

Bestimmung der Materialparameter des Spindel-Schleifscheiben-Systems mittels numerischer Parameteridentifikation

D. Biermann*, H. Blum†, A. Rademacher†, M. Schäckelhoff†, A.V. Scheidler*, K. Weinert*

Oktober 2008

Zusammenfassung

Um die Wechselwirkungen zwischen Struktur und Prozess während des NC-Formschleifprozesses adäquat simulieren zu können, ist eine detaillierte Auflösung der Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück in der Simulation der Maschine wichtig. Zur Simulation der Maschine wird die Finite Elemente Methode eingesetzt, mit der die benötigte Auflösung der Kontaktzone erreicht wird. Allerdings kann nicht die gesamte Maschine mit vertretbarem Aufwand in der Finiten Elemente Methode abgebildet werden. Deshalb werden nur die wichtigsten Teile der Maschine, die Schleifscheibe und die Spindel, explizit berücksichtigt. Für die weiteren Komponenten wird eine Ersatzmodellierung gewählt, deren freie Parameter nur mittels numerischer Parameteridentifikation identifiziert werden können. Der Artikel beschreibt die zugrunde liegende Finite Elemente Modellierung der Maschine und die zu ihrer Parametrisierung vorgenommenen Versuche. Anschließend werden die relevanten Parameter für die Minimierung des Abstandes zwischen Versuch und Simulation bestimmt und eine geeignete Norm zur Beschreibung des Abstandes angegeben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgt dann die Bestimmung der Parameter mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen. Die Diskussion der Auswirkungen der Ergebnisse der Parameteridentifikation auf die Resultate der Simulation des Schleifprozesses bildet den Abschluss dieses Artikels.

1 Einleitung

Der NC-Formschleifprozess mit torusförmigen Schleifscheiben wird für die Bearbeitung von Freiformflächen verwendet. Aufgrund der komplexen Eingriffsbedingungen ist eine genaue Vorhersage des Schleifprozesses mittels simulativer Techniken für die Erstellung von geeigneten NC-Daten unerlässlich. In der Simulation müssen die Wechselwirkungen zwischen Struktur und Prozess adäquat abgebildet werden, um eine hinreichend genaue Vorhersage zu erhalten. In der ganzheitlichen Simulation des NC-Formschleifprozesses werden verschiedene Simulationen miteinander gekoppelt. Auf der einen Seite steht die Modellierung des Prozesses und auf der anderen die Modellierung der Schleifmaschine. In der Modellierung des Prozesses ist eine möglichst genaue Vorhersage der im Prozess auftretenden Kräfte wichtig, die die entscheidende Eingangsgröße für das Maschinenmodell sind. Durch die Auffederung der Maschine ändert sich wiederum die Kontaktsituation im Prozessmodell. Eine detaillierte Beschreibung des Schleifprozesses und der Simulation ist in [1] zu finden.

Insbesondere bei der Simulation von torusförmigen Schleifscheiben in Verbindung mit Freiformflächen variiert die Kraftverteilung innerhalb der Kontaktzone und auch die Kontaktzone selbst in Ort und Zeit. Deshalb ist eine genaue Auflösung der möglichen Kontaktzone auch in der Simulation der Maschine wichtig. Um dies zu gewährleisten, wird die Finite Elemente Methode (FEM)

*Institut für spanende Fertigung, Technische Universität Dortmund, Baroper Str. 301, 44227 Dortmund

†Lehrstuhl für wissenschaftliches Rechnen, Technische Universität Dortmund, Vogelpothsweg 87, 44227 Dortmund

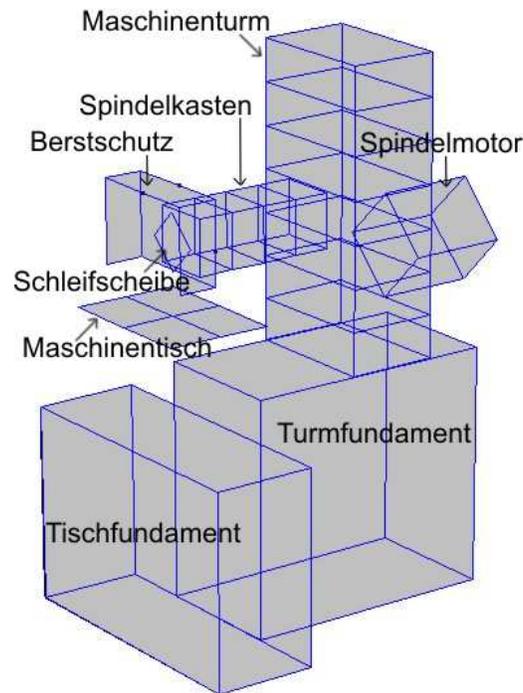


Abbildung 1: Ersatzsystem der Maschine

für die Abbildung der Schleifscheibe verwendet. Auf der anderen Seite ist aber die Modellierung der gesamten Maschine mit der FEM extrem aufwändig. Aus diesem Grund werden nur die Spindel und die Schleifscheibe mittels der FEM explizit abgebildet. Die anderen Teile der Maschine werden mit Hilfe von elastischen Lagern modelliert. Nun müssen die verschiedenen Parameter der Lager, die Elastizitätskonstanten, die Dichten und die Dämpfungskonstanten, bestimmt werden. Da es sich hier um eine Ersatzmodellierung handelt, können die Konstanten nicht direkt gemessen werden. Um die Parameter dennoch zu bestimmen wird die Technik der Parameteridentifikation verwendet. Dabei werden repräsentative Experimente an der realen Maschine durchgeführt, die anschließend numerisch nachgebildet werden. Die Ergebnisse der Simulation und der Experimente werden dann verglichen. Ziel ist es, die Parameter so zu wählen, dass der Abstand zwischen den Ergebnissen in einer vorgegebenen Norm minimal wird.

Im Rahmen dieses Artikels werden die einzelnen Arbeitsschritte vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Begonnen wird im nächsten Abschnitt mit der Darstellung der Experimente und der Diskussion ihrer Resultate. Dann wird die Modellierung des Spindel-Schleifscheiben-Systems vorgestellt. In Abschnitt 4 wird untersucht, welche Parameter relevant für die Minimierung des Abstandes sind und welche vernachlässigt werden können. Die Wahl einer für das Problem geeigneten Norm bildet den Schwerpunkt von Abschnitt 5. Im Anschluss werden die eingesetzten Optimierungsalgorithmen kurz eingeführt und die Ergebnisse der Optimierung präsentiert. Den Abschluss bildet eine Diskussion der Ergebnisse.

2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Darstellung des dynamischen Prozessverhaltens in der Simulation ist ein Abgleich der Simulation mit dem realen dynamischen Verhalten der Maschinenstruktur erforderlich. Die wirkenden Kräfte im Prozess werden beeinflusst durch die begrenzte Steifigkeit des Maschinensystems. Dieses kann durch den statischen Versatz der Schleifscheibe und die Schwingungen im System beschrieben

