

Modellbasiertes Condition Monitoring  
mit optiSLang

# Ursache und Wirkung

Der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften einzelner Bauteile für das Verhalten eines Gesamtsystems ist nicht immer sofort ersichtlich. Anhand der Simulation einer Werkzeugmaschinenbaugruppe wird aufgezeigt, wie durch Parametrisieren und mit den Methoden aus optiSLang der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung identifizierbar ist.

Um die Bearbeitungstoleranzen und die Qualität von Werkstücken über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, ist es notwendig, den Zustand der Werkzeugmaschine während des Betriebs zu überwachen. Dafür existieren unterschiedliche Strategien, die als „run to break“, zeitbasierte präventive Wartung und zustandsorientierte Instandhaltung kategorisiert werden können. Das Ziel des letztgenannten Ansatzes ist eine ständige Analyse des Verhaltens der Komponenten während ihrer Betriebszeit.

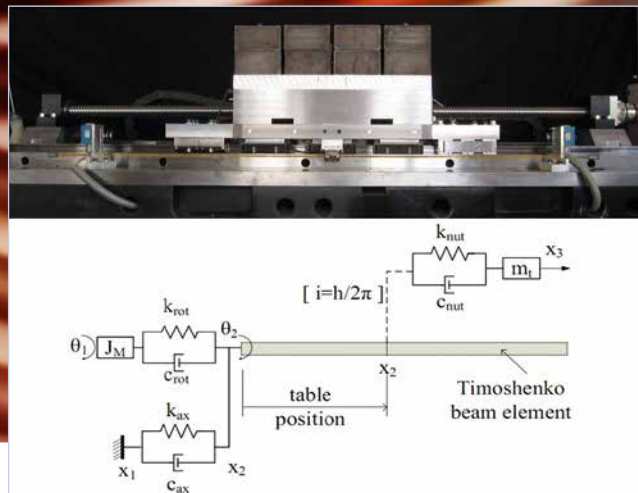
In den meisten Fällen basiert die Zustandsüberwachung auf der Schwingungsdiagnose. Dabei werden externe Beschleunigungssensoren in zahlreichen Positionen installiert und der Schwingungszustand der Maschine analysiert. Im vorliegenden Projekt wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der die Eigenschaften einzelner Maschinenkomponenten basierend auf der Analyse eines Modells des Gesamtsystems ermittelt.

Die Entwicklung eines geeigneten Algorithmus für die Zustandsüberwachung eines bestimmten Systems erfordert umfassende Kenntnisse über die möglichen Ausfallarten. Für den Fall eines Spindel-mutterantriebs ist der Verschleiß der Roll-

bahn das am häufigsten auftretende Problem. Die Erosion des Laufbahnprofils ändert die tribologischen Eigenschaften der Kontaktfläche und verringert dadurch die Vorspannung zwischen Kugeln, Mutter und Spindel. Ein Verlust der Vorspannung reduziert wiederum die Gesamtsteifigkeit des Vorschubantriebssystems, was zu Veränderungen der Eigenfrequenzen des Systems führt. Daher kann durch Analyse der Eigenfrequenzen eines Vorschubantriebs die Steifigkeit der unterschiedlichen Komponenten bestimmt werden.

## Analyse mit reduzierten Modellen

Im Fall des SIOCS-Projekts (Simulationsbasierte Parameteridentifikation für Online Condition Monitoring einer Kugelrollspindel) am ISW (Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen) der Universität Stuttgart wurden die Berechnungen der Eigenfrequenzen und die folgende Analyse der Komponentensteifigkeit durch ein FE-Modell (Finite Elemente) von Kugelgewindetrieben durchgeführt. In der ersten Phase wurde ein reduziertes 2D-FE-Modell



**Bild 1:** Die Kugelgewindetrieabachse am ISW und ein entsprechendes reduziertes Modell.

(Bild 1) entwickelt, das weniger als 50 Freiheitsgrade besitzt. Die erste Eigenfrequenz entspricht der axialen Schwingung der Achse und die zweite Eigenform bezeichnet im Wesentlichen die Torsion-Schwingung der Spindel. Das reduzierte Modell beinhaltet neben der Tischmasse und der Motorträgheit die Steifigkeits- und Dämpfungsparameter von Mutter, Lager und Kupplung.

