zu lösender Problemschwerpunkt liegt in der Anordnung und Gestaltung der Kompensationsantriebe für die X- und Y-Achsen. Hierbei sind insbesondere Forderungen hinsichtlich Symmetrie, Masseverteilung und Krafteinleitung zu erfüllen.

Bild 10.46 veranschaulicht die Gestaltungslösung für den Kreuzschlitten mit integrierten Direktantrieben und Impulskompensation.

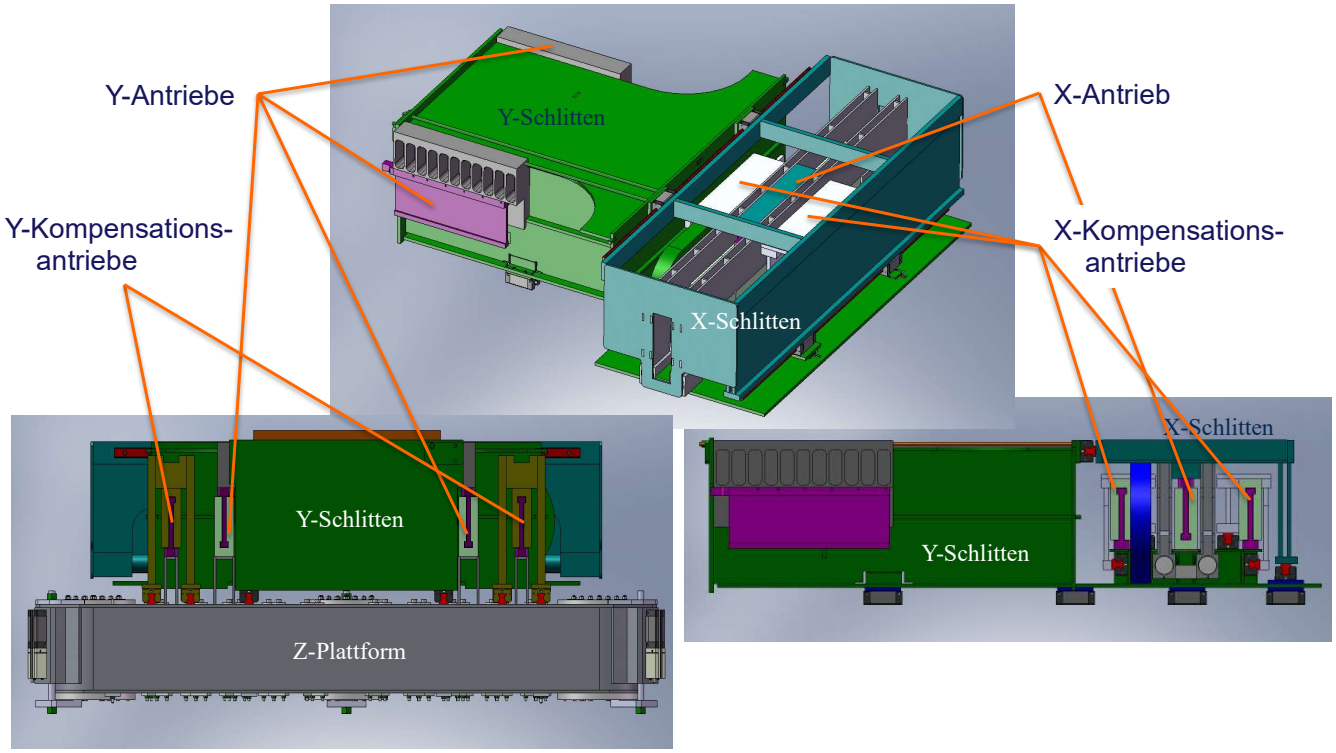


Bild 10.46 Gestaltung des Leichtbau-Kreuzschlittens mit integrierten Direktantrieben und Impulskompensation

