# 1 Einbeziehung des Bearbeitungsprozesses in die Modellbildung zum Betriebsverhalten von Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematiken

R. Neugebauer, S. Ihlenfeldt, J. Leopold, K. Hoyer, M. Wabner

#### Einleitung

Bei der spanenden Bearbeitung auf Werkzeugmaschinen spielen sowohl die Produktivität als auch die Fertigungsgüte eine sehr wesentliche Rolle. Beides wird durch die Maschine selbst und durch den konkreten Bearbeitungsprozess beeinflusst und bestimmt. Daher ermöglicht eine auf die Leistungsfähigkeit und die spezifischen Eigenschaften der Werkzeugmaschine abgestimmte Bearbeitungstechnologie (Werkzeug-/ Schneidstoffauswahl, Schnittparameter) solche Bearbeitungsergebnisse, die den gestellten und steigenden Anforderungen hinsichtlich Qualität und Produktivität sicher genügen. Diese Abstimmung der Bearbeitungstechnologie an die spezifischen Maschineneigenschaften setzt gesicherte, quantifizierbare Kenntnisse zur Wechselwirkung zwischen Maschine und Prozess voraus und erfordert die Erfassung des Fertigungsprozesses und dessen Charakterisierung für eine adäquate Prozessmodellierung. Nur dann kann ein entscheidender Schritt hin zur "Selbstoptimierenden Prozessführung" realisiert werden.

Dies gilt im besonderen Maße für Prozesse der spanenden Bearbeitung auf Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken. Parallelkinematiken haben im Vergleich zu konventionellen Strukturen ein im Arbeitsraum stark variierendes Verhalten (kinematisch bzw. dynamisch). Bearbeitungstests hatten gezeigt, dass sich dieses Verhalten auch bei Zerspanungsaufgaben zeigt. Beispielsweise wurde festgestellt, dass abhängig von der Bearbeitungsposition im Arbeitsraum und der Bearbeitungsrichtung die Rauheitswerte der bearbeiteten Oberfläche um bis zu 40 %, die Spanungskräfte um bis zu 100 % variierten. Des Weiteren konnten deutliche Unterschiede in der Standzeit der Werkzeuge ermittelt werden. Aus diesen Feststellungen ergaben sich die Fragestellungen, wie die ortsabhängigen Maschineneigenschaften auf den Prozess wirken und wie man für die Zukunft das Gesamtverhalten vorhersagen kann, um die Auslegung der Maschinen zu verbessern und das "Einfahren" der Fertigungsprozesse zu verkürzen. Dabei reicht es nicht, nur die Maschine zu optimieren, z.B. durch intelligente thermische Kompensation, sondern es muss vielmehr auch der Fertigungsprozess auf die Spezifika des Maschinenkonzeptes und die Maschinensteuerung an den Fertigungsprozess angepasst werden.

Diese wechselseitige Abstimmung und Anpassung von Maschine und Prozess ist aber nur möglich, wenn die konkreten Eigenschaften anhand von Modellgrößen systematisch erfasst

und identifiziert werden, um somit ein gesicherte Prozessbeschreibung und Modellierung zu gewährleisten und damit eine Integration signifikanter Prozessparameter in Steuer- und Regelalgorithmen und in die NC-Bearbeitungsprogramme zu ermöglichen [2]. Die aus dieser Herausforderung abgeleiteten Ziele und Vorgehensweisen sind kurz in Bild 1-1 zusammengefasst.



Bild 1-1: Ziele und Vorgehensweise

## 1.1 Versuchsmaschinen

Während das statische, dynamische und thermische Verhalten von Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik bereits Gegenstand umfangreicher Untersuchungen ist [1,2], liegen für die verschiedenen Fertigungsprozesse, insbesondere für die spanende Bearbeitung, bisher noch zu wenige Erkenntnisse vor. Ein Grund dafür ist, dass die Erfassung und Systematisierung prozessrelevanter Daten für die Prozessidentifikation einen zeitlich sehr hohen experimentellen Aufwand bedeutet. Allein durch die Möglichkeit und Notwendigkeit, eine Vielzahl von technologischen Prozessparametern zu variieren, erwächst ein umfangreiches Versuchsprogramm.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens musste sich daher auf eine konkrete Bearbeitungsaufgabe beschränkt werden. Es wurde das Mehrachsfräsen ausgewählt, da die vorhandenen parallelkinematischen Werkzeugmaschinen ihr Potenzial für eine Fräsbearbeitung im Werkzeug- und Formenbau besitzen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen Kinematiken mit längenveränderlichen Streben (Fünf-Achs-Fräsmaschinen Mikromat Hexapod 6X HEXA und METROM Pentapod P800). Die Pentapod-Kinematik ist mit einem zusätzlichen (redundanten) Rundtisch ausgestattet. Die MIKROMAT 6X HEXA besitzt einen Arbeitsraum von 630 x 630 x 630 mm<sup>3</sup> und die METROM P800 von 800 x 800 x 500 mm<sup>3</sup>.

DOF.					
Chains	2	3	4	5	6
2	8	9	10	11	12
	(4,4/3,5/2,6)	(4,5/3,6)	(5,5/4,6)	(5,6)	(6,6)
3	14	15	16	17	18
	(4,5,5/2,6,6/ 4,4,6/3,5,6)	(5,5,5/4,5,6 3,6,6)	(5,5,6/4,6,6)	(5,6,6)	(6,6,6)
4	20	21	22	23	24
	(5,5,5,5/4,5,5,6/ 3,5,6,6/4,4,6,6)	(5,5,5,6/4,5,6,6 3,6,6 <sub>6</sub> )	(5,5,6,6/ 4,6,6,6)	(5,6,6,6)	(6,6,6,6)
5	26	27	28	29	30
	(5,5,5,5,6) 4,5,5,6,6)	(5,5,5,6,6/ 4,5,6,6,6)	(5,5,6,6,6/ 4,6,6,6,6)	(5,6,6,6,6)	(6,6,6,6,6)
6	32	33	34	35	36 🔍
	(5,5,5,5,6,6)	(5,5,5,6,6,6)	(5,5,6,6,6,6)	(5,6,6,6,6,6)	(6,6,6,6,6,6)

