

Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von ur- oder umgeformten Serienteilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen – simulationsbasierte Modellüberlegungen

Matthias HEINRICH^{1,2}, Ute RABE², Barbara GRABOWSKI¹, Bernd VALESKE^{1,2}

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar), Saarbrücken

² Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung. Die akustische Resonanzanalyse (ART) ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Komponenten anhand ihres Eigenschwingungsverhaltens bzw. daraus abgeleiteter Parameter bewertet werden. Das Prinzip der ART beruht darauf, dass die Eigenschwingungen eines Körpers von verschiedenen Abweichungen beeinflusst werden. So spiegeln sich z. B. Defekte oder unzulässige Geometrieausprägungen im Eigenschwingungsspektrum eines entsprechenden Bauteils wider.

Bedingt durch geringfügige geometrische oder materialspezifische Variationen weisen jedoch auch nominell gleiche Gut-Teile in der Regel unterschiedliche Eigenfrequenzen auf. Die durch unzulässige Abweichungen hervorgerufenen Eigenfrequenzänderungen können durch den Einfluss zulässiger Geometrie- und Materialvariationen überlagert werden, sodass die verlässliche Erkennung qualitativ unzulänglicher Teile anhand gemessener Eigenfrequenzen keineswegs trivial ist.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts werden Untersuchungen zur eigenfrequenzbasierten Erkennung von Teilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen (Geometriefehler) durchgeführt. Die Arbeiten fokussieren insbesondere auf ur- oder umgeformte Serienteile, deren Eigenfrequenzen sowohl von deutlich ausgeprägten, aber tolerierbaren Bauteilvariationen als auch von Geometriefehlern beeinflusst werden können. In diesem Beitrag wird anhand simulierter Daten dargestellt, inwiefern die Abhängigkeiten zwischen den Ist-Abmessungen und den exakten Eigenfrequenzen geometrisch komplexer Teile näherungsweise mit einfachen linearen Formeln beschrieben werden können.

1 Einführung

1.1 Akustische Resonanzanalyse und Eigenschwingungen

Die oftmals auch als Klangprüfung bezeichnete *akustische Resonanzanalyse (ART)* ist ein volumenorientiertes zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Komponenten anhand ihres Eigenschwingungsverhaltens hinsichtlich verschiedener Eigenschaften oder Qualitätsabweichungen untersucht werden können. Als vergleichendes Verfahren fokussiert die ART vor allem auf die akustische 100 %-Prüfung metallischer oder keramischer Serienteile, die in großen Stückzahlen und mit geringen Taktzeiten gefertigt werden. Vorteilhaft bei der ART sind u. a. die verhältnismäßig einfache Automatisierbarkeit und die sekundenschnelle Prüfbarkeit des gesamten Bauteilvolumens [1 – 3].



Jeder Körper schwingt nach einer geeigneten Anregung in Abhängigkeit seiner Geometrie, seiner Materialeigenschaften und der äußeren Randbedingungen bevorzugt bei gewissen Frequenzen – seinen sogenannten *Eigenfrequenzen*. Zu jeder Eigenfrequenz gehört eine charakteristische Eigenschwingungsform, die auch als Eigenmode bezeichnet wird. Die ART nutzt aus, dass die Eigenschwingungen eines Körpers von verschiedenen Abweichungen beeinflusst werden. So spiegeln sich strukturelle Defekte oder unzulässige Geometrieausprägungen im Eigenschwingungsverhalten eines Teils wider. Folglich besteht das Ziel der ART in der Erkennung solcher Teile anhand geeigneter, aus dem gemessenen Eigenschwingungsverhalten abgeleiteter Prüfmerkmale. In der Regel wird dazu der abgestrahlte Luftschall des angeregten Prüfobjekts mit geeigneten Sensoren erfasst und weiterverarbeitet. Beispielsweise können neben Eigenfrequenzen auch Dämpfungsgrößen aus der Schwingungsantwort eines Teils bestimmt werden. Eine Prüfentscheidung erfolgt letztendlich auf Basis einer Kalibrierung an repräsentativen Gut- und Schlecht-Teilen [1 – 4].

1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsweg

Bedingt durch Bauteilvariationen und Störeinflüsse unterscheiden sich nominell gleiche Serienteile in der Regel hinsichtlich der mit ART ermittelten Eigenfrequenzen – unabhängig von möglicherweise vorhandenen Defekten bzw. unzulässigen Abweichungen. So beeinflussen vor allem tolerierbare Geometrie- oder Materialvariationen (Fertigungstoleranzen, Chargeneinflüsse) die Eigenfrequenzen solcher Teile. Die durch unzulässige Abweichungen verursachten Eigenfrequenzänderungen werden ggf. durch den Einfluss zulässiger Bauteilvariationen überlagert. Eine Detektion qualitativ unzulänglicher Teile anhand der Eigenfrequenzen ist daher keineswegs trivial [1 – 3, 5, 6]. Abbildung 1 verdeutlicht dies.

