

# Gegenüberstellung und Validierung unterschiedlicher Arten der Anregung zur Modalanalyse

Daniel Herfert<sup>1</sup>

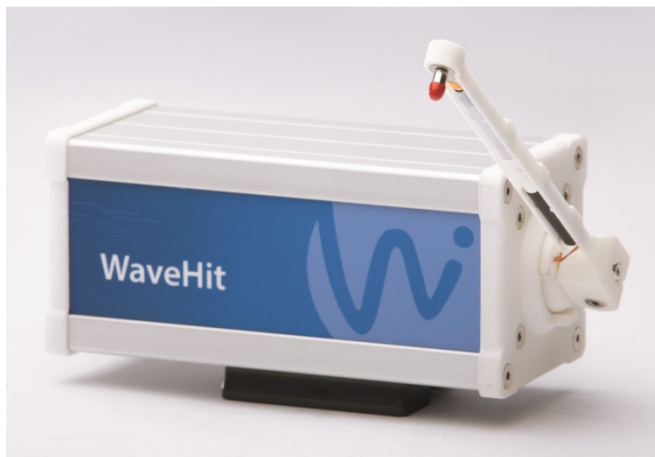
<sup>1</sup> GFaI e.V., 12489 Berlin, E-Mail: herfert@gfai.de

## Einleitung

Im Rahmen der klassischen bzw. experimentellen Modalanalyse spielt die Art der Anregung eine besondere Bedeutung. Die beiden meist verwendeten Arten der Anregung sind die manuelle Modalhammermethode und die elektromagnetische Shakeranregung. In einigen Anwendungen wird auf die Anregung mittels Piezoaktoren und Lautsprecher zurückgegriffen. Auf diese Anregearten wird in dieser Ausarbeitung aufgrund des seltenen Einsatzes nicht eingegangen. Seit einiger Zeit gibt es aber eine neuartige innovative Methode zur Anregung, die die Vorteile der klassischen Anregungsarten vereint. Hierbei handelt es sich um einen elektronisch steuerbaren Modalhammer.

Mit dem elektronisch steuerbaren Modalhammer „WaveHit“ sind reproduzierbare und hochpräzise „One-Hit“-Anregungen mit einstellbarer Kraftamplitude möglich. Dieser Modalhammer bietet neuartige und automatisierbare Möglichkeiten zur Durchführung von experimentellen Modalanalysen zum Model Updating eines strukturdynamischen FEA-Modelles und im Bereich der Wartung und Qualitätssicherung mittels Schallsensoren.

Das „WaveHit-Gesamtsystem“ bestehend aus einer Softwareoberfläche (Abbildung 2) und dem Hammer (Abbildung 1) wurde bewusst intuitiv und einfach gehalten.



**Abbildung 1:** Abbildung des elektronisch steuerbaren Modalhammers „WaveHit“.

Der Hammer wird über einen USB-Anschluss an ein windowsfähiges Endgerät (PC oder Tablet) angeschlossen und ist dann mittels der mitgelieferten Softwareoberfläche schnell und einfach bedienbar. Über ein BNC-Kabel wird der im Hammer integrierte ICP-Kraftsensor an einen ICP-Anschluss eines beliebigen Datenrecorders angeschlossen. Sensorik (BNC-Buchse) und Motorik (USB-Anschluss) sind galvanisch vollständig voneinander getrennt.

Durch die Möglichkeit zum Abspeichern der Hammereinstellungen im Modalhammer, können die Hammerschläge über die mitgelieferte Software aber auch manuell per Taster bzw. durch ein Fremdgerät mit den jeweiligen Speichereinstellungen (Kraftamplitude, Ausholwinkel u.a.) ausgeführt werden. Mit der Software kann die Anzahl der Schlagwiederholungen und die Pause zwischen den Schlägen festgelegt werden.



**Abbildung 2:** Softwareoberfläche WaveHit zur Bedienung des Modalhammers

## Versuchsaufbau

Zur Gegenüberstellung und Validierung der drei Arten der Anregung (Shaker, manueller Modalhammer, elektronisch steuerbarer Modalhammer) wurden drei separate Scans mit dem PSV-500 3D Scanning Vibrometer [2] der Firma Polytec GmbH durchgeführt. Das Versuchsobjekt war eine über 100 Jahre alte Türglocke. Für alle drei Anregungsarten wurden die identischen Messeinstellungen mit 115 Messpunkten und einer Abtastrate von 50 kHz ausgewählt.