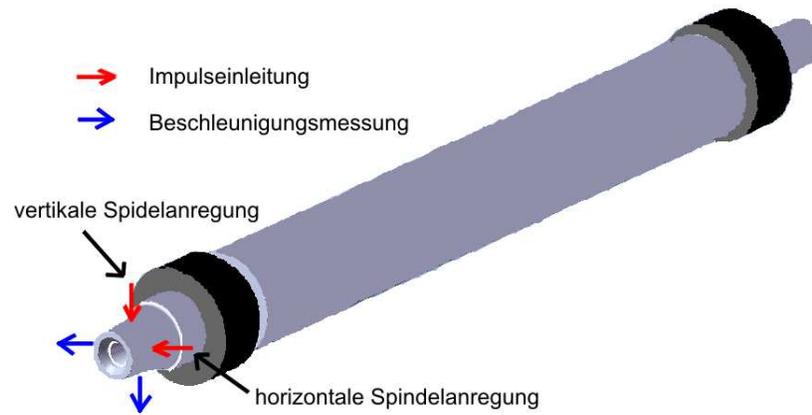


Abbildung 2: Anregung des Maschinensystems mit einem Impulshammer

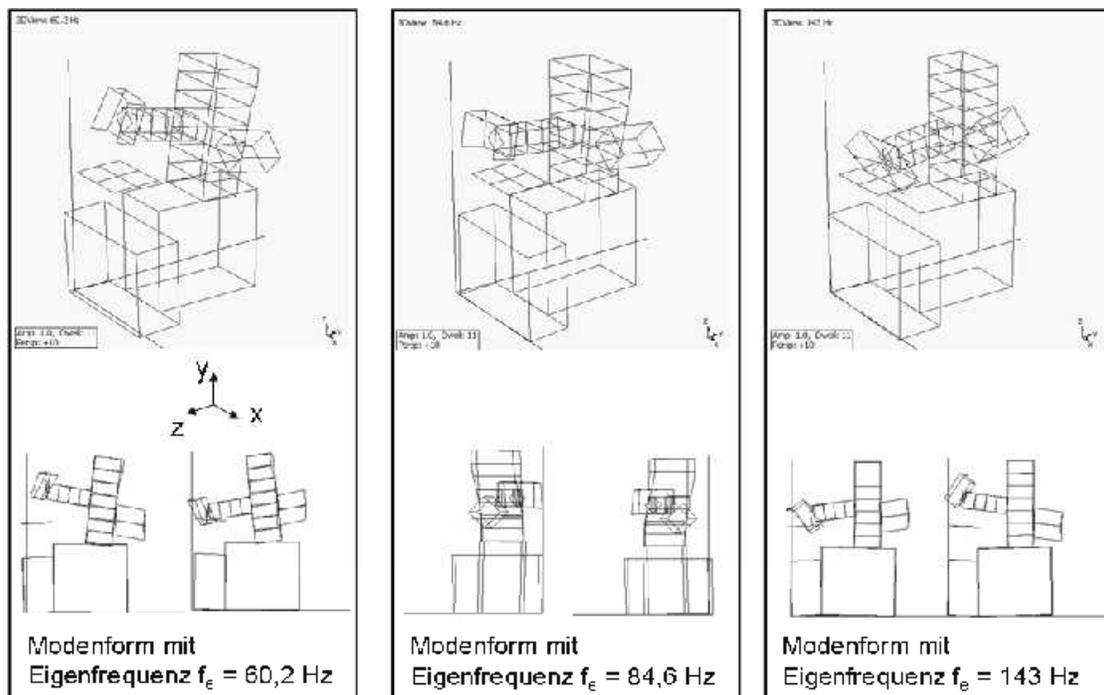


Abbildung 3: Eigenformen des Maschinensystem

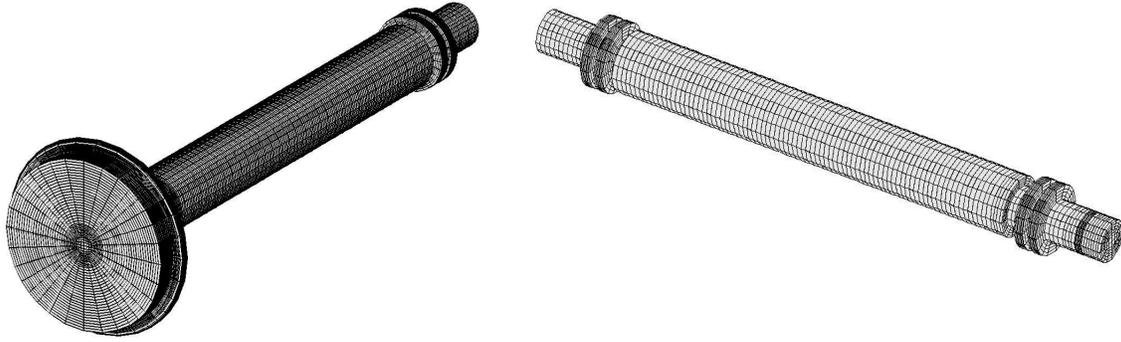
werden. Zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens werden die modalen Parameter der Schleifmaschine bestimmt. Dafür muss die Maschine in ein vereinfachtes Ersatzsystem überführt werden. Dieses stellt die wesentlichen Komponenten des dynamischen Verhaltens der Maschine dar. Das Ersatzsystem besteht aus 106 Knoten und ist in Abbildung 1 dargestellt. Das dynamische Verhalten der Maschine wurde durch zwei Analyseverfahren bestimmt. Es wurde eine Schwingungsanalyse der Schleifspindel durchgeführt, weil diese sich im Maschinensystem gegenüber anderen Komponenten nachgiebiger verhält. Beim ersten Verfahren wurde die Spindel ohne Schleifscheibe mit einem Hammer mit Gummikalotte horizontal und vertikal an der Spindel angeregt. Der Kraftaufnehmer, der das dynamische Verhalten der Maschine bestimmt, ist 180° von der Einleitung entfernt, siehe Abbildung 2. Das Messsignal wird durch einen FFT-Analysator weiterverarbeitet, um die dynamische Nachgiebigkeit des Systems zu berechnen. Die relevanten Frequenzen, die ermittelt werden, sind die Übergangsfunktionen zwischen zwei Freiheitsgraden der Struktur. In vertikaler Richtung lässt sich die Maschinenstruktur bei 57.5 Hz, 158 Hz und 530 Hz und in horizontaler Richtung bei 83 Hz anregen. Da sich auf dem Werkstückprofil nur Wellen mit einer Frequenz von 59 Hz ausbilden, ist für eine weitergehende Interpretation eine Modalanalyse der Maschine durchgeführt worden. Dabei wurde die Maschine am Berstschutz in drei Richtungen mit einem Shaker angeregt. Die Strukturantwort ist mit einem drei Komponentenkraftsensor an den verschiedenen Strukturknotenpunkten aufgenommen worden. Das Messsignal ist mit einem FFT-Analysator analysiert worden. Aus den Übertragungsfunktionen können die Eigenfrequenzen, die jeweilige Dämpfung und die Eigenschwingungsformen mit einer Modalsoftware ermittelt werden. Dabei sind mehrere Eigenmoden der Maschine bestimmt worden. Bei Eigenmoden mit einer Frequenz unter 50 Hz findet keine nennenswerte Relativverlagerung zwischen Werkstück und Spindel statt und damit haben diese auch keinen Einfluss auf das System. Bei 60.2 Hz zeigt sich eine starke Neigungsschwingungen des Spindelturms. Der Spindelturm und der Werkstücktisch bewegen sich in diesem Eigenmode entgegengesetzt. Bei 84.4 Hz schwingen Tisch und Spindelkasten parallel zueinander. Bei 143 Hz schwingt das gesamte System in Richtung der Werkstückverfahrtrichtung. Relevant für die Oberflächenstruktur des Bauteils ist alleine der Eigenmode von 60.2 Hz, dieser findet sich als Welligkeit auf der Werkstückoberfläche wieder. Die beiden anderen Eigenmoden sind für die Oberflächenbeschaffenheit nicht relevant, da bei 84.4 Hz das System in Vorschubrichtung schwingt und eher dafür sorgt das die Oberfläche glatter wird und bei 143 Hz sich die Schwingungen zwischen Werkstück und Spindel aufheben. Die verschiedenen Moden sind in Abbildung 3 gezeigt. Eine detaillierte Darstellung findet sich in [2].

3 Finite Elemente Diskretisierung des Spindel-Schleifscheiben-Systems

In der Simulation der Maschine erfolgt eine genaue Diskretisierung der wichtigsten Maschinenteile. In dem hier betrachteten Fall handelt es sich dabei um die Schleifscheibe und die Spindel. In diesen beiden Komponenten entsteht ein großer Teil der Gesamtverformung der Maschine während des Schleifprozesses. Aber auch die Anteile der übrigen Maschinenteile müssen berücksichtigt werden. Dazu werden elastische Lager in das Modell integriert, deren Steifigkeit und Dichte frei wählbar sind. In Abbildung 4(a) ist das FE-Netz des Spindel-Schleifscheibenscheiben-Systems dargestellt. Da die Schleifscheibe vollständig in der FE-Simulation abgebildet wird, sind ihre dynamischen Eigenschaften in der Simulation erfasst. Zudem soll die Simulation für unterschiedliche Schleifscheiben genutzt werden. Deshalb wird hier nur die Spindel, die in Abbildung 4(b) gezeigt wird, und ihr dynamisches Verhalten betrachtet.

