

OptiSLang in der Entwicklung von Werkzeugmaschinen

Alexander Broos^{1*}, Dr. Gerhard Kehl²,
Dr. Andreas Melchinger³, Sascha Röck⁴,
Dr. Johannes Will⁵

¹ wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

² Gebr. Heller Werkzeugmaschinenfabrik GmbH, Nürtingen

³ Index-Werke GmbH & Co. KG Hahn & Tessky, Esslingen

⁴ Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

⁵ DYNARDO Dynamic Software and Engineering GmbH, Weimar

Zusammenfassung

In der Produktentwicklung von Werkzeugmaschinen bieten sich einige Einsatzmöglichkeiten der CAE-basierten Methoden parametrischer Sensitivitätsuntersuchungen und Optimierung, die das Optimierungstool OptiSLang zur Verfügung stellt. Auf Basis der vorhandenen Finite-Elemente-Modelle können besonders Sensitivitätsstudien wichtige Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile bestimmter Konstruktionsmerkmale liefern. Daraus lassen sich Maßnahmen zur Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften ableiten und Parameteroptimierungen durchführen.

In diesem Artikel werden Anwendungsbeispiele für den Einsatz von OptiSLang dargestellt, die innerhalb des vom BMBF geförderten Verbundforschungsprojekts SimCAT [1] untersucht worden sind. Nach einer Einführung in die Grundzüge der Bewertung und Optimierung von Werkzeugmaschineneigenschaften wird vorgestellt, welcher Nutzen durch Sensitivitätsstudien und Parameteroptimierung bei einer Frässpindel, einer Drehmaschine und bei der Parameteridentifikation eines Echtzeitsimulationsmodells erreicht werden konnte.

Keywords: Parameteroptimierung, Werkzeugmaschine

* Kontakt: Dipl.-Ing. Alexander Broos, wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Tel. 0721-608-4297, E-Mail: broos@wbk.uka.de

1 Einleitung

Der Werkzeugmaschinenbau gehört zu den Kernbranchen des exportstarken deutschen Maschinen- und Anlagenbaus, in der traditionsreiche mittelständische Unternehmen eine dominierende Rolle spielen. Im Zuge eines globalisierten Wettbewerbs müssen diese Unternehmen ihre Markführerschaft durch eine effiziente Produktentwicklung behaupten. Um zeit- und kostenintensive Prototypenuntersuchungen, die jeder Produktneueinführung vorausgehen, zu reduzieren, werden mittlerweile eine Reihe von Simulations- und Berechnungswerkzeugen eingesetzt. Eine herausragende Rolle spielt dabei die Finite-Elemente-Methode (FEM), mit der die wesentlichen statischen und dynamischen (Eigenfrequenzen, Nachgiebigkeitsfrequenzgänge (NFG)) Eigenschaften schon früh im Produktentwicklungsprozess analysiert werden können. Weitere Methoden, die eher im Forschungsumfeld eingesetzt werden, sind die Mehrkörpersimulation und die Echtzeitsimulation. Aus dem Vorhandensein von Berechnungsmodellen ergibt sich auch die Möglichkeit, diese Modelle für die Bauteil- oder Systemoptimierung zu verwenden, um gezielt einzelne Eigenschaften des Systems „Werkzeugmaschine“ (WZM) zu beeinflussen.

1.1 Das Verbundforschungsprojekt SimCAT [1]

Die heute in der Produktentwicklung von Werkzeugmaschine eingesetzten Simulationsverfahren betrachten in der Regel isoliert die Aspekte Strukturmechanik (Topologie, statisches Verhalten), Struktur- und Thermodynamik (dynamisches und thermisches Verhalten), das Feld der Steuerungs- und Antriebstechnik (Antriebsregler, Sensoren und Aktoren) und die Prozesssimulation (Spanbildung, Prozesskräfte). Die jeweiligen numerischen Simulationsverfahren werden vorwiegend zeitlich hintereinander (sequentiell) eingesetzt. Auf dieser Basis können nur Optimierungen hinsichtlich der Eigenschaften durchgeführt werden, die durch das jeweilige Verfahren abgebildet werden. Erklärtes Gesamtziel des Projekts war es, eine integrierte Simulationsumgebung zu schaffen, mit der das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen durch rechnerbasierte virtuelle Modelle ganzheitlich abgebildet wird.

Im Projekt wurden dazu auf den drei Ebenen Simulation im Frequenzbereich, Simulation im Zeitbereich und Echtzeitsimulation die für die Werkzeugmaschine spezifischen Anforderungen an Simulation und Optimierung untersucht. Als Ergebnis des Projekts stehen Erweiterungen von bestehenden Berechnungsverfahren sowie Erkenntnisse über den Einsatz von für die WZM-Branche neuartigen Methoden zur Verfügung. Ein besonderer Aspekt hierbei war die Anwendung von Methoden der Parameteroptimierung.

2 Parameteroptimierung in der Produktentwicklung von Werkzeugmaschinen

Die CAE-basierte Parameteroptimierung stellt numerische Verfahren zur Verfügung, um gezielt das Verhalten eines technischen Systems durch Modifikation einzelner Parameter – dies können z.B. Federsteifigkeiten oder Blechdicken sein – zu beeinflussen. Die Parameter stehen in Simulationsmodellen in der Regel als Zahlenwerte zur Verfügung, die von den Optimierungswerkzeugen verändert werden können. Im Verbundforschungsprojekt SimCAT wurden diese Verfahren auf das Anwendungsgebiet von Werkzeugmaschinen angewendet. Im Projekt wurden Ansätze erarbeitet, um mittels Parameteroptimierung das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen zu verbessern und auch die Prozessstabilität in den Optimierungszyklus mit einzubeziehen. Als Nutzen für Werkzeugmaschinenhersteller ergibt sich daraus

- ein tieferes Verständnis des komplexen Produkts Werkzeugmaschine,
- Erkenntnisse über Schwachstellen und Verbesserungspotential und
- Hilfestellung für Neukonstruktionen für langfristig verbesserte Produkte.

Als Ergebnis des Projekts stehen Methoden zur Verfügung, wie die Parameteroptimierung effizient in den Produktentwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen einbezogen werden kann [2]. Diese Methoden umfassen:

- die Identifikation von Einsatzgebieten der Parameteroptimierung im Produktentwicklungsprozess,
- die Identifikation von geeigneten Parametern und Zielfunktionen,
- eine Entwicklung praktikabler Optimierungsworkflows, sowie
- die Überprüfung der Anwendbarkeit an Praxisbeispielen.

Der Produktentstehungsprozess von Werkzeugmaschinen gleicht dem anderer Produkte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221. Er besteht aus den Phasen Produktideenfindung, Konzeptfindung, Entwurf, Ausarbeitung, Prototypenbau/Versuch und schließlich der Serienreife. Für den Einsatz der Parameteroptimierung wurden in [3] besonders die Konzept- und Entwurfsphase identifiziert, welches auch die Phasen mit dem hauptsächlichlichen Einsatz von Simulationsunterstützung sind.

Auf die verwendeten Parameter, Gütekriterien und Workflows wird im Folgenden eingegangen.

