

# Modellierung, Simulation und Optimierung des horizontalen Bewegungsverhaltens eines landwirtschaftlichen Spritzgestänges

Anna-Gret Borchert, Reinhard Schmidt

In diesem Beitrag wird eine Methode zur realitätsnahen Abbildung des horizontalen Bewegungsverhaltens von landwirtschaftlichen Spritzgestängen und zur Reduzierung der Größe des Simulationsmodells präsentiert. Des Weiteren werden Lösungsansätze zur Reduzierung der Gestängeschwingungen vorgestellt und mithilfe einer Simulation verglichen. Dabei wird gezeigt, inwieweit das Schwingungsverhalten des Gestänges bei großen Arbeitsbreiten durch ein passives Tilgungssystem und eine aktive Schwingungsisolierung verbessert werden kann.

## Schlüsselwörter

Pflanzenschutz, Spritzgestänge, Schwingungstilgung, Simulation

Bei Pflanzenschutzgeräten zeigt sich ein deutlicher Trend hin zu mehr Schlagkraft und zu individueller, gezielter und damit kostengünstiger und umweltschonender Ausbringung. Die Erhöhung der Schlagkraft ist u. a. durch die Vergrößerung der Behältervolumina, höhere Fahrgeschwindigkeiten, eine schnellere Anpassung an wechselnde Bedingungen und die Vergrößerung der Gestängebreite möglich. Allerdings steigen die Bauteilbelastungen mit zunehmender Gestängegröße und -masse an, wodurch sich auch das Schwingungsverhalten des Gestänges in Richtung niedrigerer Eigenfrequenzen verändert, sodass es zu größeren Schwingungsamplituden kommen kann (SCHRANZ 2014).

Relativbewegungen des Spritzgestänges zum Grundgerät in Fahrtrichtung, die durch eine permanente Schwingungsanregung und die Elastizität des Gestänges verursacht werden, führen zu einer ungleichmäßigen Belagsverteilung. Im Hinblick auf die weitere Steigerung der Gestängebreite und besonders auf eine Verbesserung der Belagsverteilung ist es notwendig, das Schwingungsverhalten des Spritzgestänges weiter zu optimieren. So kann erreicht werden, dass nur die Mindestmenge ausgebracht werden muss und die Wirtschaftlichkeit sowie die Umweltfreundlichkeit der Pflanzenschutzgeräte erhöht wird.

## Aufbau des Simulationsmodells

Der Vergleich verschiedener Lösungsansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens des Spritzgestänges erfolgt auf Basis einer Simulation, die mit der Software Matlab/Simulink durchgeführt wird. Beim Modellaufbau wird das Ziel verfolgt, die Dynamik eines Pflanzenschutzgestänges so genau wie möglich abzubilden und die Berechnungszeit so gering wie möglich zu halten. Dazu wird die Theorie der modalen Transformation und Reduktion angewendet, wodurch ein Modell eines linearen Ersatzsystems mit wenigen Freiheitsgraden entsteht.

Ein Spritzgestänge stellt einen kontinuierlichen Schwinger dar, dessen Eigenschaften ersatzweise als Mehrmassenschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden durch das lineare, gekoppelte Differentialgleichungssystem (Gleichung 1) beschrieben werden kann (HEROLD 2003).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Massenmatrix  $\mathbf{M}$  und die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  bilden dabei die mechanischen Eigenschaften ab, die Dämpfungsmatrix  $\mathbf{D}$  berücksichtigt die Dämpfung innerhalb der Struktur durch die proportionale Abhängigkeit zur Massen- und Steifigkeitsmatrix. Die Gelenkstellen zwischen den einzelnen Gestängeelementen werden als ideal starr angenommen, sodass ausschließlich die Struktur der Bauteile das Dämpfungsverhalten des Spritzgestänges beeinflusst.

$$\mathbf{D} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (\text{Gl. 2})$$