Steifigkeitsorientierte Leichtbauweise

Eine gesamtverträgliche Lösung zur Erfüllung der Einzelforderungen nach

- hoher Steifigkeit, insbesondere der direkt kraftleitenden Strukturen und Verbindungsstellen,
- Minimierung der Massen der bewegten Baugruppen bei gezielter Beeinflussbarkeit deren Schwerpunktlagen,
- Verwendung von Leichtbauwerkstoffen, insbesondere Aluminiumprofilen,
- geringen Fertigungs- und Montageanforderungen sowie
- möglichst flexibler Bauweise zur Gewährleistung einfacher Umbauten und Modifikationen am Versuchsträger
- schließt klassische Orientierungen auf der Grundlage von geschweißten oder gar gegossenen Baugruppen weitestgehend aus. Unter den vorgenannten Gesichtspunkten als besonders geeignetes Gestaltungs- bzw. Aufbauprinzip wurde für die konstruktive Ausführung sowohl der bewegten als auch der Basisbaugruppen konsequent die Zugankerverspannung eingesetzt. Bild 10.47 und Bild 10.48 veranschaulichen dazu gefundene Gestaltungslösungen und Aufbauprinzipien an der Z -Plattform und dem Säulengestell.

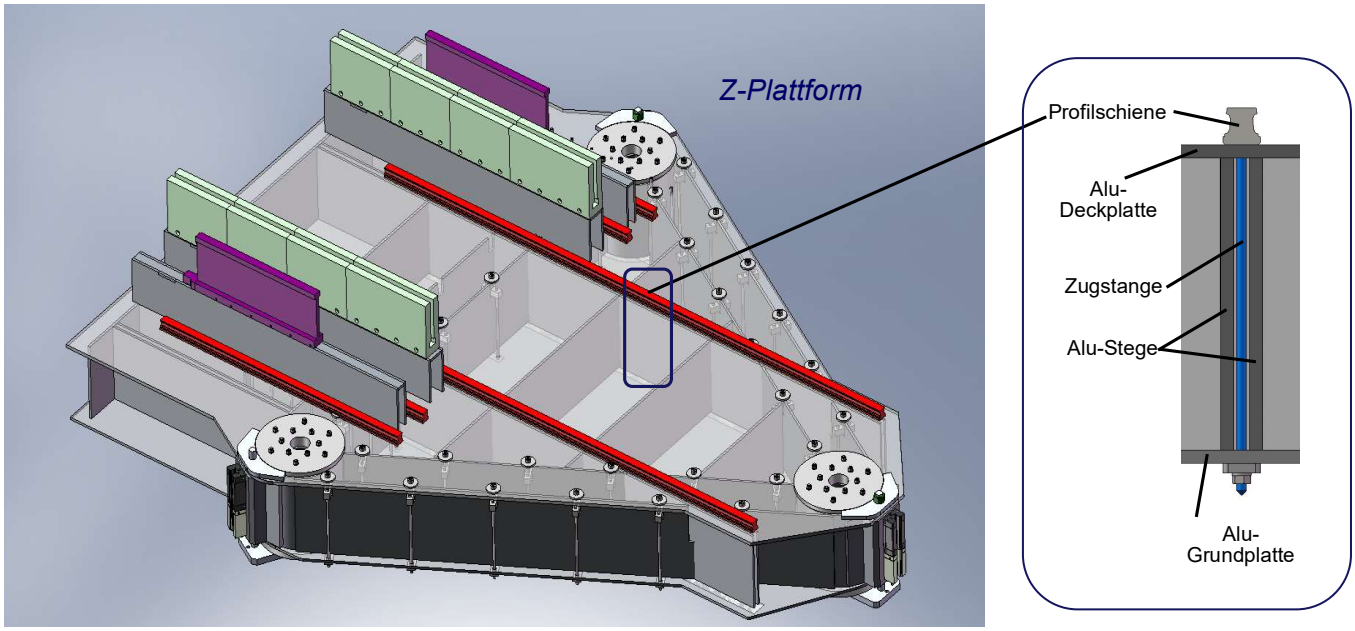


Bild 10.47: Zugankerverspannung von Platten-Steg-Verbindungen am Beispiel der Aluminium-Struktur der Z-Plattform

