

Parameteroptimierung bei Werkzeugmaschinen – Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale

Jürgen Fleischer¹, Alexander Broos¹

¹wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

Zusammenfassung

Die Entwicklungszeiten und -kosten von Werkzeugmaschinen können erheblich reduziert werden, wenn die wesentlichen Maschineneigenschaften vorab an virtuellen Prototypen simuliert und auch optimiert werden. Zu den hierbei eingesetzten Verfahren zählt seit geraumer Zeit schon die Strukturoptimierung. Verfahren aus der Parameteroptimierung hingegen wurden bisher kaum eingesetzt, dabei sind gerade sie ein probates Mittel zur Sensitivitätsermittlung und Optimierung von parameterbehafteten Maschinenstrukturen und -komponenten, insbesondere bei Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken.

Dieser Artikel stellt die Anwendungsmöglichkeiten der Parameteroptimierung bei Werkzeugmaschinen dar. In der Konzeptphase des Entwicklungsprozesses können durch Variation geometrischer Größen die dynamischen Eigenschaften der Maschine gezielt verbessert werden, wobei die Optimierung auf Basis der Mehrkörpersimulation erfolgen kann. In der Entwurfsphase stehen dagegen die Ermittlung und Verbesserung des Einflussverhaltens parameterbehafteter Maschinenkomponenten, wie Kugelgewindetribe, Lager und Führungen, im Vordergrund, was durch ausgehend von Finite-Elemente-Modellen einfach realisierbar ist.

Durch den Einsatz von Verfahren aus der Parameteroptimierung ergeben sich für den Entwicklungsingenieur völlig neue Möglichkeiten, sein Produkt zu bewerten und Einflüsse auf das Maschinenverhalten frühzeitig zu erkennen. Diese Potentiale werden ebenfalls aufgezeigt.

Keywords: Werkzeugmaschinen, (Parameter-) Optimierung, FEM, Mehrkörpersimulation

1 Einleitung

Obwohl Werkzeugmaschinen technologisch hoch entwickelte Erzeugnisse sind, wird ihre Weiterentwicklung in der breiten Öffentlichkeit kaum wahrgenommen. Begründet liegt dies im Zweck von Werkzeugmaschinen (WZM), Kapazitäten und Möglichkeiten zur Herstellung anderer Produkte bereitzustellen. Quasi im Hintergrund hat sich in den vergangenen Jahren bei der Entwicklung und Leistungssteigerung von WZM eine Menge getan. Neue Entwicklungen im Bereich hochdynamischer Maschinenkomponenten, hinsichtlich High Speed Cutting oder Minimalmengenschmierung haben die erzielbaren Bearbeitungsergebnisse weit vorangebracht.

Im Zuge des allgemeinen Kosten- und Qualitätsdrucks waren WZM-Hersteller gezwungen, ihren Entwicklungsprozess zu verschlanken. Die Entwicklungszeit kann beispielsweise durch den Einsatz von virtuellen Prototypen stark verkürzt werden, weil mit diesen die wesentlichen Maschineneigenschaften schon früh im Entwicklungsprozess simuliert und auch optimiert werden können.

Bei den für WZM eingesetzten Optimierungsverfahren dominiert heute die Strukturoptimierung in Form der Topologieoptimierung. Mit dem Aufkommen von Werkzeugmaschinen mit parallelkinematischen Strukturen fand allerdings auch die Parameteroptimierung ihren Eingang in den Entwicklungsprozess, weil gerade bei diesen Stabkinematiken eine Vielzahl von geometrischen Größen unmittelbar auf das Maschinenverhalten einwirken und klassische Ingenieuransätze für die Dimensionierung und Auslegung fehlschlagen.

2 CAE-Einsatz in der Werkzeugmaschinenentwicklung

Um die Bedeutung von Parameteroptimierungsverfahren in der WZM-Industrie einordnen zu können, muss man sich zunächst mit den Einsatzmöglichkeiten von CAE-Werkzeugen im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen allgemein auseinandersetzen. Weiterhin muss der tatsächliche Einsatz von CAE-Verfahren bei WZM-Entwicklern beleuchtet werden.

2.1 Der WZM-Entwicklungsprozess allgemein

Der WZM-Entwicklungsprozess gleicht anderen Produktentstehungsprozessen und folgt dem Ablauf, wie er in der VDI-Richtlinie 2221 [1] beschrieben ist. Vor allem in den Phasen „Konzipieren“ und „Entwerfen“ werden derzeit Berechnungs- und Optimierungswerkzeuge eingesetzt [2]. Abbildung 1 stellt den Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen dar. Während in der Konzeptphase vorrangig die Kinematik der Maschine und die grobe Dimensionierung bestimmt wird, müssen in der Entwurfsphase komplette Teilsysteme beurteilt werden.