Um die Komplexität des Modells zu reduzieren, wird die komplexe Geometrie der einzelnen Gestängeelemente durch Balkenelemente mit sechs Freiheitsgraden und symmetrischen, über die Balkenlänge konstanten Querschnitten abstrahiert, die die Masse, die Steifigkeit und das dynamische Verhalten der Gestängeelemente beschreiben. Für jedes einzelne Element werden die Steifigkeits- und die Massenmatrix aufgestellt, deren Kombination zu der Gesamtsteifigkeits- und Gesamtmassenmatrix des Gestänges führt. Die geometrischen Abmessungen des Balkenquerschnitts sowie der E-Modul werden für jedes einzelne Gestängeelement iterativ bestimmt. Dazu werden die ersten zehn Eigenfrequenzen und -formen eines Elements zum einen mit dem hier beschriebenen Modell und zum anderen mit einer Finite-Elemente-Berechnung ermittelt und verglichen.

Zur weiteren Reduktion wird das gekoppelte Differentialgleichungssystem mithilfe der modalen Transformation in ein System linear entkoppelter Gleichungen in den Modalraum transformiert. Unter der modalen Transformation versteht man die links- und rechtsseitige Multiplikation der Bewegungsgleichung mit der Modalmatrix. Dazu wird im ersten Schritt das allgemeine Eigenwertproblem gelöst (Gleichung 3):

$$[\mathbf{K} - \omega_i^2\mathbf{M}]\mathbf{u}_i = 0 \quad i = 1 \dots n \quad (\text{Gl. 3})$$

Daraus folgen die Modalmatrix  $\mathbf{U}$ , deren Spalten aus den Eigenvektoren  $\mathbf{u}_i$  gebildet werden, sowie die Eigenwertmatrix  $\omega$  mit den Eigenwerten  $\omega_i^2$  auf der Hauptdiagonalen.

Die anschließende Koordinatentransformation

$$\mathbf{x} = \mathbf{U}\mathbf{q} \quad (\text{Gl. 4})$$

und die linksseitige Multiplikation der allgemeinen Bewegungsgleichung mit  $\mathbf{U}^T$  führt auf ein System von  $n$  entkoppelten Differentialgleichungen mit jeweils einem modalen Freiheitsgrad.

$$\mathbf{U}^T\mathbf{M}\mathbf{U}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}^T\mathbf{D}\mathbf{U}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}^T\mathbf{K}\mathbf{U}\mathbf{q} = \mathbf{U}^T\mathbf{F} \quad (\text{Gl. 5})$$

Durch die modale Transformation erhält man zwar ein System entkoppelter Differentialgleichungen, allerdings beinhaltet das Modell noch immer  $n$  Freiheitsgrade, weshalb die modale Transformation für Systeme mit sehr vielen Freiheitsgraden alleine nicht praktikabel ist. Um die Anzahl der Freiheitsgrade und damit auch die Komplexität des Modells zu minimieren, wird das Modell modal reduziert, indem alle Eigenwerte oberhalb einer Grenzfrequenz  $\omega_{max}$  im Modell nicht berücksichtigt werden. Dieser Ansatz stellt eine Näherungslösung dar, denn nur die Superposition aller Eigenmoden beschreibt das dynamische Verhalten vollständig. Als Richtwert für eine gute Näherungslösung gilt, dass die Grenzfrequenz  $\omega_{max}$  dem 1,5-Fachen der zu untersuchenden Frequenz  $\Omega_{max}$  entsprechen sollte (IHLENBURG 2013).  $\Omega_{max}$  ist in der Regel die größte relevante Frequenz, die im Anregungsspektrum enthalten ist.

## Modellvalidierung

Für die Validierung des Modells wird ein Versuch im niederfrequenten Bereich mit einem speziell für die Schwingungsanalyse landwirtschaftlicher Spritzgestänge entwickelten Prüfstand durchgeführt. Dabei wird eine Feldspritze in Fahrtrichtung mit einem Frequenzsweep mit einer konstanten Wegamplitude und in einem Frequenzbereich von 0 bis 3 Hz angeregt. Es handelt sich um einen stationären Versuch, bei dem die Gestäμβewegung durch Messung der Verschiebung an verschiedenen Punkten innerhalb des Gestänges bestimmt wird. Der Versuch wird in der Simulation nachgebildet, indem die gemessene Anregungsfunktion übernommen wird und die Verschiebungen an den Messpunkten verglichen werden. Zur abschließenden Validierung des Modells werden die Dämpfungsfaktoren  $\alpha$  und  $\beta$  angepasst.

