

Bildbasierte Schwingungsanalyse: Präzision und Grenzen im Vergleich zu klassischen Methoden

Dr.-Ing. **Daniel Herfert**, GFAI e.V., 12489 Berlin; Dr.-Ing. **Carsten Schedlinski**, ICS Engineering GmbH, 63303 Dreieich; Dipl. Math. **Jacob Krause**, GFAI e.V., 12489 Berlin; **Maik Gollnick**, GFAI e.V., 12489 Berlin; **Kai Henning**, GFAI e.V., 12489 Berlin

1. Einleitung

Die bildbasierte Schwingungsanalyse mittels optischen Flusses bietet eine vielversprechende Alternative bzw. Ergänzung zu klassischen Messverfahren wie der Laser-Doppler-Vibrometrie oder der Nutzung von Beschleunigungsaufnehmern. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Grenzen dieses Ansatzes speziell mit Fokus auf die experimentelle Modalanalyse zu ermitteln und ihn mit etablierten Methoden zu vergleichen. Dabei werden verschiedene Einflussfaktoren betrachtet, die die Genauigkeit der Messungen beeinflussen können.

Der Untersuchungsaufbau umfasst mehrere Stufen: beginnend mit einer Kalibrierungs-Referenzmessung wird die Methode unter optimalen Bedingungen validiert. Anschließend werden mögliche Störgrößen, wie Reflexionen, Kamerabewegungen oder Beleuchtungsveränderungen, systematisch aufgezeigt. Darüber hinaus erfolgt die Untersuchung einer realen Struktur mittlerer Komplexität, um die Leistungsfähigkeit des optischen Flussverfahrens in realistischen Szenarien zu bewerten. Abschließend wird ein Vergleich mit Simulationsergebnissen und Messungen mittels Beschleunigungsaufnehmern sowie Laser-Doppler-Vibrometer durchgeführt, um die Genauigkeit und Anwendbarkeit dieser Methode weiter zu charakterisieren.

2. Bildbasierte Schwingungsanalyse

Die bildbasierte Schwingungsanalyse nutzt Videodaten, um Schwingungen einer Struktur zu erfassen. Eine Kamera nimmt die Bewegung auf, die Auswertung erfolgt softwarebasiert über den optischen Fluss [1], ein Verfahren zur Bestimmung kleinster Helligkeitsverschiebungen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern. Dabei wird eine sehr hohe Subpixelgenauigkeit erreicht, sodass auch Bewegungen deutlich unterhalb der Pixelgröße messbar sind.

Für das Verfahren benötigt werden eine Kamera mit geeignetem Objektiv, eine stabile Beleuchtung (ggf. Kontrastmuster auf der Oberfläche) sowie eine Auswertesoftware auf einem

PC. Die erreichbare räumliche Auflösung ergibt sich direkt aus der Kameraauflösung und der Abbildungsskala (Pixelgröße im Messbereich). Die zeitliche Auflösung wird durch die Bildrate bestimmt, sodass zum heutigen Zeitpunkt mit Hochgeschwindigkeitskameras Abtastraten von einigen Kilohertz möglich sind.

Der typische Ablauf einer bildbasierte Schwingungsanalyse gliedert sich wie folgt:

1. Aufzeichnung einer Bildsequenz während der Anregung der Struktur
2. Berechnung der Bewegungsfelder (optischer Fluss) zwischen den Einzelbildern
3. Extraktion zeitlicher Signale (Geschwindigkeit) an beliebigen Bildpunkten
4. Analyse im Frequenzbereich (z. B. Betriebsschwingformen, Modalanalyse) oder im Zeitbereich (z. B. Betriebsschwingformen, Geschwindigkeits-Zeitdaten)

Um die aus dem optischen Fluss gewonnenen Pixelbewegungen in reale Größen (z. B. m oder m/s) zu überführen, ist eine Skalierung mit bekannten Abmessungen im Bild erforderlich.

Bewegungen senkrecht zur Kamera (Out-of-Plane) können mit einer einzelnen Kamera nicht direkt gemessen werden. Durch eine gezielte Schrägstellung der Kamera lassen sich jedoch auch Anteile der Out-of-Plane-Bewegung in der Bildprojektion erfassen. Für eine vollständige und amplitudengenaue Messung der Out-of-Plane-Komponenten ist der Einsatz von zwei Kameras (Stereo) oder die Berücksichtigung eines absoluten Tiefenbildes erforderlich.

3. Kalibriermessung

Zur Bewertung der Präzision der aus dem optischen Fluss extrahierten Frequenzen und Amplituden wurden experimentelle Validierungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Für die Kalibriermessungen diente dabei ein Schwingregelsystem VCS 401 der Firma Spektra, mit dem definierte Sinusschwingungen erzeugt werden können.

Ein hexagonales Prisma mit passendem Schraubgewinde zur Schwingereinheit wurde als Prüfkörper verwendet. Die Testaufnahmen erfolgten unter senkrechter Messung (ausschließlich In-Plane Messung) mit nahezu keinen Lichtreflexionen und Eigenbewegungen der Kamera. Zur Minimierung von Störschwingungen wurde die Hochgeschwindigkeitskamera auf einem Holzstativ montiert, das durch seine dämpfenden Eigenschaften unerwünschte Einflüsse auf die Messung reduzierte (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Messaufbau zur Kalibrierung

Für jede Messung wurde am Schwingerregersystem eine Sinusschwingung mit definierter Frequenz von 100Hz und einer Auslenkung von 0,1mm eingestellt. Nach dem Einregeln erfolgte eine Aufnahme von 1000 Bildern. Als Referenzsignal diente der im Schwingerregger verbaute Beschleunigungsaufnehmer, um die Genauigkeit der optischen Schwingungsanalyse zu bewerten.