#### Struktursystematik

**METROM Pentapod P800** 

Mikromat Hexapod 6X HEXA



Bild 1-2: Untersuchte Maschinenstrukturen

## **1.2** Experimentelle Untersuchung des Betriebsverhaltens im Arbeitsraum

## **1.2.1** Bearbeitungstests Mikromat 6X HEXA

Vorversuche hatten gezeigt, dass es deutliche Unterschiede in der Oberflächenqualität (Rauheit) gefräster Bauteile und beim Verschleiß und der Standzeit der Fräser in Abhängigkeit sowohl vom Bearbeitungsort im Arbeitsraum der parallelkinematischen Werkzeugmaschine als auch von der Bearbeitungsrichtung gibt. Der Werkzeugverschleiß und dessen zeitliche Entwicklung bestimmen die Werkzeugstandzeit bzw. den -standweg und beeinflusst die erzielte Oberflächengüte der gefrästen Fläche. Der Verschleiß wird

sowohl durch die konkreten Spanungsbedingungen als auch durch die kinematischen und dynamischen Eigenschaften der Werkzeugmaschine beeinflusst. Damit sind festzustellende Unterschiede beim Standzeitverhalten der Werkzeuge in Abhängigkeit von den konkreten technologischen Parametern, der Werkzeug-/ Werkstückposition im Arbeitsraum und der Vorschubrichtung ein wesentliches Maß für prozess- und maschinenbedingte Unterschiede und damit signifikant für die Charakterisierung des gesamten Bearbeitungsprozesses.

Allein bei Veränderung des Bearbeitungsortes im Arbeitsraum der Maschinen, insbesondere der 6X HEXA wurden Unterschiede bei den Spanungskräften von über 100 % und bei der Oberflächenrauheit von bis zu 40 % festgestellt. Aus diesem Grund wurden zur Analyse der Zusammenhänge zwischen Maschine und Prozess, d.h. zur Identifikation und der Prozessmodellierung, systematische Fräsversuche geplant. Unter konstanten technologischen Parametern wird der Einfluss der Maschine (Ort und Richtung der spanenden Bearbeitung) quantitativ und qualitativ analysiert. Die Versuchsergebnisse bilden dann die notwendige Datenbasis zur Charakterisierung des Zusammenhanges zwischen Maschine und Prozess und zur Ableitung von maschinenangepassten Bearbeitungsstrategien und deren Berücksichtigung im Pre-Prozess bei der NC-Programmgenerierung.

Die ersten Fräsversuche wurden an der Mikromat 6X HEXA durchgeführt. Zur Erfassung der orts- und richtungsabhängigen Bearbeitungsunterschiede wurden die Fräsversuche bei unterschiedlichen Werkstückpositionen im Arbeitsraum festgelegt. Dazu erfolgte eine Einteilung des Arbeitsraumes (Arbeitsfläche in x-y-Richtung) in neun, sich jeweils geringfügig überlappende Werkstückpositionen gemäß Bild 1-3.

Für fünf der neun Bearbeitungspositionen (1, 2, 3, 4, 5) wurde die statische Steifigkeit messtechnisch ermittelt, womit signifikante Bereiche des Arbeitsraumes und damit auch relevante Strebenstellungen der sechs Streben erfasst wurden, siehe Bild 1-3.

	5	8	4	Position in der X-Y-Ebene	Steifigkeit in Belastungsrichtung [N/µm]			
			<b>]</b>		Kraft in N	laschinenkoo	rdinatenrichtung	
	9	1	7		X	Y	Z	
				1	7,5	8,1	22,5	
у	2	6	3	2	7,6	7,3	21,0	
				3	6,9	8,8	20,3	
(0,	0,z)			4	7,8	8,4	18,3	
	→ x			5	7,0	7,6	21,7	

## Bild 1-3: Aufteilung des Arbeitsraumes und Positions- und Richtungsabhängigkeit der statischen Steife 6X HEXA

Die dargestellten Messwerte beinhalten auch die Nachgiebigkeit eines in die Werkzeugspindel eingespannten Ersatzwerkzeuges. Die Steifigkeiten an der

Werkzeugspindel sind größer und betragen in X- und Y-Richtung ca. 10 bis 11,5 N/µm und in der Z-Richtung ca. 24 N/µm. Die Positionsabhängigkeit der Steifigkeiten beträgt für die X-und Y-Richtung ca.  $\pm$  11-20 % und für die Z-Richtung  $\pm$  23 % .Die Abhängigkeit der mittleren Steifigkeit von der Belastungsrichtung beträgt in der X-Y-Ebene ca. 10 %. Erwartungsgemäß ist die Maschine in der Z-Richtung wesentlich steifer als in X- und Y-Richtung.

Systematische Fräsversuche (Gleichlauffräsen, Trockenbearbeitung) erfolgten an den fünf der neun Werkstückpositionen. In Bild 1-4 sind die relevanten Werkzeug-, Werkstück- und Bearbeitungsdaten zusammengestellt.



Bild 1-4: Werkstückpositionen im Arbeitsraum (links), Prozessdaten

Das Werkstück wurde bei der Bearbeitung grundsätzlich auf eine Kistler-Messplattform (3-Komponenten-DynamometerTyp 9255B) gespannt (Bild 1-5), so dass während der Bearbeitung ständig eine Messung der einzelnen Kraftkomponenten erfolgen konnte. Die Messung und Speicherung der Kraftmess-Signale erfolgte für jede sechste Fräsbahn.

Der eigentlich zweischneidige Schaftfräser wurde bei allen Versuchen nur mit einer Schneide bestückt. Die Verwendung eines "Einschneiders" erlaubt eine eindeutige Zuordnung der Messgrößen (Kräfte) zum Verschleiß an der Schneide. In Bild 1-5 ist der verwendete Fräser mit Spannfutter abgebildet.