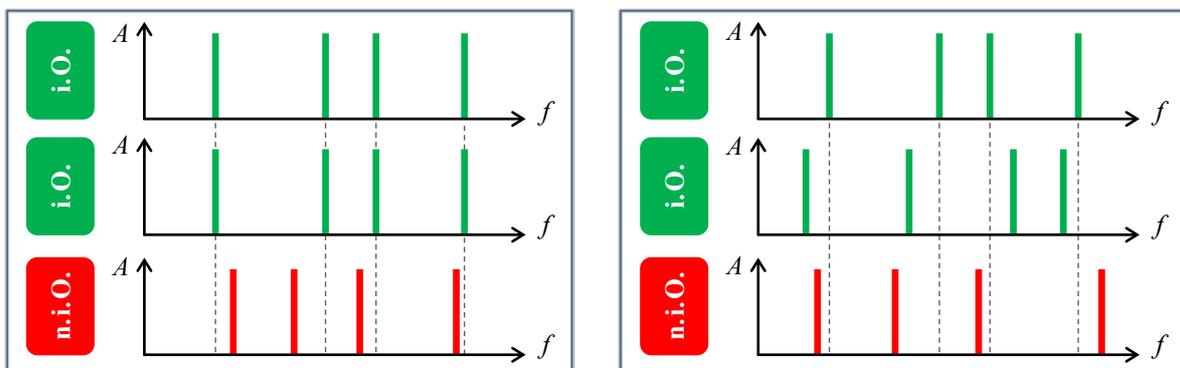


Abbildung 1: Auswirkung von Störeinflüssen auf die Eigenfrequenzen nominell gleicher Serienteile. Würden sich Gut-Teile (i. O.) nicht hinsichtlich ihrer Eigenfrequenzen unterscheiden, könnten Schlecht-Teile (n. i. O.) direkt anhand abweichender Eigenfrequenzen erkannt werden (links). Verschiedene Gut-Teile weisen in der Realität jedoch unterschiedliche Eigenfrequenzen auf, sodass ggf. Defekteinflüsse überlagert werden (rechts).

Die Veröffentlichungen anderer Autoren zur eigenfrequenzbasierten ART an geometrisch komplexen Strukturen befassen sich entweder mit der Unterscheidung von zulässigen Bauteilvariationen und strukturellen Defekten oder mit der Lokalisierung und Klassifizierung von Fehlstellen [5 – 9]. Im Gegensatz dazu fokussieren die Aktivitäten im aktuellen Forschungsprojekt MERKUR darauf, Geometriefehler an ur- oder umgeformten Teilen mit großen Bauteiltoleranzen anhand gemessener Eigenfrequenzen zu erkennen [10]. Geometriefehler stellen dabei unzulässige und aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht nachbearbeitbare Geometrieabweichungen dar; Abbildung 2 zeigt einige Geometriefehler.

Das Ziel des Projekts besteht also in der Entwicklung einer Methodik, mit der die Einflüsse von zulässigen Bauteilvariationen und die Einflüsse von Geometriefehlern auf die Eigenfrequenzen komplexer Teile separiert werden können, sodass ein Rückschluss auf verschiedene Bauteileigenschaften anhand gemessener Eigenfrequenzen ermöglicht wird.

Als erstes Zwischenziel wird überprüft, inwiefern anhand gegebener Eigenfrequenzen auf die Ist-Abmessungen geometrisch zufallsbehafteter Teile geschlossen werden kann. Die Untersuchungen dazu sind diesem Beitrag dargestellt.

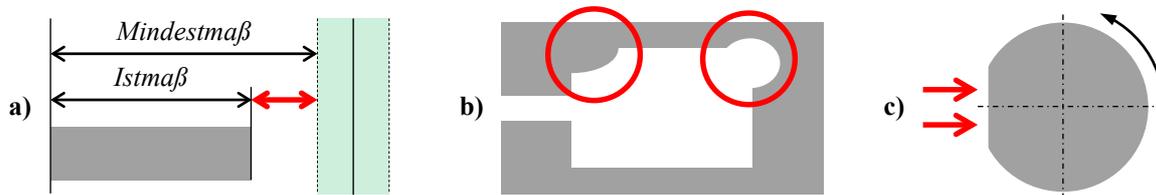


Abbildung 2: Schematische Darstellung einiger Geometriefehler: a) Maßabweichung, b) Formabweichung, c) Störung der Rotationsymmetrie → Unwucht im Betrieb

Andere Studien haben gezeigt, dass die *Finite-Elemente-Methode* zur Berechnung der Eigenfrequenzen komplexer Serienteile geeignet ist. Zudem wurde festgestellt, dass die Auswirkungen von Bauteilvariationen auf die Eigenfrequenzen mittels numerischer Berechnungen analysiert werden können [3]. Der Umkehrschluss – also der Schluss von den Eigenfrequenzen eines Teils auf seine Geometrie oder seine Materialeigenschaften – ist im Allgemeinen jedoch nicht möglich, da viele verschiedenartige Körper einen vergleichbaren Satz von Eigenfrequenzen aufweisen. Dieser Umstand ist in Abbildung 3a dargelegt.