Die Ergebnisse dieser Messung waren sehr vielversprechend, insbesondere an den optimal ausgewählten Sensorpunkten, die nach einem Verfahren zur Identifikation signifikanter Bildpunkte (siehe Abbildung 2) bestimmt wurden.

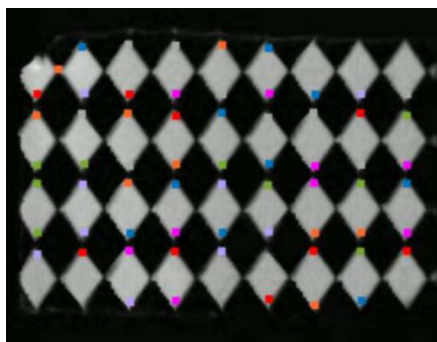


Abbildung 2: Optimal ausgewählte Bildpunkte (63) werden auf dem Bild farbig markiert.

Dieses Verfahren basiert auf der Auswahl von Bildpunkten mit starken Helligkeitsunterschieden in ihrer Umgebung, die sich besonders gut zur Bewegungsverfolgung eignen. Alle diese Bildpunkte konnten die eingestellte Frequenz des Schwingerregers präzise erfassen (siehe Abbildung 3). Zudem erreichte der Median aller besten Messpunkte exakt die eingestellte Amplitude des Schwingerregers.

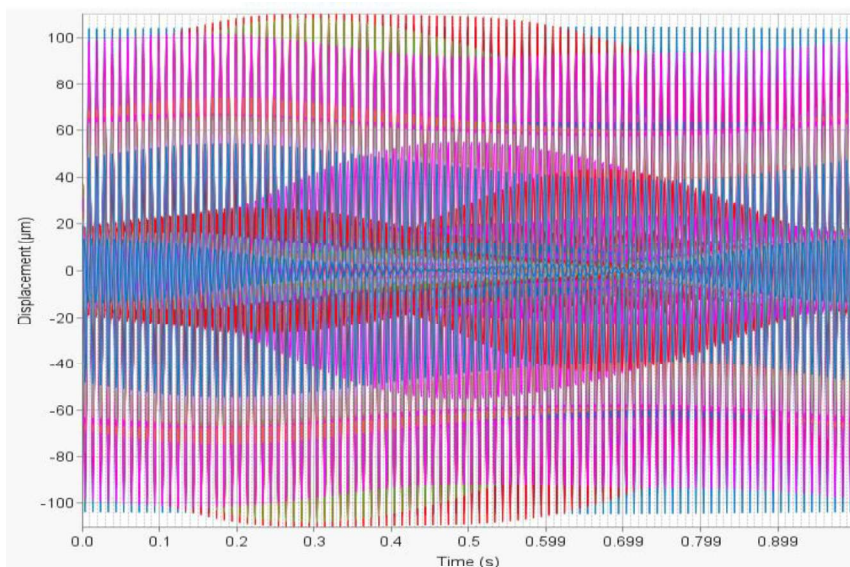


Abbildung 3: Anregung Sinus mit 100Hz und 0,1mm Amplitude (63 optische Messpunkte), Bandpassgefiltert bei 100 Hz

In Abbildung 4 sind die Amplitudenwerte aller optimalen Messpunkte statistisch dargestellt.

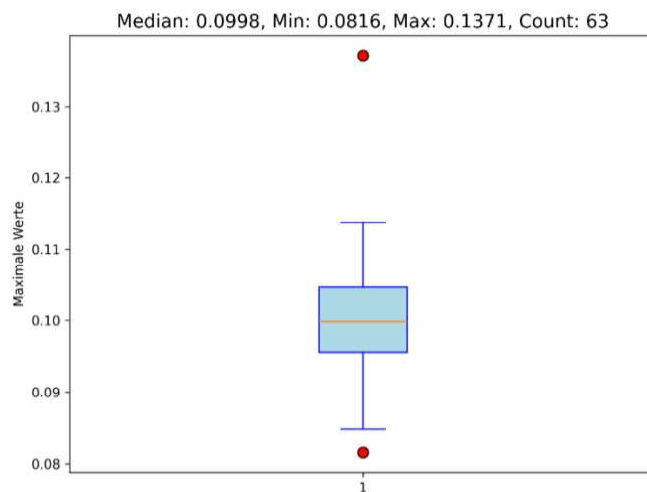


Abbildung 4: Sinus mit 100Hz und 0,1mm Amplitude (63 optische Messpunkte)

4. Störgrößen

Ein zentraler Unterschied zwischen der bildbasierten Schwingungsanalyse und z.B. der klassischen 1D-Laser-Doppler-Vibrometrie liegt im jeweiligen Messprinzip. Während das Laser-Doppler-Vibrometer bei senkrechter Messung Out-of-Plane-Schwingungen erfasst, misst die Kamera mit dem optischen Flussverfahren in der Bildebene (In-Plane). Diese unterschiedliche Erfassungsrichtung kann zu systematischen Abweichungen führen,

insbesondere wenn sich die gemessenen Bewegungen nicht eindeutig einer dieser Komponenten zuordnen lassen. Zusätzlich beeinflussen verschiedene Störgrößen [2] die Messgenauigkeit:

- **Lichtreflexionen:** variierende Reflexionen auf der Oberfläche des Prüfkörpers können die Bildpunkte verfälschen und zu Fehlinterpretationen der Bewegungen führen.
- **Eigenbewegungen der Kamera:** auch kleinste Vibrationen oder Bewegungen der Kamera können die Messung beeinflussen und zu Ungenauigkeiten führen.
- **Qualität der Bildmerkmale:** die Genauigkeit der optischen Flussmessungen hängt stark von der Qualität der verwendeten Bildmerkmale ab. Bildpunkte mit schwachem Kontrast oder unscharfen Kanten sind weniger zuverlässig und können zu Fehlern in der Bewegungserfassung führen. Um die Qualität der Bildmerkmale zu verbessern, kann eine Folierung, das Verwenden einzelner 3D-Marker oder die Verwendung texturierter Sprays auf der Oberfläche des Prüfkörpers eingesetzt werden. Diese Methoden erhöhen den Kontrast und verbessern die Detektion der Bewegungen. Im Vergleich zu anderen bildbasierten Algorithmen spielt die Art des Musters eine weniger kritische Rolle für die Leistung des optischen Flusses, da der Algorithmus gut mit unterschiedlichen Texturen, auch mit real schon existierenden, umgehen kann.
- **Zu niedrige Abtastrate bzw. Bildrate:** wie bei klassischen Sensoren gilt auch für die bildbasierte Schwingungsanalyse, dass die Bildrate mindestens 2-mal (besser 2,5-mal) so hoch wie die höchste Frequenz der gemessenen Schwingung sein sollte, um eine genaue Erfassung der Bewegungen zu ermöglichen. Eine zu niedrige Abtastrate kann zu Aliasingeffekten und Ungenauigkeiten führen.

Einige der aufgezählten Störgrößen wie Eigenbewegung des Sensors, Aliasingeffekte oder Unterabtastung, Reflexions- und Projektionseffekte gelten generell für optische messende Sensoren, bspw. auch für das Laser-Doppler-Vibrometer.

5. Vergleich mit Simulation und klassischen Messmethoden

Messobjekt, FE-Modell und Testplanung

Abbildung 5 zeigt eine Abdeckplatte mittlerer Komplexität, die im Folgenden untersucht wird, um die grundlegenden Phänomene anhand eines realen Beispiels zu veranschaulichen. Für diese Abdeckplatte wurde zunächst ein FE-Modell mit Volumenelementen erstellt (Abbildung 6), das unter frei/freien Randbedingungen („free/free“) fünf elastische Eigenformen bis 2 kHz liefert (Tabelle 1 zeigt die zugehörigen Eigenfrequenzen).



Abbildung 5: Abdeckplatte ($\approx 860 \text{ g}$, $\approx 305 \times 165 \times 33 \text{ mm}$)

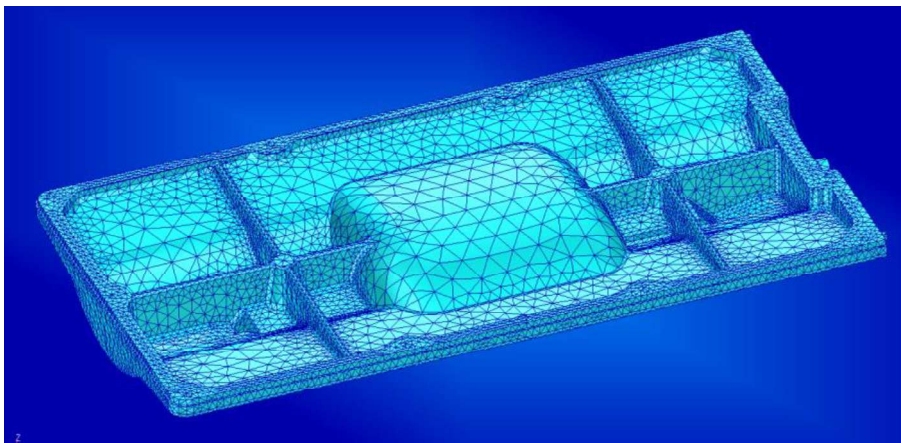


Abbildung 6: Übersicht des FE-Modells

Tabelle 1: FEA-Eigenfrequenzen aus der analytischen Modalanalyse bis 2kHz

Nr.	FEA in Hz
1	458,4
2	573,6
3	1074,2
4	1374,0
5	1787,6

Anschließend wurde das FE-Modell für eine Testplanung verwendet (siehe hierzu auch [4]), wobei die ICS-hauseigene ICS.sysval Software (siehe [5]) Anwendung fand. Insbesondere wurde ein reduziertes Testmodell mit 25 Messpunkten abgeleitet (Abbildung 7), welches die Eigenformen bis 2 kHz räumlich hinreichend genau repräsentiert, sofern Messungen alleine senkrecht zur Abdeckplatte (Out-of-Plane) durchgeführt werden.

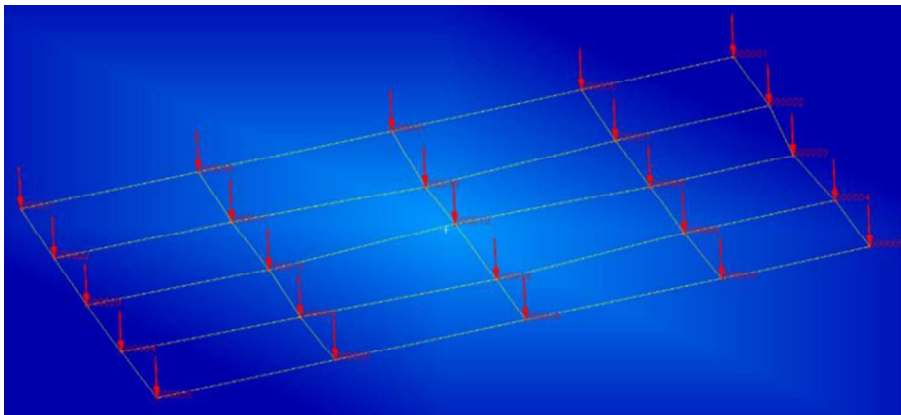


Abbildung 7: Testmodell mit 25 Messfreiheitsgraden senkrecht zur Abdeckplatte

Referenzmessungen

Als Referenzmessungen wurden eine klassische Beschleunigungsmessung mit wandernder, manueller Hammeranregung (siehe Abbildung 8) sowie eine Laser-Doppler-Vibrometermessung mittels 1D-Laserscanner und automatischer Mini-Hammeranregung durchgeführt (siehe Abbildung 9). Die Hammermessung wurde gewählt, um Verstimmungen des Messobjekts, z.B. durch Anbindung eines Shakersystems, zu vermeiden (siehe hierzu [6]).