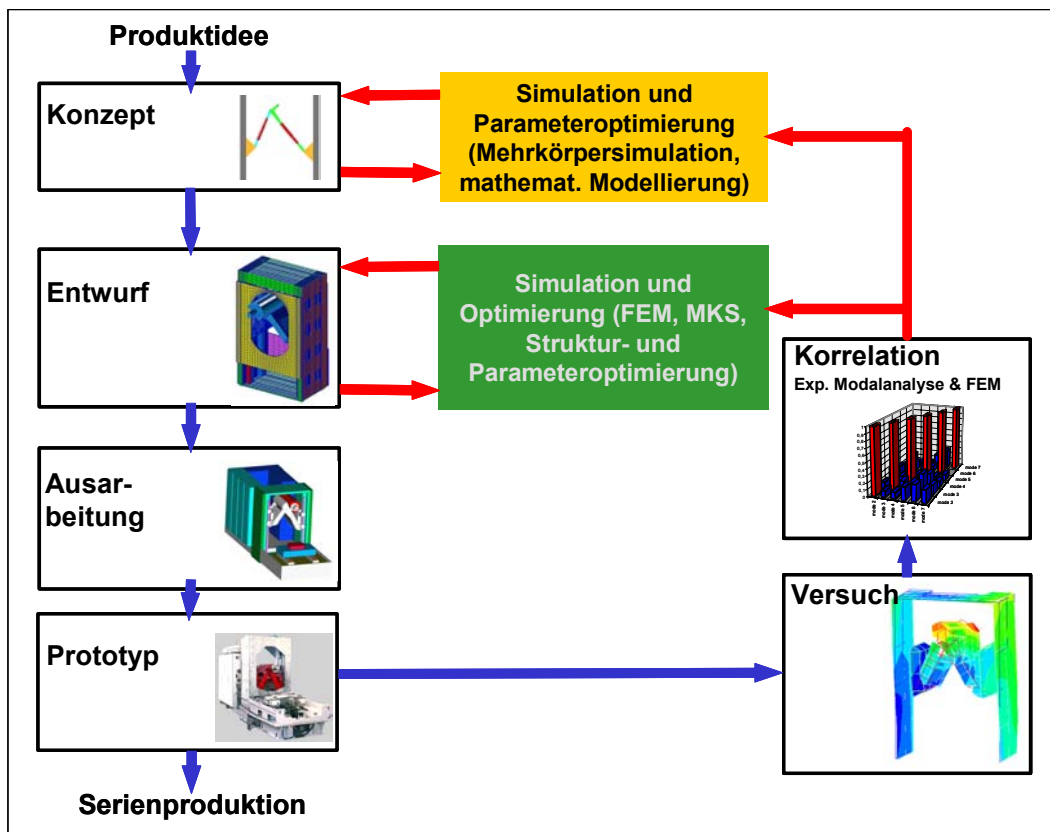


Abbildung 1: Produktentwicklungsprozess und Einsatz von Berechnungswerkzeugen bei Werkzeugmaschinen

CAE-Anwendung in der Konzeptphase In der Konzeptphase wird meist auf große Simulationsmodelle verzichtet. Die Hauptaufgabe, das Klären grundsätzlicher Dimensionierungsfragen hinsichtlich der Maschinendynamik, lässt sich mit großen Vereinfachungen noch direkt formulieren. Es dominiert deshalb die allgemeine mathematische Formulierung von Modellen mit hohem Abstraktionsgrad und die Lösung der Problemstellung mit mathematischen Softwarepaketen, z.B. Matlab. Mit Einzug der parallelkinematischen Maschinen wird die mathematische Formulierung jedoch so komplex, dass hier für die Modellerstellung gerne auf Mehrkörpersysteme zurückgegriffen wird.

CAE-Anwendung in der Entwurfsphase Nachdem ein Maschinenkonzept erarbeitet wurde, müssen konkrete Bauteilentwürfe für nun feststehende Belastungsfälle erstellt und beurteilt werden. Diese Aufgabe kann durch Strukturoptimierung – besonders Topologieoptimierung – gelöst werden. Die abschließende Beurteilung des Gesamtsystemverhaltens erfolgt durch Finite-Elemente-Analyse (FEA), wofür spezielle Berechnungsmodelle erstellt werden müssen. Für hochdynamische Maschinen oder Maschinen mit parallelkinematischen Strukturen kann die Optimierung auch aus einer hybriden Mehrkörpersimulation angestoßen werden, was bei stark positionsabhängigen Eigenschaften die Ermittlung kritischer Lastfälle erleichtert [3].

2.2 Einsatz von CAE-Methoden in der WZM-Entwicklung

Der tatsächliche Einsatz von CAE-Methoden in der WZM-Entwicklung muss differenziert betrachtet werden. Besonders zwischen dem Einsatz von rechnergestützten Methoden bei WZM-Herstellern und WZM-nahen Forschungseinrichtungen muss unterschieden werden. Letztere nutzen schon seit mehreren Dekaden eine Vielzahl von Softwaretools, um statisches und dynamisches Verhalten von WZM zu untersuchen und zu verbessern. Hierzu gehören beispielsweise Untersuchungen mit FEA für die statische und dynamische Steifigkeit und Schwingungsformen, Topologieoptimierung für die optimale Bauteilgestaltung, MKS für das Bewegungsverhalten und Regelungsuntersuchungen, sowie spezialisierte Software für die Simulation von Prozessgrößen.

Bei den WZM-Herstellern ergibt sich hingegen ein völlig anderes Bild. Erst seit Ende der 1990er Jahre setzen die großen Hersteller eine durchgängige 3D-CAD-Prozesskette für die Maschinenentwicklung ein [4]. Ungefähr im selben Zeitraum entwickelte sich auch der standardmäßige Einsatz von FEA zur Maschinenberechnung. Die konsequente Anwendung der Topologieoptimierung für WZM-Bauteile ist heute zwar oft schon Bestandteil dieser Prozesskette, der effiziente Einsatz lohnt sich jedoch erst, seit dem die Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen möglich ist [5,6].