2.1 Parameter

Im Projekt SimCAT stand die Simulation und Optimierung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen im Vordergrund. Dieses Verhalten wird im Wesentlichen durch die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften der Maschinenbauteile und Komponenten bestimmt.

Die folgenden Parameter wurden während des Projekts in die Optimierung einbezogen:

- Materialeigenschaften – verschiedene Werkstoffkennwerte von Guß- und Stahlwerkstoffen wurden als diskrete Parametersätze vorgegeben.
- Federsteifigkeiten – die wesentlichen Fügestellen einer WZM, wie Führungen, Lager oder Kugelgewindetriebe, werden in Simulationsmodellen durch Federn abstrahiert, deren Steifigkeitskennwerte direkt angesprochen werden können.
- Dämpfungen – im Projekt wurden auch Dämpfungskennwerte messtechnisch ermittelt. Um eine Auswirkung der Variation dieser Dämpfungskoeffizienten auf das dynamische Verhalten zu ermitteln, wurde den Federelementen, die die Fügestellen darstellen, jeweils ein Dämpferelement parallel geschaltet.
- Reglerparameter – die Finite-Elemente-Analyse unter Berücksichtigung der Reglerdynamik war ein Schwerpunkt von SimCAT. Entsprechend standen in den FE-Modellen Regelungsparameter zur Verfügung, die für die Optimierung herangezogen wurden, wie beispielsweise Verstärkungsfaktoren.

Vor Beginn der Optimierung müssen für die Parameter noch Grenzen festgelegt werden, innerhalb derer der Optimierer die Parameter variieren darf. Zum Erkenntnisgewinn sollten diese Grenzen zu Beginn möglichst groß gewählt werden; später müssen sie auf ein realistisches Maß, das z.B. durch die zur Verfügung stehenden Komponentenauswahl bestimmt wird, reduziert werden.

2.2 Gütekriterien

Um das dynamische Verhalten der Werkzeugmaschine zu optimieren, müssen geeignete Optimierungskriterien definiert werden. In einem gemeinsamen Workshop der Projektpartner wurde als maßgebliches Optimierungskriterium der gerichtete Nachgiebigkeitsfrequenzgang (NFG) der Werkzeugmaschine am Mittelpunkt des Werkzeugs (Tool Center Point, TCP) festgelegt, wobei einmal die Absolut-NFGs auf Werkzeug- und Werkstückseite sowie zum anderen der Relativ-NFG zwischen Werkzeug- und Werkstückseite betrachtet wurden.

Als Zielfunktion für die Optimierung ergab sich hieraus, die Amplituden der NFGs in allen Raumrichtungen zu minimieren, wobei hier die größten Amplituden maßgeblich waren. Für die technische Realisierung hieß dies, dass innerhalb eines Frequenzfensters die maximale Amplitude gesucht wurde und die Optimierung dann die Parametervariation auf Reduzierung dieser Amplitude ausrichtete (Abbildung 1a). Wenn durch die Optimierung nun diese Maximalamplitude soweit abgesenkt wurde, dass eine weitere Amplitude bei einer anderen Frequenz zur Maximalamplitude wurde, so richtete sich die Zielfunktion nun auf diese neue Maximalamplitude. Im Idealfall würde sich so ein praktisch linearer NFG ergeben, was aber in Wirklichkeit nicht zu realisieren ist. Da unterschiedliche Bauteile und Koppellemente unterschiedliche Frequenzbereiche beeinflussen, konnten

Innerhalb eines NFGs mehrere solche Frequenzfenster definiert werden, was zu einer mehrdimensionalen Zielfunktion führte, in der auch in Konflikt stehende Optimierungsziele auftreten konnten.

Für die Optimierung der Prozessstabilität wurden zusätzlich das Grundniveau der Schnitttiefe und die Integralfläche unterhalb der Stabilitätskurve innerhalb eines oder mehrerer Drehzahlfenster definiert (Abbildung 1b). Sowohl Niveau als auch Schnitttiefe sollten maximiert werden.

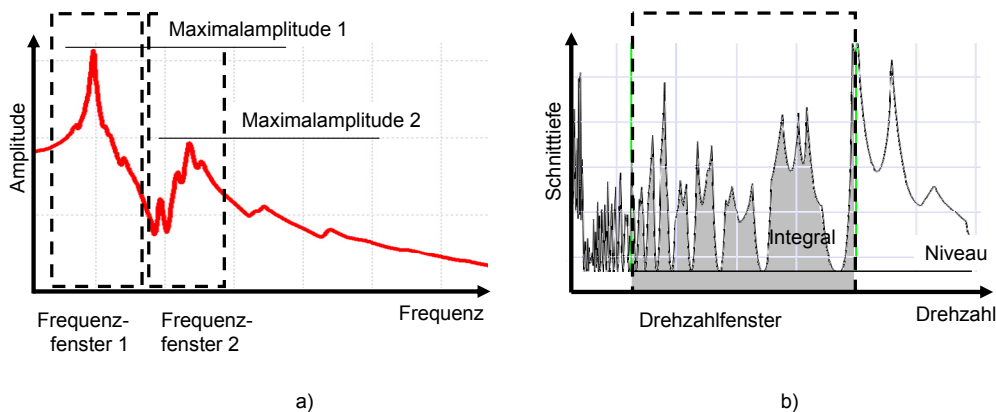


Abbildung 1: a) Nachgiebigkeitsfrequenzgang als Zielfunktion, b) Prozessstabilität als Zielfunktion

2.3 Technische Realisierung der Kopplung von OptiSLang mit unterschiedlichen CAE-Berechnungsprogrammen und Optimierungsworkflows

OptiSLang ist ein Softwaretool für Sensitivitätsstudien, multikriterielle, multidisziplinäre Optimierung, Robustheitsbewertungen und Zuverlässigkeitsanalyse. Da es plattform- und solverunabhängig eingesetzt werden kann, besteht die Möglichkeit zum Aufbau komplexer Analyseworkflows mit Einsatz unterschiedlicher CAE-Berechnungsprogramme. Für die nachstehend dargestellten Anwendungsbeispiele wurde OptiSLang mit den FE-Solvern Permas und ANSYS sowie mit dem Werkzeug für die Echtzeitsimulation VIRTUOUS gekoppelt. Diese Kopplungen basieren jeweils auf dem Ein- und Auslesen von ASCII-Dateien. Das jeweilige Analysedek muss im solverspezifischen Format als Textdatei vorliegen. Die Parameter in dem Analysedek werden mit dem OptiSLang-Parametereditor erfasst (angepasst) und ihre Eigenschaften definiert (Variationsbereiche, Mittelwert, Verteilungsfunktion etc.). In jeder Iterationsschleife variiert OptiSLang dann automatisiert die Parameter in den vorgegebenen Schranken und stößt Solverläufe für die Berechnung an. Für die Auswertung müssen die Solverergebnisse ebenfalls in einem strukturierten Textfile vorliegen, das dann von OptiSLang eingelesen und ausgewertet wird. Für die Auswertung werden dann in OptiSLang noch Gütekriterien und Zielfunktionen definiert werden.