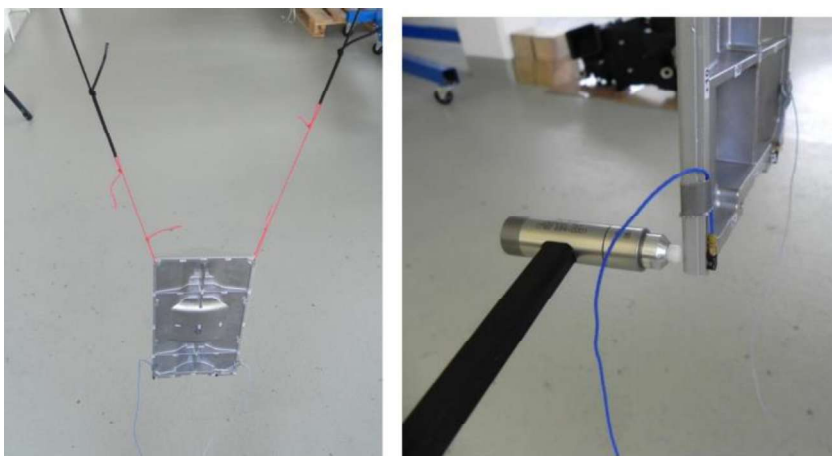


Abbildung 8: Messaufbau mit Beschleunigungsaufnehmern und Hammeranregung

Die Messung mit wanderndem Hammer repräsentiert eine einfache Standardmessung mit relativ geringer räumlicher Auflösung, die bei überschaubarem Zeit- und Kostenaufwand die wesentlichen dynamischen Merkmale, z.B. für eine nachfolgende Modellvalidierung, liefert. Die Laser-Doppler-Vibrometermessung ist unter Zeit- und Kostenaspekten deutlich aufwendiger – allerdings liefert sie verlässlich und weitgehend automatisierbar eine sehr hohe räumliche Auflösung des Testobjekts, sofern hierfür das Erfordernis besteht.



Abbildung 9: Messaufbau mit 1D-Laserscanner und automatischer Hammeranregung

Die Ergebnisse der experimentellen Modalanalysen sind für beide Messungen in Tabelle 2 (nur Eigenfrequenzen) sowie für die Laser-Doppler-Vibrometermessung in Abbildung 10 (Eigenformen) gezeigt. Erwartungsgemäß zeigen sich praktisch keine Unterschiede.

Tabelle 2: Experimentelle Modaldaten der Referenzmessungen

Nr.	FEA in Hz	EMA Acc. in Hz	EMA Laser in Hz
1	458,4	453,4	453,4
2	573,6	567,9	568,6
3	1074,2	1081,1	1081,5
4	1374,0	1364,3	1363,6
5	1787,6	1770,0	1769,1

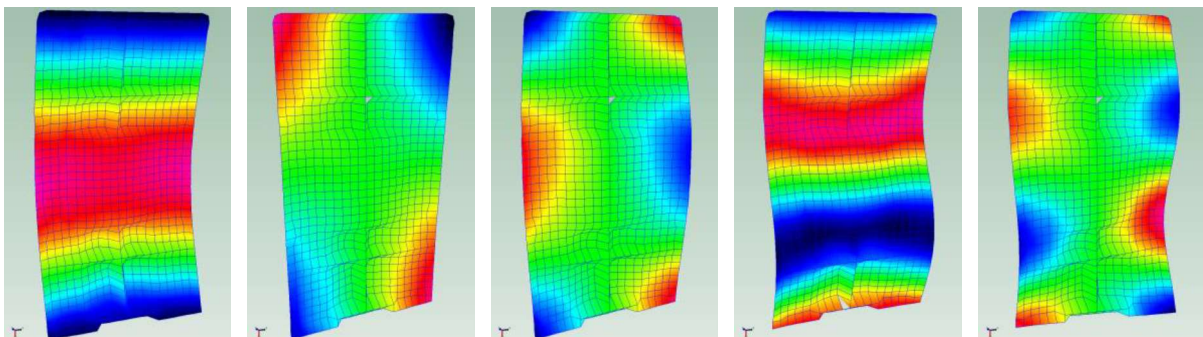


Abbildung 10: Eigenformen der Lasermessung bei 453,4/568,6/1081,5/1363,6/1769,1Hz

Messaufbau mit Hochgeschwindigkeitskamera

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Mikrotron EoSens und für die Auswertung der Videos die Software WaveCam [3] eingesetzt, um die Schwingungsbewegungen des Bauteils zu erfassen. Die Kamera wurde mit einer Bildrate von 4527fps (Frames per Second) betrieben, bei einer Aufnahmezeit von 0,33s, was einer Frequenzauflösung von 3,03 Hz entspricht. Die Auflösung betrug 500 x 1008 Pixel.

