

Modellbasierte Regelung eines elektrodynamischen Shakers zur Schwingungsprüfung

Autor*innen: Matthias Panny¹, Simon Eder², Franz-Josef Falkner¹

Institutionen: ¹MCI | Die Unternehmerische Hochschule, ²dibit Messtechnik GmbH

Abstract. Diese Arbeit befasst sich mit der Anwendung von modellprädiktiver Regelung auf elektrodynamischen Shakern für Schwingungsprüfungen mit Frequenzen bis zu 2 kHz. Herkömmliche, kommerzielle Regelsysteme berücksichtigen die Systemeigenschaften des Shakers meist nur unzureichend, was zu Problemen bei der Reproduktion von realen Schwingungsprofilen führt. Aus diesem Grund soll ein modellbasierter Ansatz entwickelt werden, der die Regelung beliebiger Schwingungsprofile in ausreichender Qualität zulässt. Ausgehend von einem Modell, welches mittels Lagrange'schen Gleichungen bestimmt wird, kann ein modellprädiktiver Regelalgorithmus in MATLAB/Simulink implementiert werden. Da die FPGA-basierte Zielhardware für den Regler ressourcenbeschränkt ist, muss das Prädiktionsmodell, welches ursprünglich in Form eines Zustandsraummodells vorliegt, durch eine Übertragungsfunktion ausgedrückt werden. Sowohl Modell als auch Regler werden in Simulation und Messung in einem Frequenzbereich bis 2 kHz validiert, auch unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten, wie sie beispielsweise durch Hinzufügen eines starren Testobjektes auftreten.

Keywords: Modellprädiktive Regelung, Shaker-Modellierung, Schwingungsprüfung

1 EINLEITUNG

Schwingungsprüfungen sind in der ingenieurtechnischen Praxis vielfach ein fixer Bestandteil der Validierung der Eigenschaften von Strukturen und Systemen jeglicher Art, um damit deren Zuverlässigkeit in vibrationsstarken Umgebungen zu gewährleisten. Hierfür werden die zu untersuchenden Prüflinge meist mit Hilfe von elektrodynamischen Schwingerregern mit Schwingungsprofilen bekannter, teils genormter, Form beaufschlagt. Tests mit diesen üblichen Schwingungsprofilen werden in den meisten kommerziellen Regelsystemen für elektrodynamische Shaker bereits implementiert. Werden jedoch während Testläufen oder im Modellversuch real auftretende Schwingungsprofile mittels Beschleunigungssensorik gemessen, so können diese vielfach nicht, beziehungsweise nur mit unzureichender Qualität, mit elektrodynamischen Shakern am Prüfling reproduziert werden. Grund hierfür ist die übliche Herangehensweise der kommerziellen Regelsysteme, bei welcher die Systemeigenschaften des Shakers nicht in umfangreichen Ausmaß für die Regelung verwendet werden. Außerdem sind üblicherweise individuelle Reglerstrukturen und Konfigurationen notwendig, um die Vielzahl an gewünschten Schwingungstrajektorien auszuregeln. Aus dieser Unzulänglichkeit heraus haben sich bereits diverse alternative Regelstrategien für elektrodynamische Shaker entwickelt [1]–[4].

Diese Arbeit zielt darauf ab einen modellbasierten Ansatz zu nutzen, um beliebige

Schwingungsprofile mit ausreichender Güte als Referenzanregung mit einem Shaker zu erzeugen, um beliebige realistische Schwingungstests durchführen zu können.

Die hierfür notwendige Modellbildung, sowie die Simulation und Implementierung des Reglers, wird in Kapitel 2 behandelt. Im dritten Kapitel werden die Ergebnisse, sowohl der Simulation als auch für den implementierten Regler, dargestellt, welche im vierten Kapitel diskutiert werden.

2 METHODEN

Die Ausgangslage für die Entwicklung einer modellbasierten Regelstrategie stellt die Modellbildung des Shakers (TIRA TV 5220/LS-120) dar. Hierbei sollen jegliche Systemdynamiken im, für die Strukturtechnik üblichen, Frequenzbereich von 1 Hz bis 2 kHz, mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden.