Bild 1-5: Werkstück (rechte Hälfte mit Fräsbahnen) aufgespannt auf Kistler-Messplattform (links), 16 mm-Schaftfräser mit TiN-beschichteter Wendeplatte (Sandvik)

Die Auswertung der ersten Untersuchungen erfolgte hinsichtlich der ortsabhängigen Zerspanungskräfte in Bezug zu den ortsabhängigen Oberflächenrauheiten [3]. Im Bild 1-6 sind die Ergebnisse für dreiachsige Bearbeitung (d.h. senkrechte Spindel) und Fräsrichtung X zusammengefasst. Deutlich zu erkennen ist die Positionsabhängigkeit der Oberflächenrauheit.



#### Bild 1-6: Mehrachsfräsen auf einem Hexapod

Weitere Bearbeitungstests, die als Bewertungskriterium für die Positions- und Richtungsabhängigkeit den Werkzeugstandweg nutzen, wurden jeweils bis zum Erreichen der kritischen Verschleißmarkenbreite VB = 0,3 mm durchgeführt. Um diese zu ermitteln wurde jeweils nach einem festgelegten Fräsweg die Bearbeitung gestoppt und die Verschleißmarkenbreite ermittelt. Zu diesen Zeitpunkten wurden ebenfalls die Schnittkraftkomponenten *Fx*, *Fy*, *Fz* (im globalen Koordinatensystem) registriert und die Oberflächenrauhigkeit der zuletzt bearbeiteten Fräsbahn gemessen. Die gemessenen Werte zeigen signifikante Unterschiede abhängig von der Vorschubrichtung und der Position im Arbeitsraum.

In Tabelle 1-1 sind beispielhaft die gemessenen Kräfte bei Bearbeitungstest Position 1 am Anfang, in der Mitte und am Ende des Standweges zusammengestellt.

Versuch		Anfang		Mitte			Ende			
Position	Richtung	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	$ F_{z} $	F <sub>x</sub>	$ F_{y} $	F <sub>z</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
1	Х	73	72	62	80	71	89	241	91	58
1	Y	311	76	5	305	83	9	466	117	16

Tabelle 1-1: Gemessene Bearbeitungskräfte in Position 1

Bei Position 1 ergaben die Fräsversuche weiterhin einen kürzeren Standweg für das Fräsen in Y-Richtung als in –X-Richtung (vgl. Bild 1-7).

 $v_{o}$  = 180 m/min,  $\,f_{z}$  = 0,1 mm,  $\,a_{p}$  = 1 und 2 mm, Vorschubrichtungen: -x and y



Bild 1-7: Standweg in Position 1 in Abhängigkeit von Vorschubrichtung und Schnitttiefe ap

Nachfolgend dargestellt sind ermittelte Positionsabhängigkeiten (Vergleich Position 1 und 2, Bilder 1-8, 1-9). Der Standweg ist in dieser Position kürzer als in der zentralen Position 1. Die Abbildung zeigt weiterhin den Effekt von geänderten technologischen Parametern. So sind höhere Schnittgeschwindigkeiten und Zahnvorschübe besser geeignet für die Bearbeitung von C45 Stahl.





Bild 1-8: Vergleich der Standwege für Position 1 und 2



 $v_c$  = 180 m/min,  $\ f_z$  = 0,1 mm,  $\ a_p$  = 2 mm, Vorschubrichtung: -x

Bild 1-9: Rauheitswerte R<sub>Z</sub> der bearbeiteten Oberflächen

Diese Zusammenhänge zwischen Bearbeitungsort und Bearbeitungsrichtung und den erreichten Werkzeugstandwegen wird auch anhand der gemessenen Spanungskräfte deutlich. Hierbei ist eine signifikante Korrelation zwischen Schnittkraft (Kraftkomponente orthogonal zur Vorschubrichtung) und Verschleiß  $VB_{max}$  zu verzeichnen, Bild 1-10. Das Bestimmtheitsmaß (Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten) liegt bei allen Versuchen im Bereich von 0,8 bis 0,96.



Bild 1-10: Korrelation zwischen Verschleiß und Schnittkraft, Position 4, Vorschub X

## **1.2.2 Bearbeitungstests METROM P800**

An den Bearbeitungstests an der 6X HEXA hat sich gezeigt, dass die Fräsversuche verkürzt werden können. Deshalb wurde an der P800 eine andere Vorgehensweise angewendet. Als günstige Vorgehensweise wird das Fräsen von Kreisbahnen angesehen. Hierbei ändert sich die Vorschubrichtung kontinuierlich. Bei entsprechender Wahl eines niedrigen Durchmessers bleiben die ortsabhängigen Maschineneigenschaften konstant und man kann durch das Auswerten der Oberflächenrauheiten die Richtungsabhängigkeiten erkennen. Dieses Vorgehen verkürzt für zukünftige Aufgaben den Testumfang erheblich und ermöglicht eine stärkere Variation von Prozessparametern und zu untersuchenden Positionen Die Versuchsanordnung ist in Bild 11 dargestellt. Die Versuchsbedingungen unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die Schnittparameter.



Bild 1-11: Werkstückpositionen im Arbeitsraum (links), Werkzeug-, Werkstück- und Bearbeitungsdaten

Als Bewertungskriterium wurden erreichte Oberflächenrauheiten in z-Richtung (Stirnfräsen) herangezogen. In Bild 1-12 sind für die drei verschiedenen Bearbeitungspositionen gemessene Oberflächenrauheiten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der zentralen Position P1 die höchsten Oberflächenqualitäten erreicht werden. An den Positionen P2 und P3, die sich jeweils an den Rändern des Arbeitsraumes befinden, werden im Mittel nur unwesentlich niedrigere Werte erreicht. Es ist jedoch eine erhöhte Richtungsabhängigkeit der Rauheitswerte festzustellen.