Zur Erhöhung der optischen Flussqualität wurde die Oberfläche des Messobjekts mit Mattierungsspray behandelt und an den definierten Messpunkten mit 3D-Markern versehen. Die 3D-Marker wurden unter anderem auf korrespondierenden Punkten zur Testgeometrie nach Abbildung 7 angebracht. Die Anregung erfolgte manuell mittels Modalhammer analog zur Referenzmessung mit Beschleunigungsaufnehmern (siehe auch Abbildung 8 oben). Eine Anregung mit Mini-Automatikhammer war hier nicht ausreichend, da die erzielbaren Antwortamplituden geringer als das Auflösungs-niveau der Kameras waren. Zudem wird im Vergleich zu den anderen Verfahren nur eine einmalige Anregung benötigt.

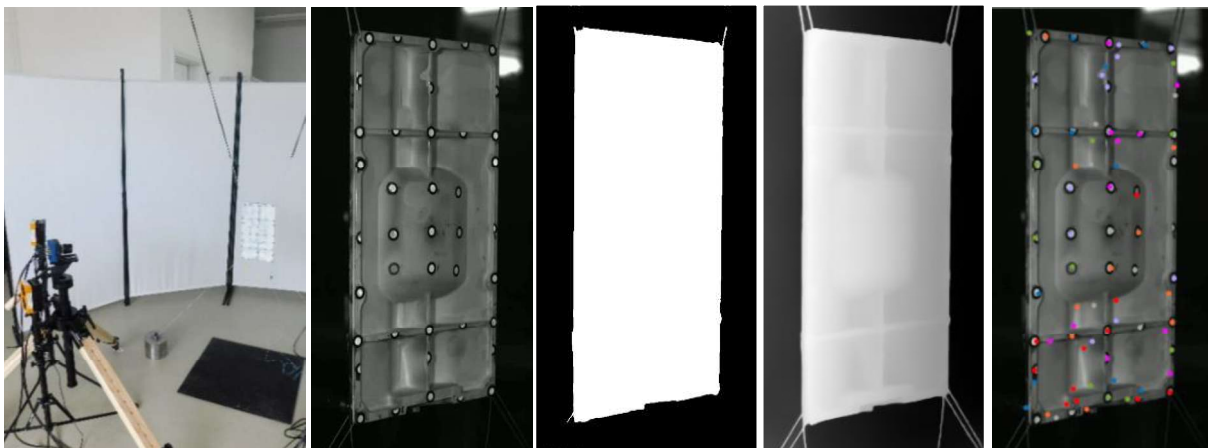


Abbildung 11: Messaufbau, Bild, Maske, Tiefenbild, Beste Sensorpunkte

Das Setup (siehe Abbildung 11) ermöglichte zudem die Erzeugung eines Tiefenbildes, mit dem eine räumliche Filterung vorgenommen werden konnte. Dadurch wurden ausschließlich Pixel berücksichtigt, die der Bauteiloberfläche zugeordnet sind, während die Umgebung aus der Analyse ausgeschlossen wurde. Störgrößen ergaben sich aus den zur freien Lagerung eingesetzten Gummiseilen, da diese sich im Video ebenfalls bewegen. Da der optische Fluss in der Berechnung benachbarte Pixel einbezieht, führen diese starken Bewegungen zu Abweichungen an nahegelegenen Messpunkten am Rande des Bauteils.

Pixelweise Tiefen-Normalisierung (perspektivische Korrektur)

Für die experimentelle Erfassung der Schwingungen wurde der optische Fluss (u, v) bestimmt. Die Aufnahmen erfolgten unter einem Blickwinkel von ca. 45° , sodass Beiträge aus allen drei Raumrichtungen (x, y, z) im Bildsignal vorliegen; die dominante Bewegung ist Out-of-Plane (z), diese erscheint aufgrund der Projektionsgeometrie jedoch nur anteilig. Zur Kompensation der perspektivischen $\frac{1}{z}$ -Skalierung wird ein pixelweiser z -Ausgleich auf Basis eines durch ein neuronales Netz rekonstruierten Tiefenbildes $Z(x, y)$ vorgenommen. Konkret werden die Flusskomponenten tiefengewichtet: $u^*(x, y) = Z(x, y) u(x, y)$, $v^*(x, y) = Z(x, y) v(x, y)$, wodurch die perspektivische Abschwächung der In-Plane-Anteile sowie der durch Z -Bewegungen verursachte, nach außen gerichtete Flussanteil aus der z -Bewegung (optische Expansion) lokal aufgehoben wird. Die Brennweite wird nicht explizit berücksichtigt, da sie für alle Bildpunkte näherungsweise konstant ist und in der anschließenden Modalanalyse nur als globaler Maßstabsfaktor wirken würde; die Analyse zielt auf relative Eigenformen ab, nicht auf absolute Amplituden. Aus den korrigierten Feldern (u^*, v^*) werden die modalen Antwortgrößen abgeleitet (kleinwinklige Linearisierung, perspektivische Projektion) und mit den numerischen Simulationen verglichen, die ausschließlich z -Schwingungen enthalten.

Operationale Modalanalyse

Die experimentellen Eigenformen wurden mittels operativer Modalanalyse (OMA) aus den korrigierten optischen Flussdaten bestimmt. Hierzu wurde der Complex Mode Indicator Function (CMIF)-Algorithmus [7] eingesetzt, der eine robuste Identifikation der Eigenformen auch bei mehreren gleichzeitig angeregten Schwingungen ermöglicht und den Einfluss von Messrauschen reduziert. In Abbildung 12 ist die erste Indikatorfunktion des CMIF-Algorithmus‘ gezeigt: Die besten Sensorpunkte sind in Rot markiert, während die gesamte Pixelregion in Schwarz angezeigt wird (Resonanzen bei 452,7Hz, 567,4Hz, 1080,4Hz, 1361,1Hz, 1765,5Hz).