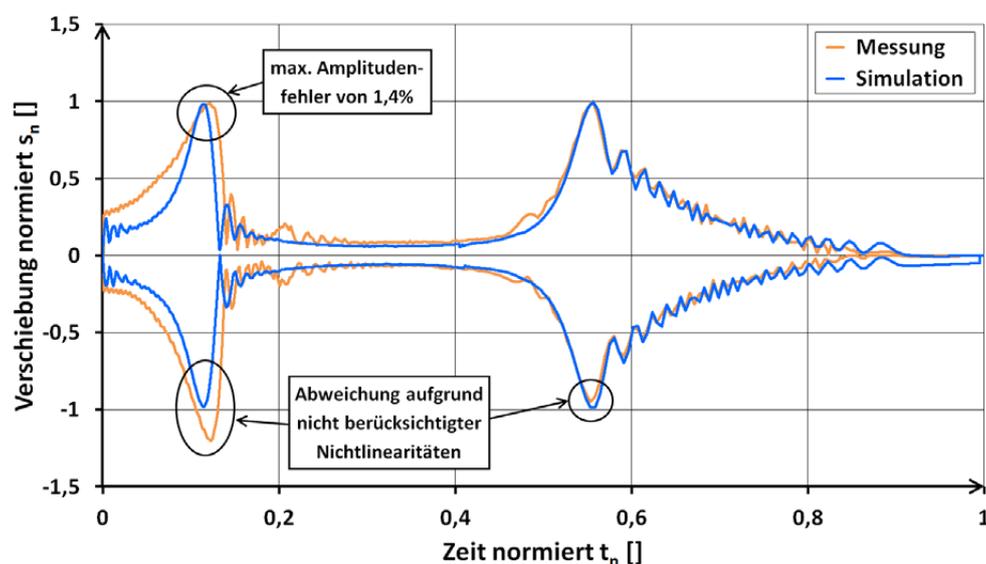


Abbildung 1: Normierter Vergleich der Hüllkurven der Verschiebung am Ende des Gestänges

Abbildung 1 stellt den Vergleich der Verschiebungen am Ende des Gestänges normiert dar und zeigt die Hüllkurven der gemessenen und berechneten Schwingung; dabei lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreichen. Der Vergleich der maximalen Schwingungsamplitude zeigt eine maximale Abweichung der berechneten zur gemessenen Ampli-

tude von 1,4%. Des Weiteren ergibt eine Frequenzanalyse im niederfrequenten Bereich, dass die maximale Abweichung der Schwingfrequenz bei 0,6% liegt. Dennoch wird auch deutlich, dass das reale Spritzgestänge ein unsymmetrisches Schwingungsverhalten aufweist, welches mit dem hier präsentierten Modellansatz nicht abgebildet ist. Dies lässt sich durch die im Berechnungsmodell nicht berücksichtigten Klappgelenke zwischen den Gestängeelementen begründen, die aufgrund ihrer geometrischen Ausführung ein nichtlineares Schwingungsverhalten des Spritzgestänges bewirken.

Insgesamt bildet das Simulationsmodell, obwohl es eine Näherungslösung darstellt, das dynamische Verhalten des Spritzgestänges ausreichend genau ab, um verschiedene Lösungsansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens untersuchen zu können.

### Untersuchung eines passiven Tilgungssystems

Wenn bei einer bestimmten Anregungsfrequenz große Resonanzamplituden vorliegen, kann der Einsatz von passiven Tilgern nützlich sein, um die Schwingungsamplituden zu verkleinern. In diesem Fall werden zusätzliche Feder-Masse-Systeme an dem zu tilgenden Bauteil positioniert und die Tilger-eigenfrequenz auf die zu tilgende Frequenz abgestimmt (BUCK 2005).

