

Untersuchung und Vergleich verschiedener berührender und berührungsloser Methoden zur Schwingungsanregung bei der akustischen Resonanzanalyse

Marius Gipperich¹ (marius.gipperich@gmail.com), Matthias Heinrich¹, Ute Rabe¹,
Thomas Westphalen², Sebastian Nyga²

¹Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, 66123 Saarbrücken

²Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, 52074 Aachen

Einleitung

Die akustische Resonanzanalyse (Acoustic Resonance Testing – ART) gehört zu den ältesten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung. Sie zielt darauf ab, den Zustand eines Bauteils anhand seines Klages bzw. seiner Resonanzfrequenzen sekundenschnell zu beurteilen. Da sich Geometrieabweichungen, Materialfehler und Ungenauigkeiten wie Risse auf diese charakteristischen Frequenzen auswirken, ermöglicht die ART im Hinblick auf eine gewünschte 100 %-Kontrolle die Detektion akustisch auffälliger Bauteile, die aussortiert und im Folgenden genauer untersucht werden können. Dabei liegt der Schwerpunkt nicht auf der Bestimmung der Fehlerart oder -größe, wie es beispielsweise bei der Ultraschallprüfung der Fall ist, sondern vielmehr auf der generellen Einordnung in Gut- und Schlechteile. [1]

Da die Einsetzbarkeit der ART in der Praxis maßgeblich davon abhängt, wie die Bauteilschwingung zur Prüfung angeregt wird, wurden im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen unterschiedliche Anregungsmethoden miteinander verglichen. Ein erster Schritt zielte dabei auf die systematische Untersuchung der Anregung durch Impacts mit verschieden großen Kugeln aus Polypropylen, Stahl und Siliziumnitrid ab, um zu prüfen, inwieweit unterschiedliche Kontaktdauern und Energieeinträge das angeregte Frequenzspektrum beeinflussen. In einem zweiten Schritt wurden zum Vergleich Anregungsversuche mit Laser- und Druckluftimpulsen, d. h. also berührungslosen Methoden, durchgeführt und diese Ansätze auf ihre Einsetzbarkeit untersucht.

Prinzip und Vorgehensweise bei der ART

Das Prinzip der akustischen Resonanzanalyse, auch Klangprüfung genannt, beruht darauf, dass jedes Objekt, unabhängig von seiner Größe und seinen Materialeigenschaften, nach einer impulsartigen Anregung mit charakteristischen Frequenzen schwingt, sofern die Dämpfung und die Lagerung eine freie, resonante Schwingung zulassen. Dieser „akustische Fingerabdruck“ wird durch die Geometrie und die Werkstoffeigenschaften des Bauteils beeinflusst. Imperfektionen wirken sich auf die gemessenen Resonanzfrequenzen im Vergleich zu einem fehlerlosen Referenzobjekt aus.

Im ersten Schritt werden die Resonanzschwingungen des elastisch gelagerten Prüfobjekts angeregt. Dies erfolgt nach dem heutigen Stand der Technik oftmals durch einen kurzen Hammerschlag, der zu einer breitbandigen Frequenzanregung führt. Das Bauteil schwingt im Anschluss mit seinen angeregten Eigenmoden und den zugehörigen Frequenzen. Das an die Luft abgestrahlte Körperschallsignal setzt sich aus Schwingungen dieser Frequenzen zusammen und kann mit einem Mikrophon aufgezeichnet werden. Alternativ sind auch eine kontinuierliche Anregung oder die

Detektion mittels Beschleunigungssensoren oder Laser-vibrometrie möglich. Das so gespeicherte Zeitsignal wird im Anschluss fouriertransformiert (FFT), woraus sich ein Spektrum ergibt. Die Lage der dominanten Maxima entspricht den angeregten und erfassten Resonanzfrequenzen des Bauteils. Aus den Zeitsignalen und den ermittelten Spektren zahlreicher Gut- und Schlechteile werden Prüfmerkmale abgeleitet, d. h. zum Beispiel bestimmte ausschlaggebende Frequenzpeaks, deren Lagen bei jeder Prüfung ausgewertet werden. Ist die Abweichung einer oder mehrerer Frequenzen eines Prüflings größer als die definierte Toleranz, in der eine Schwankung erlaubt ist, wird das Teil aussortiert. Neben einer solchen einfachen Klassifikation mit festen Schwellwerten werden auch kompliziertere Bewertungsverfahren verwendet.