2.1 MODELLBILDUNG

Die Modellbildung elektrodynamischer Systeme mittels Lagrange'scher Gleichungen wird in [5] behandelt. Aus der Repräsentation durch diskrete elektrische und mechanische Elemente, wie sie in Abbildung 1 für das entwickelte Modell dargestellt ist, lassen sich Systemgleichungen in Verschiebungs- und Ladungsform ableiten. Standardmodelle für elektrodynamische Shaker, wie etwa aus [5], [6] oder [7] sind nicht dafür ausgelegt um im Kontext einer modellbasierten Reglerstrategie eingesetzt zu werden, da sie nicht in der Lage sind Systemdynamiken über den gesamten Frequenzbereich in ausreichender Güte wiederzugeben. Dies macht die Erweiterung des Standardmodells im elektrischen Teilsystem der Tauchspule um einen weiteren parallelgeschalteten R-L-Zweig notwendig [8].

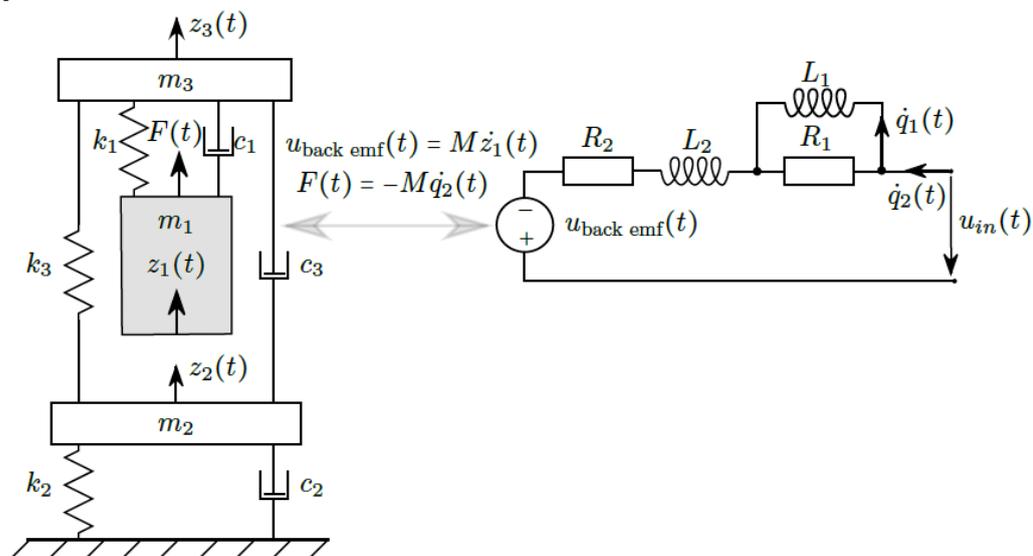


Abbildung 1. Entwickeltes Modell des elektrodynamischen Shakers, bestehende aus dem mechanischen Teilsystem (links) und dem elektrischen Teilsystem (rechts), sowie der Koppelung der beiden Teilsysteme.

Die in Abbildung 1 enthaltenen Systemparameter der beiden Teilsysteme:

- $m_{1-3}, k_{1-3}, c_{1-3}$: Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen des mechanischen Teilsystems
- R_{1-2}, L_{1-2} : Widerstände und Induktivitäten des elektrischen Teilsystems
- M : Koppelungsfaktor der beiden Teilsysteme

sowie die beiden Systemparameter des vorgeschalteten Leistungsverstärkers werden in weiterer Folge identifiziert um ein lineares Zustandsraummodell mit 9 Zuständen zu erhalten.