Zur Optimierung des Schwingungsverhaltens des landwirtschaftlichen Spritzgestänges werden in dieser Studie je zwei Tilger pro Gestängehälfte eingesetzt, die sich am Ende der beiden äußeren Gestängeelemente befinden (Abbildung 2). Die Tilger haben einen Freiheitsgrad in Fahrtrichtung und werden auf die Biegeeigenfrequenzen des Spritzgestänges abgestimmt, wobei der äußere der beiden Tilger auf die erste in Fahrtrichtung ausgeprägte Biegeeigenfrequenz und der innere auf die zweite ausgelegt wird. Für die Untersuchung der Tilger wird der für die Validierung des Modells verwendete Frequenzsweep simuliert.

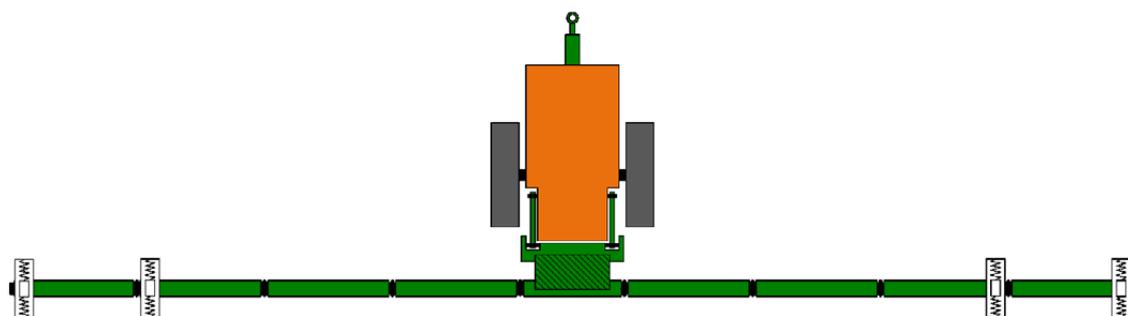


Abbildung 2: Pflanzenschutzgerät mit passiven Tilgern am Ende der äußeren Gestängeelemente

Das Ergebnis der Tilgeruntersuchung ist in Abbildung 3 normiert dargestellt und zeigt die Hüllkurven der auftretenden Schwingung am Ende des Spritzgestänges im Vergleich zum Ausgangszustand ohne Tilger. Ebenfalls zu sehen ist die bei der Verwendung passiver Tilger typische Ausprägung von sogenannten Seitenbändern. Damit sind die wesentlich geringeren Amplituden bei einer geringfügig niedrigeren und höheren Frequenz als der bisherigen Eigenfrequenz des Systems gemeint. Am äußeren Ende des Spritzgestänges reduziert sich durch den Einsatz der Tilger die maximale Schwingungsamplitude um ca. 40%. Die Graphik zeigt aber auch, dass sich Schwingungen am Spritzgestänge nicht vollständig vermeiden lassen.

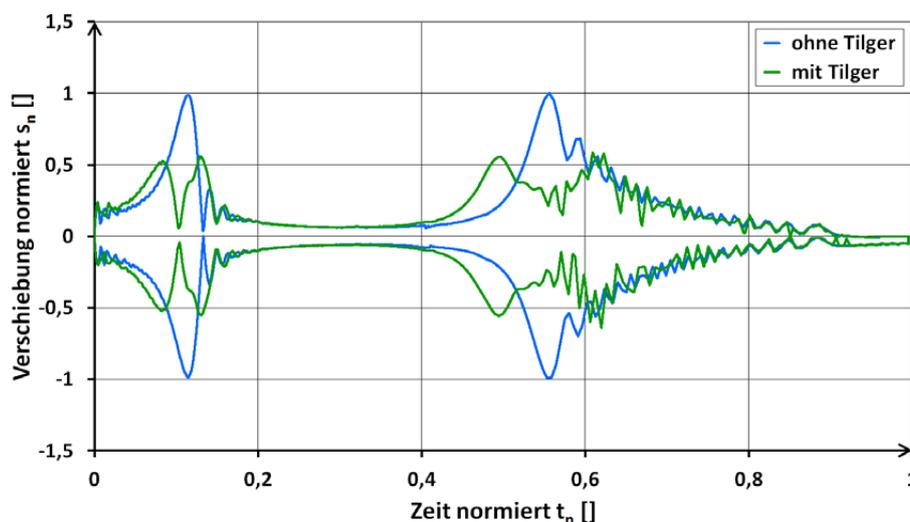


Abbildung 3: Normierter Vergleich der Hüllkurven der Verschiebung am Ende des Gestänges