Um die Fräsergebnisse qualitativ einordnen zu können, wurden unter gleichen Bedingungen Versuche auf einer seriellen Maschine DIGMA 850 HSC durchgeführt. In Bild 1-13 sind die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den Resultaten der P800 dargestellt. Besonders in der zentralen Bearbeitungsposition der P800 unterscheiden sich die Ergebnisse kaum von der 850 HSC. Daraus kann abgeleitet werden, dass mit Parallelkinematiken durchaus Bearbeitungsqualitäten erreicht werden, die mit denen klassischer Maschinen vergleichbar sind.



Bild 1-12: Mehrachsfräsen METROM P800: Oberflächeneigenschaften und statische Steifigkeiten an den Bearbeitungspositionen



Bild 1-13: Vergleich der Oberflächenrauheit Ra zwischen der Parallelkinematik METROM P800 und der seriellen Maschine DIGMA 850 HSC

#### 1.2.3 Modellierung und Ableitung von Richtlinien und Regeln zum Fräsprozess

Um eine Ableitung von Richtlinien und Regeln für das Mehrachsfräsen auf Parallelkinematiken zu realisieren, ist sowohl die Kenntnis umfangreicher Einzelmessgrößen als auch eine Verallgemeinerung und Systematisierung dieser Versuchsergebnisse als Prozessmodell des Fräsvorganges notwendig. Aufgabe einer adäquaten Prozessmodellierung ist es daher, mittels Modellen eine wirklichkeitsnahe Beschreibung des Prozessverhaltens zu finden und diese mit dem konkreten Prozess abzugleichen. In ein solches Modell gehen konstante (z.B. Werkzeugmaschine) und variable Größen (z.B. Werkzeug) ein.

Zur Modellierung und zur systematischen Erfassung charakteristischer Zusammenhänge wurden Neuronale Netze erprobt. Diese haben den Vorteil, dass die tatsächlichen funktionalen Zusammenhänge des Realprozesses a-priori nicht bekannt sein müssen. Durch Auswahl geeigneter Netztopologien und entsprechendes Anlernen durch Trainingsmengen ist die Voraussage des Modellverhaltens bei anderen Parameterkonstellationen möglich. Anhand der Trainingsdaten werden die Topologie und die Verbindungsgewichte ermittelt. Die Güte des Neuronalen Netzes und dessen Trainingszustandes wird durch so genannte Validierungsmengen, die sich von den Trainingsmengen unterscheiden, bewertet. Die benutzten Netze zur Modellierung der Fräsprozessdaten hatten elf Eingangsneuronen (Zahnvorschub  $f_z$ , Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , Schnitttiefe  $a_p$ , Schnittkräfte  $F_{xy}$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , Vorschubrichtungsvektor  $r_f=(r_{fxy}, r_{fyy}, r_{fz})$  erreichter Vorschubweg  $l_f$ ) und ein Ausgangsneuron (Verschleißmarkenbreite  $VB_{max}$ ) [4].

Unterschiedliche Netztypen (MLP mit Backpropagation und mit Quickpropagation, Elman Netze and RBF-Netze) wurden getestet. Dabei erwiesen sich MLP-Netze mit Backpropagation und RBF-Netze als am besten geeignet.

als Für eine gezielte Anwendung von Neuronalen Netzen Möglichkeit zur Prozessmodellierung ist eine hinreichend große Menge von Trainingsund Validierungsdatensätzen erforderlich, wobei diese Datensätze einen möglichst großen Bereich hinsichtlich der Streubreite der einzelnen Eingabedaten abdecken sollten, damit das dadurch realisierte Prozessmodell den tatsächlichen Prozess, d.h. die Entwicklung des Werkzeugverschleißes (Verschleißmarkenbreite  $VB_{max}$ ) in Abhängigkeit der variablen Eingangsgrößen realistisch beschreibt. Dies erfordert noch mehr experimentelle Daten aus entsprechenden Fräsversuchen. Trotzdem kann konstatiert werden, dass Neuronale Netze prinzipiell zur Modellierung geeignet sind, da diese flexibel hinsichtlich der Zahl der Eingangsneuronen angepasst werden können und vorab keinen mathematisch formulierten funktionellen Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen benötigen.

Aufgrund der getroffenen verbalen Aussagen zur Bewertung der Versuchsergebnisse erscheint es nicht gerechtfertigt, daraus gesicherte Modelle und quantifizierbare Ergebnisse wie beispielsweise Formeln oder Korrekturfaktoren für die NC-Programmerstellung zur Optimierung der Bearbeitungsstrategie abzuleiten [5]. Die Streubreite und das leider oftmals entgegengesetzte Verhalten (für jede Hypothese, die sich anhand der Versuchsergebnisse

ergibt, gibt es stets auch Gegenbeispiele) beim Werkzeugverschleiß (als ein Maß zur zeitlichen Charakterisierung des Bearbeitungsprozesses) erlauben es nicht, diese beabsichtigte Ableitung von Formeln o.ä. gesichert durchzuführen.

Ein möglicher Ansatz für Formeln und Korrekturfaktoren ist die Wahl der technologischen Parameter (Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , Zahnvorschub  $f_z$ ) in Abhängigkeit von der Bearbeitungsrichtung (Vorschubrichtung)  $r_f$  und den Bearbeitungsort (Koordinaten X, Y, Z) im Maschinenraum in folgender prinzipieller Form:

$$v_c = v_{c,0} * (1 + k_{vc}) \qquad \qquad f_z = f_{z,0} * (1 + k_{fz}) \tag{1}$$

$$k_{vc} = f_l(x, y, z, r_f) \qquad \qquad k_{f,z} = f_2(x, y, z, r_f)$$
(2)

Hierbei sind  $v_{c,0}$  und  $f_{z,0}$  die für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe empfohlenen Schnittwerte und  $k_{vc}$  und  $k_{fz}$  entsprechende, vom Bearbeitungsort und der Bearbeitungsrichtung funktionell abhängige Korrekturglieder.