3.1 Kontinuierliche Formulierung

Das Gebiet, das durch die Spindel eingenommen wird, sei Ω und $I = [0, T]$ ein Zeitintervall. Die Länge der Spindel beträgt 658 mm und der maximale Durchmesser 75 mm. Homogene Dirichlet-Randwerte werden auf dem Teil des Randes $\Gamma_D \subset \partial\Omega$, der der Oberfläche der Lager entspricht, vorgeschrieben. Die Einleitung der Kraft wird durch inhomogene Neumann-Randwerte q auf der



(a) Spindel und Schleifscheibe

(b) Spindel

Abbildung 4: FE-Netz des Spindel-Schleifscheiben-Systems

Fläche $\Gamma_N \subset \partial\Omega$ beschrieben. Das Materialverhalten der Spindel und der Lager wird als linear elastisch angenommen, wobei der Zusammenhang zwischen den Spannungen σ und den Verzerrungen ε von dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν bestimmt wird. Es wird hier mit dem linearen Verzerrungsoperator $2\varepsilon(u) = \nabla u + \nabla u^T$ gearbeitet, wobei u die Verschiebung der Spindel bezeichnet. Die Geschwindigkeit ist durch $\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$ und die Beschleunigung durch $\ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ gegeben. Weiter sei ρ die Dichte des Materials. Für die Spindel, bestehend aus 42Cr-Mo4 Stahl, sind die folgenden Werte der Materialparameter aus der Literatur entnommen worden: $E_{Sp} = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, $\nu_{Sp} = 0.29$ und $\rho_{Sp} = 7.85$ kg/dm³. Jedes der vier Lager wird, wie in Abbildung 5 illustriert, in vier verschiedene Bereiche unterteilt, für die jeweils andere Dichten und Elastizitätsmodule angenommen werden. Die Lager werden von 1 bis 4 durchnummeriert, wobei das Lager mit der Nummer 1 das der Schleifscheibe am nächsten gelegene Lager ist. Die Bezeichnung h_1 kennzeichnet die Werte an der rechten Seite der Lager, h_2 die an der linken Seite, v_1 die am oberen Ende und v_2 die am unteren Ende. Damit ergeben sich die folgenden Konstanten zur Beschreibung des Materials der Lager: $Eh_{1,i}$, $Eh_{2,i}$, $Ev_{1,i}$, $Ev_{2,i}$, $\rho h_{1,i}$, $\rho h_{2,i}$, $\rho v_{1,i}$ und $\rho v_{2,i}$ für $i = 1, \dots, 4$. Weiterhin wird eine massen- sowie eine steifigkeitsproportionale Dämpfung mit den Konstanten $Dg = \text{diag}(xDg, yDg, zDg)$ und StD angenommen. Die Startwerte $u_0 \in [H^1(\Omega, \Gamma_D)]^3 := \{v \in [H^1(\Omega)]^3 \mid \gamma|_{\Gamma_D}(v) = 0\}$ und $v_0 \in [L^2(\Omega)]^3$ sind 0. Als Ansatzraum wird die Menge

$$V := W^{2,\infty}(I; [L^2(\Omega)]^3) \cap L^\infty(I; [H^1(\Omega, \Gamma_D)]^3)$$

zur Vereinfachung der Notation gewählt, obwohl die Existenz einer Lösung in V nicht bewiesen werden kann [3]. Das L^2 -Skalarprodukt ist definiert durch $(u, v) = \int_\Omega uv \, dx$ für $u, v \in [L^2(\Omega)]^3$. Insgesamt entsteht das Problem

Problem 3.1 *Finde eine Funktion $u \in V$ mit $u(t=0) = u_0$ and $\dot{u}(t=0) = v_0$, für die*

$$\forall \varphi \in [H^1(\Omega, \Gamma_D)]^3 : \quad (\rho \ddot{u} + \rho Dg \dot{u}, \varphi) + (\sigma(u + StD\dot{u}), \varepsilon(\varphi)) = (q, \varphi)_{\Gamma_N}$$

für alle $t \in I$ gilt.

Wenn die Lösung u hinreichend glatt ist, erhält man die äquivalente starke Formulierung

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u} + \rho Dg \dot{u} - \text{div}(\sigma(u + StD\dot{u})) &= 0 && \text{in } \Omega \times I \\ u &= 0 && \text{auf } \Gamma_D \times I \\ \sigma_{nn} &= q && \text{auf } \Gamma_N \times I, \end{aligned}$$

wobei σ_{nn} die Spannung in Normalenrichtung bezeichnet.

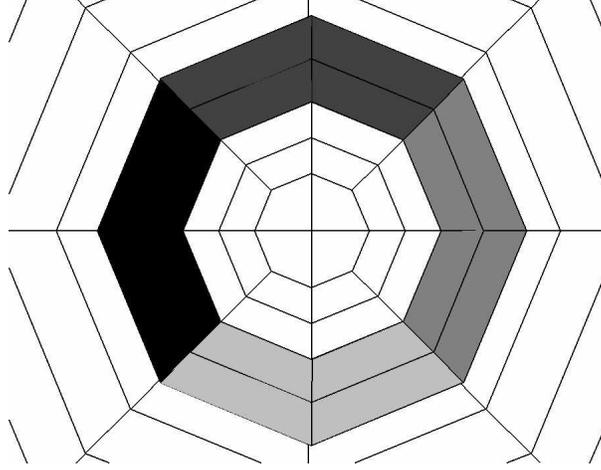


Abbildung 5: Verteilung der unterschiedlichen Materialparameter in den Lagern

3.2 Diskretisierung

Die Rothe-Methode wird zur Diskretisierung des dynamischen Problems benutzt. Dabei wird zuerst in der Zeit mit der Newmark Methode (siehe [4]) diskretisiert. Die resultierenden örtlichen Probleme werden dann näherungsweise mit trilinearen Finiten Elementen gelöst.

3.2.1 Diskretisierung in der Zeit

Das Zeitintervall I wird in N äquidistante Teilintervalle $I_n := (t_{n-1}, t_n]$ der Länge $k = t_n - t_{n-1}$ mit $0 =: t_0 < t_1 < \dots < t_{N-1} < t_N := T$ zerlegt. Der Wert einer Funktion w zu einem Zeitpunkt t_n wird durch w^n approximiert. Die Notation $v = \dot{u}$ und $a = \ddot{u}$ wird für die Geschwindigkeit bzw. die Beschleunigung benutzt. Im Newmark Verfahren werden v und a mit

$$a^n = \frac{1}{\beta k^2} (u^n - u^{n-1}) - \frac{1}{\beta k} v^{n-1} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) a^{n-1}, \quad (1)$$

$$v^n = v^{n-1} + k [(1 - \alpha) a^{n-1} + \alpha a^n]. \quad (2)$$

approximiert. Dabei sind α und β freie Parameter im Intervall $[0, 2]$. Damit das Verfahren von zweiter Ordnung konvergiert, muss $\alpha = \frac{1}{2}$ gewählt werden. Weiterhin muss die Ungleichung $2\beta \geq \alpha \geq \frac{1}{2}$ gelten, um die unbedingte Stabilität des Verfahrens zu garantieren (siehe [5]). Das Newmark Verfahren erfordert auch Startwerte a_0 für die Beschleunigung. Diese können aus den Startwerten für die Verschiebung und die Geschwindigkeit berechnet werden (siehe [5]). Das semi-diskrete Problem lautet:

Problem 3.2 *Gesucht ist u mit $u^0 = u_0$, $v^0 = v_0$ und $a^0 = a_0$, so dass in jedem Zeitschritt $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, die Funktion $u^n \in [H^1(\Omega, \Gamma_D)]^3$ die Lösung der Gleichung*

$$(\rho a^n + \rho Dg v^n, \varphi) + (\sigma (u^n + StDv^n), \varepsilon(\varphi)) = (q(t_n), \varphi)_{\Gamma_N}, \quad (3)$$

für alle $\varphi \in [H^1(\Omega, \Gamma_D)]^3$ ist. Darüber hinaus müssen u^n , v^n und a^n die Gleichungen (1) und (2) erfüllen.

Setzt man die Gleichung (1) mit $\alpha = \beta = \frac{1}{2}$ in die Gleichung (3) ein, ergibt sich die Gleichung

$$c(u^n, \varphi) = (F_1^n, \varphi) + (\sigma(F_2^n), \varepsilon(\varphi)) + (q(t_n), \varphi)_{\Gamma_N}, \quad (4)$$

wobei c definiert ist durch

$$c(\omega, \varphi) := (\rho\omega, \varphi) + \frac{1}{2}k \{(\rho Dg\omega, \varphi) + (\sigma(StD\omega), \varepsilon(\varphi))\} + \frac{1}{2}k^2 (\sigma(\omega), \varepsilon(\varphi))$$

und F_1^n und F_2^n durch

$$\begin{aligned} F_1^n &:= \rho \left(I + \frac{1}{2}kDg \right) u^{n-1} + k \rho v^{n-1} - \frac{1}{4}k^3 \rho Dg a^{n-1} \\ F_2^n &:= \frac{1}{2}k StD \left(u^{n-1} - \frac{1}{2}k^2 a^{n-1} \right). \end{aligned}$$

Die Bilinearform c ist gleichmäßig elliptisch, stetig und symmetrisch. Folglich muss in jedem Zeitschritt eine elliptische Gleichung gelöst werden.