2.3 Einsatz von Verfahren der Parameteroptimierung bei WZM

Vor dem dargestellten Hintergrund kann nun das Einsatzpotential für die Parameteroptimierung beurteilt werden. Die Mehrkriterienoptimierung hielt Einzug in die WZM-Entwicklung mit dem Aufkommen von parallelkinematischen WZM (PKM) Mitte der 1990er Jahre. Grund hierfür war die Vielzahl der variablen Geometrieparameter dieser Stabkinematiken, die alle einen unmittelbaren Einfluss auf das Maschinenverhalten haben und deren Einflüsse nicht mehr mit einfachen Ingenieurmethoden beurteilt und optimiert werden können. Für die Modellbildung wurde zunächst die rein mathematische Formulierung von Mehrkörpersystemen gewählt [7]. Für den Einsatz in einer durchgängigen, rechnerbasierten Entwicklungsumgebung ist diese Art der Modellierung jedoch unpraktisch, so dass – wie im Folgenden dargestellt – besser auf Modellbildung ausgehend von Standard-*FEA* oder *MKS*-Systemen zurückgegriffen wird.

3 Parameteroptimierung in der Konzeptphase

In diesem Abschnitt wird exemplarisch der erfolgreiche Einsatz von Mehrkriterienoptimierung in Kombination mit Mehrkörpersimulation einer Werkzeugmaschine mit Parallelkinematik dargestellt. Bei der Beispielmaschine handelt es sich um das Horizontal-Bearbeitungszentrum „GENIUS 500“ von Hüller-Hille [8] (Abbildung 2). Bei PKM sind die Vorschubachsen parallel zueinander angeordnet. Im Gegensatz zu konventionellen WZM mit serieller Kinematik, bei welchen

die Vorschubachsen seriell aufeinander aufbauen, besitzen PKM deutliche Steifigkeits- und Dynamikvorteile, die allerdings durch eine wesentlich aufwändigere Regelung erkauft werden. Die Beispielmachine besitzt für die Bewegungen in ihrer xy-Ebene eine parallele Koppelkinematik. Hierbei werden zwei Koppeln von zwei Schlitten mit Lineardirektantrieben angetrieben.

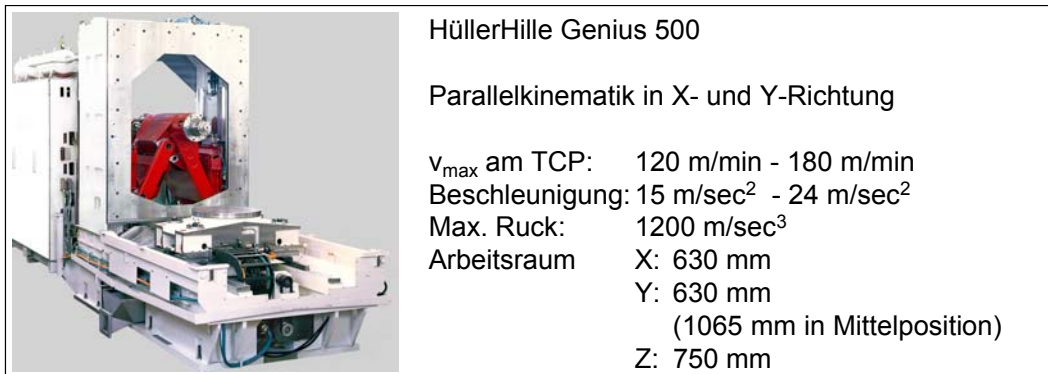


Abbildung 2: Hüller-Hille GENIUS 500 [8]

Die Parameteroptimierung lässt sich bei PKM in der Konzeptphase sehr gut einsetzen, um ein Optimum für Geometrieparameter zu ermitteln, wodurch unmittelbar die wesentlichen Maschineneigenschaften Steifigkeit, Übersetzungsverhältnis und Arbeitsraum beeinflusst werden. Weitere Kenngrößen, wie sie z.B. in [7] dargelegt werden, können mit demselben Modell ebenfalls in die Optimierung mit einbezogen werden. Dadurch ergibt sich allerdings ein deutlich höherer Modellierungsaufwand, so dass für die Demonstration der Anwendbarkeit der Parameteroptimierung die Beschränkung auf die genannten Zielgrößen und Parameter angebracht war.

Für die Optimierung lässt sich damit das gesamte Optimierungsproblem wie folgt beschreiben: die Strebenlängen der Koppeln a und b stellen die zu optimierenden Größen dar. Zielfunktion ist eine maximale Steifigkeit der Koppeln bei maximalem Arbeitsraum und maximaler Schlittenbeschleunigung (Abbildung 3).