Mögliche Ansätze für  $f_1$  bzw.  $f_2$  können additiver oder multiplikativer Art sein:

$$f = g_1(x) + g_2(y) + g_3(z) + g_4(r_f)$$
(3)

$$f = h_1(x) * h_2(y) * h_3(z) * h_4(r_f)$$
(4)

Für die einzelnen Teilfunktionen  $g_1$  bis  $g_4$  bzw.  $h_1$  bis  $h_4$  kommen lineare, parabolische oder exponentielle Ansätze in Frage.

## **1.3 Kopplung Simulation Arbeitsprozess und Struktur**

#### **1.3.1** Strukturmodelle Dynamik und Verfahrbewegung

Die experimentellen Untersuchungen haben bestätigt, dass besonders bei Parallelkinematiken eine signifikante Richtungsund Positionsabhängigkeit der erreichbaren Prozessparameter gegeben ist. Voraussetzungen für die Durchführung der Untersuchungen zur Wechselwirkung von Maschine und Prozess sind abgesicherte Simulationsmodelle des maschinendynamischen untersuchten Verhaltens der Parallelkinematiken. Wesentlicher Untersuchungspunkt war die Modellbildung des Biegeschwingungsverhaltens von längenveränderlichen Streben bei gleichzeitiger Möglichkeit des Aufprägens von Bewegungsund Regelungsvorgängen. Die strukturdynamischen Untersuchungen erfolgten mit den Systemen ALASKA, MSC.visualNastran bzw. ANSYS. Ziel waren parametrierbare Modelle um diese perspektivisch auch in Optimierungsalgorithmeneinzubinden. Die regelungstechnische Beschreibung erfolgte mit Matlab/Simulink. Für alle Systeme sollte eine Kopplung Strukturdynamik / Regelung realisiert werden.

Es hat sich während der Untersuchungen gezeigt, dass die beste Abbildung des Strukturverhaltens mit komplexen FEM-Modellen erreicht wird, da auch höherfrequente

Schwingungen der Streben und der Gestelle abgebildet werden können. Nachteilig ist jedoch der gegenüber Mehrkörpersystemen (MKS) wesentlich höhere Rechenzeitaufwand, der umfangreichen systematischen Untersuchungen zur Positions- und Richtungsabhängigkeit entgegensteht. FEM-Modelle bilden deshalb neben Messungen die Basis zur Anpassung der verwendeten MKS-Modelle. In Abbildung 1-14 ist ein komplexes FEM-Modell der P 800 dargestellt.

Die MKS-Modelle wurden stufenweise von Primitivmodellen, die im Wesentlichen die Bearbeitungseinheit in geeigneten Aufhängungen erfasste, über starre und dann unterschiedlich elastische Streben erweitert. Für den Aufbau der Hexapod-Streben aus KGT, Trägerrohr, Außenrohr und Kardangelenk und die Auswahl geeigneter Testerregungen war es zweckmäßig, zunächst ein unverfahrbares Modell der Komplettstrebe aufzubauen. Dazu können die konstruktiven Verbindungen durch fest angebrachte Federn modelliert werden.

Wenn hierfür axial orientierte Bushings (Verbindungen zwischen zwei Partnern in Form von abstandsabhängigen Kräften nach dem Prinzip actio = reactio) eingesetzt werden, obwohl die jeweiligen Stützwirkungen der Lagerungen und Führungen an anderen geometrischen Orten wirken, so ist das angesichts der konstruktiven Gestaltungen von Fall zu Fall zu bedenken. Sehr oft werden die Abweichungen eine geringere Tragweite aufweisen als der Ersatz des Lagers oder der Führung durch Federn überhaupt.

Oft können die jeweiligen Elemente der Streben mit je einem Bushingelement mit Steifen verbunden werden; lediglich für das räumlich weniger konzentrierte Kardangelenk wurde eine komplexere Modellierung einbezogen.



Bild 1-14: FEM- und MKS-Simulationsmodelle

Zur Simulation von Verfahrbewegungen wurde das unverfahrbare Strrebenmodell modifiziert. Verfahrbarkeit bedeutet die örtliche Verschiebung der jeweiligen Partner der elastischen Verbindungen zwischen Kugelgewindetrieb (KGT) und Trägerrohr sowie zwischen Trägerrohr und Außenrohr zueinander.

Verbindungselemente mit solcher Variabilität der Ansatzpunkte auf ihren jeweiligen Trägern sind weder aus dem eingesetzten noch aus ähnlichen Programmen bekannt. Wenn aber mit den herkömmlichen Elementen die Verbindungsaktionen bzw. –reaktionen zufolge der Relativverschiebung der Partner mit einem Abstand zum physikalischen Wirkungsort angesetzt werden, so kann das mit zusätzlich aufzubringenden Gegenmomenten kompensiert werden.

Bei dem verwendeten Programm können an praktisch beliebigen Stellen auf jeden Körper in großer Vielfalt programmierbare Kräfte und Momente aufgebracht werden. Die Aufgabe besteht also darin, bei jeder dem Verfahren unterliegenden Verbindung bei dem Partner, dessen Trägerpunkt konstruktionsbedingt sich von der physikalischen Wirkstelle entfernt, die adäquaten Kompensationsmomente zu ergänzen. Dabei ist zum Verfahren der Strebenlänge ein Aktor zwischen den benachbarten Vierteln von Trägerrohr und KGT eingeführt. Er wurde mit verschiedenen zeitlich veränderlichen Längskraftverläufen mit maximal 111 mm Verfahrweg belastet.

Für eine Simulation des Bewegungsverhaltens einer Parallelkinematik ist neben der rein geometrischen Betrachtung der Verfahrwege auch das realisierte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil entlang der Verfahrwege interessant. Als Grundlage der Simulation eines konkreten Bearbeitungsfalles können die mit Hilfe eines CAM-Moduls berechneten Werkzeugbahnen dienen. Diese, im kartesischen Bezugssystem des Werkstückes angegebenen Bahnen, sind durch eine kinematische Koordinatentransformation in die entsprechenden Strebenkoordinaten umzurechnen. Zur Modellbildung eines realitätsnahen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens sind außerdem die in der realen Steuerung der Parallelkinematik vorhandenen Look-ahead-Funktionen heranzuziehen.