Die Beziehung zwischen den Steifigkeitsparametern und den berechneten ersten zwei Eigenfrequenzen des reduzierten Modells wurde analysiert. Die Steifigkeitsparameter sollten basierend auf gemessenen Eigenfrequenzen identifiziert werden. Dazu erfolgte eine Optimierung mit der Software optiSLang, bei der die Zielfunktion durch die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Eigenfrequenzen definiert wurde. Bestätigt wurde das Ergebnis durch ein Verfahren, das auf einem neuronalen Netz zum Aufbau der Beziehung zwischen Eingängen (Eigenfrequenzen) und Parameterausgängen (Steifigkeiten) basierte.

Die initiale Identifikation der Steifigkeitsparameter gibt an, dass basierend auf der Messung aus nur zwei Eigenfrequenzen kein eindeutiger Steifigkeitswert für die

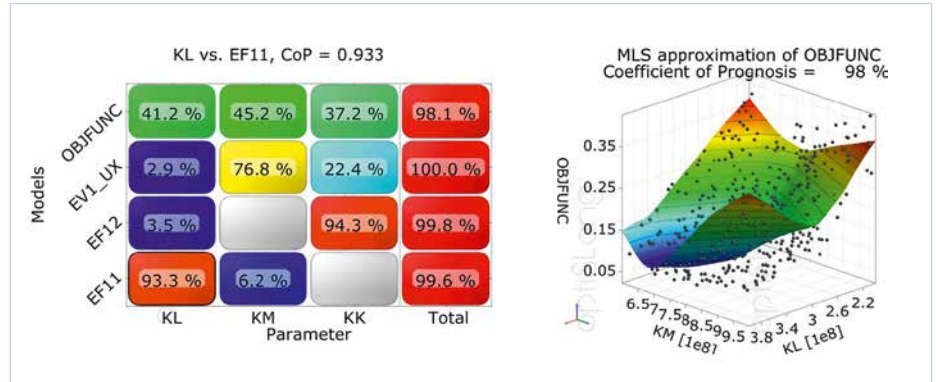


Bild 2: CoP (linke Seite) und MoP (rechte Seite) basierend auf Sensitivitätsanalyse in optiSLang.

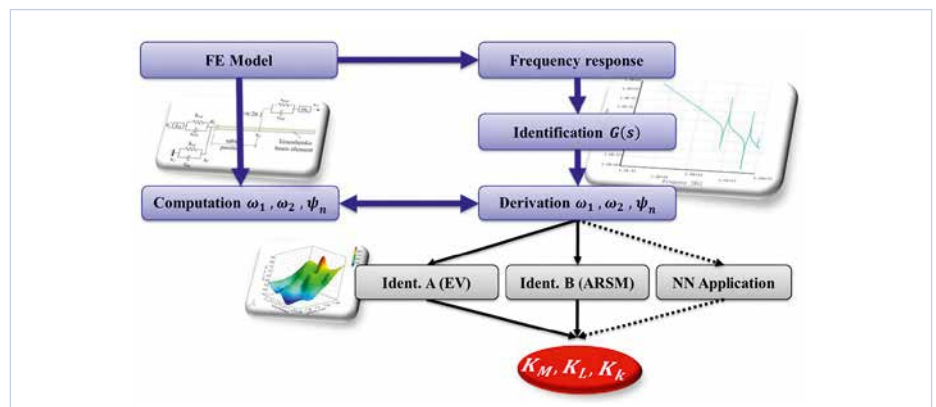


Bild 3: Workflow für die Ermittlung der Steifigkeitsparameter eines Kugelgewindtrieb-Systems, basierend auf berechneten Eigenfrequenzen und dem zweiten Eigenvektor.