Nachdem die Kopplung mit Parametern, Ergebnisdateien und Zielfunktionen festliegt, wird die eigentliche Parameterstudie oder -optimierung durchgeführt. Hierzu wird am besten der in Abbildung 2 dargestellte Workflow verwendet. Zunächst werden im Designraum die wichtigsten Parameter mittels einer Sensitivitätsstudie identifiziert. Dafür stellt OptiSLang umfangreiche Postprocessing-Funktionalitäten zur Verfügung, mit denen die Korrelationen zwischen Parametern und Gütekriterien ermittelt werden können. Basierend auf dem Ergebnis der Sensitivitätsstudie wird ein Parameteroptimierungslauf mit reduziertem Parametersatz durchgeführt, um eine optimale Konfiguration der Parameter einzustellen. Um das Optimierungsergebnis zu validieren, wird eine Robustheitsbewertung nachgeschaltet. Hierbei werden im Raum streuender Parameter die zu erwartenden Eingangsstreuungen z.B. durch Fertigungstoleranzen, mittels statistischer Kennwerte definiert. Nur wenn sich das Optimierungsergebnis als robust gegenüber diesen Parameterstreuungen erweist, liegt ein optimierter Entwurf vor. Optimierte heißt in diesem Sinne nicht ein mathematisches Optimum, sondern eine realisierbare, signifikante Designverbesserung.

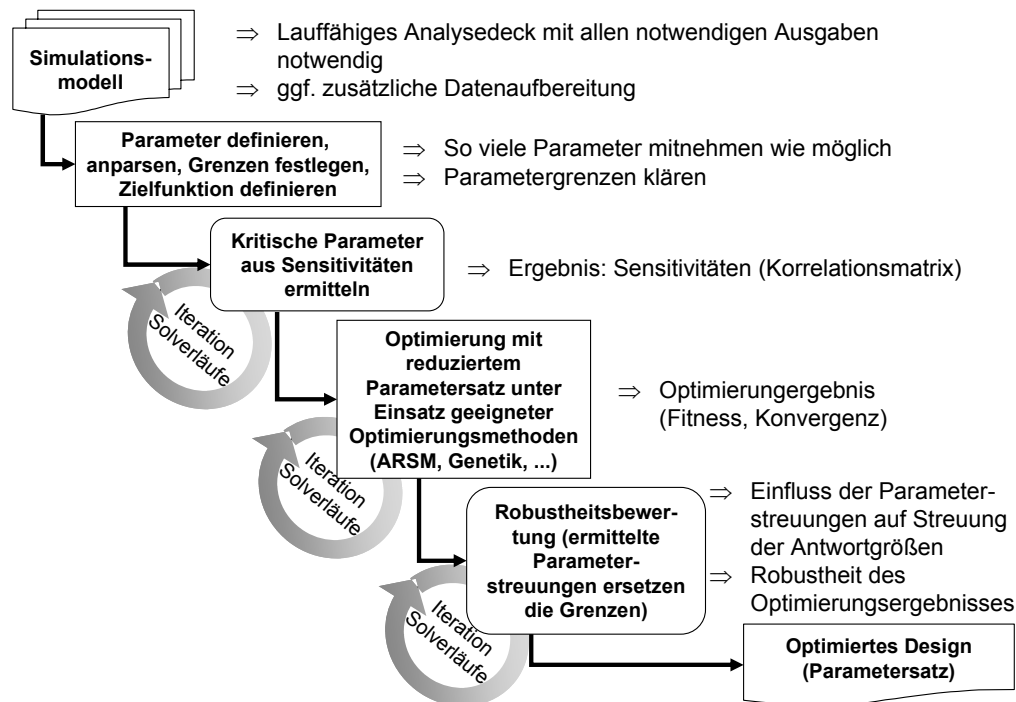


Abbildung 2: Parameteroptimierungs-Workflow mit OptiSLang

3 Optimierung von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der Prozessdynamik

In SimCAT konnte eine Optimierungsschleife unter Berücksichtigung der zu erwartenden Prozessstabilität realisiert werden [4]. Dazu wurden zunächst die NFGs der Maschine mit PERMAS berechnet und diese Daten dann an das Berechnungsprogramm für die Prozessdynamik, CutPro, weitergereicht. In der Optimierungsschleife wurden dafür die Federsteifigkeiten des Maschinenmodells

variiert und der jeweilige NFG an CutPro übergeben, wobei der zu Grunde gelegte Referenzprozess, dessen Prozessstabilität betrachtet wird, nicht verändert wird. Das Ablaufschema dieser Optimierungsschleife ist in Abbildung 3 dargestellt. Da CutPro keine batchfähige Software ist, wurde die Einbindung und Abstimmung über AutoMate realisiert.

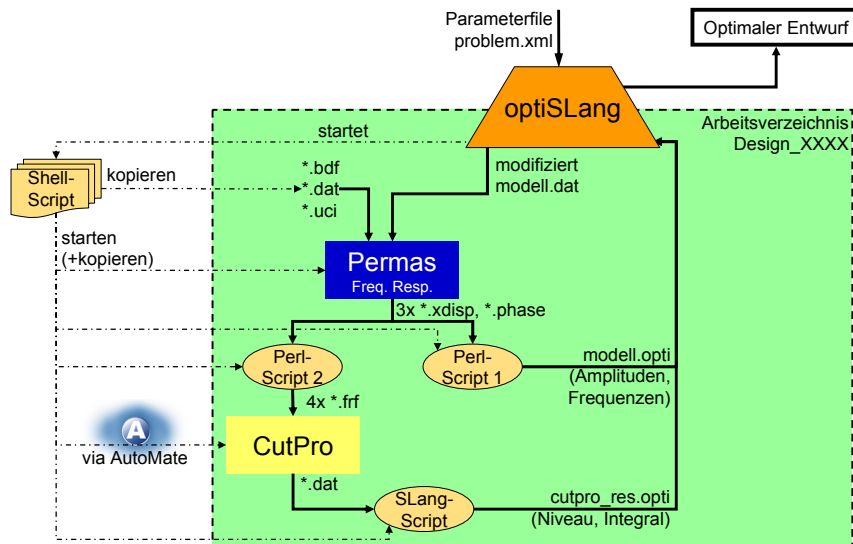


Abbildung 3: Ablaufschema der Optimierung mit Prozessdynamik

Für die Optimierungsschleife mit Prozessdynamik wurde ein kondensiertes Modell des Bearbeitungszentrums Heller MCH250 verwendet, um die Rechenzeit auf ca. 10 Minuten zu verringern. Als Referenzprozess wurde in CutPro das Umfangsfräsen mit einem Igelfräser eingestellt [5], für das die Stabilitätskarten abgeleitet wurden. Als Parameter wurden die wesentlichen Führungs- und Lagersteifigkeiten der Maschine im Stellbereich 50%-200% der Nennwerte verwendet. Für die Auswertung mit OptiSLang wurde ein Auswerteskript erstellt, mit dem das Grundniveau und Integral unter der Stabilitätskurve erfasst wurde. Die durchgeführte Sensitivitätsstudie zeigte, dass die dem Prozess am nächsten gelegenen Führungen den größten Einfluss auf die Prozessstabilität hatten. Das beste Design der Sensitivitätsstudie stellte bereits eine deutliche Verbesserung der Prozessstabilität gegenüber dem Ausgangsdesign dar, so dass auf eine weitere Optimierung verzichtet wurde (Abbildung 4). Dies ist eine wesentliche Erkenntnis für die Anwendbarkeit der Optimierungsmethodik in OptiSLang: aus den Sensitivitätsstudien in den Designräumen der Optimierung können wertvolle Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen Eingangsvariation und Ausgangsvariation entnommen werden. Auf dieser Grundlage werden Designverbesserungen erzielt, die mit oder ohne anschließende Parameteroptimierung realisiert werden können.