Zur Schallaufnahme wurden in dieser Arbeit zwei ¼“-Freifeld-Kondensatormikrofone der Firmen AVM Mess- und Prüfgeräte für Akustik und Vibration, Büttelborn (Typ MI17, Frequenzbereich 20 Hz -20 kHz) und G.R.A.S Sound and Vibration A/S, Holte/Dänemark (Typ 46BE, Frequenzbereich 10 Hz - 100 kHz) eingesetzt. Zur Signalaufzeichnung und -verarbeitung wurden die TestSigBox und die zugehörige Software SonicTC der Firma RTE Akustik und Prüftechnik GmbH, Pfinztal, verwendet. Die Bauteile waren während der Versuche auf den zur TestSigBox gehörenden Elastomerspitzen gelagert und die FFT erfolgte mit einem MATLAB-Algorithmus.

Anregung durch Impacts

Der erste Versuchsteil dieser Arbeit bestand darin, mithilfe eines Impacts Resonanzschwingungen einer vereinfachten Pleuelstange aus AlMgSi11 anzuregen. Dazu wurden Kugeln aus Siliziumnitrid-Keramik (Si₃N₄), Polypropylen (PP) und einem nichtrostenden, martensitischen Chromstahl (X46Cr13, Werkstoffnummer 1.4034) mit den Durchmessern 3 mm, 5 mm und 10 mm verwendet, die mit einer Fallvorrichtung aus einer Höhe von 40 cm auf das Bauteil fallen gelassen wurden. Die Impactgeschwindigkeit betrug somit etwa 2,8 m/s.

Die Resonanzfrequenzen des Pleuels waren durch Finite-Elemente-Eigenfrequenzsimulationen mit der Software COMSOL Multiphysics aus vorangehenden Arbeiten am Fraunhofer IZFP bereits näherungsweise bekannt [2].

Im Vorfeld konnten zudem durch analytische Berechnungen unter Berücksichtigung der Impact-Modelle von Hertz (rein elastisches Verhalten) [3] und Zener (keine plastische Verformung, aber Energiedissipation in Form von elastischen Wellen) [4] die zu erwartenden Kontaktdauern und -kräfte für die Impacts der verschiedenen Kugeln auf dem Pleuel bestimmt werden.

Zusätzlich war jeweils eine Vorhersage der theoretisch verursachten plastischen Verformung möglich [5]. Die Kontaktdauer ist bei der Anregung durch Impacts ausschlaggebend, da sie sich direkt auf die angeregte Mittenfrequenz auswirkt. Für die Kontaktdauer nach Hertz gilt in diesem Fall:

$$t_{el,Hz} = 3,78 \left(\frac{m^2}{v_A R E_{1,2}^2} \right)^{1/5} \quad [s] \quad (1)$$

mit m als Kugelmasse, R als ihrem Radius, v_A der Impactgeschwindigkeit und $E_{1,2}$ dem effektiven E-Modul. Zener führt zusätzlich einen Inelastizitätsparameter λ_Z ($0 \leq \lambda_Z \leq 1$) ein, der von Kugel- und Bauteilmaterial, den Geometrieverhältnissen sowie der Geschwindigkeit abhängt und angibt, welcher Energieanteil elastisch dissipiert wird. Er wird bei Kugeln mit großer Dichte, hoher Geschwindigkeit und geringen E-Moduln maximal. Neben den Größen in Formel (1) geht λ_Z exponentiell in die Kontaktdauer nach Zener ein. Für eine möglichst geringe Kontaktdauer und somit eine hohe angeregte Mittenfrequenz sind demnach Kugeln mit geringer Dichte, kleinem Durchmesser und großem E-Modul sowie eine nicht zu große Impactgeschwindigkeit erforderlich.