Um zu überprüfen, ob dennoch – zumindest bei bekanntem Teiletyp und damit bekannter prinzipieller Geometrie – anhand der Eigenfrequenzen eines Teils näherungsweise auf seine exakte Geometrie geschlossen werden kann, wurde der in Abbildung 3b skizzierte Lösungsweg entwickelt. Demnach werden zunächst die zufallsbehafteten Ist-Abmessungen vieler virtueller Teile mit Hilfe von Zufallszahlen beschrieben. Die Eigenfrequenzen der geometrisch nun definierten Teile werden anschließend mit Finite-Elemente-Berechnungen bestimmt; die unterschiedlichen Ist-Abmessungen der Teile spiegeln sich in ihren Eigenfrequenzen wider. Anhand dieser Daten werden schließlich im Rahmen einer Kalibrierung lineare Zusammenhänge zwischen der Geometrie bzw. den zufälligen Ist-Abmessungen als Zielgrößen sowie den Eigenfrequenzen als Eingangsgrößen ermittelt. Die resultierenden Zusammenhänge werden abschließend an weiteren virtuellen Test-Teilen validiert.

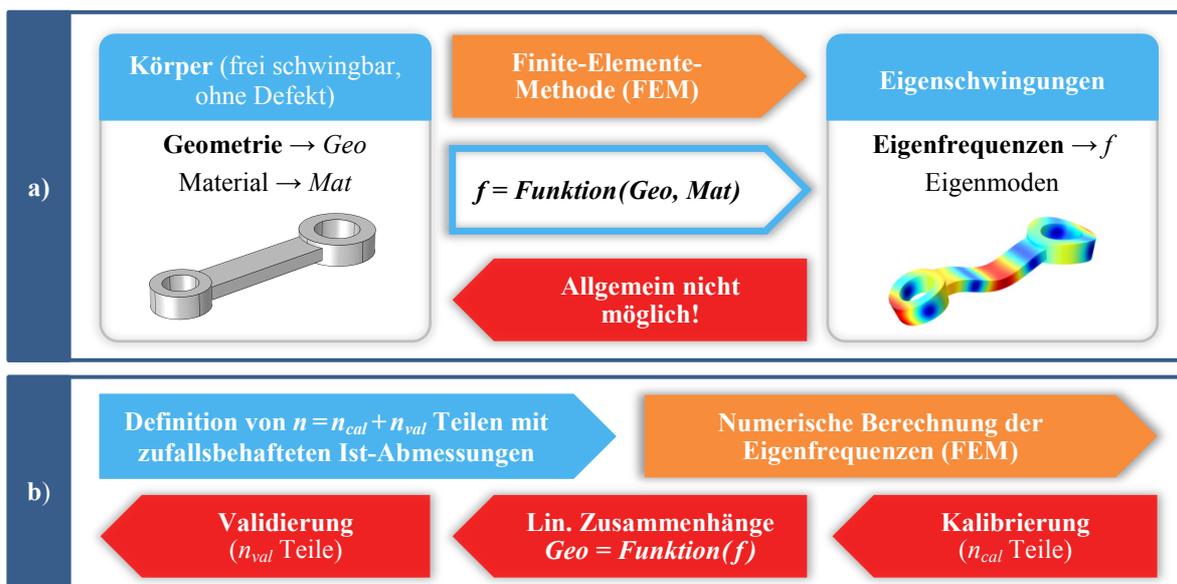


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Bauteileigenschaften und dem Eigenschwingungsverhalten komplexer Teile (a) sowie des geplanten Lösungswegs (b). Die Eigenfrequenzen ergeben sich u. a. aus der Geometrie und den Materialeigenschaften. Basierend auf einer Kalibrierung soll der Rückschluss auf die Ist-Abmessungen eines Teils anhand seiner Eigenfrequenzen erfolgen.

2 Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen einer Pleuelstange

In Abbildung 4 ist eine vereinfachte Pleuelstange skizziert, die mit Hilfe von acht Geometrieparametern eindeutig (bei Vernachlässigung von Form- und Lageabweichungen) hinsichtlich ihrer Geometrie bzw. ihrer Abmessungen definiert ist.