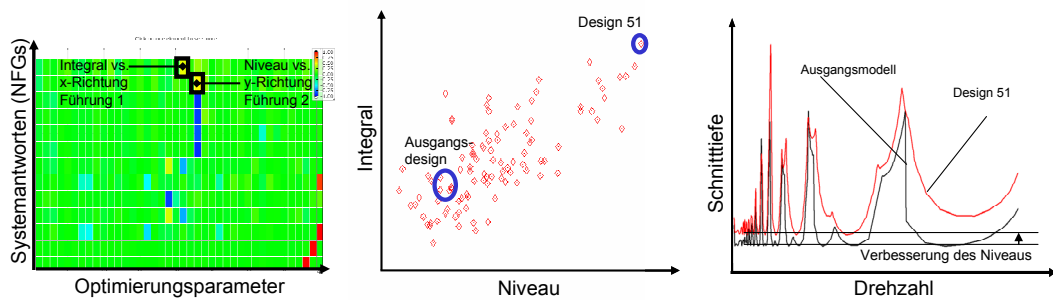


Abbildung 4: Ergebnisse der Optimierung mit Prozessdynamik

In den folgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse aus dem Einsatz von OptiSLang für die Optimierung einer Frässpindel, der Untersuchung von Dämpfungsauswirkung auf das dynamische Verhalten einer Drehmaschine und die Parameteridentifikation für ein Echtzeitsimulationsmodell dargestellt.

4 Optimierung einer Frässpideleinheit

Frässpideleinheiten gehören zu den Kernkomponenten von Fräsmaschinen. Sie stellen die für die Bearbeitung notwendige Hauptschnittbewegung und Drehmoment zur Verfügung, dienen der Werkzeughalterung und übernehmen eine wichtige Aufgabe in der Medienführung (Druckluft, Kühlschmierstoff). Aufgrund ihres komplexen Aufbaus mit einer Vielzahl an Wellen, Lagerstellen, Werkstoffen und beweglichen Teilen tragen sie einen wesentlichen Teil zur Prozessstabilität der Maschine bei. Das dynamische Verhalten und die statische Steifigkeit der Frässpindel beeinflussen zudem direkt die fertigungsfähige Bauteilqualität.

Im Projekt SimCAT wurde das FE-Modell einer Frässpindel (Abbildung 5) mit 46 kontinuierlich variierten Parametern (lokale Steifigkeiten und Dämpfungen) und 10 diskret variierten Parametern (Werkstoffen) untersucht. Eine Sensitivitätsstudie wurde durchgeführt, und anschließend eine Mehrzieloptimierung (Paretooptimierung) aufgesetzt. Die Optimierungsziele waren die Amplituden im Nachgiebigkeitsfrequenzgang und die Schwinggeschwindigkeit durch Unwuchterregung an Werkzeug oder Spindel.

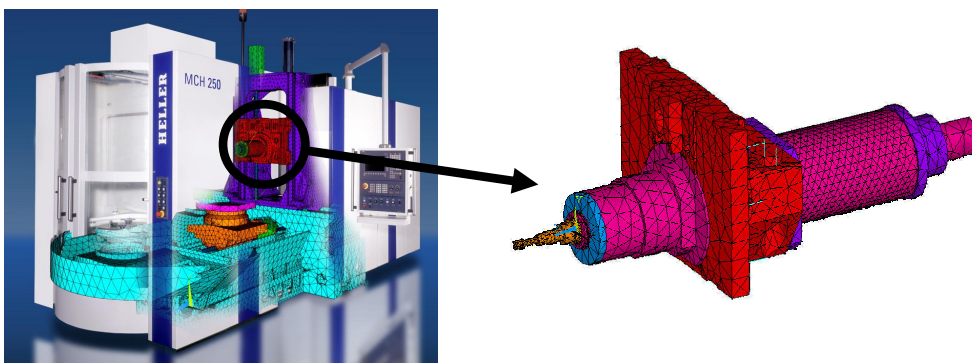


Abbildung 5: Frässpideleinheit der HELLER MCH 250

Für die Sensitivitätsstudie wurde eine Variationsrechnung mit 300 Rechenläufen durchgeführt. Dabei wurden die auszuwertenden Frequenzgänge in mehrere Frequenzfenster unterteilt (Abbildung 6a). Mit der Sensitivitätsstudie konnten durch Auswertung von Korrelationsmatrix und Bestimmtheitsmaßen (Abbildung 6b) sieben dominierende Parameter ermittelt werden.

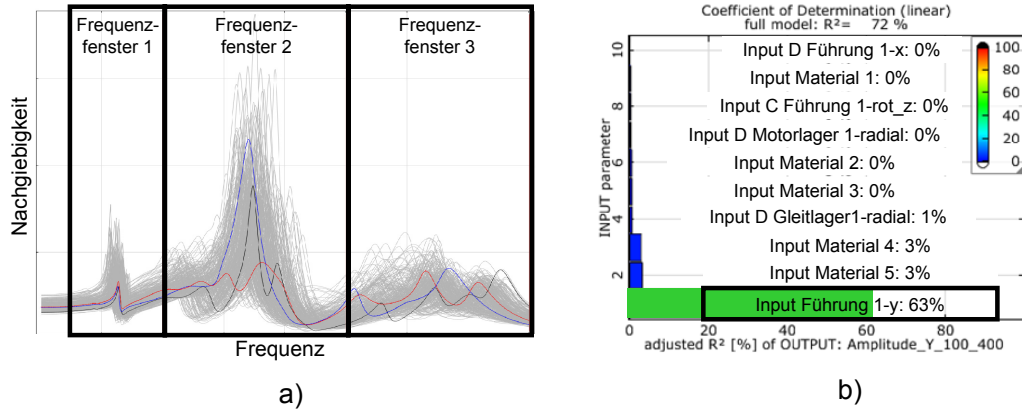


Abbildung 6: a) Bandbreite und Fenster des Frequenzgangs in x-Richtung
b) Bestimmtheitsmaß (Beispiel)

Der beste Parametersatz aus der Sensitivitätsstudie diente als Eingangsdatensatz für eine anschließende Optimierung. Die Optimierung mittels einer gewichteten Zielfunktion ergab einen Widerspruch bezüglich der Zielfunktion des NFG in y-Richtung, im Frequenzbereich 400-1000 Hz. Bei unterschiedlicher Gewichtung dieses Gütekriteriums ergab sich für eine Gleichgewichtung aller Bereiche in y-Richtung eine Designverbesserung von 16%. Bei doppelter Gewichtung des angesprochenen Frequenzfensters konnte zwar die entsprechende Amplitude deutlich reduziert werden, insgesamt wurde jedoch nur eine Designverbesserung von 13% erreicht werden (Abbildung 7).