Die Kugeln wurden auf den Pleuel fallen gelassen und nach dem Auftreffen wurde für jeweils zwei Sekunden das Zeitsignal mit dem Mikrofon G.R.A.S. 46BE aufgezeichnet. Mit jeder Kugel wurden neun Versuche durchgeführt und die nach der FFT in MATLAB bestimmten Spektralampplituden anschließend gemittelt. Zudem wurden sämtliche Amplituden auf den Amplitudenwert, der bei dem niedrigsten Eigenmode von ca. 1784 Hz vorlag, normiert. Dadurch wurde sichtbar, wie stark höherfrequente Moden in Bezug auf die niedrigste Frequenz angeregt wurden, ohne dabei die Kugelmasse und damit die eingebrachte Energie zu berücksichtigen.

Beispiele für ein nicht normiertes und ein normiertes Spektrum sind Abbildung 1 zu entnehmen. Die gestrichelten Linien zeigen die durch Simulation bestimmten Resonanzfrequenzen. Insgesamt konnte in diesen Versuchen festgestellt werden, dass die Polypropylenkugeln am niederfrequentesten anregen, während die 3 mm großen Kugeln aus Siliziumnitrid auch die bei über 40 kHz liegenden Moden noch gut messbar anregen. Diese Beobachtungen werden durch die Kontakttheorien bestätigt. Eine geringe Kontaktdauer, wie sie bei den Si_3N_4 -Kugeln aufgrund ihres großen E-Moduls zu erwarten war, ermöglicht eine höherfrequente Schwingungsanregung, während die weichen PP-Kugeln mit langer Kontaktdauer stärker den niederfrequenten Bereich anregen. Die Anregung mit Siliziumnitrid-Kugeln erzeugt zudem gegenüber den Kugeln aus anderen Materialien einen gleichmäßigeren Verlauf der Amplituden über den Frequenzbereich und es sind nur wenige große Sprünge zu verzeichnen, die hauptsächlich durch die Lage der Schwingungsrichtung der jeweiligen Moden zur Anregungsrichtung zu begründen sind. Um allerdings nicht nur möglichst hochfrequent anzuregen, sondern gleichzeitig genug Energie zur Erzeugung einer messbaren Bauteilschwingung einzubringen, könnte in diesem Anwendungsfall auf die 5 mm große Si_3N_4 -Kugel zurückgegriffen werden, da sie eine gute Kombination aus breitbandiger, gleichmäßiger

Anregung und einem ausreichend großen Energieeintrag bietet. Die in diesem Fall verursachte Tiefe der theoretischen plastischen Verformung von etwa 10 - 20 μm ist für die meisten Anwendungen noch tolerierbar.