3.2.2 Diskretisierung im Ort

Mittels eines Finite Elemente Ansatzes wird das Problem 3.2 im Ort diskretisiert. Es werden trilineare Basisfunktionen auf dem Netz \mathbb{T} benutzt um den diskreten Ansatzraum V_h zu konstruieren. Die Startwerte werden mittels einer L^2 -Projektion I_h auf V_h abgebildet. Das orts- und zeit-diskrete Problem lautet

Problem 3.3 *Finde $u_h^n \in V_h$ mit $u_h^0 = I_h u_0$, $v_h^0 = I_h v_0$ und $a_h^0 = I_h a_0$, so dass die Gleichung*

$$\forall \varphi_h \in V_h^n : \quad c(u_h^n, \varphi_h) = (F_{1,h}^n, \varphi_h) + (\sigma(F_{2,h}^n), \varepsilon(\varphi_h)) + (q(t_n), \varphi_h)_{\Gamma_N} \quad (5)$$

für alle $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ gilt. Die Gleichungen (1) und (2) bestimmen v_h^n und a_h^n .

Dabei sind $F_{1,h}^n$ und $F_{2,h}^n$ durch

$$\begin{aligned} F_{1,h}^n &:= \rho \left(I + \frac{1}{2}kDg \right) u_h^{n-1} + k \rho v_h^{n-1} - \frac{1}{4}k^3 \rho Dg a_h^{n-1} \\ F_{2,h}^n &:= \frac{1}{2}k StD \left(u_h^{n-1} - \frac{1}{2}k^2 a_h^{n-1} \right). \end{aligned}$$

gegeben. Die Gleichung (5) führt auf das folgende lineare Gleichungssystem in \mathbb{R}^m :

$$A\bar{u}^n = \bar{F}_1^n + \bar{F}_2^n + \bar{q}^n.$$

Dabei bezeichnet $A := M + \frac{1}{2}kC + \frac{1}{2}k^2K$ die verallgemeinerte Steifigkeitsmatrix, $M \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ist die Massematrix, $C \in \mathbb{R}^{m \times m}$ die Dämpfungsmatrix und $K \in \mathbb{R}^{m \times m}$ die Steifigkeitsmatrix.

3.2.3 Realisierung der Experimente in der Simulation

In der Simulation sind die beiden in Abschnitt 2 dargestellten Experimente bzgl. der Spindelanregung abzubilden. Die Kraft wird dabei als Neumann Randbedingung auf dem Teil des Randes aufgebracht, der mit der Erregerfläche im Experiment übereinstimmt. Die Auswertung der Beschleunigung erfolgt an den Stellen, an denen die Sensoren im Experiment befestigt waren. Um die Genauigkeit der Auswertung zu erhöhen, wird der integrale Mittelwert der Beschleunigung über die Fläche des Sensors berechnet.

In der Optimierung müssen immer die Ergebnisse der Simulation zu beiden Experimenten berechnet werden, um den Wert der Zielfunktion an einer Stelle zu bestimmen. Deshalb ist die Berechnung der Zielfunktion parallelisiert worden und es werden zur Auswertung immer nur die Daten neu erzeugt, die von den Parametern abhängen.

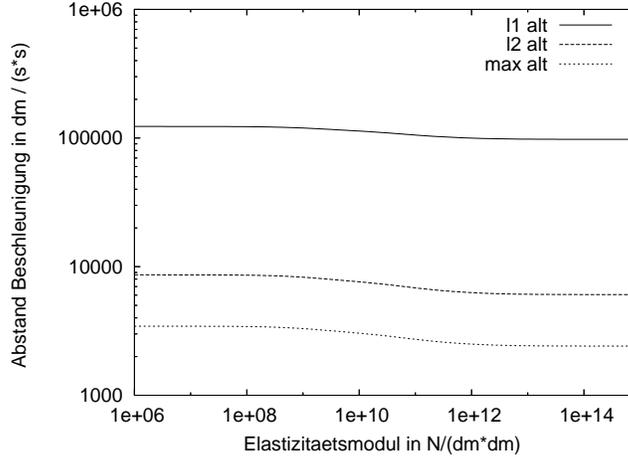


Abbildung 6: Simultane Variation des Elastizitätsmoduls an den ersten beiden Lagern in den Normen l_1 , l_2 und l_∞

4 Relevante Modellparameter

Für jeden der in Abschnitt 3 definierten Modellparameter wird zunächst ein für die spezifische Messgröße relativ kleiner, zu optimierender Wert angenommen. Anschließend wird der Wert jedes Parameters P schrittweise um das 1.25-fache erhöht und der Abstand der gemessenen und simulierten Beschleunigungen bezüglich dieses Parameters, der im Folgenden mit δ_P bezeichnet wird, solange bestimmt, bis ein Minimum erreicht und überschritten wird. Die restlichen 35 Parameter bleiben jeweils konstant.

Eine Komponente y_g des Vektors δ_P bezeichnet den Abstand der gemessenen zur simulierten Beschleunigung bei einem festen Wert g von P . Dieses y_g wiederum ist definiert als die Norm eines Vektors x , dessen Komponenten die Abstände der Beschleunigungen bei fester Parameterausprägung g und variabler Zeit $t \in t_0, \dots, t_N$ darstellen. Da die Beschleunigungen sowohl in vertikaler (v) als auch in horizontaler (h) Richtung betrachtet werden, wird hier zwischen x_{iv} und x_{ih} unterschieden.

Als Fehlermaße von x werden $l_1(x) := (l_{1v}(x))^2 + (l_{1h}(x))^2$, $l_2(x) := (l_{2v}(x))^2 + (l_{2h}(x))^2$ und $l_\infty(x) := l_{\infty,v}(x)^2 + l_{\infty,h}(x)^2$ gewählt. Dabei sind $l_{1v}(x) := \sum |x_{iv}|$, $l_{1h}(x) := \sum |x_{ih}|$, $l_{2v}(x) := \sum (x_{iv})^2$, $l_{2h}(x) := \sum (x_{ih})^2$, $l_{\infty,v}(x) := \max |x_{iv}|$ und $l_{\infty,h}(x) := \max |x_{ih}|$. Im Verlauf der Untersuchungen stellen sich diese Fehlermaße als etwas problematisch bezüglich der Fragestellung heraus. Daher werden sie in Abschnitt 5 problemspezifisch modifiziert.

Da es enormen Aufwand erfordert, bezüglich jedes einzelnen Parameters zu optimieren, wurde zunächst untersucht, inwieweit auf die Variation bestimmter Parameter, die kaum Einfluss auf die simulierte Beschleunigung haben, verzichtet werden kann. Zudem wurde überprüft, ob sich einige Parameter P_i zu Gruppen zusammenfassen lassen, für die einheitliche Werte für δ_{P_i} angenommen werden können.

4.1 Elastizitätsmodul

Die Initialisierungswerte der Materialkonstanten des Elastizitätsmoduls werden gewählt und anschließend wie oben beschrieben variiert. Die Plots zu $Eh_{i,j}$ und $Ev_{i,j}$, $i, j = 1, 2$ sind alle nahezu identisch und konstant, ebenso ist auch der Plot bei einer simultanen Variation dieser Parameter