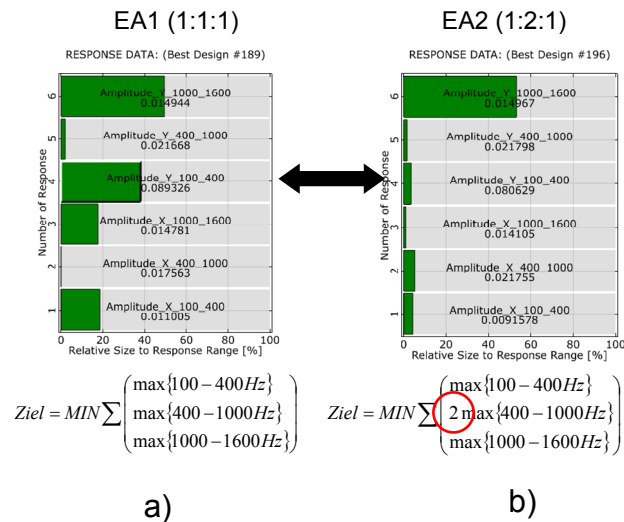


Abbildung 7: Ergebnisse der Optimierungen mit unterschiedlich gewichteten Zielfunktionen: Frequenzband 400-1000Hz a) einfach gewichtet; b) doppelt gewichtet.

Mittels einer Mehrzieloptimierung wurde die Paretofront, die optimale Kompromissmenge der in Konflikt stehenden Optimierungskriterien ermittelt. Die Frequenzbereiche 100-400 Hz und 400-1600 Hz werden durch unterschiedliche Materialdatensätze dominiert, so dass sich eine ausgeprägte Paretofront ergibt (Abbildung 8 a). Die Paretooptimierung führte zu einer Designverbesserung von 17% bei gleichzeitig deutlich reduzierter y-Amplitude im Frequenzbereich 100-400 Hz (Abbildung 8 b).

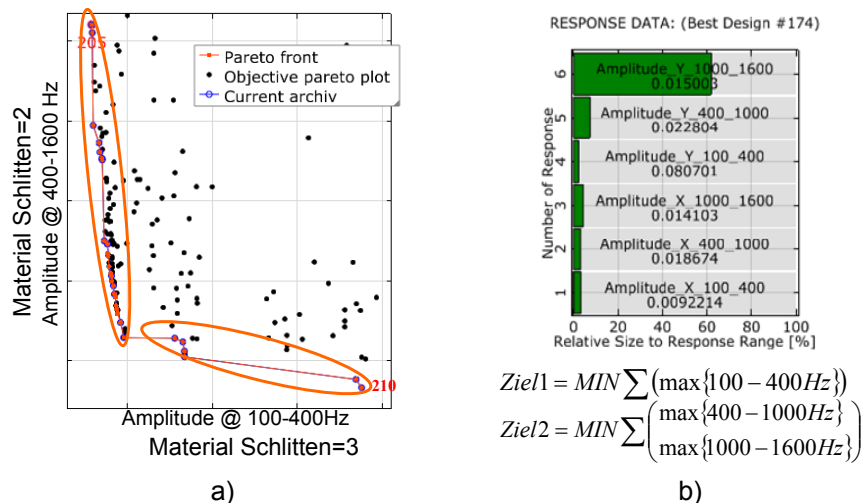


Abbildung 8: a) Paretofront; b) Optimierungsergebnis der Schwingungsamplituden nach Paretooptimierung.

Für das Anwendungsbeispiel Frässpindelinheit lässt sich zusammenfassen, dass die Methode der Sensitivitätsanalyse und der Parameteroptimierung ein großes Potential aufgezeigt hat, um in Kombination mit der ebenfalls in SimCAT weiterentwickelten Topologieoptimierung deutliche Produktverbesserungen erzielen zu können [6]. Die Praxistauglichkeit in der Produktentwicklung von Werkzeugmaschinen muss sich bei konsequentem Einsatz dieser Methoden mit der Zeit bewahrheiten.

5 Studie der Auswirkungen von Material- und Bauteildämpfungen auf das dynamische Verhalten einer Drehmaschine

Ein wesentliche Aspekt des Projekts SimCAT war die Fragestellung des Übergang von der bisher in der WZM-Berechnung vorherrschenden modalen Dämpfung auf lokalisierte Dämpferelemente, um das spezifische Verhalten von Koppelementen besser im Berechnungsmodell abbilden zu können. Vor diesem Hintergrund wurde auch eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Auswirkungen von Material- und Bauteildämpfungen auf das dynamische Verhalten einer Drehmaschine durchgeführt. Als Demonstrator hierfür stand das FE-Modell des Drehfräszentrum TNX65 aus dem Hause Traub zur Verfügung (Abbildung 9).

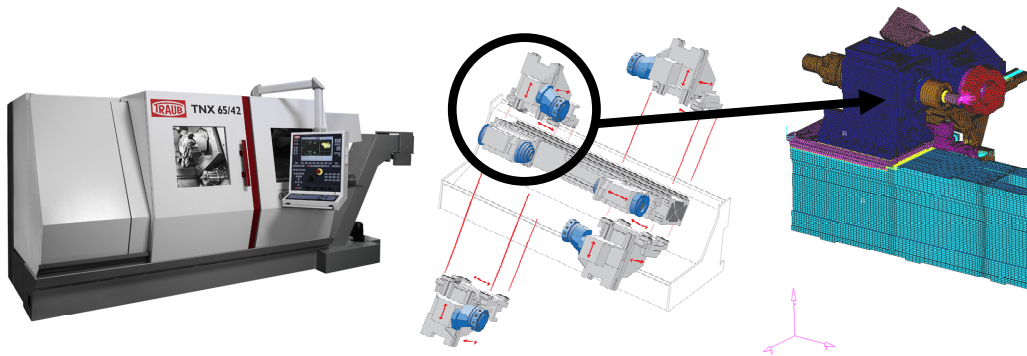


Abbildung 9: Drehfräszentrum Traub TNX65

Dieses Modell, bestehend aus Maschinenbett, Hauptspindeleinheit und eines XYZ-Werkzeugträgers wurde so parametrisiert, dass überhaupt keine modale Dämpfung mehr enthalten ist. Neben viskosen Dämpferelementen aller Lagerstellen und Führungen wurde auch die Strukturdämpfung für verschiedene massive Bauteile des Modells mit einbezogen, was zu insgesamt 104 Parametern, die die Dämpfung beschreiben, führte. Mit diesen Parametern wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Die zulässigen Variationsbereiche der Parameter wurden auf 10% - 1000% des Startwertes festgelegt. Als Gütefunktionale wurden die unterschiedlichen Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in alle Raumrichtungen herangezogen und mit dem Ergebnis eines Referenzlaufs mit modaler Dämpfung (der wiederum durch messtechnische Untersuchungen validiert war) abgeglichen.

Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass lediglich 9 der 104 Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die dynamischen Nachgiebigkeiten zeigen. Darunter befinden sich neben der Strukturdämpfung einiger Baugruppen in der Hauptspindel auch lokale Dämpfungswerte an einzelnen Linearführungswagen der Werkzeugträgerereinheit (Abbildung 9).

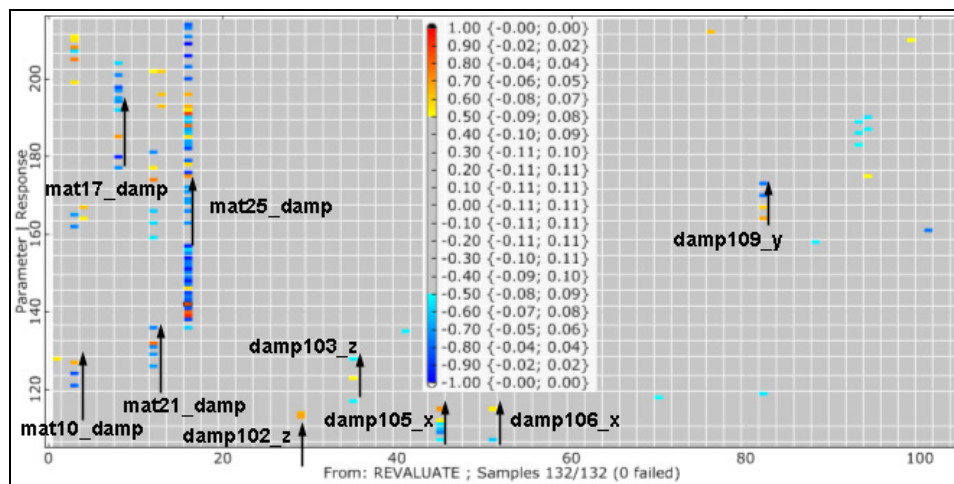


Abbildung 9: Korrelationsmatrix der Sensitivitätsstudie auf Bauteil- und Werkstoffdämpfungen (Korrelationen $< \pm 0.5$ ausgeblendet)

Erfreulich war bei dem Ergebnis der Sensitivitätsanalyse noch, dass sogar für einzelne Schwingungsamplituden eine direkte Zuordnung des „hauptverantwortlichen“ Parameters gemacht werden konnte (Abbildung 10).

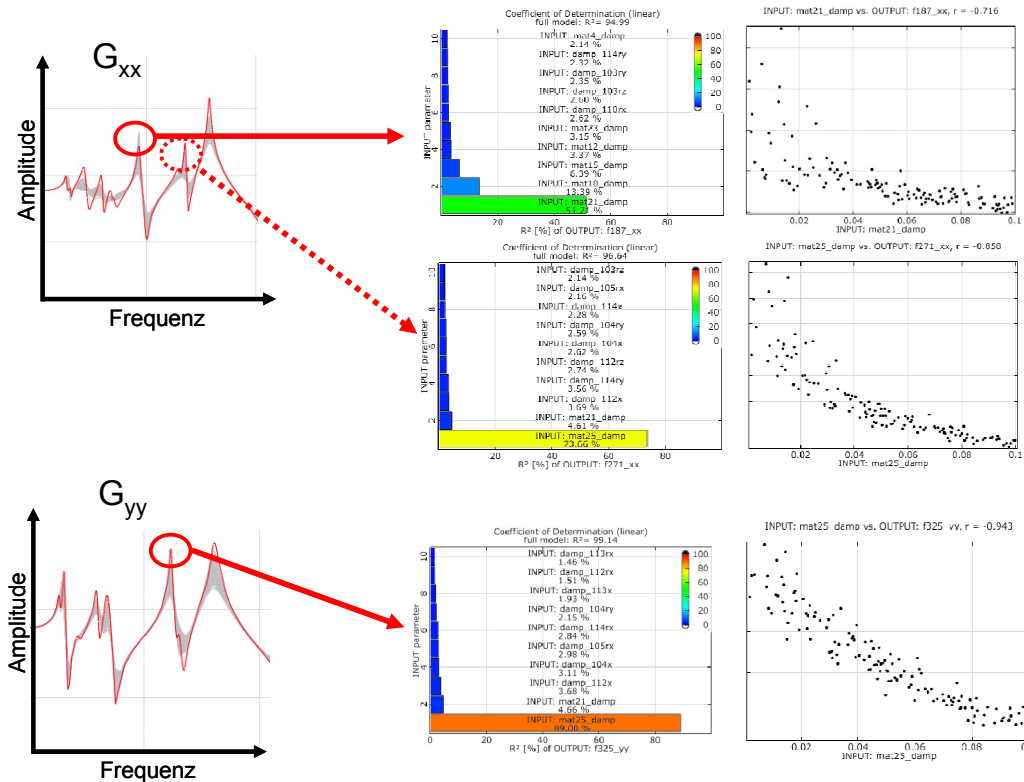


Abbildung 10: Zusammenhänge zwischen einzelnen Amplituden im NFG und Parametern, dargestellt an Bestimmtheitsmaßen

Wegen der geringen Anzahl sensibler Parameter wird durch solche Studien klar aufgezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Maschinen gezielt hinsichtlich optimaler dynamischer Nachgiebigkeiten zu konstruieren und an welchen Stellen eingegriffen werden muss. Für das vollständige Ausschöpfen dieses Potentials müssen aber noch umfassende weitere Studien, begleitet durch entsprechende experimentelle Anstrengungen durchgeführt werden [7].

6 Parameteridentifikation an einem Echtzeitsimulationsmodell

Die Analyse komplexer dynamischer Systeme muss i.d.R. auch die Regelungstechnik dieser Systeme mit einbeziehen. Um den Prozess der Inbetriebnahme von Regelungen oder Maschinensteuerungen zu vereinfachen und zu beschleunigen, wird seit einigen Jahren die sog. „Hardware-in-the-Loop-Simulation“ (HiLS) eingesetzt. Hierbei werden reale Steuerungskomponenten in Kombination mit virtuellen Modellen des zu regelnden Systems verwendet, um so z.B. Regelungsparameter auf das System abzustimmen. Hierfür ist die Echtzeitsimulation

zwingend erforderlich [8]. Die dafür notwendigen, echtzeitfähigen Modelle müssen entweder manuell erstellt oder aus vorhandenen, nicht-echtzeitfähigen Modellen (z.B. aus der MKS oder FEM) abgeleitet werden. Diese Modellreduktion sowie die zugehörige Parameteridentifikation waren ebenfalls Bestandteil des Projekts SimCAT [9]. Aufgrund der Modellreduktion erhöht sich der Abstraktionsgrad der Modellparameter, d.h., dass ein Parameter mehrere physikalische Eigenschaften beinhaltet, wie beispielsweise zusammengesetzte Steifigkeiten und Dämpfungen. Deren Bestimmung erfordert eine sehr gute Systemkenntnis oder eine Identifikation anhand von Messdaten. Demonstrator für die Echtzeitsimulationsumgebung war das Modell einer Vorschubachse einer Index-Drehmaschine (Abbildung 11). Das Modell wurde vom ISW Stuttgart in der Echtzeitsimulationsplattform virtuos (Hersteller: Industrielle Steuerungstechnik GmbH) aufgebaut und mit einer Siemens-Steuerung über das reale Bussystem (Profibus) verbunden.