Zur Shakeranregung wurde der Miniaturshaker TMS-2025E [3] der Firma PCB Synotech GmbH eingesetzt. Für die manuelle Modalhammeranregung wurde der Miniaturhammer 086E80 [4], ebenfalls von der Firma PCB Synotech GmbH, verwendet. Wie bereits erwähnt wurde als dritte Art der Anregung der elektronisch steuerbare Modalhammer „WaveHit“ eingesetzt, der den Miniaturhammer 086E80 [4] verbaut hat.

Im Unterschied zur Shakeranregung muss bei der Anregung mittels Modalhammer keine direkte Ankopplung am Versuchsobjekt erfolgen. Hierdurch wird keine zusätzliche Masse auf das Versuchsobjekt übertragen. Daher wurde im Falle der Modalhammer die Glocke manuell bzw. elektronisch reproduzierbar direkt im oberen Bereich der Glocke angeregt (siehe Abbildung 3).



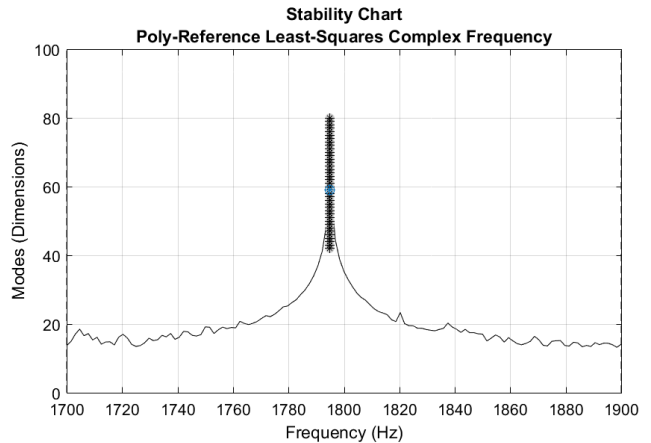
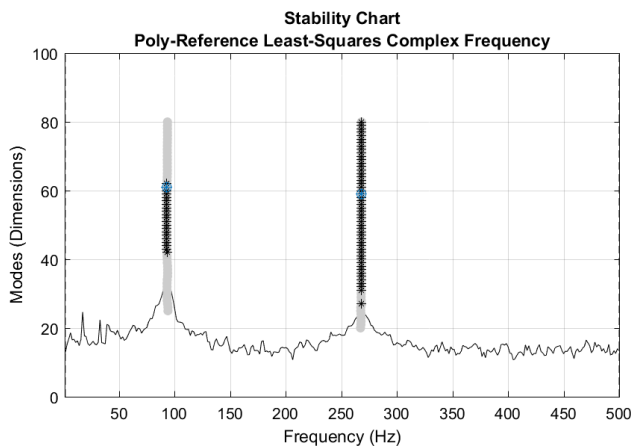
**Abbildung 3:** Versuchsaufbau zur modalen Vermessung einer 100 Jahre alten Türglocke mit dem PSV-500 3D Scanning System der Firma Polytec GmbH

Eine direkte Anbringung des Shakers an der Glocke mittels „Stinger“, veränderte die Schwingungen der Glocke zu stark. Daher konnte die Glocke nur indirekt über einen Schütteltisch angeregt werden. Der Tisch wurde mittels eines Chirp-Signales über den Shaker angeregt.

### Messungen

Im Anschluss der Messung wurde für jeden Messpunkt eine Übertragungsfunktion berechnet.

Die Analyse der Übertragungsfunktionen wurde mit der Software „WaveImage Modal“ [1] durchgeführt. „WaveImage Modal“ ist eine Software zur Bestimmung von Schwingungseigenschaften mittels bekannter Verfahren der Experimentellen und Operationalen Modalanalyse und verfügt über eine einzigartige Kombination von Algorithmen der Modalanalyse. Die Messdaten zur dynamischen Strukturanalyse können mittels Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Wegaufnehmern verarbeitet werden. Für die Analyse von rotierenden Strukturen steht darüber hinaus die Ordnungsanalyse zur Verfügung. Neben der messdatenbasierten Modalanalyse bietet die Software auch eine Finite-Elemente-Analyse-Komponente zur Simulation der Schwingungseigenschaften anhand der Strukturgeometrie und der Materialeigenschaften.

