

Schlussbericht vom 30.04.22

zu IGF-Vorhaben Nr. 20709 BR

Thema

VIBROSIM II - Modellbildung und Simulation des Schwingungsverhaltens mobiler Arbeitsmaschinen unter Berücksichtigung der Tragwerkselastizitäten

Berichtszeitraum

01.05.2019 bis 28.02.2022

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.

Forschungseinrichtung(en)

TU Dresden

Institut für Mechatronischen Maschinenbau

Professur für Baumaschinen

01062 Dresden

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Das dynamische Systemverhalten stellt ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung mobiler Arbeitsmaschinen dar. Es ist maßgeblich für die Schwingungsexposition auf den Bediener und damit für dessen Komfortempfinden verantwortlich. Darüber hinaus führen die dynamisch hervorgerufenen Belastungen zu festigkeitsrelevanten Beanspruchungen sowie zu einer Beeinflussung der Maschinenbewegungen und folglich der Positioniergenauigkeit des Werkzeugs.

In dem vorangegangenen Forschungsvorhaben VIBROSIM (IGF-Nr. 17027 BR) wurde ein Lösungsansatz entwickelt, mit dem durch Modellbildung und Simulation das Vibrationsübertragungsverhalten mobiler Erdbaumaschinen bewertet werden kann. Die Schwerpunkte lagen dabei auf der Ermittlung und Beschreibung der Systemanregungen sowie auf der Abbildung des dynamischen Übertragungsverhaltens von Elastomerkomponenten. Für die Tragwerksstrukturen wurde eine Idealisierung als „starre Körper“ vorgenommen, welche keinerlei Verformung der Stahlbaukomponenten berücksichtigt. Im Verlauf des Projektes zeigte sich, dass aus einer solchen Vereinfachung Einschränkungen hinsichtlich der Abbildungsgüte des Maschinenverhaltens resultieren. Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts VIBROSIM wurde daher die Simulation von schwingungsfähigen Baumaschinen unter Berücksichtigung der Tragwerkselastizitäten im Forschungsvorhaben VIBROSIM II vertieft, um einen ganzheitlichen Ansatz zur Beschreibung des dynamischen Übertragungsverhaltens zu entwickeln.

Es wurden sowohl eine Tandemvibrationswalze (TVW) mit vergleichsweise hochfrequenten Vibrationen (< 100 Hz) als auch ein Hubsteiger mit einer Dynamik im niederfrequenten Bereich (< 2 Hz), deren Ursache in einer zunehmenden Leichtbauweise der Arbeitsausrüstung zu finden ist, untersucht. Der Leichtbau führt auf der einen Seite zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und kleineren Antrieben, erweist sich auf der anderen Seite aber bei langen, schmalen Konstruktionen im Hinblick auf die Dynamik als besonders nachteilig. Um einerseits die genannten Vorteile des Leichtbaus nicht aufgeben zu müssen und andererseits unnötige Iterationen während der konstruktiven Entwicklungsphase (auch bei den o.g. hochfrequent erregten Maschinen) zu vermeiden, wurden Simulationsmodelle entwickelt, anhand derer die Dynamik bereits während des Entwicklungsprozesses abschätzbar ist, sodass Regelungsstrategien für die Antriebe, konstruktive Einflüsse und Auswirkungen auf die Umgebung zielgerichtet getestet werden können.

Für die Walze wurden Modelle verschiedener Abstraktionsgrade erstellt, parametrisiert und mithilfe einer umfassenden Messkampagne evaluiert. Ziel dieser Vorgehensweise war die Identifikation der Einflussgrößen auf das komplexe Schwingungsübertragungsverhalten der TVW. Der Ausgangspunkt war das Vorgängerprojekt VIBROSIM, bei dem das Übertragungsverhalten nur unzureichend abgebildet werden konnte. Dabei sind die unzureichende Erfassung der Eigenschaften der Elastomerkomponenten sowie das Strukturverhalten für die Abweichungen zwischen Vermessung und Modellberechnung als Einflussgrößen herausgestellt worden. Das Forschungsvorhaben VIBROSIM II zielte darauf ab, das Strukturverhalten über die Implementierung flexibler Körper zu berücksichtigen. Für die Elastomermodellierung wurde ein vereinfachter Ansatz genutzt, welcher die Modellparametrierung aus Herstellerangaben (Shore-Härte) ermöglichen sollte. Die Betrachtung der Elastomermodelle mit dem vereinfachten

Modellansatz ergab eine gute Näherung der Modellberechnung. Im Vergleich zu Herstellerangaben zeigt das reduzierte Elastomermodell für die statische Steifigkeit gute Übereinstimmungen. Auf dieser Grundlage konnten aus der Literatur Koeffizienten für die Ermittlung der dynamischen Steifigkeit sowie des Verlustwinkels auf Basis der Shore-A-Härte evaluiert werden, wobei der Bezug zur Schwingfrequenz 50 Hz angenommen wird. Im Vergleich zu Messungen aus dem Vorgängervorhaben konnte somit das dynamische Verformungs-Kraftverhalten der Bandagen-Elastomere bei 50 Hz prognostiziert werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zudem Modelle entwickelt, welche vor allem in Kombination mit flexiblen Körpern ein verbessertes Schwingungsverhalten zeigen. Die Ergebnisse aus experimentellen Versuchsreihen konnten aber auch mit derartigen Ansätzen nicht erreicht werden. Eine Parametrierung mittels Shore-Härte kann infolgedessen nicht als allgemeingültige Vorgehensweise empfohlen werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Vermessung der einzelnen Elastomere notwendig ist, um die Vielzahl der Einflussgrößen in einem Elastomermodell abzubilden.