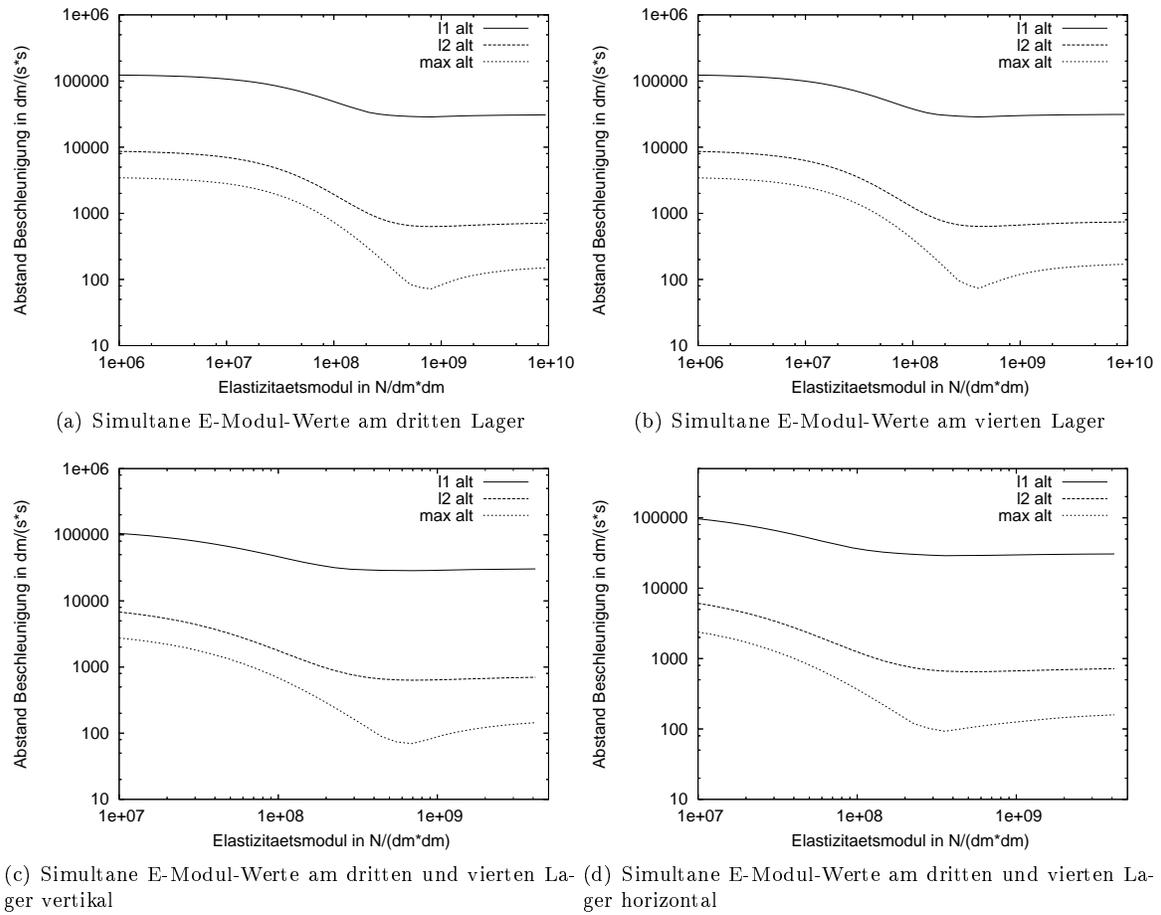


Abbildung 7: Variationen der Materialkonstanten des Elastizitätsmoduls geplottet gegen die Beschleunigungsdifferenz in den Fehlermaßen l_1 , l_2 und l_∞

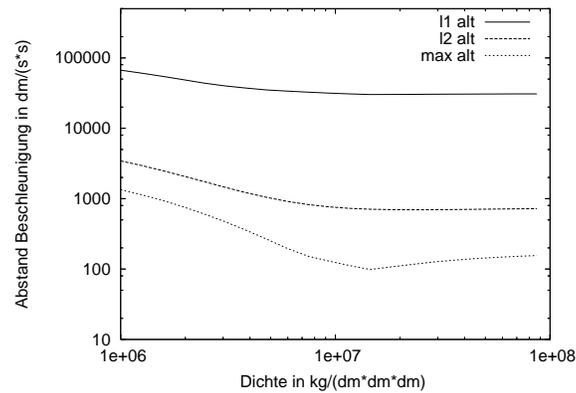
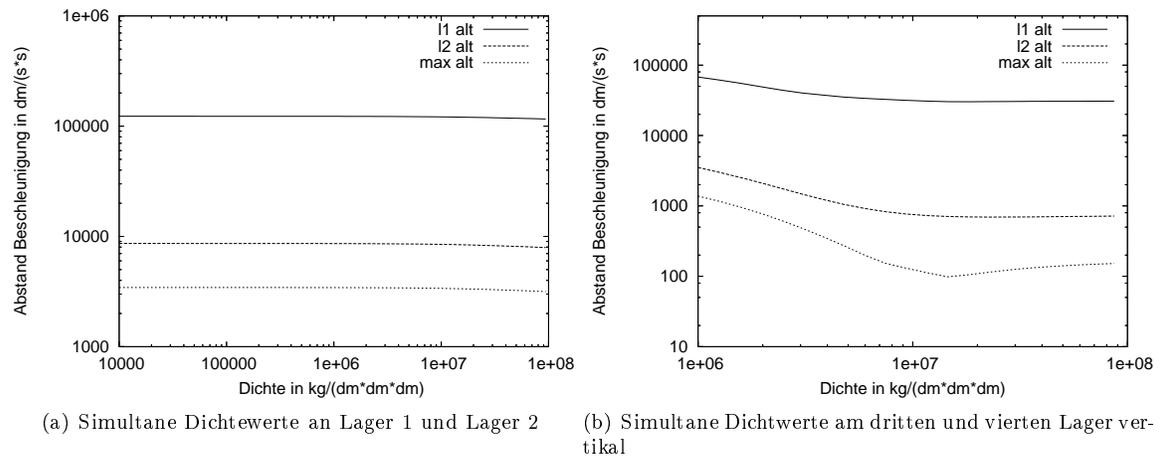


Abbildung 8: Variationen der Materialkonstanten der Dichten geplottet gegen die Beschleunigungs-differenz in den Normen l_1 , l_2 und l_∞

konstant (Abbildung 6). Auch ein Datenabgleich zeigt, dass variierende Werte des Elastizitätsmoduls in diesen Punkten $\delta_{Eh_{i,j}}$ bzw. $\delta_{Ev_{i,j}}$ nicht verändern. Daher wird für diese Parameter ein konstanter Wert von 10^6 angenommen.

Auch die Plots zu $Eh_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 3, 4$ sind nahezu identisch (Abbildung 7), weisen allerdings ein deutliches Minimum auf. Daher werden diese Parameter zur Parametergruppe *EMhL3L4* zusammengefasst und simultan minimiert. Analog dazu werden auch die Parameter $Ev_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 3, 4$ zur Gruppe *EMvL3L4* zusammengefasst. Diese beiden Gruppen werden allerdings getrennt betrachtet, weil sie ihr jeweiliges Minimum bei unterschiedlichen Parametergrößen annehmen. Die Grafiken (a) und (b) von Abbildung 7 zeigen die simultane Variation der E-Modulwerte am dritten bzw. vierten Lager ohne Unterscheidung zwischen horizontalen und vertikalen Werten. Diese wirken beinahe identisch. Gruppiert man aber um, d.h. betrachtet man die horizontalen Werte am 3. und 4. Lager als Einheit und ebenso die vertikalen Werte, so zeigt sich die bereits erwähnte „Verschiebung“ der Minima deutlich.

4.2 Dichte

Für die Variation der Dichtewerte in denselben Punkten ergeben sich Ergebnisse vollkommen analog zu denen des Elastizitätsmoduls (Abbildung 8): Unabhängig von den Dichtewerten, die in den ersten beiden Lagern, also den Parametern $\rho h_{i,j}$, $i, j = 1, 2$ und $\rho v_{i,j}$ bei der Simulation angenommen werden, bleiben $\delta_{\rho h_{i,j}}$ und $\delta_{\rho v_{i,j}}$ konstant. Eine Variation dieser Parameter ist also unnötig. Weiter werden die Parameter $\rho h_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 3, 4$ und $\rho v_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 3, 4$ zu den Gruppen *phL3L4* und *pvL3L4* zusammengefasst.

4.3 Dämpfung

Die drei Parameter xDg , yDg und zDg wirken sich jeweils unterschiedlich auf ihr spezifisches δ aus (Abbildung 9), so dass an dieser Stelle keine Zusammenfassung mehrerer Parameter möglich ist. Allerdings variiert zDg kaum, so dass diese Dämpfung in der nachfolgenden Untersuchung vernachlässigt werden kann. Auch in vertikaler Spindel-Querschnittsrichtung (xDg) ist ein Minimum kaum ersichtlich. Da die Graphen zu diesem Parameter aber zumindest zu Beginn der Simulation deutlich abfallen und ein Minimum im Datensatz zu erkennen ist, wird auch bezüglich dieses Parameters variiert. Der Plot zur Variation bezüglich der Steifigkeitsdämpfung zeigt ein Verhalten, dass bis auf eine Verschiebung entlang der x-Achse exakt dem Verhalten des Plots zu yDg entspricht (Abbildung 9, (b) und (c)), daher wird auch *StD* vernachlässigt.