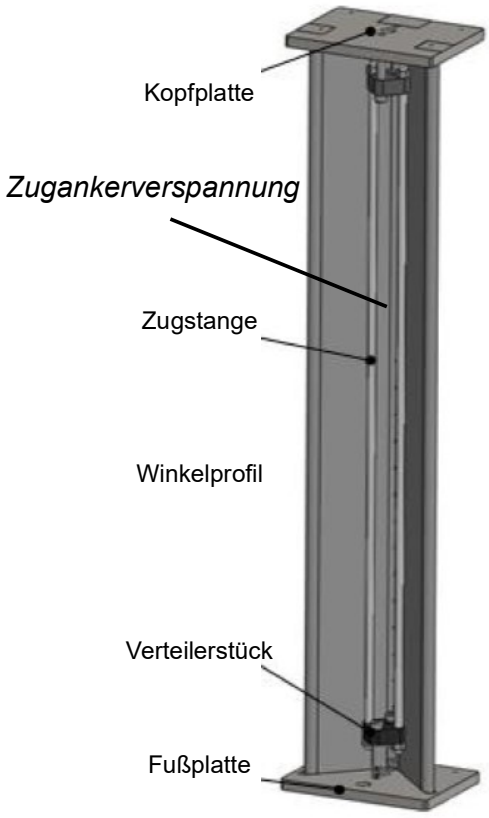


Bild 10.48 Zugankerverspannung von Profilverbindungen am Beispiel der Gestellsäulen

Die Aufnahme der Frässpindel ist als anpassungsfähiges Stabwerk ausgeführt. Die konkrete Gestaltung wurde hinsichtlich der horizontalen und vertikalen Steifigkeiten an der Spindelnase optimiert,Bild 10.49.

Die Ausführung kraftleitender Strukturen mit Stabtragwerken und über Zuganker verspannten Profilen wurde bereits bei der Hexapod-Parallelkinematik „Felix“ – z.B. [4], [5] – erfolgreich eingesetzt und langjährig erprobt, wobei sich alle erwarteten positiven Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit, Leichtbau, einfacher Fertigung und Montage sowie Strukturflexibilität bestätigt haben.

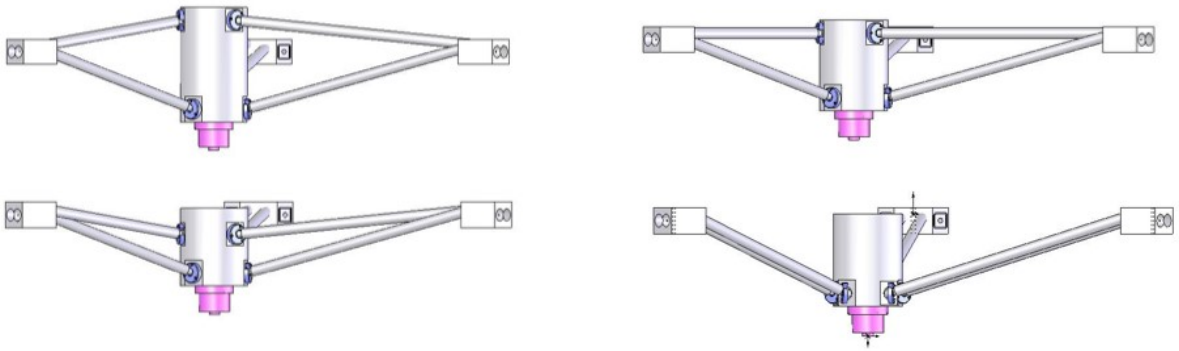


Bild 10.49 Variation der Geometrie des Stabwerks zur Spindelaufnahme

Gesamtaufbau des Versuchsträgers

Entsprechend den zum Struktur- und Antriebskonzept, zum Kreuzschlitten und den Leichtbauweisen getroffenen Grundentscheidungen sowie den daraus abgeleiteten Untersetzungen in der Gestaltung, einschließlich einer Fülle dabei erforderlicher Detaillösungen, ergibt sich der mit Bild 10.50 dargestellte Gesamtaufbau für den Versuchsträger.