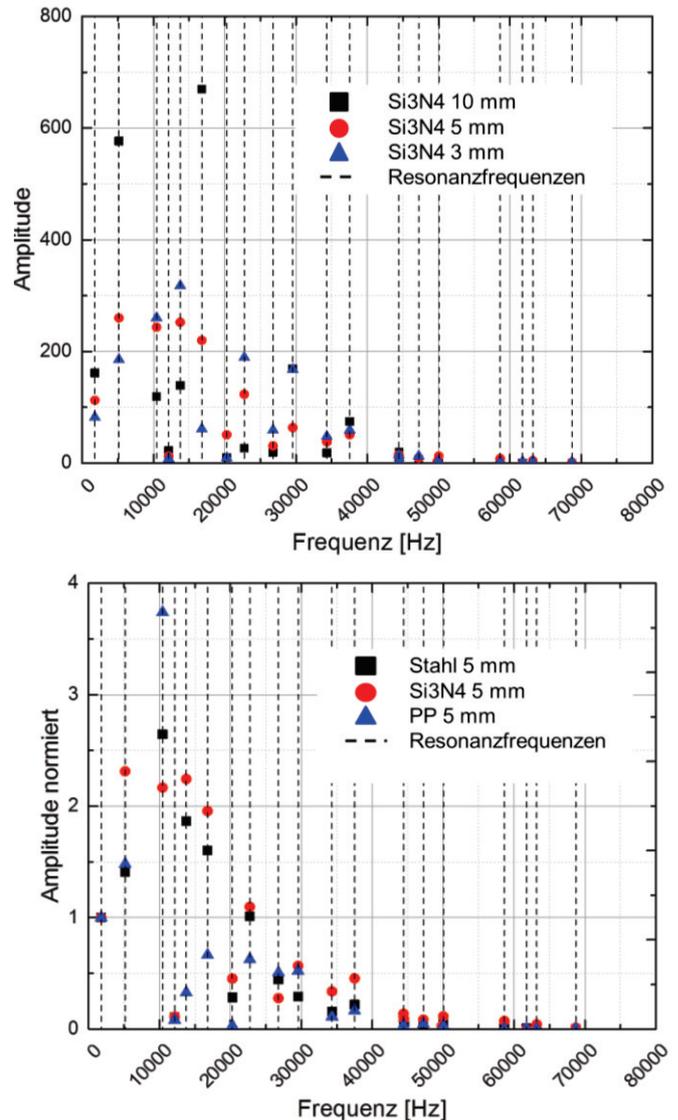


Abbildung 1: Oben: Nicht normierte Spektren bei der Anregung mit Siliziumnitrid-Kugeln. Unten: Normierte Spektren bei der Anregung mit 5 mm-Kugeln aus Stahl, Siliziumnitrid und Polypropylen.

Anregung mit Laserpulsen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als erste Alternative zur Anregung der Schwingungen eines Pleuels durch einen Impact eine Anregung mit Laserstrahlung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass dabei mehrere Anregungsmechanismen in Frage kommen [6,7].

Der erste ist nicht zerstörungsfrei und ermöglicht die Schwingungsanregung durch eine Materialablation an der Oberfläche und einen daraus resultierenden Rückstoßimpuls. Mit dieser Methode konnten mit einem Nd:YAG-Pulslaser durch Einzelpulse einer Länge von 10 ns einzelne Longitudinal- und Transversalmoden angeregt werden, deren

Amplituden jedoch stark unter denen der mechanischen Anregung mit einem Hammer blieben.

Es war eine starke Richtungsabhängigkeit zu verzeichnen, d. h. bei Anregung in Längsrichtung des Pleuels wurden ausschließlich Longitudinalmoden angeregt und bei Anregung in Querrichtung ausschließlich transversal schwingende Moden.

Vielfersprechendere Ergebnisse konnten bei Anregungsversuchen unter Ausnutzung des thermoelastischen Effekts erzielt werden. Dazu wurde die Auftrefffläche auf dem Aluminium zur Erhöhung der Absorption schwarz gefärbt. Zunächst wurde eine kontinuierliche Anregung von Resonanzfrequenzen durch eine entsprechend eingestellte Pulsrate des Nd:YAG-Lasers getestet.

Für den Longitudinalmode bei etwa 12,15 kHz sind die Ergebnisse in Abb. 2 zu sehen: In der Nähe der Resonanzfrequenz nimmt die angeregte Amplitude stark zu. Steuerungsbedingt war an dem verwendeten Laser die Repetitionsrate nur in 100 Hz-Schritten einstellbar, was im Vergleich zur Halbwertsbreite der Resonanzmaxima von ca. 5 Hz zu ungenau ist. Bei genauer Abstimmung der Pulsrate auf die Resonanzfrequenz könnten die Resonanzüberhöhung vollständig genutzt und sehr viel höhere Amplituden angeregt werden.