Nach Voruntersuchungen an einzelnen Streben wurde ein im Programm [6] (abgekürzt vN4D) erarbeitetes Modell einer Parallelkinematik Maschine mit quersteifen, längs verfahrbaren Streben in eine Simulinkumgebung zur Steuerung der Strebenlängen eingefügt.

#### **1.3.2** Modelle Arbeitsprozess

Für das Berechnungsmodell (Gleichungsform) für zerspanende Maschinen hat sich seit Jahrzehnten die Darstellung

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + (K + k_s aR)X = 0 \tag{5}$$

bewährt mit Koordinatenvektor X, Massenmatrix M, Dämpfungsmatrix B, Steifigkeitsmatrix K und dem Ausdruck  $k_s aRX$  für den Arbeitsprozess.

Die Proportionalität bei letzterem zur Spandicke a mit der Matrix R von so genannten Richtungskoeffizienten wurde insbesondere mit der Dissertation [7] begründet, bei der auch für die Herleitung von R die Zulässigkeit von Mittelungen über mehrere gleichzeitig greifende Schneiden untersucht wurde.

Spätestens seit [8] ist nachgewiesen, dass in  $k_s aRX$  nicht nur translative Komponenten mit realen Parameterwerten Zahlenbeispiele berechtigt sind. belegen, dass Drehschwingungsanteile bereits bei geringen Amplituden die Größenordnung der translativen Schwingungen erreichen. Die Matrix R ist im Allgemeinen nicht symmetrisch und auch nicht Adäquatheitsverlust analog kann ohne der verbreiteten "Bequemlichkeitshypothese" für die Dämpfungsmatrix B symmetrisiert werden.

Wie den oben aufgeführten Erkenntnissen zu entnehmen, ist die Spandicke beim Fräsen eine entscheidende Eingangsgröße für das Modell des Bearbeitungsprozesses. Dabei sind die folgenden Annahmen sinnvoll:

• Koordinatensystem mit X-Achse in Vorschubrichtung des bewegten Werkzeugs, Z-Achse in Spindelachse vom Fräser zur Spindel,

Y-Achse entsprechend Rechtssystem,

Ursprung in der X-Y-Arbeitsebene auf der Achse der durch schwingungsfreies Fräsen vorgespannten Spindel zu einem festen Zeitpunkt

- Die Spindelbewegung erfolgt mit Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  in negativer Z-Richtung und überlagerter Drehschwingung  $\delta$  (positiv als Verzögerung) sowie Vorschubbewegung in X-Richtung mit Geschwindigkeit v und überlagerten Querschwingungen mit  $\Delta X$  (positiv gegen X-Richtung) und mit  $\Delta Y$  (positiv in Y-Richtung).
- Das Werkzeug (Fräser) hat einen Radius R und die Schneidenzahl Z. Die Z-Ausdehnung wird nicht berücksichtigt. Die Schneide wird in dem Modell durch einen Punkt am Umfang repräsentiert. In der Ausgangslage (t=0) befindet sich die Schneide i auf der Y-Achse.
- Die Spandicke für die Schneide *i* wird berechnet durch den Schnitt des Strahls vom Fräsermittelpunkt zur Schneide *i* mit der schwingungsfrei entstandenen Kontur der Vorläufer-Schneide *i*-1.
- Kontur der Vorläufer-Schneide:

Mit dem auf die Y-Achse bezogenen Strahlwinkel  $\varphi_{i-1} = \Omega t + 2\pi/Z$  der Schneide *i*-1 und der Zeit t als Kurvenparameter hat man:

$$x_{i-l}(t) = Rsin(\varphi_{i-1}) + v t \qquad y_{i-l}(t) = Rcos(\varphi_{i-1}) \quad (6)$$

• Kontur der Schneide *i*:

Mit analogen Bezeichnungen ( $\varphi_i = \Omega t$ ) und den definierten Schwingungsabweichungen ergeben sich:

$$x_i(t) = Rsin(\varphi_i - \delta) + v t - \Delta x \qquad y_i(t) = Rcos(\varphi_i - \delta) + \Delta y \tag{7}$$

• Spandicke für Schneide *i*:

Zum Zeitpunkt t<sub>0</sub> (beschränkt auf den Eingriffsbereich) befindet sich die Schneide i bei

$$x_i(t_0) = Rsin(\Omega t_0 - \delta) + v t_0 - \Delta x \qquad y_i(t_0) = Rcos(\Omega t_0 - \delta) + \Delta y \tag{8}$$

Der Schnittpunkt mit der Vorläufer-Kontur lässt sich dann mit *r* < *R* ausdrücken durch

$$x_s(t_0) = rsin(\Omega t_0 - \delta) + v t_0 - \Delta x \qquad y_s(t_0) = rcos(\Omega t_0 - \delta) + \Delta y \qquad (9)$$

Dabei ist *r* dadurch zu bestimmen, dass gilt:

$(x_s(t_0) =) rsin(\Omega t_0 - \delta) + v t_0$	$p - \Delta x = Rsin(\varphi_{i-1}) + v t$	t und (10)
--	--	------------

$$(y_s(t_0) =) \ rcos(\Omega t_0 - \delta) + \Delta y \qquad = Rcos(\varphi_{i-1})$$
(11)

mit  $\varphi_{i-1} = \Omega t + 2\pi/Z$ .