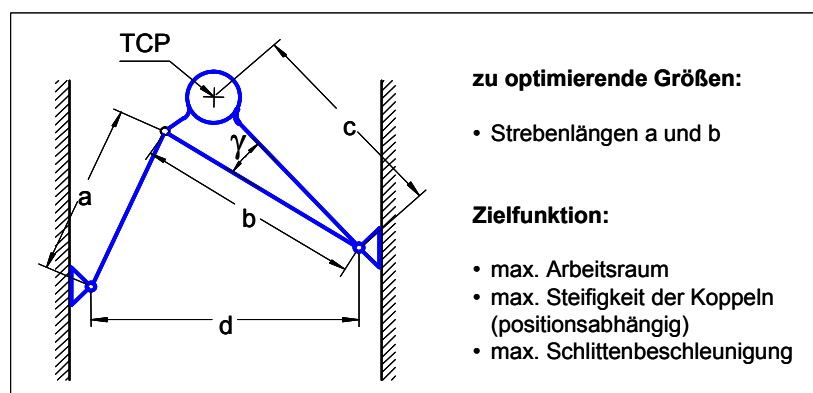


Abbildung 3: Skizze des Optimierungsproblems

Viele Kennwerte des Systems, allen voran Steifigkeit und dynamische Eigenschaften, sind abhängig von der Position des Tool Center Point (TCP) im Arbeitsraum. Weil hierdurch die direkte mathematische Formulierung der Bewegungsgleichungen sehr komplex ist, wird die Berechnung mit Hilfe der Mehrkörpersimulation durchgeführt, was eine einfache Modellerstellung ermöglicht.

Die Modellierung der Beispielmachine in der MKS-Software MSC.ADAMS ist in Abbildung 4 dargestellt. Als wesentliche Maschinenteile sind die beiden Koppeln, die Schlitten und das Gestell vereinfacht nachgebildet. Hierbei sind Schlitten und Gestell als starre Körper angenommen und modelliert. Für die Ermittlung der Nachgiebigkeit werden die Koppeln flexibel gestaltet, was durch einfache Feder-Dämpferelemente möglich ist. Lagernachgiebigkeiten sind ebenfalls durch einfache Federelemente berücksichtigt. Zur Ermittlung der Nachgiebigkeit sind Kräfte in x- und y-Richtung eingepreßt und zur Berücksichtigung verschiedener Arbeitsraumpositionen ist eine horizontale Verfahrbewegung vorgegeben, die während der Simulation abgefahren wird.

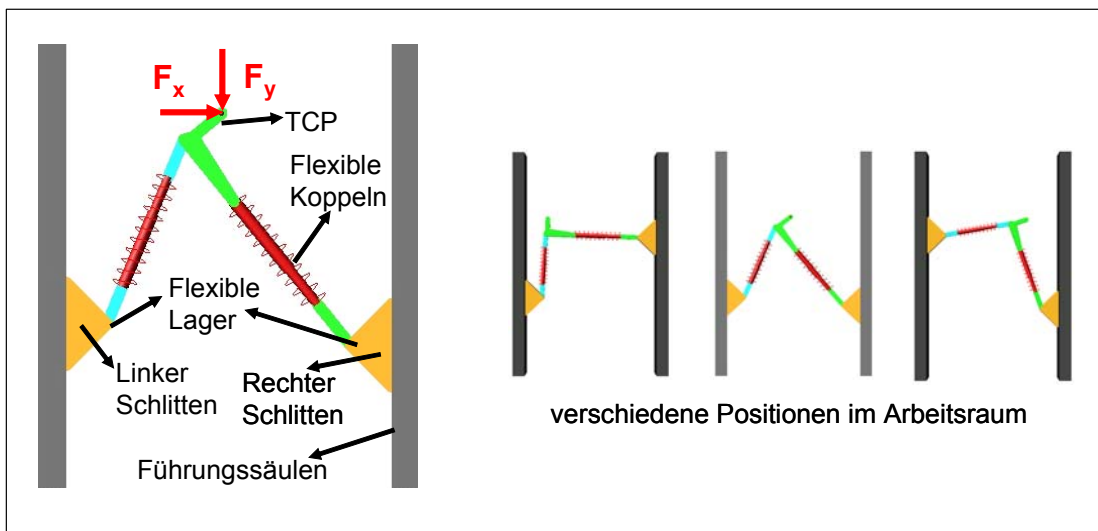


Abbildung 4: MKS-Modell der Kinematik

Bei der Modellerstellung muss besonders auf durchgängige Parametrisierung des Modells geachtet werden, weil in der Optimierung das Modell außerhalb der MKS-Software manipuliert wird und die Simulation aus einem externen Programm im Batch-Modus angestoßen wird, was eine visuelle Kontrolle des korrekten Modellaufbaus unmöglich macht.

Zur Ermittlung von Parameterschranken wurden die Modellgrenzen mittels Designs of Experiments (DOEs) ausgetestet. Dies war notwendig, um die Stabilität der Simulation zu gewährleisten, damit der gesamte Verfahrensweg eingehalten werden konnte. Die Ergebnisse der DOE-Vorstudien sind in Abbildung 5 dargestellt.