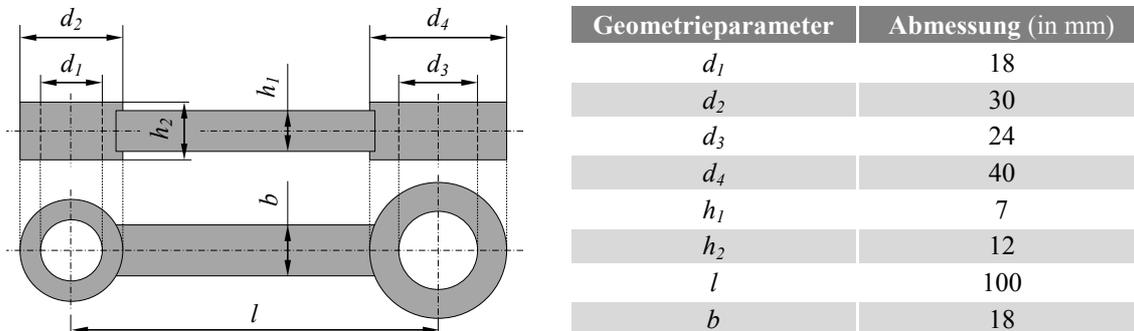


Abbildung 4: Vereinfachte Pleuelstange mit acht Geometrieparametern sowie beispielhafte Abmessungen

Mit der Finite-Elemente-Software *COMSOL Multiphysics* wurden die Eigenfrequenzen und Eigenmoden der Pleuelstange unter Berücksichtigung der in Abbildung 4 aufgelisteten Abmessungen bestimmt. Für diese Berechnung wurde ein homogen-isotropes Material angenommen (Dichte: 7850 kg / m³, Elastizitätsmodul: 210 GPa, Poissonzahl: 0,3). Weiterhin wurden keine einschränkende Randbedingungen gewählt und die Vernetzung des 3D-Modells erfolgte mittels Tetraeder-Elementen mit maximal 1,1 mm Kantenlänge.

Abbildung 5 zeigt die numerisch berechneten Eigenfrequenzen der Pleuelstange bis 30 kHz schematisch als Peaks mit identischer Amplitude. Zusätzlich sind einige Eigenmoden gezeigt. Die Pleuelstange weist bis 30 kHz insgesamt 17 Eigenfrequenzen auf, denen verschiedenartige Eigenmoden zugeordnet werden können (z. B. Biegemoden, Torsionsmoden). Mit steigender Frequenz nimmt die Komplexität der Eigenmoden in der Regel zu.

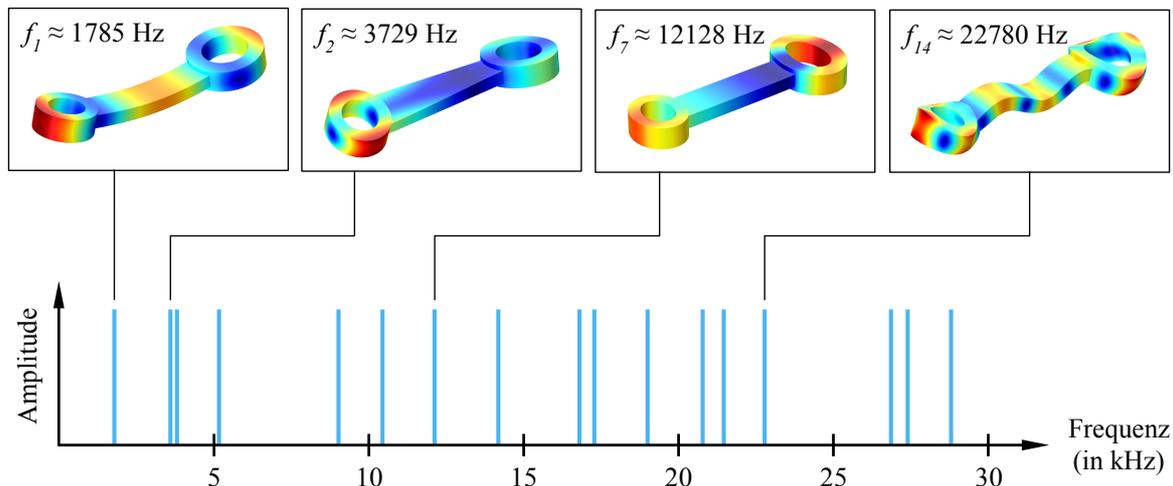


Abbildung 5: Schematisches Spektrum mit den Eigenfrequenzen sowie ausgewählte Eigenmoden des Teils

3 Untersuchungsprogramm

Die Untersuchungen umfassten die drei nachfolgend beschriebenen Schritte und erfolgten exemplarisch anhand vereinfachter Pleuelstangen (siehe Kapitel 2). Die Finite-Elemente-Software *COMSOL Multiphysics* diente zur numerischen Berechnung von Eigenfrequenzen; die Software *MATLAB* wurde zur Generierung von Zufallszahlen, zur Durchführung von Regressionsrechnungen und zur Ermittlung verschiedener Kennwerte genutzt.