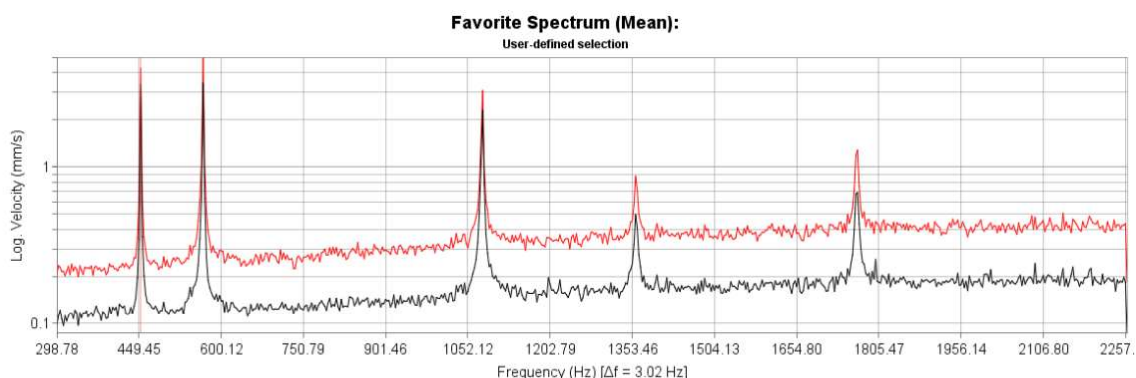


Abbildung 12: Darstellung der ersten Indikatorfunktion des CMIF-Algorithmus‘

Es konnten alle fünf Eigenformen bis 2kHz extrahiert werden. Besonders auffällig ist, dass die X-Achse im Kamerakoordinatensystem dominant schwingt, da sie den größten Anteil an der Out-of-Plane-Schwingung beinhaltet. Dies stellt die dominant schwingende Richtung dar. Die extrahierten Schwingformen wirken insgesamt sehr gleichmäßig (siehe Abbildung 13), selbst in Bereichen auf der Abdeckplatte, in denen aufgrund großer, strukturfreier Flächen nur wenige oder keine klaren Bildmerkmale vorhanden sind.

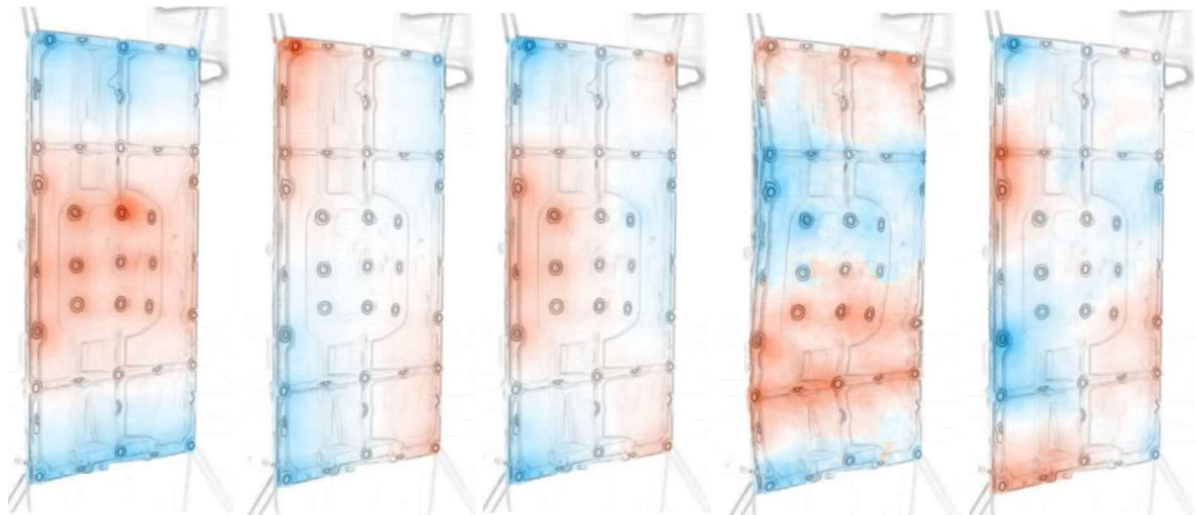


Abbildung 13: Eigenformen der Kameramessung bei 452,7/567,4/1080,4/1361,1/1765,5Hz

Die gemessenen Amplituden liegen im Mikrometerbereich, was nur durch den hohen Subpixelfaktor des optischen Flusses aufgelöst werden konnte. Mit abnehmender Amplitude steigt jedoch die Herausforderung der exakten Erfassung deutlich an.

Bestimmung optimaler Marker-Pixel für den MAC-Vergleich, Reduzierung der flächigen Messung auf Testgeometrie

Zur Auswahl des optimalen Pixels auf dem 3D-Marker wurden zunächst manuell im Kamerabild diejenigen Pixel bestimmt, die sich auf dem Marker befinden und später für den MAC-Vergleich herangezogen werden sollen. Für jeden dieser Ausgangspunkte wurde in einer 7 x 7-Pixel-Nachbarschaft derjenige Pixel ermittelt, der den geringsten Fehler im optischen Fluss aufwies. Die Größe der Nachbarschaft wurde so gewählt, dass der ausgewählte Pixel auch sicher auf dem Marker liegt. Auf diese Weise konnten 25 Messpunkte mit optimaler Tracking-Qualität ausgewählt werden, aus denen sich eine entsprechende Testgeometrie mit 25 Punkten ableitete. Durch die Z-Skalierung zur Anpassung der Perspektive sowie aufgrund des dominanten Anteils in X-Bildrichtung war es möglich, die Out-of-Plane-Komponente (Z-

Achse in Weltkoordinaten) zu approximieren. Diese Messgeometrie wurde anschließend mit entsprechenden 25 Punkten der Simulation verglichen (siehe Abbildung 14).