Das sind zwei transzendente Gleichungen für die Unbekannten r und t. Die Spandicke bei  $t_0$  ist dann:

$$Spandicke(t_0) = R - r.$$
(12)

#### **1.3.3** Kopplung Arbeitsprozess und Struktur

Auch bei physikalisch hochkomplexen und nichtlinearen Arbeitsprozessen wie dem Metallschneiden können als phänomenologische Näherung die relevanten Zusammenhänge abhängig von Koordinaten, Geschwindigkeiten und finiten Totzeiten ausgedrückt werden. Im einfachsten Fall treten lediglich koordinatenproportionale Auswirkungen auf, die für das Gesamtsystem geänderte, aber noch symmetrische Systemmatrizen bewirken. Die Folge sind mehr oder weniger bedeutsame quantitative Anderungen im Verhalten der geschlossenen gegenüber der offenen Maschine. Koordinatenproportionale Einflüsse des Arbeitsprozesses Metallschneiden bedeuten jedoch nach zahlreichen veröffentlichten Experimenten in den Systemmatrizen eine Verletzung der Symmetrie. Das bedeutet Systeme zusätzlich zu den Resonanzgefahren symmetrischer linearer weitere Instabilitätsgefahren. Abhängigkeit Schwingungs-Die der und damit der Bearbeitungseigenschaften von der Schnitttiefe *a* führt zur Unsymmetrie der Eigenbewegungen, die ihre Form zeitlich nichtproportional ändern. Mit der Unsymmetrie der Grundgleichung treten auch im Werkzeugmaschinenbau gleiche Instabilitätsgefahren auf, wie sie bei der Rotordynamik seit vielen Jahrzehnten mit den so genannten zirkulatorischen Kräften bekannt sind. So lässt sich damit nachweisen, dass Dämpferkräfte trotz "richtiger" Orientierung das System sogar zu Schwingungen anfachen können.

Die Möglichkeit einer Schwingungsanfachung durch Totzeit lässt sich an der einfachsten entsprechenden Schwingungsdifferentialgleichung zeigen:

$$m\ddot{u}(t) + b\dot{u}(t) + cu(t) = F(t).$$
<sup>(13)</sup>

Mit 
$$F(t) = -ku(t-\tau)$$
 und  $u(t-\tau) \approx u(t) - \tau \cdot \dot{u}(t) + \frac{\tau^2}{2} \cdot \ddot{u}(t)$  erhält man

$$(m+k\cdot\frac{\tau^2}{2})\cdot\ddot{u}+(b-k\cdot\tau)\cdot\dot{u}+(c+k)\cdot u=0.$$
(14)

Mit dem Ausdruck (b -  $k\tau$ ) als Dämpfungsfaktor wird die Anfachungsmöglichkeit offenbar.

#### **1.3.4** Positionsabhängigkeit der Prozessstabilität

Von wesentlichem Interesse für Maschinenentwickler und Anwender ist die Bewertung des Strukturübertragungsverhaltens hinsichtlich Prozessstabilität, da hieraus direkte Aussagen zur Leistungsfähigkeit einer Maschine getroffen werden können. Eine Bewertung des Strukturverhaltens mittels Prozessstabilität erscheint deshalb insbesondere bei Parallelkinematiken als sinnvoll.

Die Mechanismen der Entstehung von Ratterschwingungen sind hinlänglich bekannt. Daher bestand die Aufgabe darin, die bekannten Simulationswerkzeuge zu nutzen und in ein Gesamtmodell zu integrieren. Bei der Integration dieses Bewertungskriteriums in eine durchgängige Simulationskette gestaltet sich allerdings die starke Sensitivität der quantitativen Prozessstabilität hinsichtlich der Strukturdämpfung als kritisch, sodass ein



Bild 1-15: Grenzspanungstiefen P800 im Arbeitsraum, Fräsen in x-Richtung, z=27

Abgleich der Strukturübertragungsverhaltens mit Messungen unerlässlich scheint. Qualitative Aussagen, die eine Positionsabhängigkeit des Dämpfungsverhaltens vernachlässigen, lassen sich jedoch nach einmaligem Abgleich des Modells sehr gut durchgängig simulativ ableiten.

Analytische Auswertungen hinsichtlich Prozessstabilität wurden an der P800 auf Basis von gemessenen Nachgiebigkeitsfrequenzgängen vorgenommen. Es wurden dabei die in Abschnitt 1.1.2 beschriebenen technologischen Parameter verwendet. Im Gegensatz zu seriellen Kinematiken hat sich bei Parallelkinematiken im Allgemeinen gezeigt, dass die Kreuznachgiebigkeiten nicht vernachlässigt werden dürfen, da diese unter Umständen Werte in Größenordnung der direkten Nachgiebigkeit ergeben können. In Bild 1-15 sind die Stabilitätsdiagramme der P800 für vier Positionen im Arbeitsraum dargestellt (Fräsrichtung X). Es konnte dabei eine Positionsabhängigkeit der minimalen Grenzspanungstiefe von 27% festgestellt werden.

# 1.4 Auswirkung auf den Entwicklungsprozess von Parallelkinematiken

Prozessparameter sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Bewertung von Parallelkinematiken, insbesondere im Hinblick auf den im Vergleich zu seriellen Maschinen erhöhten positionsund richtungsabhängigen Eigenschaften. Zur Beeinflussung der Wechselwirkung zwischen Maschine und Prozess ist die Nutzung redundanter Freiheitsgrade ein wesentlicher Ansatz, der im Ergebnis zur Verbesserung des Leistungspotentials von Parallelkinematiken führt. Als erster Ansatz wurde die Nutzung der C-Achse bei Hexapod-Kineatiken untersucht [9]. Es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, durch gezielte Nutzung des redundanten sechsten Freiheitsgrades der Hexapod-Kinematik die Maschineneigenschaften zu verbessern. Diese Verbesserungen können ohne Änderungen des Maschinenkonzeptes erfolgen.

Es ist jedoch auch hervorzuheben, dass sich verschiedene Optimierungskriterien widersprechen. So wird für die Verbesserung der strukturdynamischen Eigenschaften eine Verkürzung der Streben durch eine Verdrehung in negative Richtung angestrebt. Für eine Verbesserung der Übertragungsgüte ist dagegen eine Verdrehung in positive Achsrichtung vorteilhaft. Somit ergibt sich auch für die Nutzung des sechsten Freiheitsgrades ein mehrkriterielles Optimierungsproblem, wobei ein stabiler Bearbeitungsprozess im besonderen Interesse des Endanwenders ist.