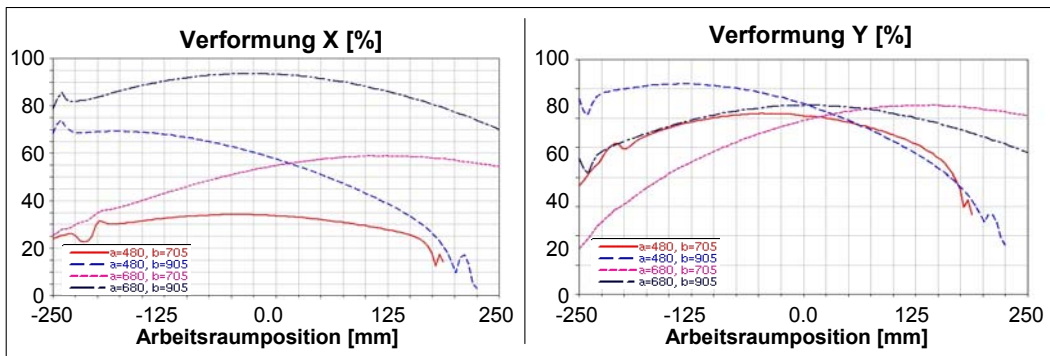


Abbildung 5: Ergebnisse der DOEs

Das voll parametrisierte Modell konnte nun im Optimierungsloop mit dem genetischen Algorithmus des Parameteroptimierungsprogramms OptiSLang durchgeführt werden. Dabei wurden die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse erzielt. Hinsichtlich fast aller Zielkriterien konnte eine deutliche Verbesserung der Maschineneigenschaften erreicht werden. Die Koppeln wurden im Optimierungsergebnis kürzer als bei der Originalmaschine. Führungsabstände und Verfahrswege blieben konstant, weil sie nicht zu den zu optimierenden Größen gehörten. Deshalb war der nutzbare Arbeitsraum – der Raum, der während der maximalen Verfahrbewegung vom TCP überstrichen werden kann – letztendlich kleiner, was unmittelbar zu einem schlechteren Verhältnis von Bauraum (Gesamt- raum, den die Maschinenkinematik inklusive Führungen einnimmt) zu Arbeitsraum führte.

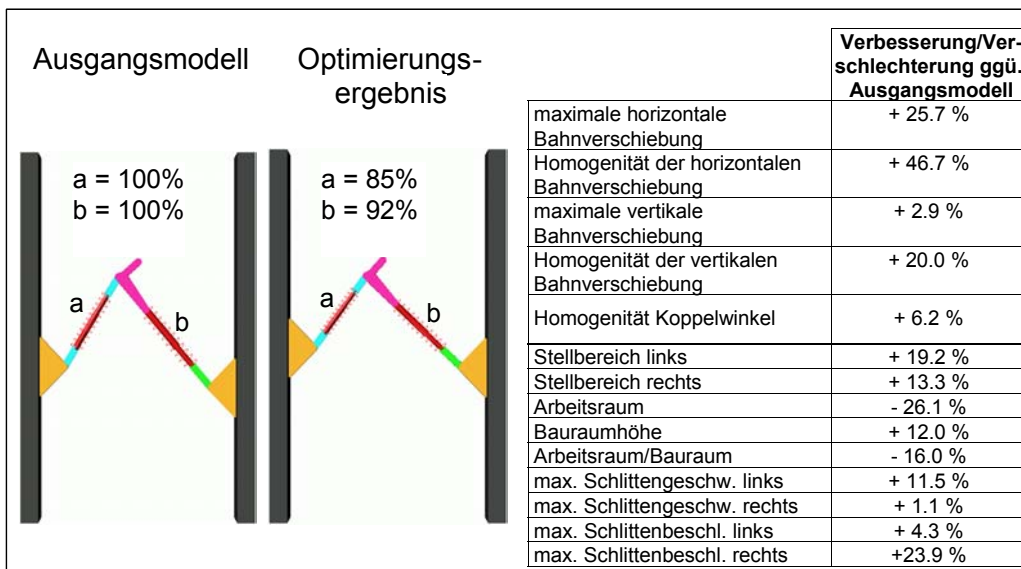


Abbildung 6: Ergebnisse der Optimierung in der Konzeptphase

4 Parameteroptimierung in der Entwurfsphase

Mit der Parameteroptimierung von bereits in der Konzeptionsphase festgelegten Maschinenkonzepten wird derzeit mit Arbeiten im Forschungsprojekt „SimCAT“ Neuland betreten. Die Motivation hierfür ist die Gewinnung von Erkenntnissen

über den Einfluss parameterbehafteter Komponenten auf das dynamische Maschinenverhalten. Solche Komponenten, zu denen u.a. Kugelgewindetriebe (KGT), Lager, Wälzführungen oder Aufstellelemente gehören, werden in FEM- oder MKS-Berechnungsmodellen vereinfacht durch Feder-Dämpfer-Elemente mit diskreten Steifigkeits- und Dämpfungswerten berücksichtigt. Darüber hinaus können durch Parameteroptimierung auch direkt Einflüsse der Regelung auf das Maschinenverhalten bewertet und optimiert werden. Möglich ist die Einbindung von Reglerelementen in der MKS durch eine Kopplung mit geeigneten Reglersimulationsprogrammen (z.B. Simulink). In der FEM kann die Reglerdynamik durch diskrete Reglerelemente geschehen, wie sie z.B. das FEM-Paket PERMAS zur Verfügung stellt. Somit steht für eine Optimierung eine Vielzahl von Parametern zur Verfügung.