5 Wahl eines Fehlermaßes

Nach obigen Untersuchungen werden also die Parametergruppen *EMhL3L4*, *EMvL3L4*, *phL3L4* und *pvL3L4* sowie die Parameter xDg und yDg weiter untersucht bzw. optimiert. Gesucht ist nun ein Fehlermaß N_δ , die die Problematik berücksichtigt, dass mit zunehmender Zeit eine wachsende Phasenverschiebung zwischen der gemessenen und der simulierten Beschleunigungskurve beobachtet wird (Abbildung 10). Durch diese Verschiebung, insbesondere durch die Tatsache, dass Extrema zeitlich versetzt auftreten, werden große Abstände dieser beiden Kurven erzeugt. Da es im Rahmen des hier verwendeten Modells nicht möglich ist, die sich ändernden zeitlichen Abstände zweier Extrema adäquat zu simulieren, wird ein zeitunabhängiges Fehlermaß gewählt, das die Phasenverschiebung nicht berücksichtigt. Stattdessen werden direkt die lokalen Maxima der Messreihe mit den lokalen Maxima der Finite Elemente Simulation verglichen. Gleiches gilt für die lokalen Minima beider Kurven. Es werden von allen simulierten Extrema nur die positiven Maxima und die negativen Minima berücksichtigt für den Vergleich mit den erhobenen Daten. Sowohl für die Simulation als auch für die gemessenen Daten werden ausschließlich Werte x mit $|x| \geq 0.01$ zum Vergleich herangezogen. Als neue Fehlermaße werden definiert: $N_\delta^1(x) := \sum |x_i|$, wobei x_i die Differenz zwischen einem gemessenen Extremum und einem simulierten Extremum gleicher Art (beides Maxima oder beides Minima) mit gleichem Vorzeichen, und $i \in 1, \dots, N$, $N := \text{Anzahl}$

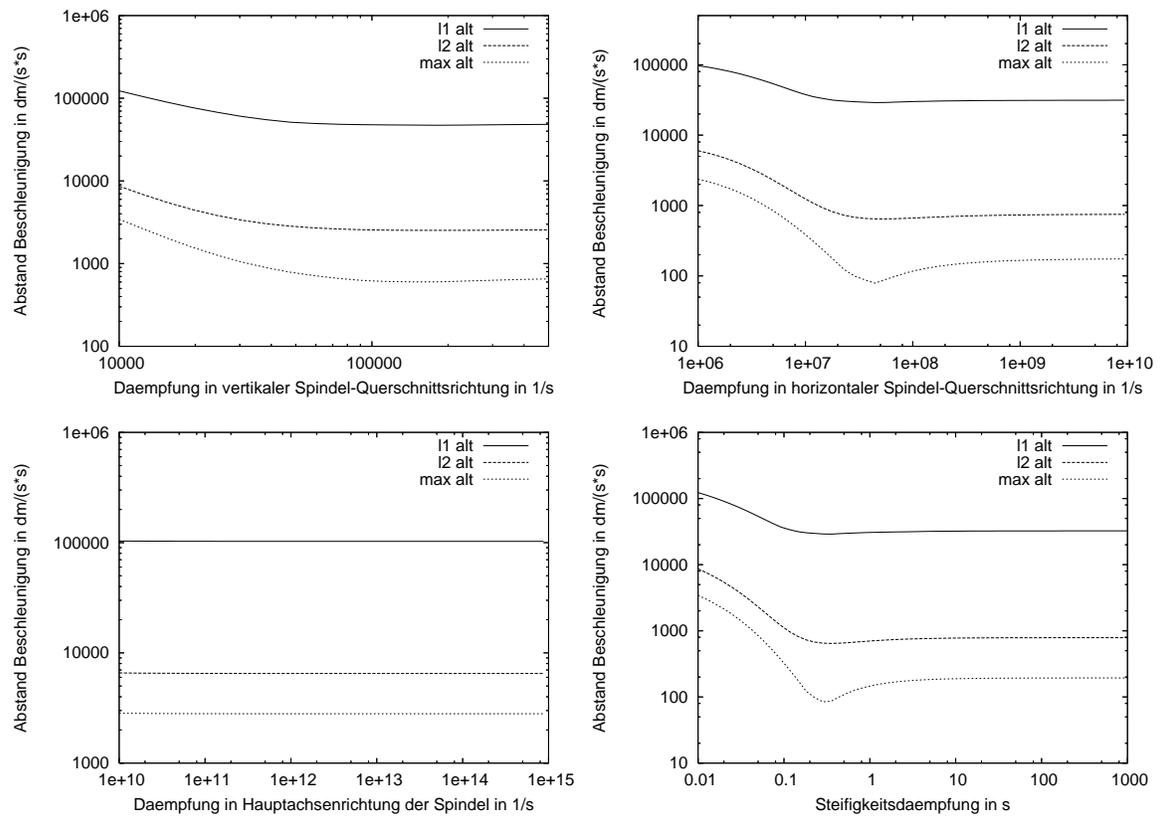


Abbildung 9: Variationen der Massendämpfungsconstanten und der Steifigkeitsdämpfung geplotet gegen die Beschleunigungsdifferenz in den Fehlermaßen l_1 , l_2 und l_∞

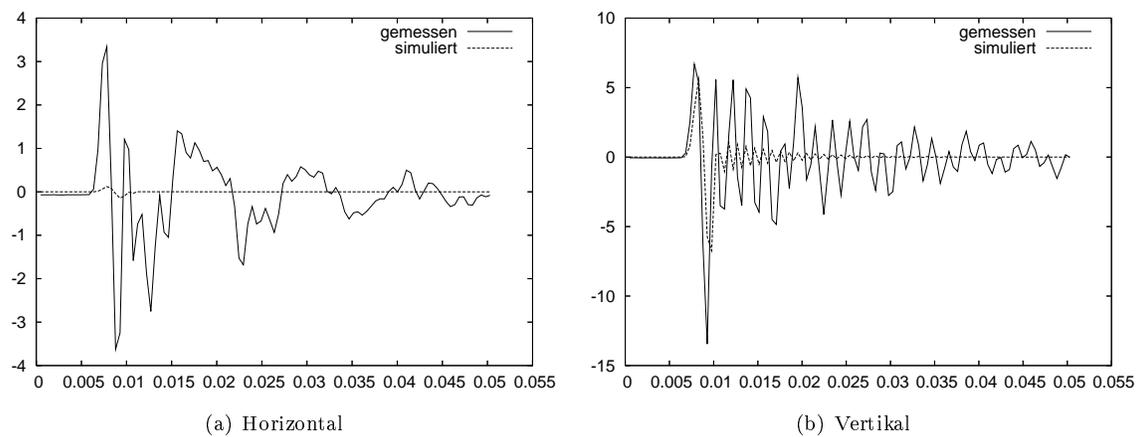
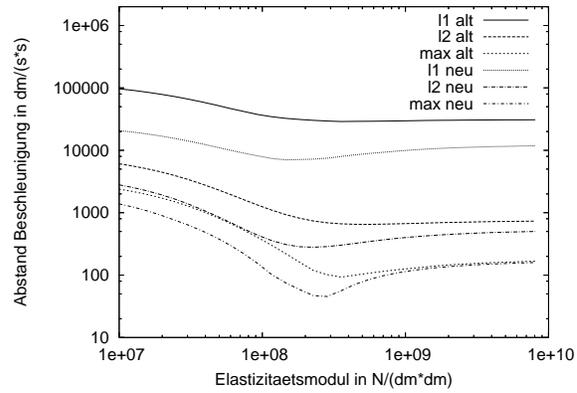
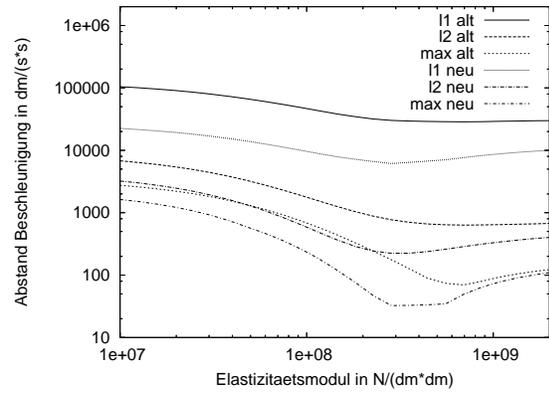


Abbildung 10: Phasenverschiebung der simulierten Beschleunigung bezüglich der gemessenen mit minimaler horizontaler Massendämpfung in der Zeit

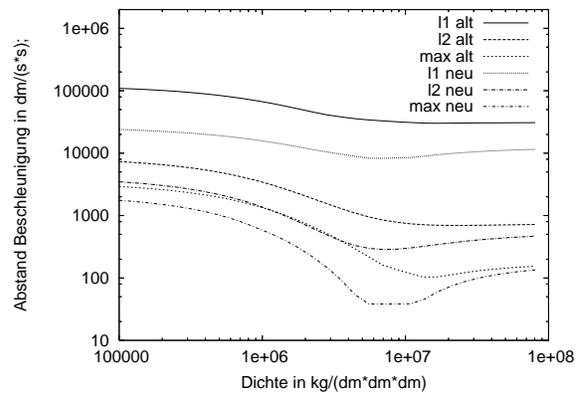


(a) Variation von EMhL3L4

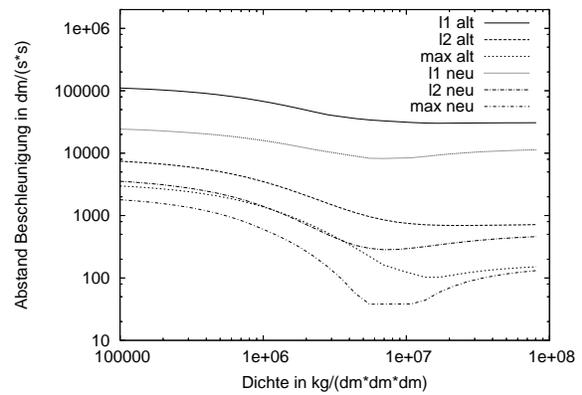


(b) Variation von EMvL3L4

Abbildung 11: Die Beschleunigungsdifferenzen in den alten und neuen Fehlermaßen der Parametergruppen EMhL3L4 und EMvL3L4



