

Integrale Prüfung von Miniaturdrehteilen mit Klangprüfung im Ultraschallbereich

Mario KIEL¹, Christoph PIENTSCHKE¹, Ralf STEINHAUSEN¹, Oliver SCHMIDTKE¹
Torsten HÖRISCH²

¹ Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle (Saale)

² HÖRISCH-PRÄZISION GmbH, Apolda

Kontakt E-Mail: christoph.pientschke@fz-u.de

Kurzfassung. Miniaturdrehteile für den Automobilbau unterliegen höchsten Qualitätsansprüchen. Durch die hohe Automatisierungsrate der Produktion ist eine hohe Fertigungsgenauigkeit erforderlich. Die Zerstörungsfreie Prüfung trägt zu möglichst geringen Ausfallraten bei. Idealerweise erfolgt die Prüfung inline im Produktionstakt. Die Klangprüfung als integrale Prüfmethode ist für die stabförmigen Bauteile vielversprechend, wobei die relevanten Eigenschwingungsfrequenzen im Ultraschallbereich liegen. Im Beitrag wird ein Überblick über die physikalisch erwartbaren Zusammenhänge zwischen Stabeigenschaften und Schwingungsfrequenzen gegeben. Die Herausforderungen für eine reproduzierbare Aufnahme von für die Stäbe charakteristischen Schwingungsspektren werden an Beispielen illustriert. Außerdem wird auf die Analyse der gewonnenen Frequenzspektren eingegangen, die von Methoden des Maschinellen Lernens profitiert. Die Optimierungen an Messaufbau und Auswertalgorithmen führten zu einem praxistauglichen Ansatz für die integrale Klangprüfung von Miniaturdrehteilen.

1 Prüfaufgabe: Miniaturdrehteile schnell und vollständig prüfen

1.1 Hohe Qualitätsansprüche an Miniaturdrehteile

Miniaturdrehteile sind wichtige Komponenten u. a. im Automobilbau. Sie bilden einen entscheidenden Bestandteil von Maschinen (Motoren, Ventilen), Steckverbindern oder auch Schließzylindern. Ein paar typische Teile sind in Abb. 1 beispielhaft dargestellt.



Abb. 1. Typische Miniaturdrehteile. Der längste Stab besitzt eine Länge von 100 mm.

Solche Miniaturdrehteile sind einerseits ein Massenprodukt, bei denen mit kurzen Taktzeiten hohe Stückzahlen produziert werden können. Dabei sind Stückzahlen im Millionenbereich pro Jahr keine Seltenheit, was theoretisch zu 3 bis 30 Tausend produzierten Teilen am Tag führt. Je nach Einsatzgebiet weisen sie eine hohe Variabilität auf: Form und Abmessungen unterscheiden sich ebenso wie das Material aus dem sie bestehen.

Im Automobilbereich werden aus Sicherheitsgründen und wegen der sehr arbeitsteiligen Produktionsweise höchste Qualitätsansprüche an die Miniaturdrehteile gestellt. Die Qualitätssicherung in arbeitsteiligen und weitgehend automatisierten Prozessen erfordert hochgradig reproduzierbare und verlässliche Teilprozesse. Das Vereinzeln, das Greifen oder Zuführen der Miniaturdrehteile wird maschinell erledigt, wobei kleinere Abweichungen schnell zu einem Fehler des Ablaufs und damit Maschinenstillstand führen können. Dieser verursacht hohen Kosten. Deswegen ist es nicht unüblich, dass der Endkunde schon bei einem einzigen abweichenden Bauteil ganze Produktionschargen mit hohen Stückzahlen bei seinen Lieferanten reklamiert.

Um den störungsfreien Ablauf der voneinander abhängenden Prozessschritte zu gewährleisten, sind nur geringe Toleranzen in den Zwischenprodukten statthaft. Vom Endkunden werden strenge Qualitätsklassen für die Zwischenprodukte definiert. Die Miniaturdrehteile müssen deswegen nicht nur frei von Fehlstellen wie Rissen sein, sondern auch maßhaltig mit Toleranzen im Mikrometerbereich sein. Zwar liegen die Herstellungskosten im Cent-Bereich, jedoch sind die Kosten bei Verletzung der Qualitätsnormen derart hoch, dass eine 100-Prozent-Prüfung der Bauteile angestrebt wird.