Zielfunktion für eine Optimierung ist hauptsächlich das dynamische Maschinenverhalten, für dessen Beurteilung zwei wesentliche Gütekriterien herangezogen werden können. Zum einen liefert der Nachgiebigkeitsfrequenzgang (NF-Gang) eine Aussage über die dynamische Steifigkeit. Zum zweiten kann durch die Ermittlung von Stabilitätskarten ein Hinweis auf das Verhalten der Maschine im Zerspanprozess erlangt werden [9]. NF-Gang und Stabilitätskarten sind beide direkt von Massenverteilung, Steifigkeiten und Dämpfungen der Maschinen abhängig. Für die im Folgenden betrachteten Untersuchungen wurde zunächst nur der relative NF-Gang zwischen Werkzeug und Werkstück betrachtet.

Für erste Untersuchungen wurde als Beispiel ein Drehfräszentrum aus dem Hause INDEX verwendet (Abbildung 7).

Das Maschinenmodell beinhaltet als Übertragungselemente

- 3 KGTs,
- 6 Wälzführungen mit 12 Führungsschuhen,
- 2 Rotationslager,
- 5 Aufstellelemente,

deren Steifigkeitsparameter für die Optimierung zur Verfügung stehen. Insgesamt wurden in verschiedenen Modellausbaustufen bis zu 17 Parameter in die Optimierung mit einbezogen. Dämpfungsparameter wurden aufgrund ihrer komplexen Auswirkungen auf das Maschinenverhalten vernachlässigt.

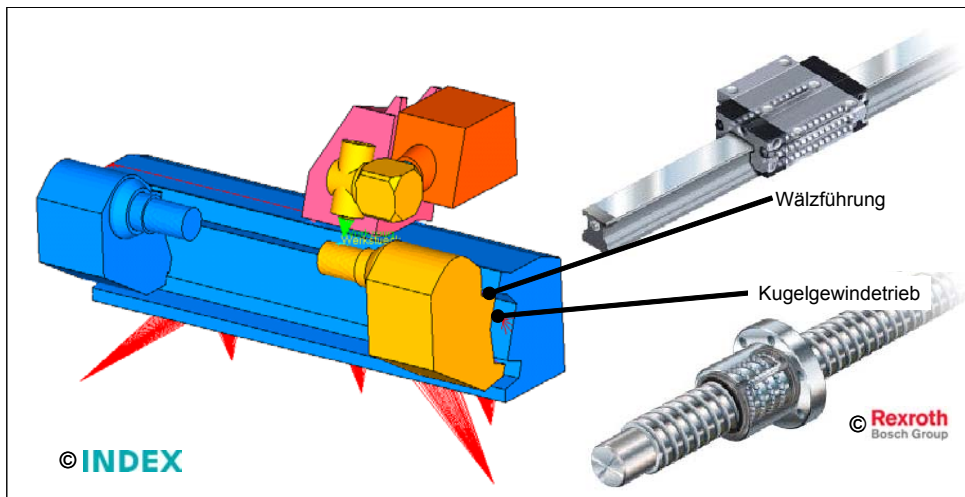


Abbildung 7: Beispiel für die Parameteroptimierung an FE-Modellen. Die Bauteilgestalt der Beispielmachine (INDEX G250) wurde stark vereinfacht, um Rechenzeit einzusparen.

Um die Rechenzeiten für Versuchszwecke so gering wie möglich zu halten, diente ein stark vereinfachtes FEM-Modell im MSC.Nastran-Format als Berechnungsgrundlage. Mit diesem reduzierten Modell wurde die Rechenzeit pro Rechenlauf auf unter fünf Minuten gehalten, weshalb auch Läufe mit über 100 Iterationen kein Zeitproblem darstellten. Als FEM-Solver wurde PERMAS eingesetzt, und notwendige Datenaufbereitung zum Processing mit OptiSLang wurde mit selbstgeschriebenen Perl-Scripten realisiert (Abbildung 8).

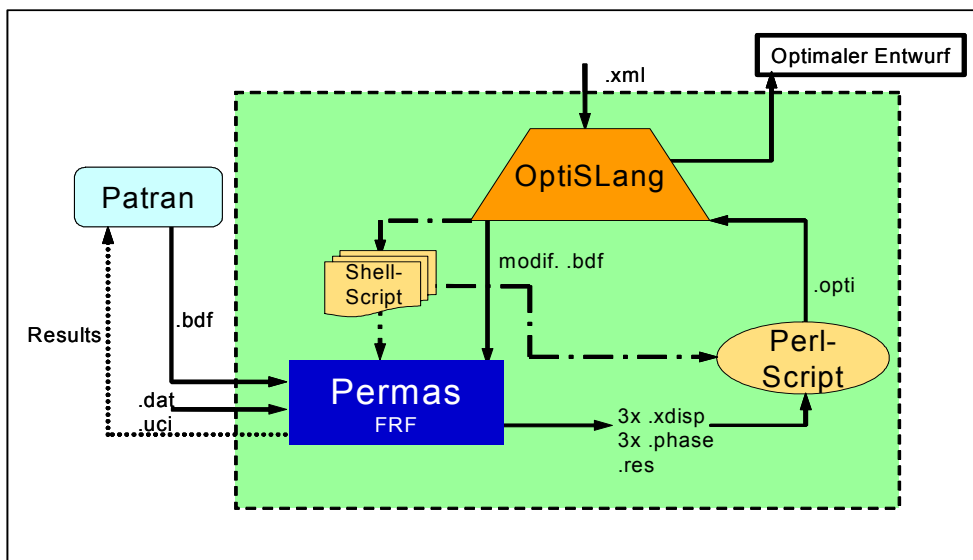


Abbildung 8: Datenstruktur der Optimierung mit PERMAS als FEM-Solver, OptiSLang als Optimierer und Datenaufbereitung durch Scripting.