(a) Variation von $\rho hL3L4$



(b) Variation von $\rho vL3L4$

Abbildung 12: Die Beschleunigungsdifferenzen in den alten und neuen Fehlermaßen der Parametergruppen $\rho hL3L4$ und $\rho vL3L4$

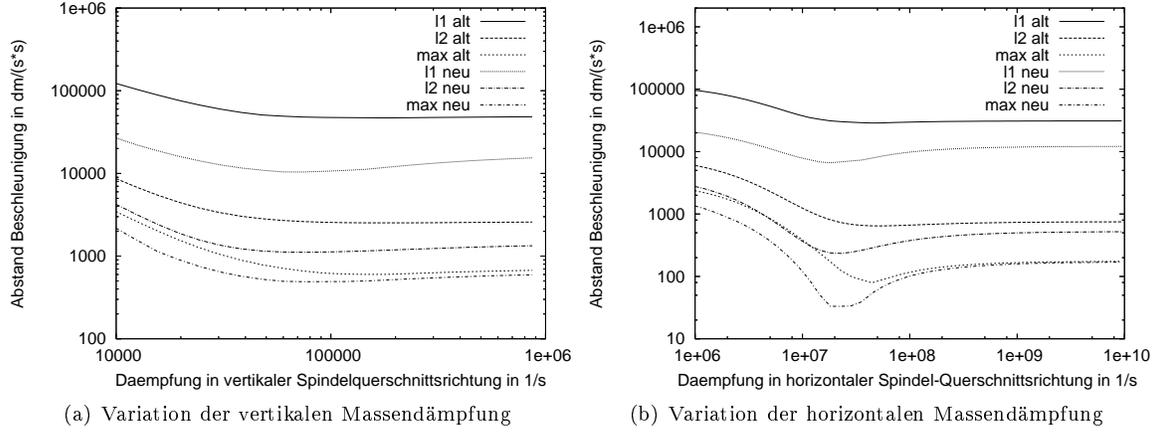


Abbildung 13: Die Beschleunigungsdifferenzen in den alten und neuen Fehlermaßen der Dämpfungsparameter

Extrema mit Betrag ≥ 0.01 ist; eine analoge Einschränkung von l_2 wird mit N_δ^2 bezeichnet und N_δ^{max} definiert eine analoge Einschränkung von l_{max} .

Wie in den Abbildungen 11, 12 und 13 zu sehen, werden durch die Wahl des neuen Fehlermaßes die Beschleunigungsdifferenzen δ_P für die Parameter(gruppen) P deutlich kleiner im Vergleich zur jeweils uneingeschränkten Fehlermaßen l_1 , l_2 bzw. l_{max} . Nun werden die Materialkonstanten für $EMhL3L4$, $EMvL3L4$, $\rho hL3L4$, $\rho vL3L4$, xDg und yDg gesucht, für die N_δ^{max} minimal ist. Dabei wird diese Norm den beiden anderen betrachteten vorgezogen, weil die erzeugten Grafiken vermuten lassen, dass echte Minima bezüglich dieses Fehlermaßes am besten zu finden sind.

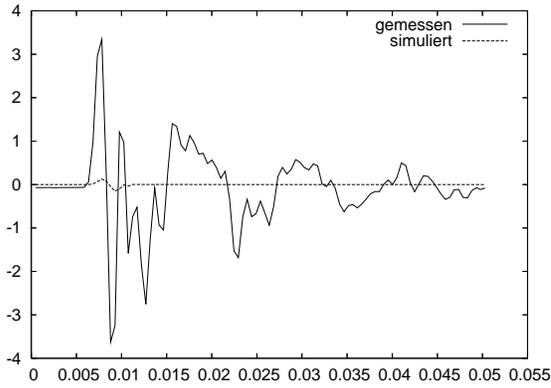
6 Parameteridentifikation

In diesem Abschnitt wird die zentrale Frage der Bestimmung der Parameter behandelt. Dazu wird zuerst das Abweichungsfunktional, dass das Zielfunktional der Optimierungsaufgabe ist,

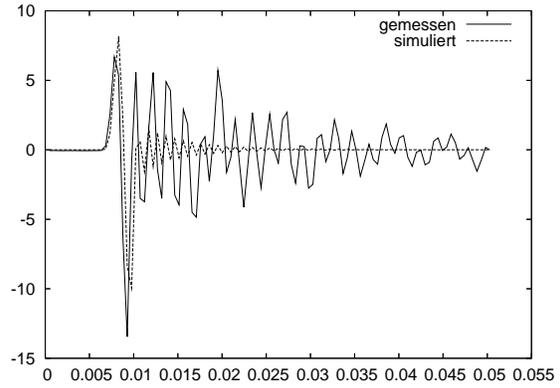
$$J(u, q) := \frac{1}{2}ab(\ddot{u} - \bar{a})^2 + \frac{1}{2}\alpha|q|^2$$

definiert. Es sei $u(q)$ die kontinuierliche Lösung der in Abschnitt 3 beschriebenen Problemstellung, wobei q der Vektor der freien Materialparameter ist. Die Messwerte sind in \bar{a} enthalten. Der Abstand wird mit Hilfe des Fehlermaßes ab gemessen, wobei ab ein beliebiges der oben angegebenen Fehlermaße sein kann. Die Konstante $\alpha > 0$ ist ein kleiner Regularisierungsparameter. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass die physikalischen Grenzen für die Konstanten eingehalten werden. Hier müssen alle Komponenten von q größer oder gleich 0 sein. Um diese Restriktion zu garantieren, wird ein Barriere Ansatz verwendet. Es werden also Einträge nahe 0 bestraft. Die Optimierung erfolgt mit dem Nelder Mead Verfahren [6], das nur Auswertungen des Zielfunktionals und keine Ableitungsinformationen benötigt.

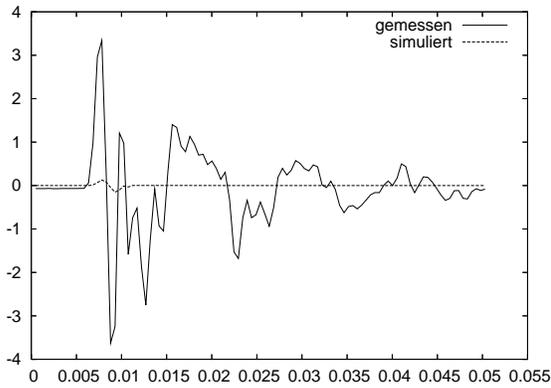
In Tabelle 1 und 2 sind die Ergebnisse der Parameteridentifikation bzgl. verschiedener Einstellungen angegeben. Die Anzahl der Zellen im Finite Elemente Netz M beschreibt die Feinheit der Diskretisierung im Ort. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte endstehen nach einer weiteren uniformen Verfeinerung des Ausgangsnetzes. Der Parameter N_{opt} gibt an, wieviele freie Parameter in der Optimierung verwendet wurden. Das in J verwendete Fehlermaß ist in der dritten Zeile angegeben. Dann sind die optimalen Werte für die 6 Parameter $EMhL3L4$, $EMvL3L4$, $\rho hL3L4$, $\rho vL3L4$, xDg und yDg in allen betrachteten Fällen angegeben. Zum Abschluss ist noch der berechnete minimaler Wert des Zielfunktionals bzgl. des N_δ^{max} und des l_∞ Fehlermaßes angegeben.