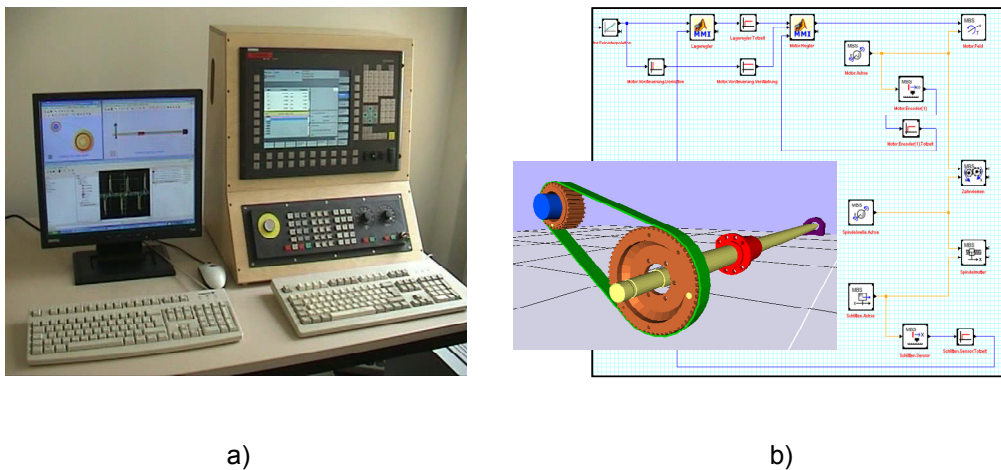


Abbildung 11: a) Hardware-in-the-Loop-Umgebung mit Simulations-PC und Siemens-Steuerung; b) Schema des Vorschubachsmodells in virtuos

Ziel der Parameteridentifikation war der Abgleich des Simulationsmodells mit Messdaten. Die Architektur von virtuos ermöglicht eine batchfähige Ankopplung an beliebige Optimierungswerkzeuge unter Windows ohne Echtzeitanforderungen. Dadurch konnte die eigentliche Parametervariation mit OptiSlang durchgeführt werden. Das Optimierungsziel der Parameteridentifikation war die Minimierung der Abweichungen zwischen Messung und Simulationsergebnis. Als Parameter standen alle Reibungs-, Dämpfungs- und Steifigkeitswerte des Modells zur Verfügung. Die hardwareseitige Reglereinstellung erfolgte nach Daten des WZM-Herstellers und wurde nicht verändert. Für die Zielfunktion wurde ein Gütefunktional aus Schleppfehler- und Strom-Zeitintegral gebildet. Besonderes Augenmerk verdient hier der Exponent der Euclid'schen Norm, r (Abbildung 12).

$$\begin{array}{l}
\text{Messung: } F_s = \frac{1}{S_{\text{Mess}}} \int_0^{\text{tend}} |s^{\text{Mess}}(t)| dt \qquad F_i = \frac{1}{i_{\text{Mess}}} \int_0^{\text{tend}} |i^{\text{Mess}}(t)| dt \\
\text{Modell: } f_s(p) = \frac{1}{S_{\text{Mess}}} \int_0^{\text{tend}} |s^{\text{Mod}}(t, p)| dt \qquad f_i(p) = \frac{1}{i_{\text{Mess}}} \int_0^{\text{tend}} |i^{\text{Mod}}(t, p)| dt \\
\Downarrow \qquad \qquad \qquad \Downarrow \\
\boxed{G(f_s(p), f_i(p)) = \sqrt[2]{(F_s - f_s(p))^r + (F_i - f_i(p))^r}}
\end{array}$$

Abbildung 12: Gütefunktional G aus Schleppfehler- und Strom-Zeitintegral

Die Ausgangsbasis für die Parameteridentifikation war ein vollständig nach Herstellerangaben parametrisiertes Modell, das signifikante Unterschiede zwischen Messdaten und Simulationsmodell beim Lage- und Momentenistwert zeigte. Eine interessante Feststellung war zudem, dass in der Maschine keine Vorsteuerung aktiviert war, das Simulationsmodell allerdings nur mit aktivierter Vorsteuerung keinen Schleppfehler aufwies (Abbildung 13).

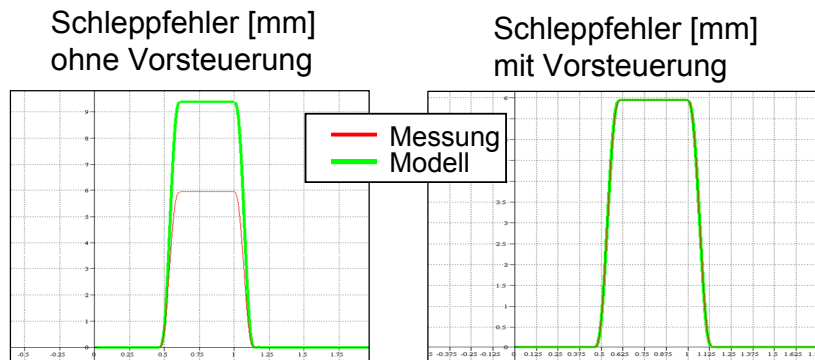
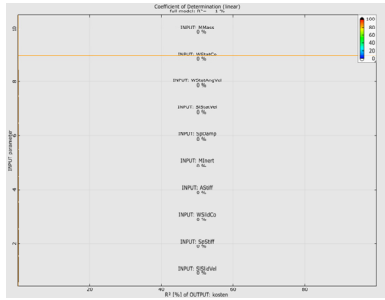


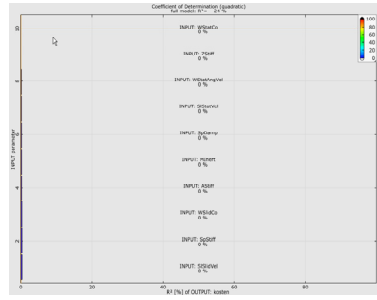
Abbildung 13: Schleppfehler mit/ohne Vorsteuerung im Simulationsmodell

Die durchgeführte Sensitivitätsstudie zeigt für einen Exponenten von $r=2$ im Gütefunktional zunächst keinerlei Korrelation. Erst für einen Exponenten von $r=8$ konnten verwertbare Aussagen aus Korrelationsmatrix und Bestimmtheitsmaß gezogen werden (Abbildung 14). Dies lässt sich damit begründen, dass die signifikanten Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsdaten nur in sehr kleinen Zeitbereichen auftreten und erst durch „Bestrafung“ mit einem hohen Euc- lid’schen Exponenten zum tragen kommen.