Zur Identifikation kritischer Parameter wurden zunächst Sensitivitätsstudien, wiederum auf Basis von DOE-Untersuchungen, durchgeführt. Dies führte zu einem reduzierten Parametersatz, mit dem die eigentliche Optimierungsrechnung

mit geeigneten Methoden (Genetik, ARSM je nach Anzahl der Parameter) durchgeführt wurde (Abbildung 9).

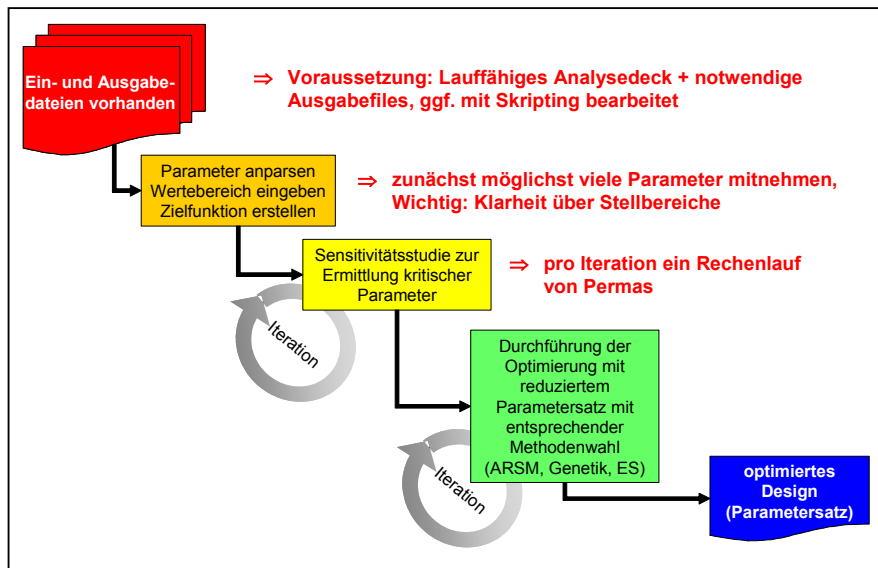


Abbildung 9: Prozesskette der Optimierung mit PERMAS und OptiSLang

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen, dass durch die Parameteroptimierung an WZM ein deutlicher Einfluss auf das dynamische Maschinenverhalten genommen werden kann. Eine signifikante Reduktion der Maximalamplituden (Abbildung 10) konnte erwartungsgemäß erzielt werden. Durch die Erprobung der Methoden wurden allerdings neue grundlegende Fragestellungen hinsichtlich geeigneter Kenngrößen zur Bewertung des Maschinenverhaltens und der Gestaltung ganzheitlicher Simulationsprozessketten aufgeworfen. Diese Fragestellungen werden im nächsten Abschnitt dargelegt.

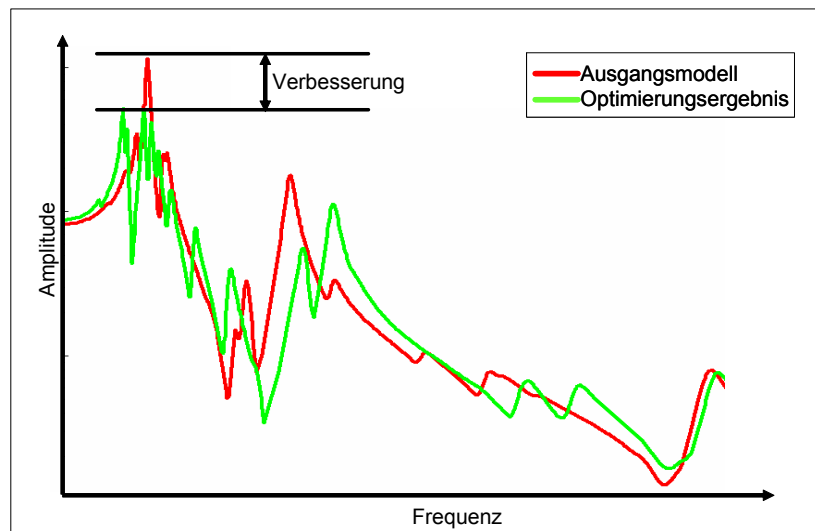


Abbildung 10: Verbesserungspotential durch Optimierung, exemplarisch am Nachgiebigkeitsfrequenzgang in x-Richtung dargestellt.

5 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen

Die Grenzen der Anwendung von Parameteroptimierungsmethoden in der WZM-Entwicklung liegen momentan noch in elementaren Defiziten beim Verständnis von Parametern und ihrem Zusammenwirken hinsichtlich des Maschinenverhaltens, besonders für dynamische Größen. Da die Parameteroptimierung in der klassischen Werkzeugmaschinenentwicklung ein neu eingesetztes Verfahren darstellt, müssen in der näheren Zukunft folgende wesentlichen Fragestellungen geklärt werden:

- Reicht der Nachgiebigkeitsfrequenzgang als alleiniges Gütekriterium aus?
- Welche Möglichkeiten gibt es, Stabilitätsbetrachtungen in den Optimierungsloop mit einzubeziehen?
- Welche Variationsbereiche von Parametern sind zulässig?
- Wo bestehen Abhängigkeiten der Parameter und wie können diese im Modell abgebildet werden?
- Wie kann Parameteroptimierung mit parameterfreier Strukturoptimierung gekoppelt werden, um ganzheitliche Maschinenoptimierung durchführen zu können?
- Welche Programmanforderungen sind für optimale, einfache Datenaufbereitung notwendig und wie können diese umgesetzt werden?