1.2 Die Klangprüfung als vollständiges und integrales Verfahren

Eine vollständige Prüfung aller Bauteile ist bei Taktzeiten im Bereich von Sekunden nur durch weitgehende Automatisierung zu erreichen. Zur Prüfung der Maßhaltigkeit werden optische Methoden eingesetzt. Risse können durch eine fluoreszierende Eindringprüfung ebenfalls visuell erfasst werden. Allerdings ist der Reinigungsaufwand sowohl davor als auch danach erheblich. Beide genannten Verfahren sind nicht direkt miteinander koppelbar, da die Anforderungen an die Optik bei der Prüfung der Maßhaltigkeit oder der Prüfung auf vorhandene Risse grundlegend unterschiedlich sind. Unabhängig davon ist die Prüfung selbst ein nachgelagerter Prozess, bei dem Bauteile stets vereinzelt werden müssen. Wünschenswert sind Verfahren, die mit *einer* Messung gleich *im Anschluss* an den eigentlichen Produktionsschritt eine Aussage über den gesamten Zustand des Prüflings im Vergleich zu einem Referenzzustand ermöglichen. Die Klangprüfung ist dazu grundsätzlich in der Lage.

Als Erfahrungswissen ist vielen Menschen die Klangprüfung vertraut, zum Beispiel um rissige Schüsseln anhand des dumpfen (statt tonhaften) Klangs nach der Schwingungsanregung zu erkennen. In ihrer messtechnisch fundierten Form ist sie als Akustische Resonanzanalyse in der Lage, eine verlässliche, nachvollziehbare Prüfaussage aus Messdaten zu erlangen[1]. Die Grundidee besteht darin, aus dem Resonanzverhalten der Miniaturdrehteile auf Abweichungen zu einem definierten Referenzzustand zu schließen. Physikalische Überlegungen zeigen, dass Abmessungen, Material und Form der Bauteile sowie die mechanische Anregung Einfluss auf die Resonanzfrequenzen haben. Damit bietet eine Messung auf dieser Basis ein ganzheitliches Bild des Bauteils und somit kann im Rahmen der Qualitätssicherung der Herstellungsprozess überwacht werden. Auch Abnutzung der Werkzeuge oder Schwan-
kung der Materialchargen könnten so detektierbar sein.

2 Prüfansätze

2.1 Das Spektrum zeigt die Unterschiede

Die Anwendung der Akustischen Resonanzanalyse auf die Miniaturdrehteile erscheint vielversprechend. In der Sprechweise der technischen Mechanik stellen die Drehteile Stäbe dar. Für diese gibt es einen theoretischen Rahmen, der die Berechnung von Resonanzfrequenzen ermöglicht. Freilich gilt dies nur für idealisierte Randbedingungen wie beispielsweise freie oder ein- bzw. zweiseitig starr eingespannte Stäbe.

Drei Eigenschwingungstypen können dabei unterschieden werden: die Längs- und die Biegeschwingung (Abb. 2) sowie die Torsionsschwingung (wegen ihrer schwierigen Anregbarkeit nicht weiter diskutiert).

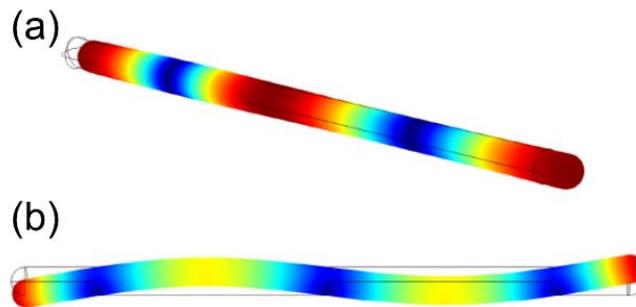


Abb. 2. Schwingungsmoden von frei schwingenden zylindrischen Stäben, a) Längsschwingung, b) Biegeschwingung

Bei der Betrachtung rotationssymmetrischer, homogener und isotroper Stäbe lassen sich die Eigenfrequenzen berechnen. Das ist auch analytisch möglich [2]. Die Form der Ausdrücke ist dabei für Längs- und Biegeschwingung

$$f_n = A_n \sqrt{E/\rho}$$

mit dem Elastizitätsmodul E und der Massendichte ρ . Die Parameter A_n unterscheiden sich je nach Schwingungstyp und Randbedingungen. Sie beinhalten Abmessungen sowie den Zusammenhang zur Ordnungsnummer n der Schwingungsmode. Im Falle der Biegeschwingungen ist dieser Zusammenhang durch die Nullstelle einer transzendenten Gleichung gegeben. Vor diesem Hintergrund lassen sich definierte Änderungen der Stäbe vornehmen und ihre Auswirkung im Frequenzspektrum analysieren. Die Resonanzfrequenzen sind über die A_n mit charakteristischen Abmessungen der Stäbe verbunden. Es werden Stäbe der Länge l und des Durchmessers d betrachtet. Für die Eigenschwingungsfrequenzen der Längsschwingungen gilt beispielsweise, dass eine Längenänderung um Δl zu einer relativen Änderung der n -ten Eigenschwingungsfrequenz f_n