### Untersuchung eines aktiven Schwingungsisolierungssystems

Die Tilgeruntersuchung hat gezeigt, dass passive Maßnahmen zur Reduzierung der Schwingamplituden am Gestänge wirkungsvoll sind. Allerdings wird auch deutlich, dass sich die Schwingungen nicht vollständig eliminieren lassen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle ein aktives System zur Minimierung der Schwingungsamplituden vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein vollaktives System, bei dem das Gestänge in der zentralen Aufhängung einen Freiheitsgrad in Fahrtrichtung erhält und bei dem ein Aktuator zwischen Pflanzenschutzgerät und Spritzgestänge mit seiner Wirkrichtung in Fahrtrichtung angeordnet ist.

Da es sich bei einem Spritzgestänge im übertragenen Sinne um zwei einseitig eingespannte Balken handelt, die nahezu keine Eigendämpfung aufweisen, ist es sehr schwierig, das Gestänge im Bereich der Aufhängung aktiv zu beruhigen, wenn es bereits schwingt. Daher wird für das aktive System die Strategie verfolgt, die Bewegungen des Grundgerätes nicht in das Gestänge einzuleiten, indem der Aktuator die gegenläufige Maschinenbewegung vollzieht. Auf die detaillierte Beschreibung des Regelalgorithmus wird an dieser Stelle verzichtet. Für die Untersuchung der Regelung dient erneut der oben beschriebene Frequenzsweep als Vergleichslastfall. Abbildung 4 stellt erste Ergebnisse unter „idealen Bedingungen“ in Form der auftretenden Schwingungen am äußeren Ende des Gestänges im Vergleich zum Ausgangszustand normiert dar. Es ist zu sehen, dass sich durch die Regelung nur sehr geringe Bewegungen auf das Gestänge übertragen und es dadurch nahezu nicht in Schwingung gerät.

Allerdings berücksichtigt der hier untersuchte Frequenzsweep das dynamische Verhalten des Pflanzenschutzgerätes nicht und stellt einen reinen Störlastfall dar. Daher ist eine Untersuchung weiterer Lastfälle, wie z. B. das Anfahren, Bremsen oder die Feldfahrt bei konstanter Fahrgeschwindigkeit mit Aufschaltung einer Störung, notwendig. Dadurch kann das Potenzial der aktiven Schwingungsisolierung genauer beurteilt werden.