Schritt 1 (Datenerzeugung): Zunächst wurden geeignete Daten – Ist-Abmessungen und davon abhängige Eigenfrequenzen vieler Teile – erzeugt. Dazu wurden 2500 virtuelle Teile mit prinzipiell festgelegter, aber zufallsbehafteter Geometrie hinsichtlich ihrer Ist-Abmessungen definiert. Die Beschreibung der konkreten Ist-Abmessungen bezüglich aller acht Geometrieparameter erfolgte mit normalverteilten und unabhängigen Zufallszahlen. Diese stellen Realisierungen entsprechender Zufallsgrößen dar, wobei als Erwartungswerte die Abmessungen aus Abbildung 4 und als Standardabweichungen die Werte 0,15 mm (Parameter d_1 , d_3 , h_1 und h_2), 0,20 mm (Parameter d_2 , d_4 und b) sowie 0,40 mm (Parameter l) genutzt wurden. Anschließend wurden jeweils die ersten 17 Eigenfrequenzen der geometrisch nun definierten Teile numerisch berechnet. Dabei wurden die in Kapitel 2 angegebenen (konstanten) Materialeigenschaften und Simulationseinstellungen genutzt.

Schritt 2 (Kalibrierung) [11]: Im Rahmen einer Kalibrierung wurden einfache Zusammenhänge zwischen den Eigenfrequenzen und den Ist-Abmessungen bezüglich eines Geometrieparameters ermittelt. Dazu wurde das lineare Regressionsmodell aus Gleichung (1) angesetzt, wobei i die Teilenummer und y_i die Ist-Abmessung des i -ten Teils bezüglich des Geometrieparameters repräsentiert. Das Modell unterstellt, dass die Ist-Abmessung y_i bis auf eine Störgröße ε_i linear von den 17 Eigenfrequenzen $f_{i|1}, \dots, f_{i|17}$ des i -ten Teils abhängt bzw. mit Hilfe dieser beschrieben werden kann (a_0, a_1, \dots, a_{17} sind Konstanten; die Variable y steht stellvertretend für einen beliebigen der acht Geometrieparameter).

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot f_{i|1} + \dots + a_{17} \cdot f_{i|17} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Die Kalibrierung erfolgte für jeden Geometrieparameter anhand der ersten 2000 Teile (Kalibrierteile, Teilenummer $i = 1, \dots, 2000$). Dabei wurden Werte für a_0, a_1, \dots, a_{17} mit der *Methode der kleinsten Quadrate* geschätzt (die Schätzwerte sind mit $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{17}$ bezeichnet). Aus jeder dieser Regressionsrechnungen ergab sich letztendlich ein geschätztes Modell bzw. eine lineare Funktion, welche die Abhängigkeit zwischen Geometrie (Ist-Abmessung) und zugehörigen Eigenfrequenzen beschreibt. Gleichung (2) zeigt das geschätzte Modell, wobei \hat{y}_i dem Schätzwert für die Ist-Abmessung y_i des i -ten Teils entspricht.

$$\hat{y}_i = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \cdot f_{i|1} + \dots + \hat{a}_{17} \cdot f_{i|17} \quad (2)$$

Schritt 3 (Validierung) [11]: Abschließend erfolgte eine Bewertung der geschätzten Zusammenhänge. Dazu wurden Schätzwerte für die Ist-Abmessungen der 500 bisher nicht betrachteten Teile (Validierteile, Teilenummer $i = 2001, \dots, 2500$) bestimmt, indem die Eigenfrequenzen in die berechneten Funktionen eingesetzt wurden. Neben dem grafischen Vergleich von Ist-Abmessungen und Schätzwerten wurden folgende Kennwerte gebildet:

- Bestimmtheitsmaß R^2 : Das Bestimmtheitsmaß beschreibt allgemein den Anteil der Variation der Zielgröße, welcher durch ein Modell erklärt wird. Die möglichen Werte liegen zwischen 0 (0 %) und 1 (100 %). Im konkreten Fall gibt das Bestimmtheitsmaß an, welcher Anteil der Variation der Ist-Abmessungen durch ein geschätztes Modell anhand der Eigenfrequenzen erklärt wird. Ein hoher Wert deutet darauf hin, dass die Geometrievariationen gut mit Hilfe des geschätzten Zusammenhangs beschrieben werden können.
- Mittlerer Fehler \bar{e} : Als mittlerer Fehler für einen Geometrieparameter wurde der Mittelwert aus den (betragsmäßigen) Differenzen $|e_i| = |y_i - \hat{y}_i|$ zwischen den jeweiligen Ist-Abmessungen und den Schätzwerten der Validierteile definiert. Um den mittleren Fehler ins Verhältnis zur Geometrievariation zu setzen, wurde er abschließend normiert (Division durch die zugehörige sechsfache Standardabweichung). Ein geringer Wert sagt aus, dass ein geschätzter Zusammenhang eine gute eigenfrequenzbasierte Abschätzung der Ist-Abmessungen für entsprechende, bisher nicht betrachtete Teile ermöglicht.

4 Ergebnisse

In Abbildung 6 sind die durch Geometrievariationen bedingten Eigenfrequenzänderungen exemplarisch für drei virtuelle Pleuelstangen dargestellt. Die prozentualen Verschiebungen beziehen sich auf die Eigenfrequenzen eines Referenzteils mit Nennmaßen (siehe Kapitel 2). Es ist ersichtlich, dass zufallsbehaftete Geometrievariationen zu äußerst komplexen Eigenfrequenzänderungen führen können.