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = -\frac{\Delta l}{l}$$

führt. Stabverkürzung führt zu Frequenzerhöhung. Bei Biegeschwingungen ist der relative Einfluss der Längenänderung auf die Eigenfrequenz doppelt so hoch und zusätzlich gibt es einen Einfluss des Stabdurchmessers

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = -2 \frac{\Delta l}{l} \text{ und } \frac{\Delta f_n}{f_n} = + \frac{\Delta d}{d}.$$

Die Biegeschwingung dürfte für die Analyse der Eigenschwingungen von großem Wert sein, weil sie in zwei voneinander unabhängige Schwingungsrichtungen erfolgen. Bei zylindersymmetrischen Stäben führen diese auf gleiche Resonanzfrequenzen. Wird diese Zylindersymmetrie jedoch gebrochen, sind verschiedene Resonanzfrequenzen zu erwarten.

Modalanalysen mit der Finite-Elemente-Methode (Software COMSOL Multiphysics) haben die analytischen Überlegungen bestätigt (Beispiele in Abb. 2). Es wurden dabei auch verschiedene idealisierte Randbedingungen untersucht. Bei den höheren Moden der Biegeschwingungen zeigten sich Abweichungen bei den Zusammenhängen zwischen relativer Frequenzänderung und relativen Abmessungsänderungen. Modellierungen mit verfeinertem Netz veränderten daran nicht viel, so dass auch die im analytischen Modell unterstellten Näherungen der Balkentheorie Ursache der Abweichung sein könnten. An Modell-Fehlstellen wurde die Vermutung bestätigt, dass Asymmetrien des Stabes (Kerben) zu einer Aufspaltung der Biegemoden führen. Je nach Position der Kerben relativ zu den Schwingungsknoten und Bäuchen der jeweiligen Schwingungsmode ändert sich die Aufspaltung der Resonanzfrequenzen. Auch die Kerbtiefe hat einen Einfluss. Die numerische Modellierung zeigt damit die Sensitivität der Eigenfrequenzen auf Stabeigenschaften, die für die Qualitätssicherung relevant sind.

Sowohl die analytische Beschreibung als auch die Modellierung liefern somit die physikalische Begründung für die akustische Resonanzanalyse an den Miniaturdrehteilen und erlauben die Größenordnung der Effekte abzuschätzen. Beide Methoden sind jedoch nicht in der Lage, die komplexen Randbedingungen und Anregungsverhältnisse experimenteller Aufbauten vollständige zu berücksichtigen. Grundsätzlich wurden analytische Berechnungen und numerische Modellierungen unter Laborbedingungen experimentell bereits verifiziert– jedoch für Stäbe deutlich größere Abmessungen [3]. Bei den hier untersuchten Miniaturdrehteilen ist die experimentelle Realisierung entscheidend.

2.2 Resonante Anregung

Die Abmessung der untersuchten Miniaturdrehteile bewirkt, dass die meisten Eigenschwingungen im Ultraschallbereich schwingen. Das ist der untere Ultraschallbereich von maximal einigen 100 kHz. Es wurden deswegen tieffrequente Ultraschallwandler verwendet, wie sie auch für die Luftultraschallprüfung zum Einsatz kommen. Ziel war dabei, die Eigenschwingungen im erwarteten Frequenzbereich effizient anzuregen als auch empfindlich zu empfangen. Für die Anregung der Längs- bzw. Biegeschwingungen wurden zwei Messgeometrien untersucht, die in Abb. 3 dargestellt sind. Die Stäbe wurden eingespannt, um sie axial zu Längsschwingungen (vergleichbar zu einer Transmissionsanordnung) bzw. seitlich zu Biegeschwingungen (vergleichbar zu einem 3-Punkt Biegeversuch) anzuregen.