2.2 VALIDIERUNG

Die Validierung des entwickelten Modelles aus Kapitel 2.1 erfolgt durch Bestimmung der Übertragungsfunktion zwischen der Eingangsspannung des Leistungsverstärkers $u_c(t)$ und der leicht messbaren Beschleunigung der Shakerarmatur $\ddot{z}_3(t)$ am realen Shaker, beziehungsweise durch eine äquivalente Simulation am Zustandsraummodell. Abbildung 2 zeigt den Amplitudenfrequenzgang in einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 kHz, erzeugt durch eine Anregung mit bandbegrenztem weißem Rauschen.

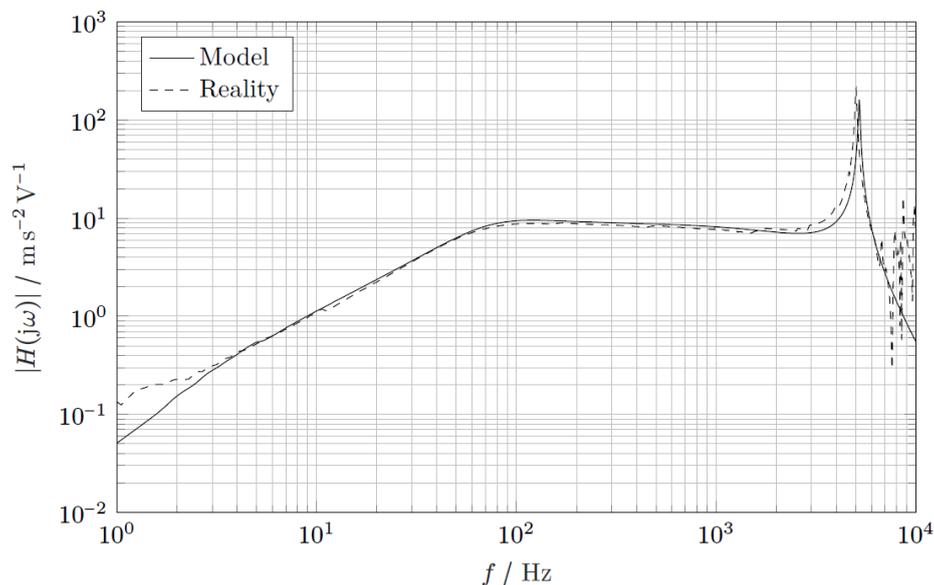


Abbildung 2. Vergleich des Amplitudenfrequenzgangs zwischen Modell (durchgezogen) und realem Shaker (gestrichelt) mit der Verstärkereingangsspannung als Systemeingang und der Beschleunigung der Shakerarmatur als Systemausgang.

Hier zeigt sich die gewünschte Modellgüte im Frequenzbereich bis 2 kHz, weshalb das erweiterte Modell aus Abbildung 1 als hinreichend für den Entwurf eines modellbasierten Reglers angesehen wird.

2.3 REGLERENTWURF & SIMULATION

Der Oberbegriff der modellbasierten Regelung deckte eine Vielzahl an möglichen Regelstrategien ab. Da im konkreten Fall das Ausregeln von Trajektorien mit dynamischem Verhalten bis 2 kHz in besonderem Fokus steht, wird auf die Ansätze der modellprädiktiven Regelung zurückgegriffen [9], [10]. Um die Implementierbarkeit auf einem FPGA-basierten Reglersystem (NI cRIO 9040) zu gewährleisten, muss dies bereits beim Reglerentwurf berücksichtigt werden. Diesen Einschränkungen entsprechend wird eine modellprädiktive Regelung in Zustandsraumformulierung gewählt. Die dazugehörige Kostenfunktion wird in Abhängigkeit der Abweichung von der Solltrajektorie definiert und ohne zusätzliche Nebenbedingungen formuliert. Dies erlaubt das Bestimmen einer analytischen Lösung für die optimale Stellgröße, ohne einen iterativen Lösungsprozess [10], welche eine Implementierung mit der gewünschten Regelfrequenz von 20 kHz auf der ausgewählten Zielhardware ermöglicht. Der resultierende modellprädiktive Regler in zeitdiskreter Form wird in MATLAB/Simulink simuliert, wodurch erste Aussagen über die zu erwartenden Regelgüte ermöglicht werden.