Der Einsatz von Verfahren der Parameteroptimierung bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen zeigt klare Potentiale auf. Die Bestimmung optimaler Maschinenkonfigurationen – von Geometrie und Komponenteneigenschaften – ist ohne die Anwendung solcher Methoden nur schwer möglich, weil Wechselwirkungen und deren Auswirkungen zu komplex sind, um sie mit konventionellen Ingenieurmethoden zu durchdringen. Deshalb liefert der Einsatz der Parameteroptimierung weiterhin eine Möglichkeit für den Entwicklungsingenieur, verborgene Einflussgrößen zu erkennen und ihren Auswirkungen entgegenzuwirken. Durch die Offenheit von Parameteroptimierungstools wie OptiSLang ist die Anwendung auch innerhalb kompliziertester Simulationsprozessketten möglich, wie z.B. bei der Regelungssimulation in Kombination mit hybrider Mehrkörpersimulation. In diesem Fall kann gleichzeitig eine optimale Abstimmung der Maschinenregelung bei gleichzeitiger Bestimmung der optimalen Maschinenkonfiguration stattfinden, was ein großer Schritt hin zur echten ganzheitlichen Maschinenoptimierung ist.

6 Zusammenfassung

Verfahren der Parameteroptimierung zeigen im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen ein hohes Einsatzpotential. In der Konzeptphase liefern sie, besonders bei Maschinen mit parallelkinematischen Strukturen, klare Designverbesserungen, die mit einfachen Ingenieurmethoden nicht mehr zu erreichen wären. Auch in der Entwurfsphase lassen sich diese Verfahren vorteilhaft einsetzen. Einerseits können Erkenntnisse über kritische Parameter und ihre Sensitivitäten gewonnen werden. Andererseits wird es möglich, optimale Komponenten, wie Führungen oder Kugelgewindetriebe, auswählen zu können. Letzteres wird

allerdings eingeschränkt, weil diese Komponenten nicht beliebig an die Optimierungsergebnisse angepasst werden können. Weiteres Potential liegt in der Ermittlung des Einflusses von Reglerparametern und ihrer Optimierung, wie auch im Einsatz von Parameteroptimierungsmethoden zur Robustheitsbewertung von Maschinenentwürfen. Viele dieser Fragestellungen bedürfen noch intensiver Forschungsarbeit, die zu einem Teil im Rahmen des laufenden BMBF-Projektes „SimCAT“ angegangen werden [10].

Literatur

- [1] VDI-RICHTLINIE 2221: *Methode zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- [2] NEITHARDT, WOLFGANG: *Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation*. Universität Karlsruhe (TH), wbk Institut für Produktionstechnik, Dissertation. Karlsruhe: Holler-Druck, 2004.
- [3] FLEISCHER, J.; BROOS, A.; SCHMIDT-EWIG, J.-P.: Optimization of a Parallel Kinematic Machine Tool through Combination of Hybrid Multi Body Simulation and Topology Optimization – Possibilities and Limits of a New Method. In: NAFEMS-Seminar "*Analyse von Mehrkörpersystemen mit FEM und MKS*", Tagungsband. Wiesbaden: NAFEMS DACH, 27./28.10.2004.
- [4] N.N.: 3D gewinnt mächtig... Befragung unter CAD-Anwendern. In: *Form + Werkzeug*, April 2003, S. 21-22.
- [5] MELCHINGER, A., SCHMITZ, E.-U.: Schneller und effizienter in der Entwicklung durch Simulation und Optimierung. In: *Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung*. Symposium, Bremen (Germany), Nov. 5-7, 2003. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003, S. 149-156.
- [6] BRECHER, C.: CAD, FEM und Simulation heben prinzipielle Beschränkungen auf. In: *Industrieanzeiger*, Ausgabe 51/52, 15.12.2003, S. 46.
- [7] KIRCHNER, JAN: *Mehrkriterielle Optimierung von Parallelkinematiken*. Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen, Dissertation. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2001.
- [8] STENGELE, G.: CROSS HÜLLER SPECHT Xperimental – A Machine Center with New Hybrid Kinematics. In: *Proceedings of the 3rd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar*. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2002.
- [9] WECK, MANFRED: *Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme*. Band 4: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998
- [10] Internetseite des Verbundforschungsprojektes *SimCAT – Integration von CA-Techniken zur ganzheitlichen Simulation und Optimierung von Fertigungs-*

einrichtungen vom CAD bis hin zur „Hardware-in-the-Loop-“ Simulation:
www.simcat.org

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Parameteroptimierung in der Konzeptphase) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1099 „Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken“, sowie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Parameteroptimierung in der Entwurfsphase) im Forschungsprojekt „SimCAT“ innerhalb der Ausschreibung „Werkzeugmaschine 2010“.