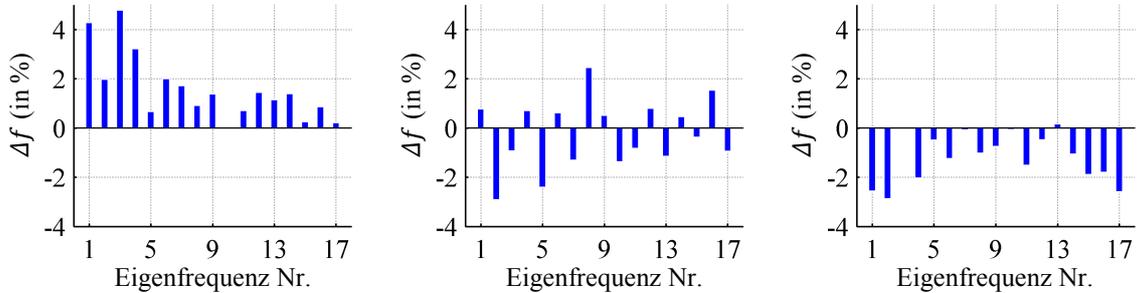


Abbildung 6: Prozentuale Änderung Δf der ersten 17 Eigenfrequenzen von drei Pleuelstangen mit zufälligen Geometrieabweichungen (bezogen auf die Eigenfrequenzen eines Referenzteils)

Nachfolgend werden Ergebnisse zum eigentlichen Untersuchungsprogramm (Kapitel 3) – also zur eigenfrequenzbasierten Abschätzung der Ist-Abmessungen – präsentiert.

Zunächst sind Ergebnisse dargestellt, die unter Berücksichtigung der ersten 17 Eigenfrequenzen ermittelt wurden. Aus den Regressionsrechnungen wurden je nach Geometrieparameter Werte zwischen 0,9953 (Parameter d_4) und 0,9998 (Parameter d_3) für das Bestimmtheitsmaß R^2 abgeleitet. Somit konnte jeweils mehr als 99,5 % der Variation der Ist-Abmessungen mit Hilfe der geschätzten linearen Funktionen anhand der Eigenfrequenzen erklärt werden. Darüber hinaus wurden Werte zwischen 0,17 % (Parameter d_3) und 0,77 % (Parameter d_4) für den mittleren Fehler \bar{e} zwischen den Ist-Abmessungen und den zugehörigen Schätzwerten der Validierteile berechnet. In Abbildung 7 sind die Ist-Abmessungen sowie die Schätzwerte bezüglich der Geometrieparameter d_3 und d_4 für die ersten 40 Validierteile dargestellt. Insbesondere für den Parameter d_3 ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Für den Parameter d_4 können geringe Unterschiede zwischen den Ist-Abmessungen und den Schätzwerten beobachtet werden. Diese Abweichungen sind unter Berücksichtigung des Streubereichs der Ist-Abmessungen jedoch als akzeptabel zu bewerten.

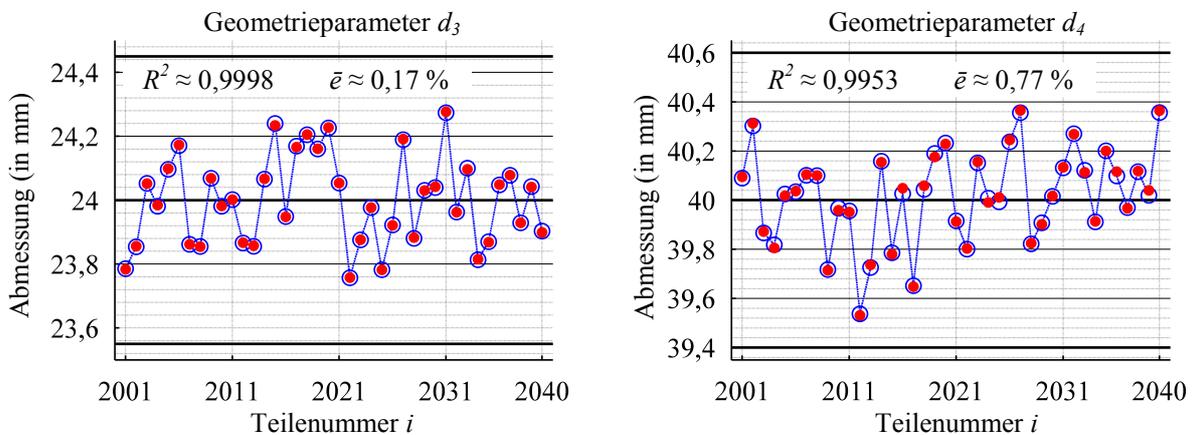


Abbildung 7: Vergleich von Schätzwerten (rot) und Ist-Abmessungen (blau) bezüglich der Parameter d_3 und d_4 für die ersten 40 Validierteile. Die Schätzwerte wurden auf Basis der ersten 17 Eigenfrequenzen ermittelt.

Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Anzahl der ins Modell integrierten Eigenfrequenzen auf das Bestimmtheitsmaß R^2 sowie den mittleren Fehler \bar{e} zwischen den Ist-

Abmessungen und den Schätzwerten auswirkt. Abbildung 8 zeigt die entsprechenden Resultate für die Geometrieparameter d_3 und d_4 . Für den Parameter d_3 wurden unter Berücksichtigung der ersten sieben Eigenfrequenzen ein Bestimmtheitsmaß von 0,9380 und ein mittlerer Fehler von 3,21 % erreicht. Für den Parameter d_4 hingegen wurden bei Verwendung der ersten sieben Eigenfrequenzen deutlich schlechtere Werte erreicht (Bestimmtheitsmaß $< 0,3$ und mittlerer Fehler > 11 %). Für alle Geometrieparameter wurden gute Ergebnisse (Bestimmtheitsmaß $> 0,95$ und mittlerer Fehler < 2 %) erzielt, sobald mindestens die ersten elf Eigenfrequenzen genutzt wurden. Hervorzuheben ist der Parameter h_1 , für den unter Berücksichtigung von nur einer einzigen Eigenfrequenz ein Bestimmtheitsmaß von knapp 0,9 und ein mittlerer Fehler von unter 4 % erzielt wurden.

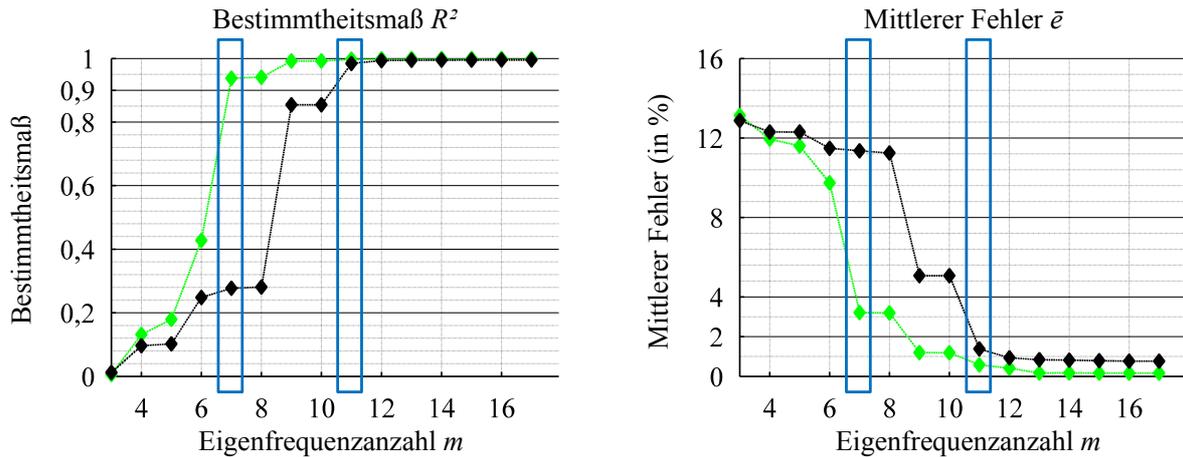


Abbildung 8: Bestimmtheitsmaß R^2 und (relativer) mittlerer Fehler \bar{e} für die Parameter d_3 (grün) und d_4 (schwarz) in Abhängigkeit der Anzahl m der ins Modell integrierten Eigenfrequenzen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis von Simulationen und einem linearen Modell wurde untersucht, ob die Abhängigkeiten zwischen den Ist-Abmessungen und den Eigenfrequenzen geometrisch komplexer Teile näherungsweise mit linearen Formeln beschrieben werden können. Die Untersuchungen erfolgten anhand virtueller Teile. Die konkreten Ist-Abmessungen dieser Teile wurden mit Zufallszahlen festgelegt und die davon abhängigen Eigenfrequenzen mit Finite-Elemente-Berechnungen numerisch bestimmt. Für jeden Geometrieparameter wurde ein linearer Zusammenhang zwischen den entsprechenden Ist-Abmessungen und den Eigenfrequenzen auf Basis zahlreicher Teile ermittelt. Mit diesen Zusammenhängen wurden Schätzwerte für die Ist-Abmessungen weiterer Teile unter Verwendung ihrer Eigenfrequenzen errechnet.