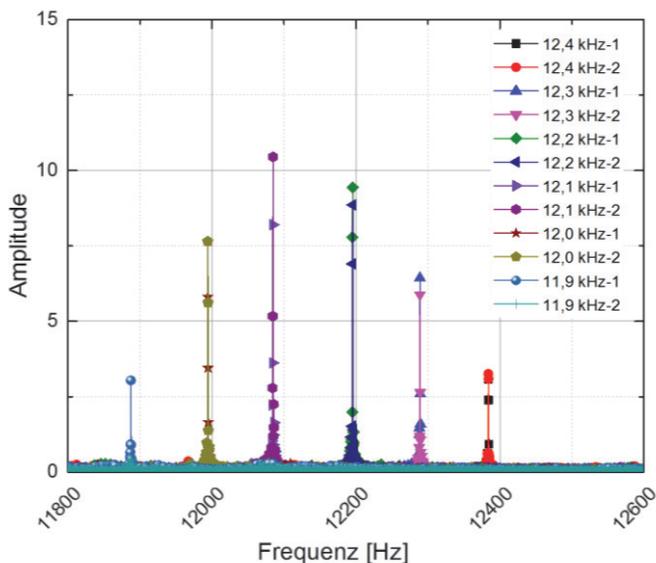


Abbildung 2: Spektrale Amplituden bei der Longitudinalanregung mit unterschiedlich eingestellten Laserpulsraten als Erregerfrequenz. Es ist gut zu erkennen, dass die Amplituden bei Annäherung an die Resonanzfrequenz bei ca. 12150 Hz besonders groß werden.

Als problematisch erwies sich bei der wiederholten kontinuierlichen Anregung jedoch der starke Anstieg der Temperatur durch die eingebrachte Wärme, was zu Verschiebungen der Resonanzfrequenz bei ca. 12150 Hz um mehr als 50 Hz zu tieferen Werten führte.

In weiteren Experimenten mit einem Diodenlaser, der 100 μ s lange Pulse erzeugt, wurde der Pleuel mit einzelnen Pulsen in Längs- und Querrichtung angeregt. Die beobachtete Richtungsabhängigkeit der Anregung ist zwar geringer als

bei der Anregung durch Laserablation, aber immer noch deutlich größer als bei der Anregung durch Impacts.

Klare Vorteile sind aber dennoch die vergleichsweise breitbandige Anregung und die geringe eingebrachte Wärmemenge. Beispielergebnisse sind in Abbildung 3 zu sehen.

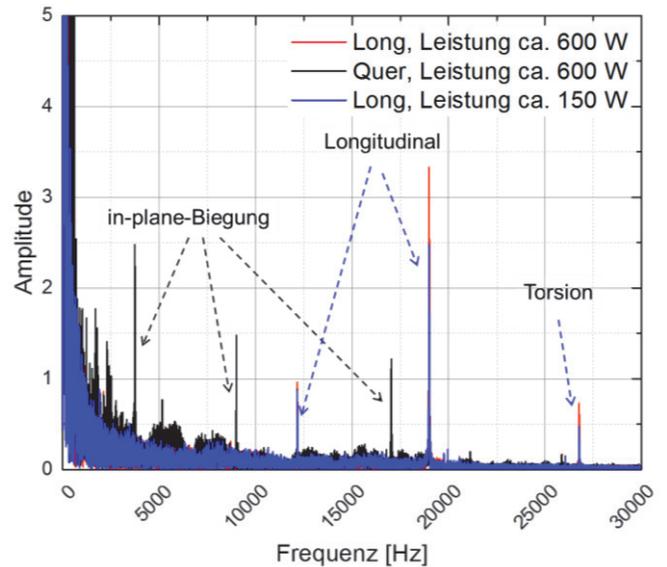


Abbildung 3: Spektren bei der Einzelpulsanregung mit einem Diodenlaser in Längs- und Querrichtung (erkennbar ist in den größeren Amplituden teilweise auch die Erhöhung der eingestellten Laserleistung durch Verwendung von Linsen).