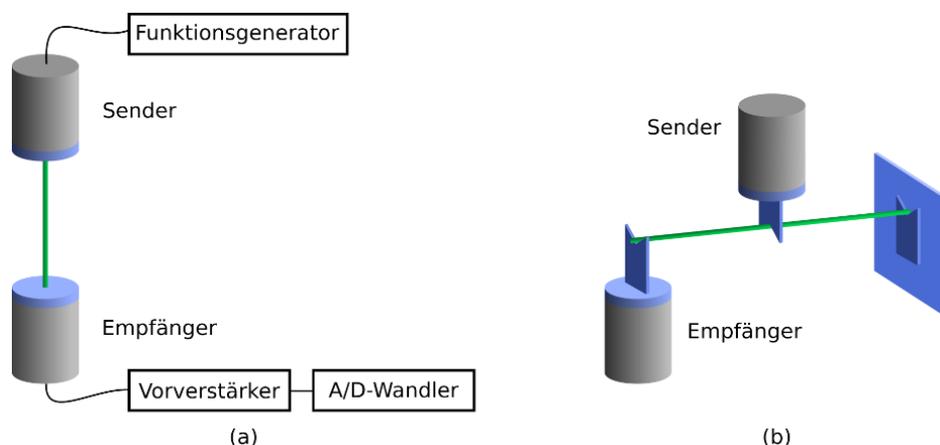


Abb. 3. Messaufbauten für die resonante Anregung von (a) Längs- und (b) Biegeschwingungen.

Mit einem Ultraschallempfänger wurden die zeitlich aufgelösten Amplituden aufgenommen. Diese wurden mittels Fast Fourier Transformation (FFT) in ein Frequenzspektrum umgerechnet und weiter analysiert. Der erste verfolgte Messansatz bestand in einer quasi-resonanten Anregung der Stäbe. Die Frequenzen des sinus-förmigen Anregungssignals wurden dabei zeitabhängig durchgestimmt (Sweep). Das Signal am Empfänger wurde mit einem Vorverstärker verstärkt und A/D gewandelt. Hierbei war die Hoffnung, dass die dabei angeregten Eigenschwingungen der Stäbe zu einer Überhöhung des Signals führen (Resonanz).

2.3 Impulsanregung

Für die Impulsanregung wurde eine Apparatur entwickelt, welche die teilautomatisierte und sehr gut reproduzierbare Einspannung der Stäbe und eine impulsförmige Anregung mittels eines Schlagarmes ermöglicht (Schema in Abb. 4). Die Stäbe wurden dafür zunächst in ihrer Mitte fixiert. Es konnte so erwartet werden, dass der Stab vorrangig in Biegemoden schwingt, was jedoch nicht explizit verifiziert werden kann.

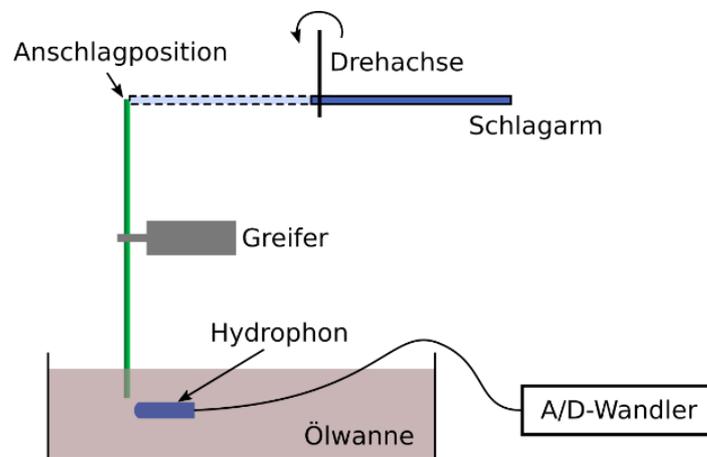


Abb. 4. Messaufbau für die Impulsanregung.

2.4 Generelles zu den experimentellen Anforderungen

Für die verlässliche Auswertung der ermittelten Resonanzspektren ist – wie in allen Messverfahren – die Reproduzierbarkeit der Messungen notwendig. In der hier vorliegenden Messaufgabe fällt dies besonders bei der Probenaufnahme ins Gewicht. Die Randbedingungen haben entscheidenden Einfluss auf die Resonanzspektren, wie auch die analytischen Überlegungen idealisierter Spezialfälle zeigten. In der Messanordnung sind sie ausschlaggebend für die Verlässlichkeit der Methode. Die Klemmung des Prüflings zwischen zwei Ultraschallwandlern (Resonanzanregung) oder die relative Position der Halterung bzgl. der Stablänge (Impulsanregung) beeinflussen die Resonanzeigenschaften des Stabes erheblich. Der Stab ist damit kein frei schwingendes System mehr. Daher wurden viele nominell gleichartige Miniaturdrehteile untersucht. Die Reproduzierbarkeit des Einspannens und die Einflüsse der Einspannung (z. B. Anpressdruck) wurden untersucht. Als einfache Modelle für Maßabweichungen wurden Stäbe deutlich unterschiedlicher Länge untersucht. Mit dem verbesserten Messaufbau sind aber auch wesentlich kleinere Maßabweichungen messbar.