2.4 REGLERIMPLEMENTIERUNG

Die Reglerimplementierung auf der NI cRIO 9040 Zielhardware erfolgt mittels automatischer Generierung des VHDL-Codes aus dem Simulink-Modell des Reglers. Dies erfordert eine Repräsentierung aller Größen, Signal und Operationen des Reglers, und des zugrundeliegenden Zustandsraummodells des Shakers, die die Anzahl an zur Verfügung stehenden Slices des Kintex-7 FPGAs nicht überschreiten darf. Das erstellte Systemmodell aus Kapitel 2.1 lässt dies, aufgrund seiner notwendigen Größe zur Abbildung des gewünschten Systemverhaltens, nicht zu. Entsprechend wird aus dem Zustandsraummodell des Shakers eine SISO-Übertragungsfunktion, analog zu Kapitel 2.2, abgeleitet, bei welcher die Beschleunigung der Shakerarmatur die Ausgangsgröße, und somit die Regelgröße darstellt. Diese Übertragungsfunktion bildet die Systemdynamiken noch hinreichend genau für die Implementierung der modellprädiktiven Regelung ab, jedoch geht jegliche Information über nicht direkt gemessene Systemzustände verloren.

3 ERGEBNISSE

Es kann nun sowohl in der Simulation, als auch am implementierten Regler das Systemverhalten der geregelten Strecke bei unterschiedlichen Trajektorien untersucht werden. Weiters wird das Reglerverhalten bei veränderten Systemparametern untersucht, um zu analysieren in welchem Maße die Regelgüte aufgrund solcher Unsicherheiten sinkt. Im spezifischen Fall wird insbesondere die Masse der Shakerarmatur künstlich erhöht, was einem Aufbringen eines starren Testobjektes entspricht. Hier lässt sich zeigen, dass die Regelgüte verhältnismäßig stärker abnimmt, je näher der elektrodynamische Shaker an seinen elektrischen bzw. mechanischen Limits betrieben wird. Solange das System in niedrigeren Leistungsbereichen betrieben wird, lässt sich

keine nennenswerte Verschlechterung feststellen.

Abbildung 3 zeigt jeweils das Regelverhalten bei einer Sinussweep-Trajektorie (oben) und bei bandbegrenztem weißem Rauschen (unten) mit einer zusätzlichen Masse von ca. 1 kg auf der Shakerarmatur in den unteren Leistungsbereichen. Hier lässt sich erkennen, dass beide Arten von Trajektorien ausgeregelt werden können.