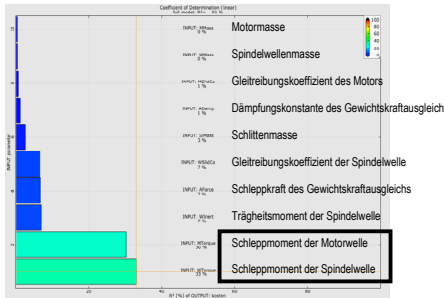
Lineares Bestimmtheitsmaß @r=2



Quadrat. Bestimmtheitsmaß @r=2



Lineares Bestimmtheitsmaß @r=8



Quadrat. Bestimmtheitsmaß @r=8

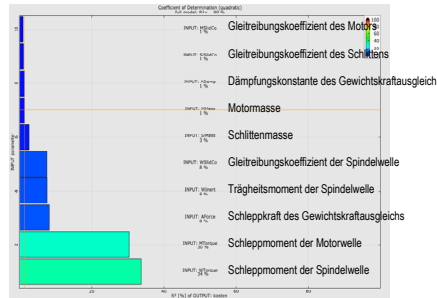


Abbildung 14: Bestimmtheitsmaße bei unterschiedlichem Exponenten r im Gütefunktional.

Durch diese Sensitivitätsstudie konnten die wesentlichen Parameter für eine Modellanpassung bestimmt werden. Dadurch konnte die Anpassung des Schleppfehlers gezielt verbessert werden, ohne die Stromverläufe zu verfälschen (Abbildung 15).

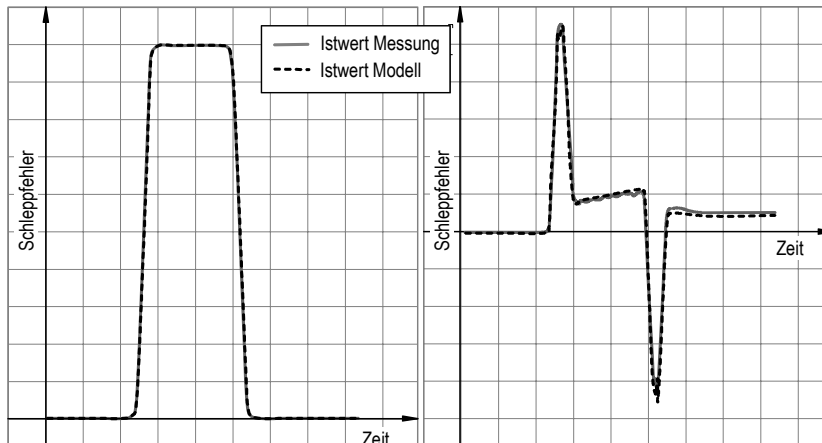


Abbildung 15: Abgleich des virtuos Echtzeitmodells mit OptiSlang

In einem weiteren Schritt wurden die identifizierten Parameter der Regelstrecke eingefroren und eine Sensitivitätsstudie der Reglerparameter durchgeführt. Dabei zeigte sich der K_v als dominanter Parameter, was bei der Gewichtung des Schleppfehlers im Gütefunktional zu erwarten war. Eine Optimierung von K_v ergab eine Verbesserung des Schleppfehlers des Antriebs um 60% in der Simula-

tion. Eine Verifikation an dem realen Antrieb konnte bislang leider noch nicht durchgeführt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten von OptiSLang für die Parameteridentifikation konnten an diesem Beispiel demonstriert werden. Eine wesentliche Erkenntnis dabei ist, die Sicherung der Sensitivität des Zielfunktional gegenüber den signifikanten Effekten der Identifikationsaufgabenstellung.

7 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt SimCAT wurden die Möglichkeiten des Einsatzes von Methoden der Sensitivitätsanalyse und Parameteroptimierung auf das Feld der Werkzeugmaschinenentwicklung ausgelotet. Hierbei zeigt sich ein großes Potential, dass durch kontinuierlichen Einsatz dieser Methoden in der Produktentwicklung bestätigt werden muss. Besonderen Nutzen zeigte die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit den von OptiSLang bereitgestellten Methoden. Diese führen zu einem vertieften Verständnis der Produkte und führen zur Identifikation der für eine Problemstellung wesentlichen Parameter. Hierdurch erhält der Entwicklungsingenieur schon früh im Produktentwicklungsprozess die Möglichkeit, durch ressourceneffizienten Einsatz das Verhalten des Produkts Werkzeugmaschine nachhaltig zu beeinflussen und damit die Produktqualität deutlich zu steigern.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundforschungsprojekts „SimCAT – Integration von CA-Techniken zur ganzheitlichen Simulation und Optimierung von Fertigungseinrichtungen vom CAD bis hin zur Hardware-in-the-Loop-Simulation“ durchgeführt. Dieses Verbundforschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut.

Literatur

- [1] <http://www.simcat.org>
- [2] BROOS, A.; WILL, J.; FISCHER, R., MANTZIARAS, D: Einsatz von Methoden der Parameteroptimierung in der Produktentwicklung von Werkzeugmaschinen. *Tagungsband zum Abschlusskolloquium des Verbundforschungsprojekts SimCAT*, 14.11.2006. Karlsruhe: wbk Institut für Produktionstechnik, 2006.
- [3] FLEISCHER, J.; BROOS, A.: Parameteroptimierung bei Werkzeugmaschinen – Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale. *Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 1.0*, 01./02.12.2004. Tagungsband. Weimar: dynardo GmbH, 2004.

- [4] BROOS, A.; MANTZIARAS, D.; KELLER, K.: Einsatz von OptiSLang in der Prozessstabilitätsuntersuchung und -optimierung von Werkzeugmaschinen. *Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 2.0*, 01./02.12.2005. Weimar: dynardo GmbH, 2005.
- [5] KELLER, K.; MANTZIARAS, D.: Prozessdynamik - Simulation & Wirklichkeit, ein aktueller Stand. *Tagungsband zum Abschlusskolloquium des Verbundforschungsprojekts SimCAT*, 14.11.2006. Karlsruhe: wbk Institut für Produktionstechnik, 2006.
- [6] KEHL, G.: Einsatz der Simulationsmethoden bei HELLER. *Tagungsband zum Abschlusskolloquium des Verbundforschungsprojekts SimCAT*, 14.11.2006. Karlsruhe: wbk Institut für Produktionstechnik, 2006.
- [7] MELCHINGER, A.: Anwenderbericht INDEX-Werke GmbH & Co. KG. *Tagungsband zum Abschlusskolloquium des Verbundforschungsprojekts SimCAT*, 14.11.2006. Karlsruhe: wbk Institut für Produktionstechnik, 2006.
- [8] PRITSCHOW, G.; RÖCK, S.: "Hardware in the Loop" Simulation of Machine Tools. *Annals of the CIRP 53* (2004) 1, S. 295-298.
- [9] RÖCK, S.; HAMM, C.: Echtzeitfähige Achsdynamik-Modelle für die Hardware-in-the-Loop-Simulation mit realen Steuerungssystemen. *Tagungsband zum Abschlusskolloquium des Verbundforschungsprojekts SimCAT*, 14.11.2006. Karlsruhe: wbk Institut für Produktionstechnik, 2006.
- [10] optiSLang - the Optimizing Structural Language Version 2.1, DYNARDO, Weimar, 2006, www.dynardo.de