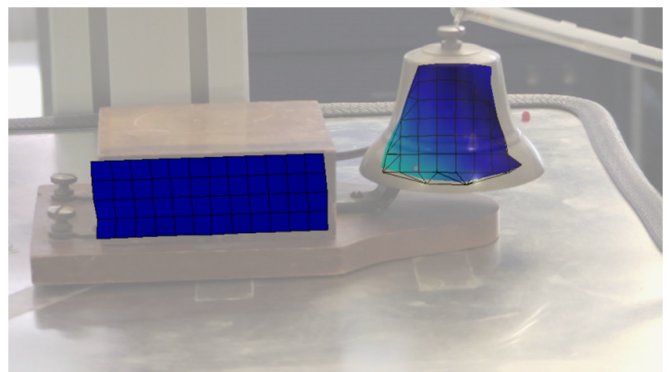


**Abbildung 4:** Ergebnisse des Poly-LSCF Algorithmuses für den Frequenzbereich 0 – 500 Hz (oben) und 1700-1900 Hz (unten) bei Anregung mittels „WaveHit“.

Der Ort der Anregung an der Glocke hat einen großen Einfluss auf die Anzahl der Glockenmoden. Unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Messungen an unterschiedlichen Stellen der Glocke konnte festgestellt werden, dass es Anregungsstellen gibt, an denen bestimmte Moden nicht angeregt werden. Nahe der Glockenmündung lassen sich die meisten Moden anregen. Wird die Glocke hingegen in der oberen Hälfte angeregt treten viele Moden nicht auf. In dieser Region werden fast ausschließlich der Ton der Glocke und dessen Harmonische angeregt.

Zur Gegenüberstellung der Anregungsarten werden in dieser Ausarbeitung aus Platzgründen nur die Moden der Glocke angezeigt (siehe Abbildung 5, 6, 7), die über alle Messungen berechnet wurden. Auch bei den anderen Moden konnten bei der Anregung mittels des elektronisch steuerbaren Modalhammers die „klarsten“ Stabilitätsdiagramme bzw. Übertragungsfunktionen berechnet werden.

Zur Bestimmung der Moden wurde eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Hierfür wurde der „Poly Reference Least Squares Complex Frequency“ Algorithmus aus der Software „WaveImage Modal“ genutzt. Hierbei handelt es sich um einen orderbasierten Algorithmus zur Modalanalyse, der mittels der Auswertung eines Stabilitätsdiagrammes die Moden bestimmt.



**Abbildung 5:** 1. Mode bei 92,2 Hz bei Anregung mittels „WaveHit“..

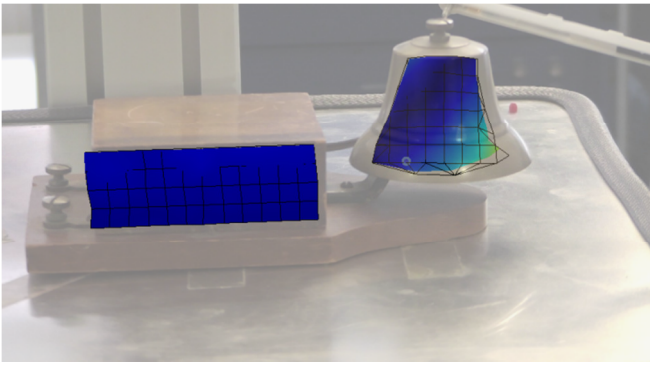


Abbildung 6: 2. Mode bei 267,2 Hz bei Anregung mittels „WaveHit“.

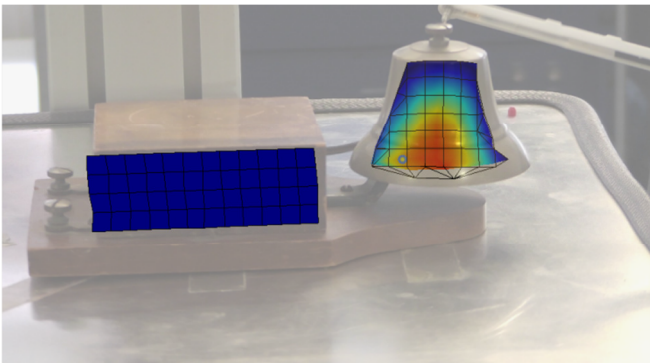


Abbildung 7: 3. Mode bei 1795,32 Hz bei Anregung mittels „WaveHit“.

Bei der Anregung mittels des elektronisch steuerbaren Modalhammers an der oberen Hälfte der Glocke konnten insgesamt drei Moden bei 92,2, 267,2 und 1795,32 Hz (siehe Abbildung 4) und viele Harmonische von der dritten Mode gefunden werden. Bei der Messung mittels eines Vibrometers werden die 115 Messpunkte nacheinander optisch abgetastet. Dafür muss eine reproduzierbare Anregung vorliegen. Diese Voraussetzung konnte mit dem manuellen Modalhammer nicht vollständig erfüllt werden. Sowohl der Ort, die Kraft als auch der Anschlagwinkel der Anregung können durch die menschliche Hand nur annähernd reproduzierbar ausgeführt werden.