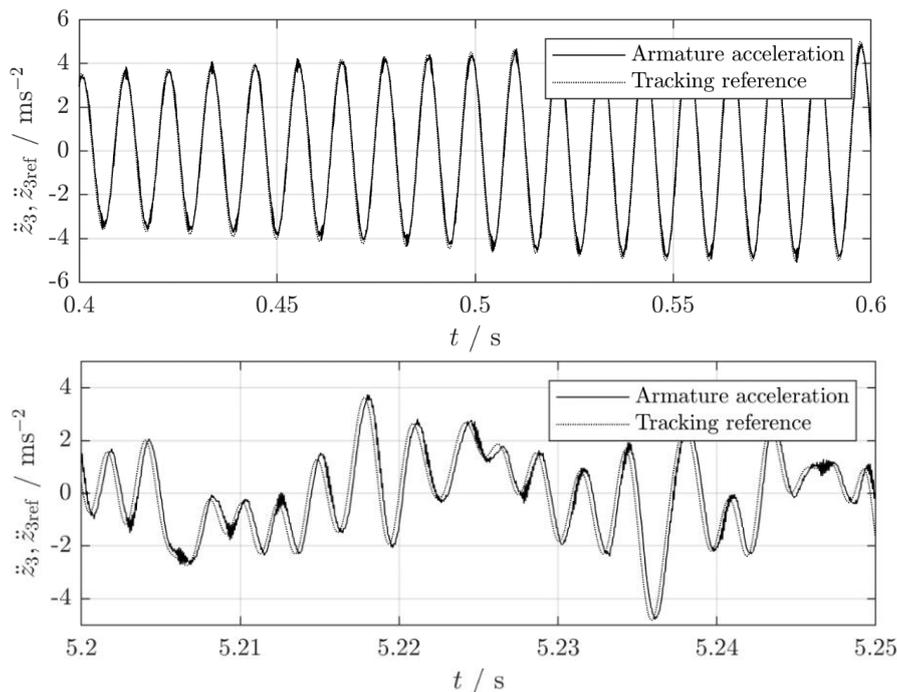


Abbildung 3. Regelverhalten für Beschleunigungstrajektorien der Shakerarmatur gezeigt durch die auszuregelnde Referenztrajektorie (punktirt) und die tatsächliche Trajektorie (durchgezogen). Vergleich für zwei Arten von Trajektorien: Sinussweep (oben) und bandbegrenztes weißes Rauschen (unten).

4 CONCLUSIO

Es lässt sich zeigen, dass modellprädiktive Regler dazu geeignet sind übliche Trajektorien, wie sie im Kontext der Schwingungsprüfung mit elektrodynamischen Shakern auftreten, mit Dynamiken bis 2 kHz auszuregeln. Dies verlangt, unabhängig von der Form der Trajektorie, keinerlei Änderungen der Reglerimplementierung oder Reglerparameter. In der präsentierten Umsetzung wird dies, aufgrund der einfachen Messbarkeit, für Beschleunigungstrajektorien gezeigt, jedoch erlaubt die modellprädiktive Regelung die Formulierung der zu regelnden Trajektorien in jedem der Zustände. Ob sich dieser Ansatz für die Anwendung auf einer Regelstrecke, bestehend aus dem elektrodynamischen Shaker und dem Prüfobjekt, verallgemeinern lässt, benötigt weitere Untersuchungen. Nachfolgende Arbeiten sollen sowohl dies, als auch die Einsetzbarkeit als inneren Teil einer kaskadierten Regelung beleuchten.

5 REFERENZEN

- [1] K. P. S. Rana, "Fuzzy control of an electrodynamic shaker for automotive and aerospace vibration testing," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 9. Elsevier BV, pp. 11335–11346, 2011.
- [2] Y. Uchiyama und M. Fujita, "Robust control of electrodynamic shaker with disturbance-force compensator," *2007 European Control Conference (ECC)*. IEEE, 2007
- [3] Y. Uchiyama, T. Hatanaka, und M. Fujita, "Preview Control of an Electrodynamic Shaker using Explicit Receding Horizon Control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1. Elsevier BV, pp. 5783–5788, 2011.
- [4] V. Pawlik, P. Steinbauer, J. Karliček, P. Denk, K. Kraus, und I. Bukovsk, "Control of the electrodynamic shaker with additional force sources," *Proceedings of Computational Mechanics 2021*, pp. 183-186, 2021.
- [5] A. Preumont, *Mechatronics: Dynamics of electromechanical and piezoelectric systems*, ser. Solid mechanics and its applications. Dordrecht: Springer, 2006, vol. 136.
- [6] J. Martino und K. Harri, "Two-port modeling and simulation of an electrodynamic shaker for virtual shaker testing applications," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 460, p. 114835, 2019.
- [7] G. Lang und D. Snyder, "Understanding the physics of electrodynamic shaker performance," *S V Sound and Vibration*, vol. 35, pp. 24–33, 2001.
- [8] S. Eder, *Model Predictive Control of an Electrodynamic Shaker*, M.S. Thesis, Dept. of Mech., MCI, Innsbruck 2022
- [9] J. M. Maciejowski, *Predictive control: With constraints*, 1st ed. Harlow and Munich: Prentice Hall, 2002.
- [10] E. F. Camacho, *Model Predictive control*, second edition ed., ser. SpringerLink Bücher. London: Springer, 2007.