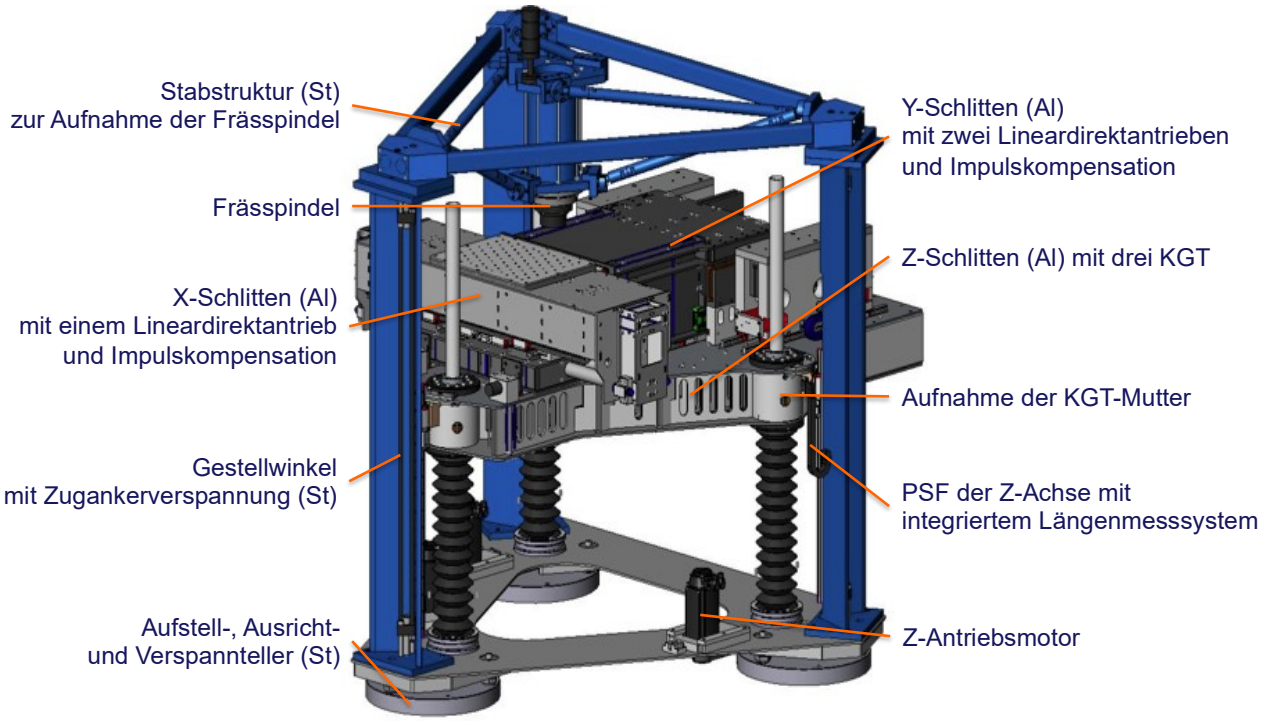


Bild 10.50 Gesamtkonzept für den Aufbau des Versuchsträgers

Das dargestellte Gesamtkonzept veranschaulicht die Realisierung der der Entwicklung zugrunde gelegten Hauptforderungen, einschließlich der Stellbarkeit für Korrekturbewegungen in allen 6 Freiheitsgraden im Arbeitsraum mit Hilfe der vorhandenen Vorschubantriebe. Diese „Korrekturfähigkeit“ setzt jedoch nicht nur voraus, dass die entsprechenden Stellantriebe verfügbar sind, sondern sie bedarf zudem konstruktiver Lösungen hinsichtlich der Anbindung der Antriebs- und Führungselemente der in ihrer Lage bzw. Orientierung zu korrigierenden Bewegungseinheiten, um die dabei auftretenden Reaktionskräfte möglichst klein zu halten ohne andererseits die bestehenden Steifigkeitsforderungen zu untergraben. Darauf soll folgend anhand zweier Gestaltungsbeispiele kurz eingegangen werden.

10.2.4 Gestaltungselemente zur Korrekturfähigkeit

Die hinsichtlich einer rückstellkraftarmen Korrekturfähigkeit bei steifer Lastübertragung zu gestaltenden Schlittenanbindungen zu Antrieb und Führung betreffen an der Z -Plattform die Sicherstellung der Neigungsfähigkeit um die X- und Y-Achse und am Y-Schlitten die Verdrehbarkeit um die Z-Achse. Dabei sollen die zu korrigierenden Winkelbewegungen in den Größenordnungen bis maximal $200\ \mu m/mm$liegen.

Durch die Korrekturbewegungen wird die Plattform- bzw. Schlittenlage sowohl bezüglich der Antriebs- als auch der Führungsachsen verändert. Folgend soll daher am Beispiel der Z -Plattform die Anbindung der Kugelgewindetrieb-Mutter und am Beispiel des Y -Schlittens die Anbindung der Führungselemente demonstriert werden.