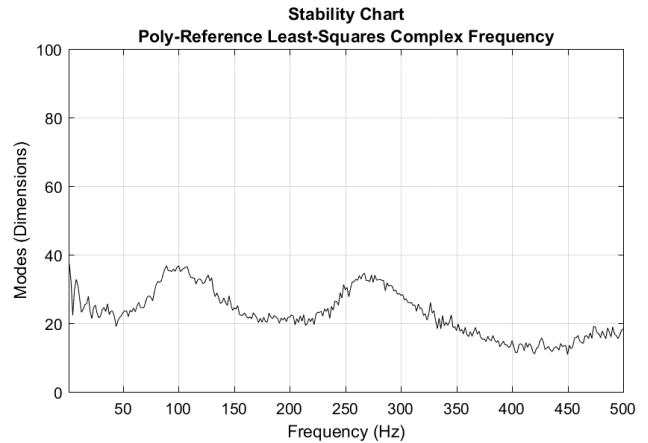
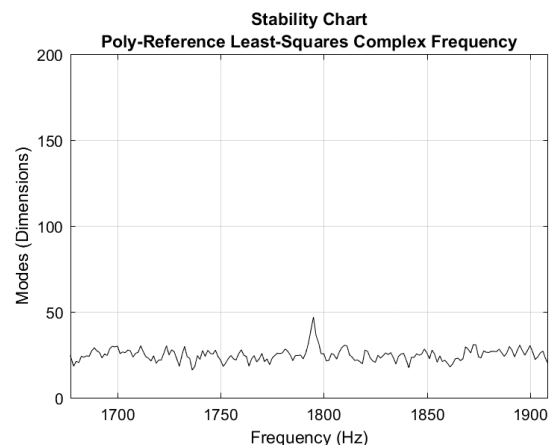
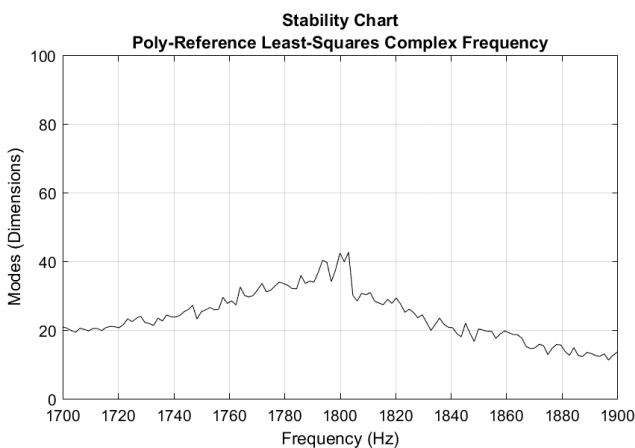


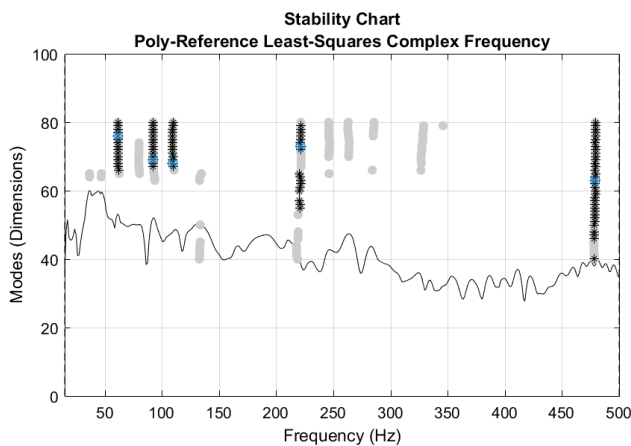
Abbildung 8: Ergebnisse des Poly-LSCF Algorithmus für den Frequenzbereich 0 – 500 Hz (oben) und 1700-1900 Hz (unten) bei Anregung mittels manuellem Modalhammer.

Daher konnten bei dieser Form der Anregung keine Moden (siehe Abbildung 8) mittels des eingesetzten Algorithmus zur experimentellen Modalanalyse ermittelt werden. Dieses Resultat ist ebenfalls in den reinen Übertragungsfunktionen ersichtlich, da dort ebenfalls keine signifikanten Moden zu sehen sind.

Da mittels der Shakeranregung indirekt über den Tisch angeregt wurde, konnten zusätzlich auch Eigenschwingungsformen vom Rütteltisch im tieffrequenten Bereich gefunden werden. Die anderen gefundenen Moden im Frequenzbereich zwischen 0 bis 500 Hz korrespondieren mit den Moden, die mittels des elektronisch steuerbaren Modalhammers (bei Anregung an der Glockenmündung) erzeugt wurden. Die berechneten Stabilitätsdiagramme bzw. die generierten Übertragungsfunktionen waren aber nicht so „klar“ wie bei der Anregung mittels elektronisch steuerbaren Modalhammer (siehe Abbildung 9).