In einer frühen Projektphase wurde mithilfe einer modellbasierten Sensitivitätsanalyse für das Walzenmodell mit den als Ersatzsteifigkeiten abgebildeten Stützen ein geringer Einfluss der Bandagenelastomere auf das Schwingungsübertragungsverhalten der Maschine herausgestellt. Diese Erkenntnis stützte die Arbeitshypothese, vorrangig das Strukturverhalten mit dem Ansatz des Imports flexibler Körper abzubilden und die Elastomermodelle vereinfacht zu modellieren. Für den Import flexibler Körper wurde ein Workflow erarbeitet, der es ermöglicht, mithilfe von CAD-Daten und Reduktionsmethoden zusätzlich zur Starrkörperverschiebung die Deformation der Bauteile in einem MKS-System abzubilden.

Die Modellvalidierungsphase hat für die Modelle mit flexiblen Körpern ein verbessertes Schwingungsübertragungsverhalten ergeben. Dabei konnte entgegen der Ergebnisse der ersten Sensitivitätsanalyse ein erhöhter Einfluss der Elastomermodelle herausgestellt werden. Über die gezielte Modifikation der Dynamikfaktoren der Bandagenelastomere ließ sich im Modell mit flexiblen Körpern eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse erzielen. Die Vermessungsergebnisse konnten ohne diese Anpassungen aber nicht erreicht werden. Diese Ergebnisse sind modellübergreifend zu beobachten. Am besten wurden die auftretenden Beschleunigungen und auftretenden Frequenzen anhand des Modells mit flexiblem Vorder- und Hinterwagen abgebildet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde mit diesen Modellergebnissen eine Schwingungsbewertung nach VDI 2057 durchgeführt. Die Abbildungsgüte des Tagesexpositionswerts konnte dabei im Vergleich zum Vorgängerprojekt erhöht werden.

Zusätzlich zu der zuvor betrachteten Tandemvibrationswalze mit vergleichsweise hochfrequenten Vibrationen (< 100 Hz) wurde ein Hubsteiger herangezogen, dessen Dynamik im niederfrequenten Bereich (< 2 Hz) liegt. Auch hier sollte untersucht werden, inwieweit die Implementierung flexibler Körper in MKS-Simulationsmodellen zu einer verbesserten Abbildung des dynamischen Systemverhaltens führt und so der Produktentwicklungsprozess verbessert werden kann.

Der entwickelte Workflow zur Erstellung der flexiblen Körper wird für jedes Segment des Teleskopauslegers angewandt. Als Ansatz für die Verformung der flexiblen Körper werden die ersten beiden Biegeeigenfrequenzen gewählt, wobei die Segmente jeweils an einem Ende fest eingespannt sind. Um ein Teleskopieren der einzelnen flexiblen Körper zu gewährleisten, wird ein Schubgelenk für flexible Körper in Verbindung mit einer impliziten Zwangsbedingung

genutzt. Mit diesen Komponenten sowie weiteren Standardkomponenten wird das elastische MKS-Modell des Hubsteigers aufgebaut. Aufgrund der Steifigkeiten der langen Auslegerstrukturen kann nur mithilfe einer hohen Dämpfung eine stabile Simulationsrechnung erreicht werden. Die Dämpfung stellt somit einen Einstellungsparameter dar, um Modelle mit flexiblen Körpern, welche die numerische Steifigkeit des Systems deutlich erhöhen, ohne die Modellgenauigkeit signifikant zu beeinflussen.

Auf Basis von vier definierten Testszenarien erfolgte im Zuge von Validierungsmessungen eine photogrammetrische Vermessung der Maschine. Die Modellvalidierung zeigte, dass das dynamische Verhalten qualitativ gut abgebildet werden kann. Im vollausgefahrenen Zustand der Teleskope haben die Verschiebungen, die Schwingungsamplituden und die Frequenz die geringsten Abweichungen zur Messung. Mit dem Einfahren der Teleskopsegmente nehmen die Abweichungen in allen Punkten (Amplitude und Frequenz) leicht zu. Die Ursache dafür liegt im Verformungsansatz der flexiblen Körper, wodurch die Biegeeigenschwingungen der jeweiligen Teleskope abgebildet werden. Die Überlappung zweier Teleskopsegmente verändert in der Praxis Eigenformen und Eigenfrequenzen, was jedoch bei Verwendung der flexiblen Körper nicht berücksichtigt wird.

Die Verwendung elastischer MKS-Modelle führt im niederfrequenten Bereich zu einer deutlich verbesserten Abbildung des dynamischen Verhaltens. Eine Abschätzung von Parametern entfällt, weil die Masse, Steifigkeit und Dämpfung bereits über die flexiblen Körper ins Modell eingebracht wird. Die einzelnen elastischen Körper bilden das dynamische Verhalten in der MKS verglichen mit der FE-Lösung in sehr guter Näherung ab. Allerdings treten bei teleskopierbaren Strukturen größere Abweichungen auf, was auf den Verformungsansatz der flexiblen Körper zurückzuführen ist.

Ergänzend zu den theoretischen und experimentellen Untersuchungen ist ein Leitfaden erarbeitet worden, der den entwickelten Workflow detailliert beschreibt und somit die „VIBROSIM-Methode“ für die den praktischen Einsatz anwenderfreundlich nutzbar macht.