3 Ergebnisse

3.1 Resonante Anregung

Die resonante Anregung führte zu schwer zu interpretierenden Resonanzspektren. Beispielfhaft sei in Abb. 5 das rot gefärbte Spektrum einer Messung eines 47 mm langen Stabes in der Messanordnung für Längsschwingungen gezeigt. Es zeigte sich, dass trotz großer Sorgfalt die Messdaten nicht gut reproduzierbar waren. Auch stellte sich die Frage, welchen Schwingungsmoden die vielen Peaks zuzuordnen sind. Als Vergleich wurden daher auch Messungen ohne Stab (also beide Wandler samt Probenaufnahme berühren sich gegenseitig) aufgenommen, wie ebenfalls in Abb. 5 gezeigt. Das Spektrum reduziert sich auf weniger Peaks, welche aber darauf hindeuten, dass das ganze untersuchte System viel komplizierter ist, als es die grundsätzlichen theoretischen Betrachtungen im Abschnitt 2.1 vermuten lassen.

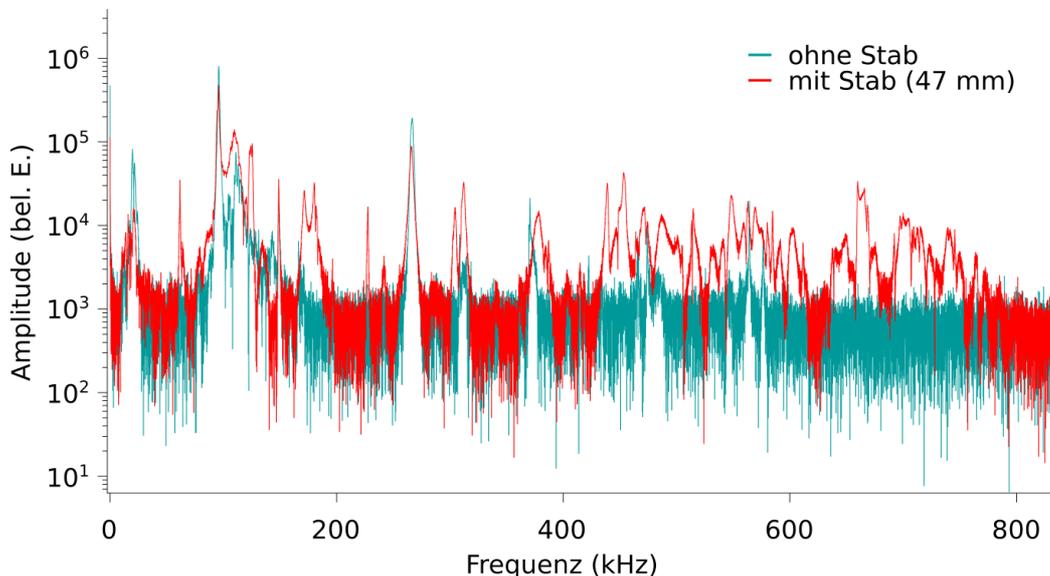


Abb. 5. Spektren bei resonanter Anregung eines 47 mm langen Stabes (rot) und des Messaufbaus ohne Stab (türkis).

Um einen Eindruck zu bekommen, welche Peaks des Spektrums sich konkreten Schwingungsmoden zuordnen lassen, wurden Stäbe mit deutlichen Längenunterschieden vermessen. Die Spektren sind in Abb. 6 gezeigt. In beiden Frequenzbereichen konnte ein Peak gefunden werden, der sich im Rahmen der Messgenauigkeit so verhält, wie es der formelle Zusammenhang zwischen relativer Längenänderung und relativer Frequenzverschiebung für Längsschwingungen aus Abschnitt 2.3 erwarten lässt. Somit konnten zwei der vielen auftretenden Peaks der Längsschwingung zugeordnet werden