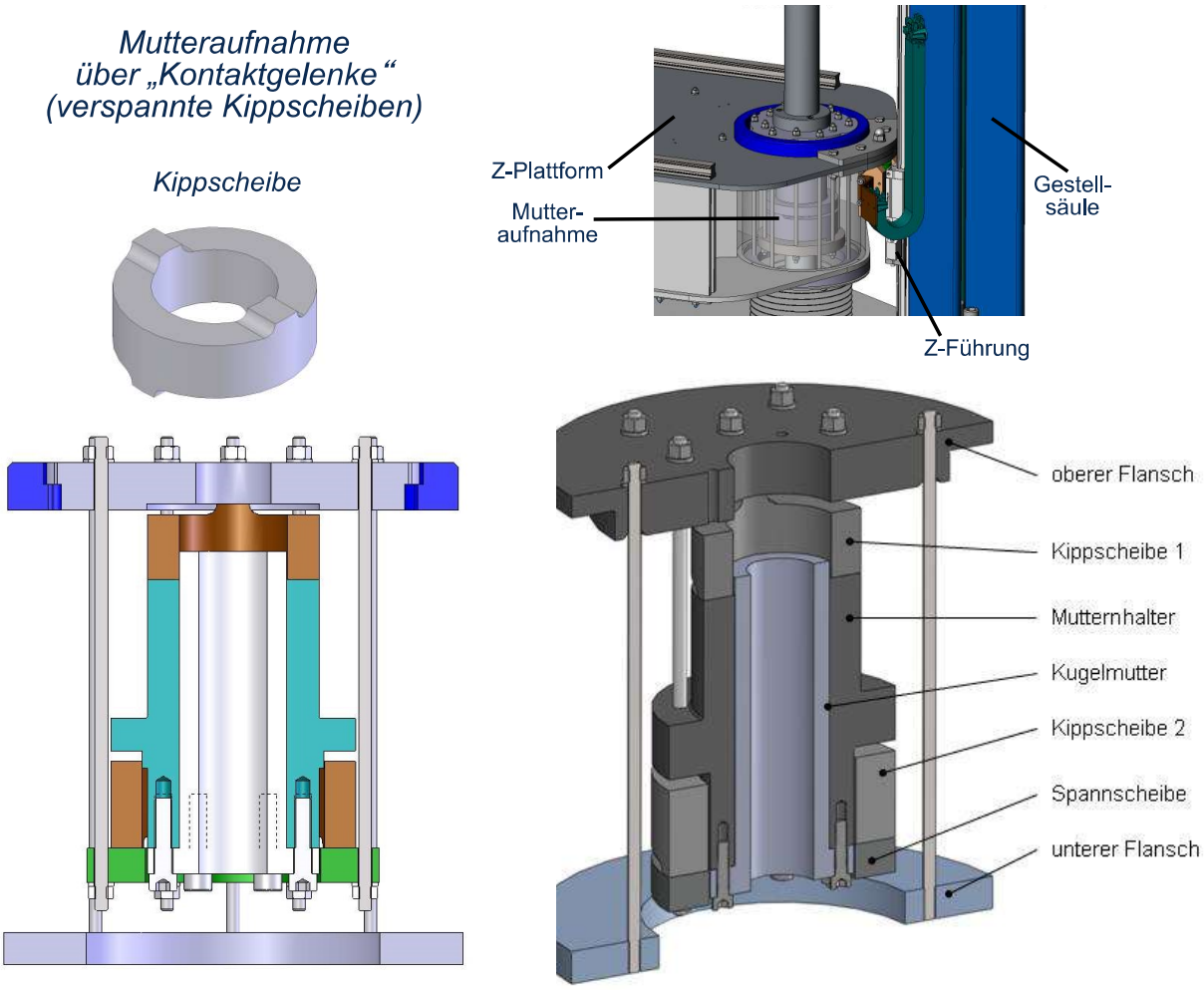


Bild 10.51: Gestaltungselemente zur Minimierung der Reaktionskräfte infolge der Korrekturbewegungen um Δx und $\Delta\varphi_z$ an der Z-Plattform

Bild 10.51 veranschaulicht, wie die Mutter-Aufnahme in der Z-Plattform einen Neigungsausgleich bei geringen Rückstellkräften und damit geringe Zusatzbelastungen im Spindel-Mutter-Wälzkontakt durch Verspannung des Mutterhalters mit der Plattform über entsprechend gestaltete Kippscheiben sicherstellt. Damit erfolgt die Mutteraufnahme in der Plattform gewissermaßen über „Kontaktgelenke“, welche geringe Neigungswinkel der Plattform gegenüber der Mutterachse zulassen.