Ein anderes Bild ergab sich bei den Untersuchungen des METROM P800 mit einer zusätzlichen redundanten C-Achse (Rundtisch). So kann beispielsweise durch entsprechende Wahl des Bearbeitungsortes die kritische Schnitttiefe hinsichtlich der Stabilität um 20 % erhöht werden. Ähnliche Effekte sind auch bei der Oberflächenqualität ermittelbar. Dabei ist die Bewegungsaufteilung zwischen Parallelkinematik und Maschinentisch so zu generieren, dass sich die Parallelkinematik in einem möglichst kleinen Bereich um diesen Punkt bewegt.

## 1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Projektes wurden Beiträge geleistet, den komplexen Zusammenhang zwischen Maschine und Prozess besser zu verstehen, zu beschreiben. Auch wenn nicht alle Zusammenhänge geklärt werden konnten, lieferten die Untersuchungen doch Hilfsmittel zur Verbesserung der Methoden der Maschinenentwicklung und zur Prozessplanung bei bestehenden Anlagen. Oberflächeneigenschaften des bearbeiteten Werkstückes, Werkzeugstandzeiten und Grenzspanungstiefen bzw. Prozesstabilität bilden dabei wesentliche Optimierungskriterien.

Ausgehend von systematischen Untersuchungen können ideale Bearbeitungspositionen gefunden werden. Durch die Nutzung redundanter Achsen eröffnet sich die Möglichkeit, anspruchsvolle Bearbeitungsoperationen gezielt in diese Gebiete zu verlegen. Dabei ist die Bewegungsaufteilung so zu generieren, dass sich die Parallelkinematik in einem möglichst kleinen Bereich um diesen Punkt bewegt. Für das gewählte Beispiel METROM P800 konnte dabei erreicht werden, dass die Oberflächenqualität trotz hoher Dynamik den Bereich sehr guter Werkzeugmaschinen erreicht.

Anhand eines einfachen Beispiels im nachfolgenden Bild ist die Vorgehensweise zusammenfassend dargestellt, wie durch redundante Achsen eine Prozessbeeinflussung erfolgen kann.



Bild 1-16: Ablaufschema des Optimierungsprozesses [10]

Die Untersuchungen zum maschinendynamischen Verhalten und damit eng verbunden zur Prozessstabilität haben gezeigt, dass eine Steigerung der Produktivität und Qualität mit Fertigungsmaschinen durch eine Verbesserung parallelkinematischen des Dämpfungsverhaltens erreicht werden kann. Die Verkopplung der Systeme in mehreren Freiheitsgraden erfordert jedoch bei der Auswahl der Wirkstellen für die Dämpfung große Sorgfalt, um eine Entkopplung der Dämpfung und damit die Unwirksamkeit der Einzelmaßnahmen zu verhindern [11]. Optimale Lage und Verteilung der Dämpfungsstellen sowie die notwendige Dämpfung sowohl an der einzelnen Wirkstelle an sich bzw. im Gesamtsystem sind bisher bei Parallelkinematiken nicht ausreichend untersucht worden. Daher sollte eine Methodik zur Berücksichtigung des Aspektes Dämpfung bereits in der Phase des Strukturentwurfs erarbeitet werden. Dazu notwendig ist eine enge den Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus Gebieten Strukturmechanik, Werkstoffwissenschaften und Regelungstechnik.

## 1.6 Literatur

- Neugebauer, R.; Harzbecker, C.; Stoll, A.: Parallelkinematiken im Werkzeugmaschinenbau, 2. Chemnitzer Parallelkinematik-Seminar 12./13. April 2000, in: Berichte aus dem IWU, Band 7, 29-53.
- Schwaar, M.; Neugebauer, R.; Kirchner, J.: Steuerung von Parallelkinematiken, 2.
   Chemnitzer Parallelkinematik-Seminar 12./13. April 2000, in: Berichte aus dem IWU, Band 7, 195-202.
- [3] Neugebauer, R.: Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics. The 3<sup>rd</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar / 2002 Parallel Kinematic Machines International Conference / 2<sup>nd</sup> NCG Application Conference on Parallel Kinematic Machines. Reports from the IWU. Chemnitz, April 23-25, 2002.
- [4] Neugebauer, R.; Krabbes, M.; Kretzschmar, W.; Schönitz, J.: Improvement of the Calibration Accuracy by a New Measurement Process; in [3], pp. 443-453.
- [5] Neugebauer, R.; Leopold, J.; Hoyer, K.; Stoll, A.; Kolbig, S.: Interaction Between Machine Tool and Process - Modelling, Simulation and Identification of Milling Operations on Hexapod 6X HEXA; in [3], pp. 833-841.
- [6] MSC.visualNastran4D 2001 r2, MSC.Software GmbH, München.
- [7] Roese, H.: Untersuchung der dynamischen Stabilität beim Fräsen. Dissertation TH Aachen, 1967.
- [8] Gumpert, W.; Ngo Quy Ty: Ein Ad-hoc-Modell für Ratteruntersuchungen mit Kopplung von Dreh- und Querschwingungen an Fräsmaschinen. Maschinenbautechnik 31(1982)5, 209-212.

- [9] Neugebauer, R.: Arbeitsbericht zum DFG Schwerpunktprogramm "Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematiken" für den Zeitraum 1.8.2001 bis 15.3.2002. Projekt: Einbeziehung des Bearbeitungsprozesses in die Modellbildung zum Betriebsverhalten von Fertigungsmaschinen mit Parallelkinematiken. 2002.
- [10] Neugebauer, R; Hoyer, K.; Ihlenfeldt, S.; Schwaar, M.; Leopold, J.: HSC Milling of Steel on Pentapod P800. CIRP 2004 January Meeting. PMI - Working Group on "Process-Machine-Interaction". Paris, France, 28-30 January, 2004.
- [11] Neugebauer, R.; Harzbecker, C.; Drossel, W.-G.; Ihlenfeldt, S.; Polzin, T.; Lütz, N.; Kretzschmar, W.: Structure design and optimization of parallel kinematics. 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2004 »Parallel Kinematic Machines in Research and Practice«, 20./21.4.2004, Reports from the IWU. Chemnitz, Band 24, 2004.