Die Herkunft bzw. Ursache für anderen Peaks im Spektrum konnte in diesem Stadium der Untersuchung nicht geklärt werden. Es bleibt jedoch zu vermuten, dass es sich dabei teils auch um spektrale Anteile des Messaufbaus (dann in Kombination mit dem Stab selbst) handelt, da diese unbeeinflusst von der deutlichen Änderung der Stablänge bleiben. Prüfköpfe und Halterung haben eine erheblich größere Masse als die Stäbe, so dass deren Schwingungsfrequenzen weniger bis gar nicht von der Stablänge abhängen. Selbst nach verschiedenen Anpassungen ließen sich mit diesem Messprinzip deswegen keine ausschließlich für die Stäbe charakteristischen Resonanzfrequenzen anregen. Auch die Methoden des Maschinellen Lernens (wie im Abschnitt 5 zu den Impulsmessungen diskutiert) führten zu keinen anderen Aussagen, was die Vermutung bestärkt, dass die Messungen kaum bis gar nicht von den Stäben selbst dominiert werden.

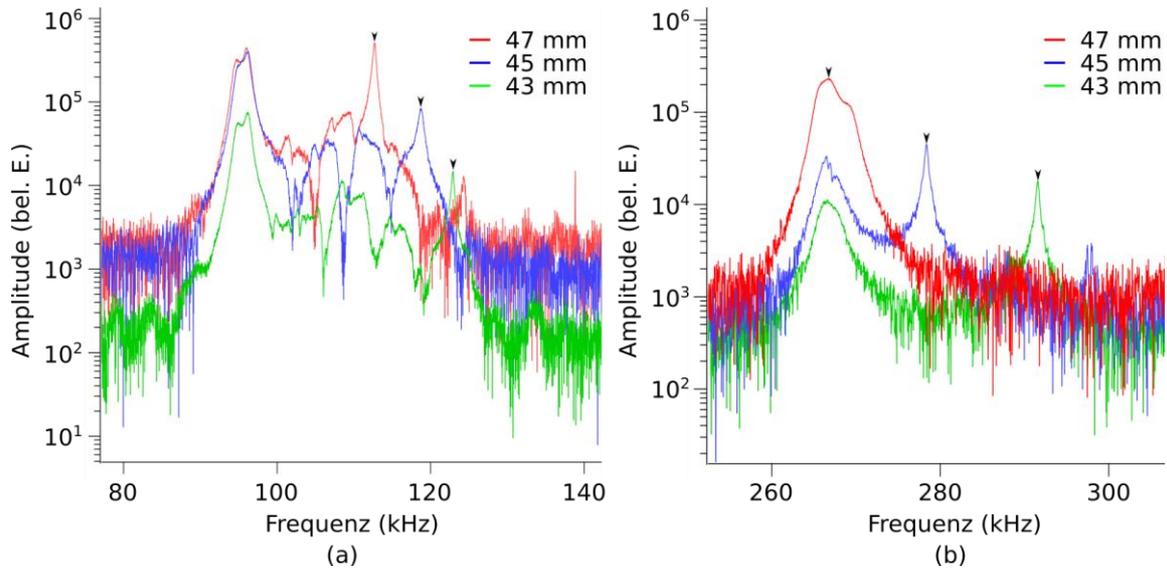


Abb. 6. Spektren bei resonanter Anregung von drei verschiedenen langen Stäben. In (a) und (b) sind zwei Frequenzbereiche dargestellt, welche die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Stablänge illustrieren.

3.2 Impulsanregung

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, ist die resonante Anregung mittels Ultraschallsensoren nicht zielführend für die vorliegende Prüfaufgabe. Es war also nötig, eine Messmethode zu entwickeln, die einerseits breitbandig anregen kann, aber andererseits die Schwingung der Stäbe möglichst wenig oder gar nicht beeinflusst. Mit einem neu entwickelten Messaufbau (vgl. Abschnitt 2.3) konnten diese Anforderungen mittels Impulsanregung erfüllt werden.

In der Abb. 7 sind die Zeitreihen und die Spektren der Messungen von einem Stab, der ein nominelles Sollmaß von 104 mm besitzt (grüne Messkurven) als auch von Stäben mit technisch relevantem Über- (blau) bzw. Untermaß (rot) von nur 30 μm (also nur etwa 0,03% Abweichung) dargestellt.