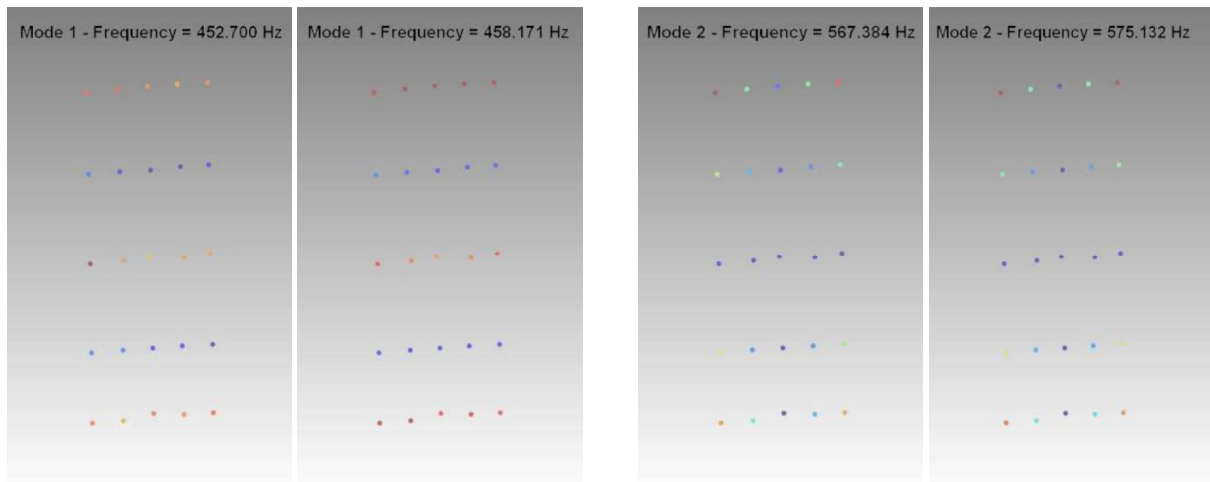


Abbildung 14: Gegenüberstellung der ersten beiden Eigenformen mit der 25 Punkte Geometrie: 1.) Erste Eigenform Messung 2.) Erste Eigenform FEA 3.) Zweite Eigenform Messung 4.) Zweite Eigenform FEA

Test/Analyse-Korrelation

Der Vergleich zwischen den experimentellen Modalanalysen (EMA/OMA) und den numerischen Simulationsergebnissen (FEA) wurde über die ICS.sysval Software mit Hilfe des Modal Assurance Criterion (MAC) durchgeführt, wobei jeweils nur die 25 gemeinsamen Messpunkte gemäß Abbildung 7 für die Ermittlung des MAC-Wertes berücksichtigt wurde.

Tabelle 3a, Tabelle 3b und Tabelle 4 fassen die Ergebnisse sowie die prozentualen Abweichungen und MAC-Werte für die ersten fünf Eigenformen zusammen. Für die beiden experimentellen Modalanalysen (EMA) zeigen sich praktisch keine Unterschiede bei den Korrelationsergebnissen. Die geringen Frequenzabweichungen und hohen MAC-Werte bestätigen eine sehr hohe Güte des FE-Modells.

Für die OMA-Ergebnisse mittels optischen Flusses sind die Frequenzabweichungen ähnlich niedrig. Die MAC-Werte sind allerdings etwas geringer als bei den klassischen Referenzmessungen, was auf eine leicht geringere Güte der zugehörigen experimentellen Eigenformen insbesondere bei steigender Frequenz (d.h. geringere Wegamplituden der Schwingung) hindeutet. Ursächlich hierfür sind Out-of-Plane-Bewegungen, die bei kleinen Amplituden verstärkt zu perspektivischen Verzerrungen und Skalierungsänderungen

beitragen, die Kameraauflösung, welche die kleinsten detektierbaren Verschiebungen limitiert und damit insbesondere bei höheren Eigenfrequenzen das Signal-Rausch-Verhältnis reduziert, sowie die Aufhängeseile, die speziell an den Rändern die gemessenen Bewegungen beeinflussen. Eine höhere Kameraauflösung oder eine verstärkte Anregung könnte hier eine Verbesserung bringen. Darüber hinaus könnten Störeinflüsse durch Out-of-plane-Bewegungen durch die Wahl eines noch optimaleren Kamerawinkels zur besseren Erfassung dieser Bewegung und durch Maskierung oder physische Dämpfung der Aufhängeseile insbesondere an den Rändern weiter reduziert werden.