Es zeigte sich, dass zufällige Geometrievariationen oftmals zu komplexen Eigenfrequenzverschiebungen führen. Dennoch konnten diese Abhängigkeiten näherungsweise mit linearen Funktionen beschrieben werden. So wurden unter Berücksichtigung der ersten 17 Eigenfrequenzen bis 30 kHz für alle acht Geometrieparameter lineare Zusammenhänge gefunden, die jeweils mehr als 99,5 % der Variation der Ist-Abmessungen anhand der Eigenfrequenzen erklären konnten. Weitere Auswertungen zeigten, dass für alle Geometrieparameter bereits bei Verwendung der ersten elf Eigenfrequenzen zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden. Für einige Geometrieparameter führte sogar die Beschränkung auf eine deutlich geringere Anzahl von Eigenfrequenzen zu sinnvollen Schätzwerten.

Es wird geschlussfolgert, dass anhand der Eigenfrequenzen eines geometrisch komplexen Teils zumindest unter gewissen Annahmen auf seine Ist-Abmessungen geschlossen werden kann. Da sich die komplizierten Abhängigkeiten für die untersuchten Körper selbst mit linearen Funktionen beschreiben ließen, wird davon ausgegangen, dass der Einfluss tolerierbarer Bauteilvariationen auf die Eigenfrequenzen auch in der Praxis zumindest teil-

weise kompensiert werden kann. Da die bisherigen Untersuchungen unter idealisierten Bedingungen durchgeführt wurden (keine Materialvariationen, keine Form- und Lagetoleranzen, keine Störeinflüsse durch den Versuchsaufbau etc.) ist im nächsten Schritt eine Überprüfung der Vorgehensweise an Realteilen vorgesehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass reale Teile oftmals eine höhere geometrische Komplexität aufweisen und eine messtechnische Identifikation aller Eigenfrequenzen in der Praxis kaum möglich ist. Dies führt in der Realität zu einem ungünstigeren Verhältnis zwischen der Anzahl der variierenden Parameter und der Anzahl der verfügbaren Eigenfrequenzen. Andererseits ermöglichen weitere mathematisch-statistische Werkzeuge (z. B. nichtlineare Regression, verschiedene Klassifikationsverfahren) ggf. eine bessere Kompensation von Bauteilvariationen und sonstigen Störgrößen. Zusätzlich sollen zur Optimierung des Modells zukünftig weitere Bauteileigenschaften (z. B. Masse, einzelne Abmessungen) als Eingangsgrößen berücksichtigt werden. In der Praxis würde außerdem bereits eine teilweise Kompensation geometriebedingter Eigenfrequenzvariationen eine verbesserte eigenfrequenzbasierte Defekterkennung erlauben.

Die präsentierten Erkenntnisse stellen eine ermutigende Ausgangsbasis für das laufende Forschungsprojekt MERKUR dar, dessen Ziel in der Entwicklung der Methodik zur eigenfrequenzbasierten Erkennung von Teilen mit Geometriefehlern besteht [10].

Referenzen

- [1] I. Hertlin: *Band 5: Akustische Resonanzanalyse*. In: *Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung: ZfP kompakt und verständlich*. Castell-Verlag, Wuppertal, **2003**
- [2] DGZfP-Richtlinie US 6: *Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung: Prinzip, Vorgehensweise, Merkmale, Validierung*. DGZfP, Berlin, **2009**
- [3] C. Lai, X. Sun, C. Dasch, G. Harmon, M. Jones: *Quantify resonance inspection with finite element-based modal analyses*. *Journal of Vibration and Acoustics* 133 (3), pp. 031004-1 – 031004-9, **2011**
- [4] M. Möser, W. Kropp: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, **2010**
- [5] L. Schmidt, R. Steinbuch: *Improved interpretation of the acoustic response spectrum to identify types of component deviations*. *Research in Nondestructive Evaluation* 14 (2), pp. 95 – 110, **2002**
- [6] R. Steinbuch: *Scatter or defect? Some remarks on the interpretation of acoustic spectral shift*. *Research in Nondestructive Evaluation* 15 (4), pp. 173 – 189, **2004**
- [7] C. Lai, W. Xu, X. Sun: *Development of an inverse algorithm for resonance inspection*. *Journal of Vibration and Acoustics* 134 (5), pp. 051017-1 – 051017-10, **2012**
- [8] C. Lai, X. Sun: *Predicting flaw-induced resonance spectrum shift with theoretical perturbation analysis*. *Journal of Sound and Vibration* 332 (22), pp. 5953 – 5964, **2013**
- [9] W. Xu, C. Lai, X. Sun: *Identify structural flaw location and type with an inverse algorithm of resonance inspection*. *Journal of Vibration and Control*, **2013**, DOI: 10.1177/1077546313516823
- [10] *MERKUR (Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur Kontrolle von ur- oder umgeformten automobilen Serienteilen auf innere Geometriefehler)*. Forschungsprojekt der htw saar, gefördert vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 03FH029PX4. Weitere Informationen zum Projekt: <https://www.htwsaar.de/ingwi/fakultaet/personen/profile/bernd.valeske/forschungsprojekt-merkur/>
- [11] L. von Auer: *Ökonometrie: Eine Einführung*. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, **2011**

Projektförderung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FH029PX4 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