Im Unterschied zur Anregung mittels des elektronisch steuerbaren Modalhammers konnte die dominante Mode bei 1795,32 Hz durch den eingesetzten Algorithmus zur experimentellen Modalanalyse nicht berechnet werden. Dies könnte mit dem Ort der Anregung und der Konstruktion der Glocke zusammenhängen.





**Abbildung 9:** Ergebnisse des Poly-LSCF Algorithmus für den Frequenzbereich 0 – 500 Hz bei Anregung mittels Shaker.

## Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mittels des elektronisch steuerbaren Modalhammers die besten Ergebnisse erzielt werden konnten. Diese Erkenntnis konnte auch bei anderen Messobjekten, die mittels des PSV-500 3D Scanning Vibrometer vermessen wurden, erzielt werden. Somit ist diese reproduzierbare Form der Anregung für die sequentielle Messung des Vibrometers sehr geeignet. Aber auch für die Messung mit elektromechanischen Sensoren ist diese Form der Anregung sehr empfehlenswert.

Neben der bereits erwähnten reproduzierbaren Anregung ermöglicht diese Form der Anregung eine regelbare Krafteinleitung bis 220 N (siehe Abbildung 1 „WaveHit-220“) bei der kleinen Ausführung und bis 2200 N („WaveHit-2200“) in der großen Ausführung. Somit sind Linearitätsuntersuchungen von kleinen und großen Strukturen sehr gut möglich.

Weiterhin können mittels dieser Technik reproduzierbare „One-Hit“ Impulse erzeugt werden.

Zur schnellen und einfachen Durchführung von Messungen bzw. zur variablen Anbringung und Positionierung des Hammers wird der Hammer mittels eines Statives neben dem Messobjekt platziert. Der Aufbau ist dabei völlig variabel, da der Hammer in alle Raumrichtungen (360 Grad) schlagen kann. Durch sein automatisches Anfahren sucht sich der Hammer automatisch den Gegenstand zur Anregung und regt dann mit der eingestellten Kraft die jeweilige Struktur an.

Zusätzliche Hardware zur Inbetriebnahme von WaveHit ist nicht notwendig.

Ein weiterer Nachteil der elektromagnetischen Shakermessung gegenüber den Hammermessungen ist die direkte Anbringung an der Struktur und der dadurch entstehende zusätzliche Masseeintrag.

Abschließend ist in Tabelle 1 eine Zusammenfassung aller Vor- und Nachteile der einzelnen Anregungsarten zusammengestellt.

**Tabelle 1:** Vergleich der Vor- und Nachteile der drei unterschiedlichen Anregungsarten

	Manueller Modalhammer	Shaker	WaveHit
Schnelle und einfache Durchführung	X		X
Keine aufwendige Anbringung an der Struktur notwendig	X		X
Reproduzierbarkeit		X	X
Keine Double Hits	~		X
Keine zusätzliche Hardware zum Betrieb notwendig	X		X
Kraft skalierbar		X	X
Frequenzbereich der Anregung	>20 kHz*	6 kHz**	>20 kHz*
Mehrfachanregung		X	

\*Werte sind abhängig vom Testobjekt

\*\* bei vergleichbarem Kraftmessbereich mit Modalhammer (220 N)

## Literatur

- [1] Homepage der Software WaveImage Modal,  
URL:<http://wave-image.com/>
- [2] Produktseite des PSV-500-3D Scanning Vibrometer der Firma Polytec GmbH  
URL:<https://www.polytec.com/de/vibrometrie/produkte/full-field-vibrometer/psv-500-3d-scanning-vibrometer/>
- [3] Produktseite des Miniaturshaker TMS-2025E der Firma PCB Synotech GmbH  
URL:[https://www.synotech.de/produkte/datenblatt/?untergruppe=mod\\_shaker&h=TMS&m=2025E](https://www.synotech.de/produkte/datenblatt/?untergruppe=mod_shaker&h=TMS&m=2025E)
- [4] Produktseite des Miniaturhammer 086E80 der Firma PCB Synotech GmbH  
URL:[https://www.synotech.de/produkte/datenblatt/?untergruppe=mod\\_haemmer&h=PCB&m=086E80](https://www.synotech.de/produkte/datenblatt/?untergruppe=mod_haemmer&h=PCB&m=086E80)