Tabelle 3a: Korrelation EMA (Beschleunigung) / FEA (25 Messpunkte)

Nr.	EMA Acc. in Hz	FEA in Hz	Abw. in %	MAC in %
1	453,4	458,4	1,1	99,8
2	567,9	573,6	1,0	99,0
3	1081,1	1074,2	-0,6	98,7
4	1364,3	1374,0	0,7	99,5
5	1770,0	1787,6	1,0	98,3

Tabelle 1Tabelle 3b: Korrelation EMA (Laser) / FEA (25 Messpunkte)

Nr.	EMA LSV in Hz	FEA in Hz	Abw. in %	MAC in %
1	453,4	458,4	1,1	99,9
2	568,6	573,6	0,9	99,6
3	1081,5	1074,2	-0,7	99,7
4	1363,6	1374,0	0,8	99,7
5	1769,1	1787,6	1,1	99,3

Tabelle 4: Korrelation OMA (Optischer Fluss) / FEA (25 Messpunkte)

Nr.	EMA Kam. in Hz	FEA in Hz	Abw. in %	MAC in %
1	452,7	458,4	1,3	97,8
2	567,4	573,6	1,1	98,4
3	1080,4	1074,2	-0,6	96,1
4	1361,1	1374,0	1,0	96,7
5	1768,6	1787,6	1,1	94,6

6. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand des realen Beispiels einer Abdeckplatte wurde die Leistungsfähigkeit der bildbasierten Schwingungsanalyse mit Fokus speziell auf die experimentelle bzw. operationale Modalanalyse untersucht. Der Vergleich zu klassischen Methoden zeigt dabei die Vor- und Nachteile sowie die Einschränkungen auf. Die wesentlichen Aspekte dabei sind:

Vorteile der bildbasierten Schwingungsanalyse

- Berührungslose Messung (keine Massenbeladung und damit Verstimmung des Messobjektes)
- Simultane, hochauflösende Messung aller Messpunkte im Rahmen der Kameraauflösung und damit sehr guter, hochauflösender Gesamteindruck des Schwingungsbildes bei gleichzeitig kurzer Messdauer (insbesondere im Vergleich zu hochauflösenden, sequentiellen Laser-Doppler-Vibrometermessungen mittels Laserscanner)
- Relativ einfacher Messaufbau
- Mit gängigen Anregungsmethoden gut kombinierbar
- Gute Qualität, sofern Bildpunkte ausreichend genau bildbasiert verfolgt werden können
- Kameras sind variabel je nach Anwendungsgebiet wählbar

Nachteile der bildbasierten Schwingungsanalyse

- Messbereich hängt von Auflösung, Objektivbrennweite und Abstand ab
 - Kleine Brennweite / großer Abstand → großer Bildbereich, aber geringere Sensitivität (weniger Pixel pro mm)
 - Große Brennweite / geringer Abstand → hohe Sensitivität, aber kleinerer Bildausschnitt
- Kleinste Bewegungen (< Mikrometer) erfordern hohe Bildqualität und ggf. stärkeres Anregungsniveau, da Bewegungen direkt auf Weg-Ebene gemessen werden
- Bei Schwingungsmessungen mit einer Einzelkamera werden vor allem Bewegungen innerhalb der Kameraebene (In-Plane) erfasst, z. B. horizontale oder vertikale Auslenkungen von rotierenden Scheiben, Platten oder Balken. Treten gleichzeitig Tiefenbewegungen auf – also Bewegungen in Richtung auf die Kamera oder von ihr weg – können sich diese mit den In-Plane-Bewegungen überlagern und lassen sich mit einer Einzelkamera nicht eindeutig trennen. Durch den Einsatz eines Tiefenbilds oder einer Stereokamera lassen sich die Bewegungen jedoch räumlich rekonstruieren, sodass In-Plane- und Tiefenbewegungen zuverlässig getrennt und präzise erfasst werden können.

- Bei einer Einzelkamera-Messung hängt die Genauigkeit der ermittelten Amplituden stark von der Kameraperspektive ab. Besonders bei geneigter Anordnung können dadurch Abweichungen entstehen, die die absolute Bestimmung erschweren. Mit einer Stereokamera-Messung oder Tiefenbildern lassen sich die Bewegungen jedoch direkt im dreidimensionalen Raum rekonstruieren, sodass die Amplituden unabhängig vom Kamerawinkel absolut korrekt bestimmt werden können.

Insgesamt hat sich die Methode der bildbasierten Schwingungsanalyse in den letzten Jahren mit Bezug auf die experimentelle Modalanalyse positiv entwickelt. Mit steigenden Auflösungen und Abtastraten der Kameras ist dabei für die Zukunft mit weiteren Verbesserungen zu rechnen. Der Nachteil der reinen In-Plane-Messung könnte durch simultane Verwendung mehrerer Kameras (2-3) eliminiert werden. Allerdings stellt die korrekte Erfassung der geometrischen Lagen der einzelnen Kameras zueinander und zum Messobjekt eine Herausforderung dar (wie bei 3D-Laserscannersystemen im Übrigen auch). Hier sind verlässliche Prozesse und Softwarelösungen erforderlich, um die Anwendung für die experimentelle Modalanalyse realistisch zu ermöglichen.

7. Referenzen

- [1] **Fleet, D., Weiss, Y.** *Optical Flow Estimation*. In: Paragios, N., Chen, Y., Faugeras, O. (eds) *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-28831-7_15; 2006
- [2] **Beauchemin, S. S., & Barron, J. L.** *The Computation of Optical Flow*. *ACM Computing Surveys*, 27(3), 433–466. doi:10.1145/212094.212141; 1995
- [3] **gfai tech GmbH** *WaveCam Produktbeschreibung, gfai tech Internet-Auftritt* <https://www.gfaitech.com/de/produkte/strukturdynamik/schwingungsanalyse-mit-wavecam>; 2025
- [4] **Schedlinski, C. et al.** *Test-Based Computational Model Updating of a Car Body in White; Sound and Vibration; Volume 39/Number 9; September 2005*
- [5] **Schedlinski, C** *ICS.sysval Produktbeschreibung; ICS Internet-Auftritt* <http://www.ics-engineering.com>; 2025
- [6] **Schedlinski, C** *Pitfalls in shaker vibration tests on lightweight structures; Tagungsband ISMA 2024; Leuven; Belgien, 2024*
- [7] **EWINS, D. J.** (2000). *Modal Testing: Theory, Practice, and Application*. Research Studies Press.