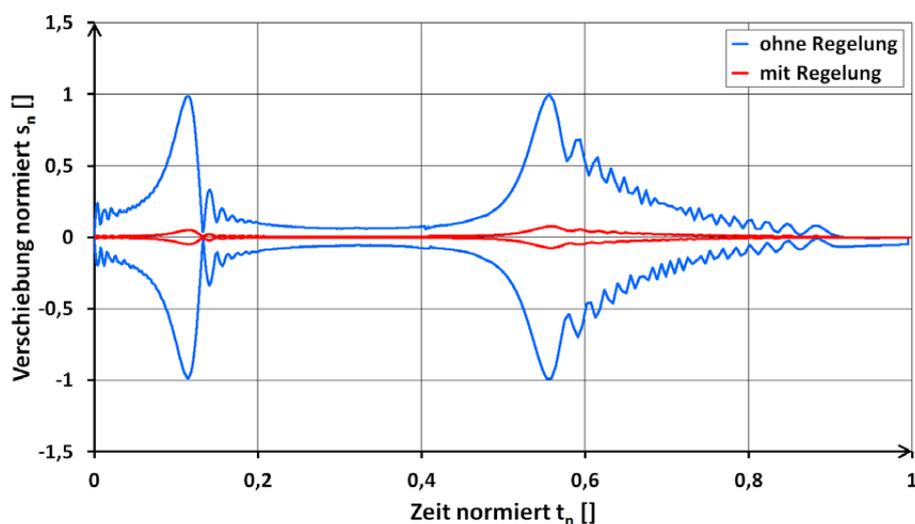


Abbildung 4: Normierter Vergleich der Hüllkurven der Verschiebung am Ende des Gestänges

## Schlussfolgerungen

Die modale Transformation und Reduktion ist eine geeignete Methode, um das horizontale Bewegungsverhalten von landwirtschaftlichen Spritzgestängen abzubilden und gleichzeitig die Rechenzeit für das Simulationsmodell zu reduzieren. Der Vergleich der berechneten Ergebnisse mit denen eines Validierungsversuchs zeigt, dass das in Matlab/Simulink erstellte, abstrahierte Berechnungsmodell das reale System ausreichend genau abbildet, um es für den Vergleich verschiedener Lösungsansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens zu nutzen.

Für den Vergleich zweier Lösungsansätze zur Reduzierung der Gestängeschwingungen werden zunächst passive Tilger untersucht, die an den äußeren Gestängeelementen positioniert und auf die ersten beiden Biegeeigenfrequenzen des Spritzgestänges abgestimmt werden. Die Simulation der Tilger zeigt, dass sich die Schwingungsamplitude am Ende des Spritzgestänges um bis zu 40 % reduzieren lässt, sich die Schwingungen aber nicht vollständig eliminieren lassen.

Des Weiteren wird zudem ein aktives System vorgestellt, welches die Strategie verfolgt, die Bewegungen des Grundgerätes nicht in das Spritzgestänge zu induzieren, indem der Aktuator die gegenläufige Maschinenbewegung vollzieht. Erste Berechnungsergebnisse zeigen eine optimale Störkopplung und das große Potenzial dieser Lösung.

Daher werden im weiteren Projektverlauf detaillierte Untersuchungen zur Auslegung der hier vorgestellten Lösungen durchgeführt, indem ein Mehrkörpersimulationsmodell des Spritzgestänges aufgebaut wird. Dieses beinhaltet die Abbildung der realen Geometrie inklusive der Elastizität der Gestängeelemente sowie verschiedene Lastfälle, die die realen Einsatzbedingungen widerspiegeln.

## Literatur

Buck, R. (2005): Prinzipien zur Auslegung von Tilgerelementen.

<http://fahrzeugtechnik.fh-joanneum.at/workshops/2005-05-11/15-00.pdf>, Zugriff am 8.8.2014

Herold, S. (2003): Simulation des dynamischen und akustischen Verhaltens aktiver System im Zeitbereich.

Dissertation, Technische Universität Darmstadt

Ihlenburg, F. (2013): Technische Schwingungslehre. [http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Ihl/TSL/PDF/tsl\\_script.pdf](http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Ihl/TSL/PDF/tsl_script.pdf),

Zugriff am 22.5.2013

Reiterer, M. (2004): Schwingungsdämpfung von Baukonstruktionen, insbesondere von Brücken. Dissertation,

Technische Universität Wien

Schranz, K. (2014): Schnell und treffsicher – Speed Spraying: Theorie, Praxis, neue Technologien. traction 14-01,

S. 62–68

## Autoren

**M. Sc. Anna-Gret Borchert** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Labor für Karosserieentwicklung und Leichtbau an der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, E-Mail: [anna-gret.borchert@hs-osnabrueck.de](mailto:anna-gret.borchert@hs-osnabrueck.de).

**Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schmidt** ist Professor für Mechanik, Maschinendynamik und Simulation an der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück

## Hinweise

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2014, Berlin, 19.–20. November 2014, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2226, S. 357–362).

Dieses Projekt wird durch den „Europäischen Fonds für regionale Entwicklung“ gefördert.