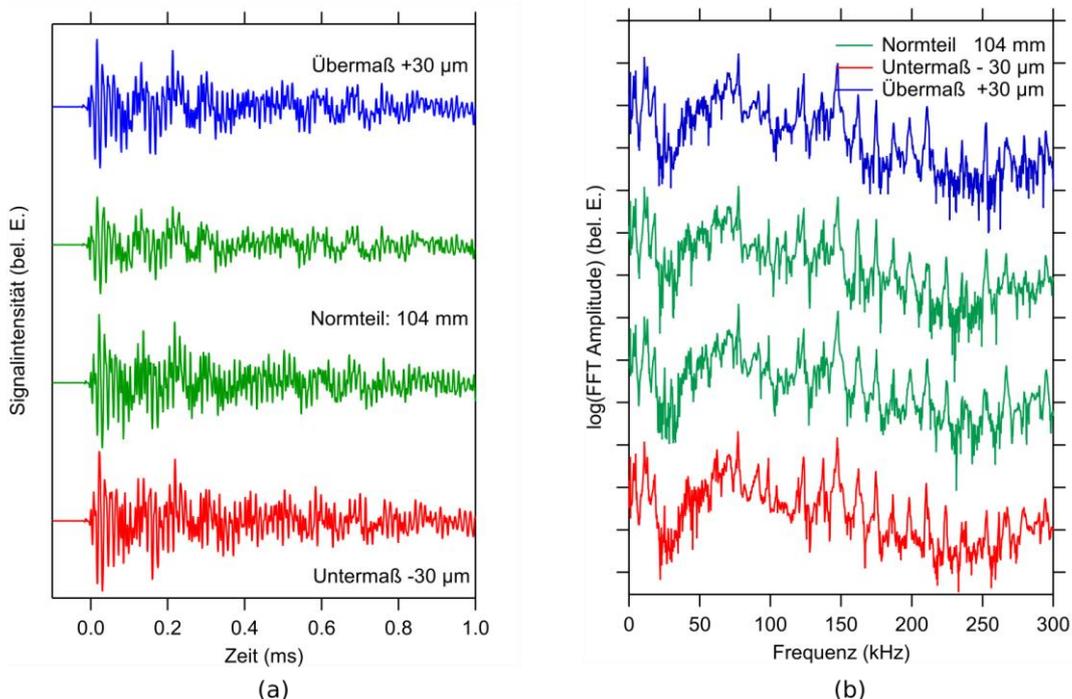


Abb. 7. (a) Zeitreihen für unterschiedlich lange Miniaturdrehteile, (b) Spektren

Wie man anhand der zwei Messungen (jeweils am gleichen Stab) der Normlänge erkennen kann, sind weder die Zeitreihen noch die Spektren identisch, was zunächst auch hier auf fehlende Reproduzierbarkeit hindeutet. Dennoch ist zumindest der prinzipielle Zeitverlauf (Amplitude, Signalabnahme mit der Zeit) auch die Spektren zumindest ähnlich. Das Gleiche gilt aber auch für die beiden anderen Messungen der Stäbe mit leicht unterschiedlicher Länge. Zieht man den oben aufgeführten Zusammenhang zwischen Längen- und Frequenzänderung in Betracht, so würde man hier eine Frequenzverschiebung der Peaks von etwa 60 Hz (entspricht 0,03% bei angenommener Peakposition von 100 kHz) erwarten. Dies ist aufgrund der erzielbaren Auflösung und der Breite der Peaks mit dem aktuellen Messaufbau nicht möglich. Die punktweise Auswertung einzelner Eigenschwingungsfrequenzen gelangt hier trotz grundsätzlich geeignetem Messaufbau an ihre Grenzen.

Um dennoch Aussagen über das Prüfergebnis zu erhalten wurden Methoden des Maschinellen Lernens angewandt, womit sich die Möglichkeit ergibt, die Daten ganzheitlicher und nicht anhand einzelner Merkmale zu analysieren. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

4 Datenanalyse

Auch wenn die Auswirkung von Abmessungsänderungen physikalisch prinzipiell verstanden ist, so kann umgekehrt aus den Resonanzspektren nicht ohne weiteres auf sie zurückgeschlossen werden. Außerdem zielt die Prüfung auf zum Teil subtile Abweichungen von einem Referenzzustand, die sich auch in Aufspaltungen von Resonanzpeaks, zusätzlichen Resonanzen oder auch in Amplitudenänderungen äußern sollten. Diese Unterschiede gehen über das punktweise Vergleichen von einzelnen Resonanzfrequenzen hinaus. Komplexere Entscheidungskriterien sind erforderlich. Für den praktischen Einsatzzweck muss es zudem gelingen, einen Referenzzustand aus den Messdaten so gut und messtechnisch reproduzierbar zu definieren, dass auch kleine Abweichungen robust gegenüber zufälligen Störungen aufgefunden werden können. Deswegen ist es notwendig, das Resonanzspektrum in seiner Gesamtheit zu analysieren. Hierfür erscheinen Methoden des Maschinellen Lernens (ML) als vielversprechender Ansatz, insbesondere solche zur Klassifikation.