Anregung mit Druckluftpulsen

Im letzten Versuchsteil erfolgte eine Untersuchung von Druckluftimpulsen als potenzielle Anregungsmethode. Der Vorteil dieser Variante liegt vor allem darin, dass sie vollständig zerstörungsfrei ist. Zudem ist Drucklufttechnik in der Industrie weit verbreitet und die Kosten für die Druckluftanregung sind somit gering, da nur ein geeignetes Ventil mit Steuerung angeschafft werden muss.

Für die Versuche in dieser Arbeit wurde ein Magnetventil der Firma Festo (MHJ10-S-2,5-QS-4-MF) gewählt, das über eine maximale Schaltfrequenz von 1 kHz verfügt. Da die Eigenfrequenzen des Pleuels alle über diesem Wert liegen, wurde in diesem Teil ein einfacher Aluminiumstab mit rechteckigem Querschnitt verwendet, dessen niedrigste Biegeeigenfrequenz analytisch zu 817,7 Hz bestimmt wurde [8].

Die Anregung war sowohl durch Einzelpulse als auch durch Frequenzsweeps und kontinuierliche Anregung möglich, wobei jeweils erst angeregt und im Anschluss mit einem Mikrofon das Nachklingen aufgezeichnet wurde, um zu vermeiden, dass das Betriebsgeräusch des Ventils die Schwingung des Stabes überlagert.

Die Ergebnisse für die Einzelpulsanregung (Pulslänge 610 μ s) und Frequenzsweeps über die Bereiche von 800 bis 850 Hz und 500 bis 900 Hz sind in Abb. 4 dargestellt. Es ist jeweils ein ausgeprägtes Maximum bei der zu erwartenden Biegeeigenfrequenz zu erkennen.

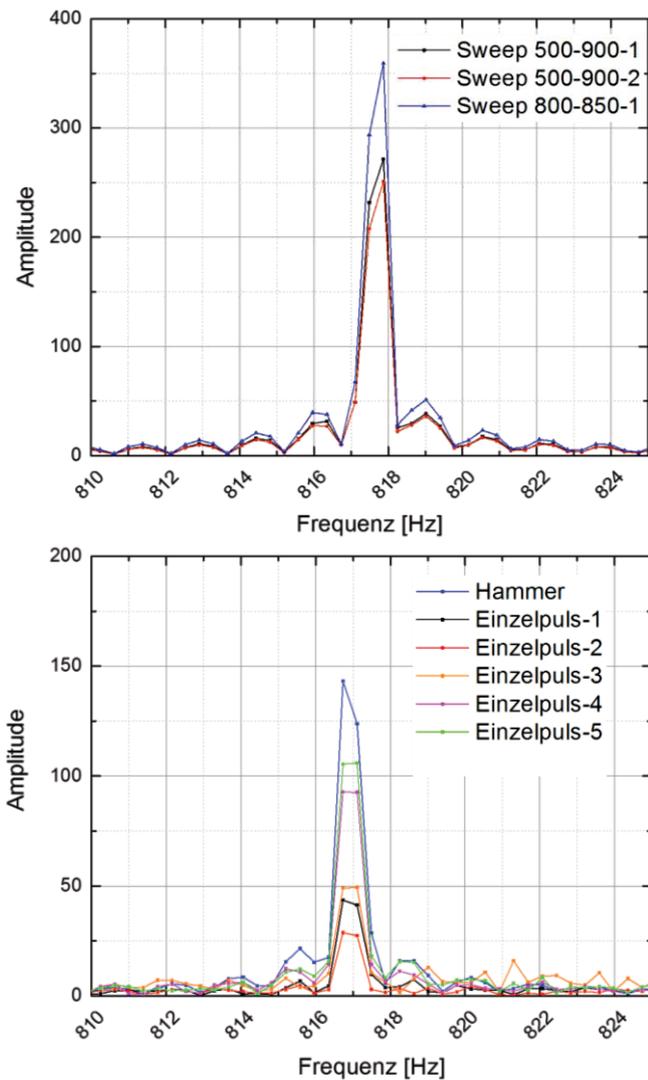


Abbildung 4: Spektraler Peak bei etwa 817,5 Hz bei Anregung mit Druckluft-Frequenzweeps (oben) und einzelnen Druckluftimpulsen (unten).

Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen mehrere Rückschlüsse zu. Zum einen erlaubt die systematische Untersuchung der Anregung durch Impacts mit verschiedenen Kugeln es, für einen speziellen Anwendungsfall eine geeignete Hammergeometrie hinsichtlich Material und Geometrie sowie eine geeignete Impactgeschwindigkeit auszuwählen, sodass die Anregung beispielsweise besonders hochfrequent ist oder möglichst geringe plastische Verformungen verursacht. Zum anderen wurden in dieser Arbeit zwei berührungslose Methoden untersucht, die prinzipiell als Anregungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden können.

Die Druckluftanregung erscheint vielversprechend, da sie vollständig zerstörungsfrei und mit relativ geringem Aufwand umsetzbar ist. Jedoch müssen hier Lösungen hinsichtlich eines Ventils gefunden werden, das mit höheren Frequenzen als 1 kHz schalten kann, um Bauteile mit darüber liegenden Resonanzfrequenzen überhaupt prüfen zu können.

Die Laseranregung bringt durch die hohen Investitionskosten und die einzuhaltenden Sicherheitsvorschriften Einschränkungen mit sich, kann aber beispielsweise bei Hochtemperaturanwendungen oder in Kombination mit Laser-Vibrometrie zur Detektion Vorteile bieten. Des Weiteren ist die Lasertechnik auch zur Anregung in komplexen Produktionsanlagen geeignet, bei denen das Prüfobjekt gegebenenfalls schwer zugänglich ist: In Fällen, in denen eine mechanische Anregung aus Platzgründen nur schlecht möglich ist, kann der Laserstrahl trotzdem durch Spiegel und weitere optische Hilfsmittel punktgenau auf das Prüfobjekt gelenkt werden, selbst wenn die Laseranlage unter Umständen einige Meter von der Prüfstelle entfernt steht.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath, für die Bereitstellung des Nd:YAG-Pulslaser-Systems, das für die Versuche zur kontinuierlichen Schwingungsanregung am Fraunhofer ILT verwendet wurde.

Referenzen

- [1] Hertlin, I. ZfP-kompakt und verständlich, Band 5: Akustische Resonanzanalyse. Castell Verlag, Wuppertal, 2003
- [2] Heinrich, M. ; Rabe, U. ; Grabowski, B. ; Valeske, B. Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von ur- oder umgeformten Serienteilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen – simulationsbasierte Modellüberlegungen. Konferenzbeitrag, DACH-Tagung, 2015.
- [3] Hertz, H. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. J. Reine. Angew. Math. 90 (1882), 156-171.
- [4] Müller, Peter, et al. Contact time at impact of spheres on large thin plates. Advanced Powder Technology 27(4) (2016), 1233-1243.
- [5] Thornton, C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres. Journal of Applied Mechanics 64(2) (1997), 383-386.
- [6] v. Ardenne, M. (Hrsg.) ; Musiol, G. (Hrsg.) ; Klemradt, U. (Hrsg.). Effekte der Physik und ihre Anwendungen. Akademische Verlagsgesellschaft Harri Deutsch, Frankfurt/M., Leipzig, 2005.
- [7] Rudolph, P. Physikalische Chemie der Laser-Material-Wechselwirkung mit Ba-Al-Borosilikatglas, AlN, SiC, SiC-TiC-TiB₂. Dissertation, Berlin, 2001.
- [8] Piersol, A.G.; Paez, T.L. Harris' Shock and Vibration Handbook. The McGraw-Hill Companies, New York, 2010.