Mutter identifiziert werden kann. Um die Abhängigkeit zu klären, wurde eine Sensitivitätsanalyse des Modells mit optiSLang for ANSYS Workbench durchgeführt. In die Sensitivitätsanalyse gingen verschiedene Steifigkeitsparameter, die Tischmasse und -position ein und mehr Eigenfrequenzen wurden untersucht. Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass weder die erste noch die zweite Eigenfrequenz überwiegend durch die Steifigkeit der Mutter beeinflusst werden. In einer weiteren Untersuchung wurde die Wirkung der Muttersteifigkeit auf andere Parameter als die Eigenfrequenzen analysiert. Das Ergebnis war, dass die erste Eigenform (Maschinentischbewegung) überwiegend durch die Muttersteifigkeit beeinflusst wird. Durch die Sensitivitätsanalyse wurden drei Ausgangsparameter ermittelt, die für die Identifizierung der Steifigkeitsparameter des Kugelgewindtriebes notwendig sind. In Bild 2 wurde dies durch CoP (Coefficient of Prognosis) und MoP (Meta model of Prognosis) nach der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

Nach Änderung der Zielfunktion durch Hinzufügen der Eigenformen und Umsetzung der Korrekturfaktoren wurde die Identifikation der Modellparameter durchgeführt. Der angewandte modellbasierte Identifikationsalgorithmus war der Evolutionäre Algorithmus (EA), die Steifigkeit-

sparameter konnten dadurch nach 200 Iterationen eindeutig identifiziert werden.

### Genauigkeit des Algorithmus

Bild 3 zeigt, wie auf Basis von Simulationseingangsdaten der vorgeschlagene SIOCS-Ansatz verifiziert wurde. Mit dem reduzierten 2D-Modell eines Kugelgewindtriebes wird der Frequenzgang der Drehzahlregelstrecke berechnet. Basierend auf der Kurvenanpassung des Bode-Diagramms lässt sich dann die Übertragungsfunktion des Systems identifizieren. Die Eigenfrequenzen und Eigenvektoren werden anschließend mit dem entwickelten Algorithmus berechnet. Durch die Bereitstellung der Eigenfrequenzen und Eigenvektoren als Eingaben des Identifikationsalgorithmus wurden die Steifigkeitsparameter des Kugelgewindtrieb-Modells bestimmt und die Genauigkeit des Algorithmus untersucht.

Nach Abschluss des Projekts kann folgendes Fazit gezogen werden: Der erwartete Zusammenhang zwischen Systemparametern und Eigenschaften der Maschine konnte zum Beginn des Projekts nicht festgestellt werden. Nach zusätzlicher Aufnah-

me der ersten Eigenform des Systems und Erfassung eines weiten Felds von Einflussgrößen und Systemantworten in der Sensitivitätsanalyse konnte dieser Zusammenhang dann erklärt werden. Die Korrelationsmatrix hat die Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern und dem Maschinenverhalten gezeigt. Mit der so ermittelten Vorgehensweise lässt sich aufgrund des realen Schwingungsverhaltens einschätzen, in welchem Zustand sich die überwachte Komponente befindet. Dadurch können Einsatzzeiten von Werkzeugmaschinen optimiert und Wartungsintervalle an den realen Zustand der Maschine angepasst werden.

#### InfoAutoren

Mahdi Mottahedi, M.Sc., ISW, Universität Stuttgart  
Dr.-Ing. Armin Lechler, Geschäftsführender  
Oberingenieur, ISW, Universität Stuttgart

#### InfoAnsprechpartner | CADFEM

Cord Steinbeck-Behrens  
Tel. +49 (0) 511-39 06 03-17  
csb@cadfem.dee

#### InfoVerwendete Software

ANSYS Workbench, optiSLang

#### InfoTag

Design-Verständnis  
www.cadfem.de/design-verstaendnis