In Bild 10.52 ist schematisch die Anbindung der Führungswagen des Y-Schlittens gezeigt. Durch entsprechend gestaltete Festkörpergelenke wird hier die kraftarme Verdrehbarkeit des Y-Schlittens – mit der X-Führungsbasis – für kleine Korrekturbewegungen gegenüber der die Y-Basis bildenden Z-Plattform ermöglicht.

Das Foto von Bild 10.53 zeigt den komplett realisierten Versuchsträger.

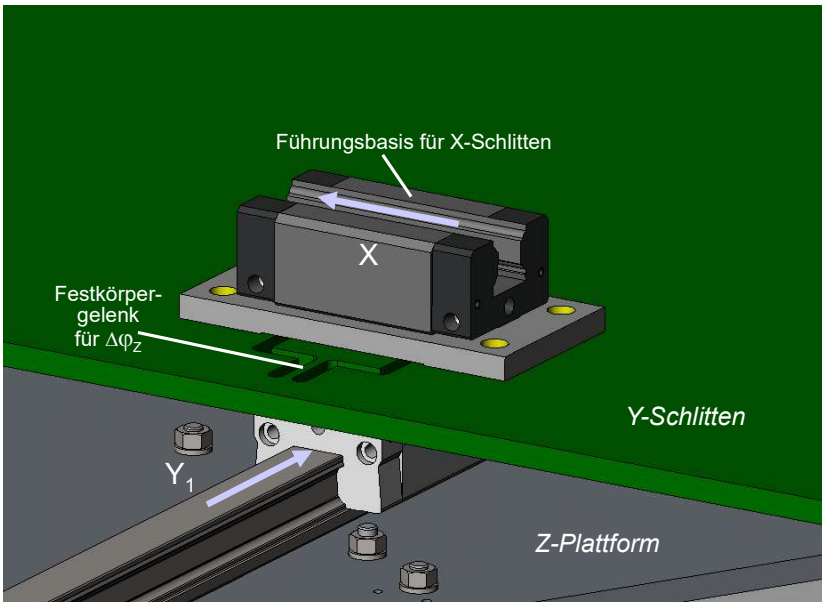


Bild 10.52 Aufnahme der Führungswagen über Festkörpergelenke

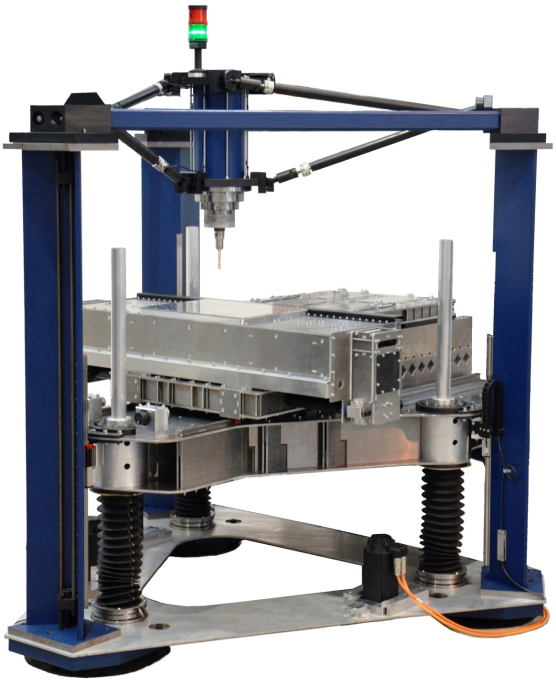


Bild 10.53 Realisierter Versuchsträger

11 Literaturverzeichnis

[1] M. Weck, Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme 1- Maschinenarten und Anwendungsbereiche, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998.

[2] M. Weck, Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme 2 - Konstruktion und Berechnung, Berlin Heidelberg New York: Springer, 1997.

[3] M. Weck, Werkzeugmaschinen und Ferigungssysteme 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2001.

[4] K. Großmann und V. Möbius, „Hexapod für Handling zwischen Roboter und Werkzuegmaschine," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZwF 95,* pp. 290-293, 6 2000.

[5] B. Kauschinger, „Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit an einem Hexapod einfacher Bauart," 2006.

12 Abkürzungen

AS	Ablaufsprache
AWL	Anweisungsliste
FBS	Funktionsbausteinsprache
HSK	Hauptspindel Konus
KGT	Kugelgewindetrieb
KOP	Kontaktplandarstellung
PLC	Programmable Logical Control
SPS	Speicher Programmierbare Steuerung
ST	strukturierter Text