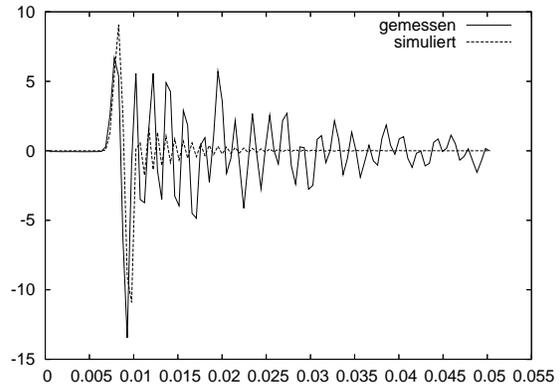
(a) Horizontal mit $N_{opt} = 3$ bzgl. N_{δ}^{max}



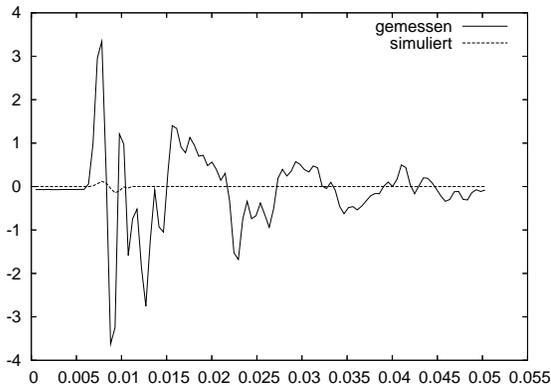
(b) Vertikal mit $N_{opt} = 3$ bzgl. N_{δ}^{max}



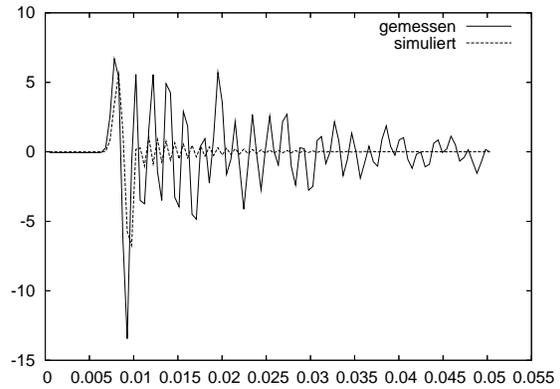
(c) Horizontal mit $N_{opt} = 6$ bzgl. N_{δ}^{max}



(d) Vertikal mit $N_{opt} = 6$ bzgl. N_{δ}^{max}



(e) Horizontal mit $N_{opt} = 6$ bzgl. l_{∞}



(f) Vertikal mit $N_{opt} = 6$ bzgl. l_{∞}

Abbildung 14: Simulierter Verlauf der Beschleunigung im Vergleich mit den gemessenen Werten für die verschiedenen optimalen Parameter

	$M = 2680$ $N_{opt} = 3$ N_{δ}^{max}	$M = 2680$ $N_{opt} = 6$ N_{δ}^{max}	$M = 2680$ $N_{opt} = 3$ l_{∞}	$M = 2680$ $N_{opt} = 6$ l_{∞}
<i>EMhL3L4</i>	$1.5306 \cdot 10^8$	$1.1461 \cdot 10^8$	$2.1418 \cdot 10^8$	$1.8436 \cdot 10^8$
<i>EMvL3L4</i>	$1.5306 \cdot 10^8$	$9.5116 \cdot 10^7$	$2.1418 \cdot 10^8$	$2.4152 \cdot 10^8$
<i>ρhL3L4</i>	236.49	$2.3281 \cdot 10^3$	731.47	46.185
<i>ρvL3L4</i>	236.49	$2.0336 \cdot 10^4$	731.47	21.256
<i>xDg</i>	43.718	$1.9795 \cdot 10^4$	$1.8215 \cdot 10^4$	$1.2519 \cdot 10^4$
<i>yDg</i>	43.718	$1.8159 \cdot 10^4$	$1.8215 \cdot 10^4$	$2.2431 \cdot 10^2$
$J_{N_{\delta}^{max}}$	5.0595	5.0131	5.2963	5.2893
$J_{l_{\infty}}$	9.0725	10.028	7.7303	7.7217

Tabelle 1: Ergebnisse der Parameteridentifikation

	$M = 21440$ $N_{opt} = 3$ N_{δ}^{max}	$M = 21440$ $N_{opt} = 6$ N_{δ}^{max}	$M = 21440$ $N_{opt} = 3$ l_{∞}	$M = 21440$ $N_{opt} = 6$ l_{∞}
<i>EMhL3L4</i>	$8.8906 \cdot 10^7$	$8.5757 \cdot 10^7$	$1.9968 \cdot 10^8$	$3.424 \cdot 10^8$
<i>EMvL3L4</i>	$8.8906 \cdot 10^7$	$8.6527 \cdot 10^7$	$1.9968 \cdot 10^8$	$2.0592 \cdot 10^8$
<i>ρhL3L4</i>	9.0418	8.6375	$7.4281 \cdot 10^5$	$5.6195 \cdot 10^4$
<i>ρvL3L4</i>	9.0418	8.6431	$7.4281 \cdot 10^5$	$3.8323 \cdot 10^4$
<i>xDg</i>	$2.6898 \cdot 10^4$	$2.7952 \cdot 10^4$	$8.6182 \cdot 10^3$	$2.0639 \cdot 10^3$
<i>yDg</i>	$2.6898 \cdot 10^4$	$2.5823 \cdot 10^4$	$8.6182 \cdot 10^3$	74.827
$J_{N_{\delta}^{max}}$	5.0174	5.0169	5.4093	5.2438
$J_{l_{\infty}}$	10.138	10.177	8.0212	7.7386
$J_{N_{\delta}^1}^1$	5.0867	5.0514	5.2771	5.2648
$J_{l_{\infty}}^1$	9.5715	10.111	7.7844	7.7879

Tabelle 2: Ergebnisse der Parameteridentifikation

Zusätzlich sind in Tabelle 2 die Werte des Zielfunktionals basierend auf den optimalen Parametern aus Tabelle 1 angegeben.

Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich trotz deutlicher Änderung von Parametern der Wert des Zielfunktionals kaum ändert. Ein Grund ist, dass mehrere lokale Minima des Zielfunktionals existieren. Dabei ist der Wert des Zielfunktionals in den Minima vergleichbar. Die Verwendung von unterschiedlichen Fehlermaßen führt zwar zu einer Veränderung der Parameter, aber auch damit ändert sich der Wert des Zielfunktionals kaum. Diese Ergebnisse werden auch in Abbildung 10, wo die Antwort der Struktur zu dem Optimierungsergebnis mit $N_{opt} = 3$ bzgl. der l_{∞} Norm dargestellt ist, und in Abbildung 14 deutlich. Die dort dargestellten Graphen weisen trotz der veränderten Parameter keine sichtbaren Veränderungen auf. Wichtig für die Simulation des Schleifprozesses ist allerdings die gute Auflösung der Anfangsschwingung im vertikalen Fall, da diese Auslenkung hauptsächlich für Abweichungen während des Schleifprozesses verantwortlich ist. In [2] konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen bzgl. des Schleifprozesses und realen Werkstücken im betrachteten Modell nachgewiesen werden. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für das einmal zusätzlich verfeinerte Netz dargestellt. Die Optimierung führt auf völlig unterschiedliche Ergebnisse, die bis auf eine Ausnahme zu besseren Resultaten führen als die optimalen Parameter aus Tabelle 1. Im Ausnahmefall hat der Optimierungsalgorithmus ein lokales aber nicht das globale Minimum gefunden. Insgesamt werden aber vergleichbare Genauigkeitsresultate in beiden Fällen erreicht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Artikels wurde die Technik der Parameteridentifikation benutzt, um ein möglichst genaues Finite Elemente Modell einer Schleifmaschine zu erstellen. Im Rahmen des hier vorgestellten linearen Modells zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Resultaten der Simulation. Um die Übereinstimmung weiter zu verbessern, ist die Einbeziehung von nichtlinearen Effekten unumgänglich. Da die Berücksichtigung dieser Effekte eine wesentliche Steigerung der Rechenzeit zur Folge hätte, soll im Rahmen der Simulation des NC-Formschleifprozesses darauf verzichtet werden. Zudem zeigt sich bereits mit dem betrachteten linearen Modell eine sehr gute Übereinstimmung beim Vergleich von simulierten Schleifoberflächen mit realen Oberflächen [2]. Eine weitere Verbesserung der Resultate im linearen Modelle sollte sich mit Optimierungsalgorithmen zur Suche von globalen Minima erzielen lassen. Das Problem der Parameteridentifikation ist auch bei der Erweiterung der Simulation des NC-Formschleifprozesses um thermische Effekte von entscheidender Bedeutung, da viele der den Modellen zu Grunde liegenden Parameter nicht direkt gemessen oder berechnet werden können. Dabei soll auf den hier gemachten Erfahrungen aufgebaut werden.

Danksagung

Die Forschungen werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1180, Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen, gefördert.

Literatur

- [1] Weinert, K., Blum, H., Jansen, T., Rademacher, A.: Simulation based optimization of the NC-shape grinding process with toroid grinding wheels, *Prod. Eng.* 1(3):245-252, 2007
- [2] Jansen, T.: Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben, Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007
- [3] Evans, L. C.: *Partial Differential Equations*, American Mathematical Society, Providence, 1998
- [4] Newmark, N. M.: A Method of Computation for Structural Dynamics, *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE* 85(EM3):67-94, 1959
- [5] Hughes, T. J. R.: *The Finite Element Method*, Dover Publications, Inc, Mineola, 2000
- [6] Nelder, J. A., Mead, R.: A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7:308-312, 1965