Es wurden einige Methoden anhand experimentell erfasster Resonanzspektren getestet. Sie haben sich als grundsätzlich geeignet erwiesen. Sie bieten den überragenden Vorteil, dass sie leicht an bestehende Referenzkörper angepasst werden können. Freilich sind für gute Ergebnisse viele definierte gleichartige Referenzproben zum Anlernen notwendig. Dabei muss jedoch das bloße Auswendiglernen vermieden werden, weil solches Overfitting die Beurteilungstärke für unbekannte Proben reduziert.

Bei den oben vorgestellten Messungen von Stäben mit unterschiedlichen Längen wurden jeweils 100 Messungen durchgeführt. Davon wurde die Hälfte der Messungen für das Anlernen des jeweiligen Algorithmus verwendet, wobei jede der drei Stablängen einer anzulernenden Gruppe zugeordnet wurde. Die übrigen Messungen wurden anschließend anhand des gelernten Schemas den Gruppen zugeordnet. Dabei wurden zunächst die Algorithmen „*Support Vector Machine*“ (SVM), „*Random Forest*“ (RF) und „*Logistische Regression*“ (LR) verwendet [4]. Die Zuordnung wurde anhand der Testdaten überprüft, die nicht zum Trainieren der Algorithmen verwendet worden sind. Die erzielte Genauigkeit bei der Zuordnung betrug 99,3% (SVM), 98,7% (RF) und 100% (LR) und stellt damit eine sehr gute Basis für die Applikation dieser Methoden in den Prüfalltag dar. Es muss natürlich sichergestellt werden, dass zwar durchaus intakte Teile als fehlerhaft klassifiziert werden dürfen (also nur vermeintlich defekte Teile) aber auf keinen Fall fehlerhafte Teile als intakt klassifiziert werden dürfen. Die Optimierung der Algorithmen ist Bestandteil weiterer Untersuchungen.

Beim Test des Versuchsaufbaus wurden auch sehr viele Messungen an einem einzelnen Stab durchgeführt. Dabei fiel auf, dass der Schlagarm mit der Zeit durchaus Abdrücke auf dem Bauteil hinterließ. Zwar stellt das die Zerstörungsfreiheit der Methode in Frage, jedoch sollte eine einzelne Messung, wie sie für die endgültige Anwendung angestrebt wird, keinen merklichen Einfluss auf die Qualität der Bauteile haben.

Es wurde versucht, die Veränderung des Stabes messtechnisch nachzuweisen. Hierfür wurden 150 wiederholte Messungen aufgenommen. Anschließend wurden Schritt für Schritt jeweils 20 Messungen einer virtuellen Gruppe zum Training verwendet. Innerhalb einer solchen Gruppe kann ein ähnlicher Beanspruchungsgrad unterstellt werden. Die Messungen Nr. 1–20 bildeten dabei die Vergleichsgruppe 1 und jeweils nächsten 20 Messungen die Gruppe 2, wobei diese Gruppe mit jeder weiteren Analyse um 20 Messungen weiter verschoben wird (also 21–40, 41–60 usw.). Wenn es eine Veränderung des Prüflings mit der Zeit gibt, welche das Messsignal beeinflusst, so sollten die der 2. Gruppe nachfolgenden Messungen mit der Zeit immer zuverlässiger mittels des Algorithmus in die 2. Gruppe zugeordnet werden. Die Ergebnisse für die Wahrscheinlichkeit dieser Zuordnung in die Gruppe 2 sind in Abb. 8 mittels blauer Punkte dargestellt. Die gestrichelte Regressionskurve zeigt den deutlichen Trend, der bei den letzten Messungen eine Zuordnung von 100% erreicht.

Das Ergebnis zeigt einerseits, dass die Messung den Stab mit der Zeit verändert, unterstreicht aber auch andererseits die Funktionalität der Methode. Das Beispiel kann als Modell für eine zeitliche Veränderung im Produktionsprozess angesehen werden. Im Rahmen der Qualitätssicherung erlaubt die Methodik offenbar den Nachweis auch einer Apparatedrift.

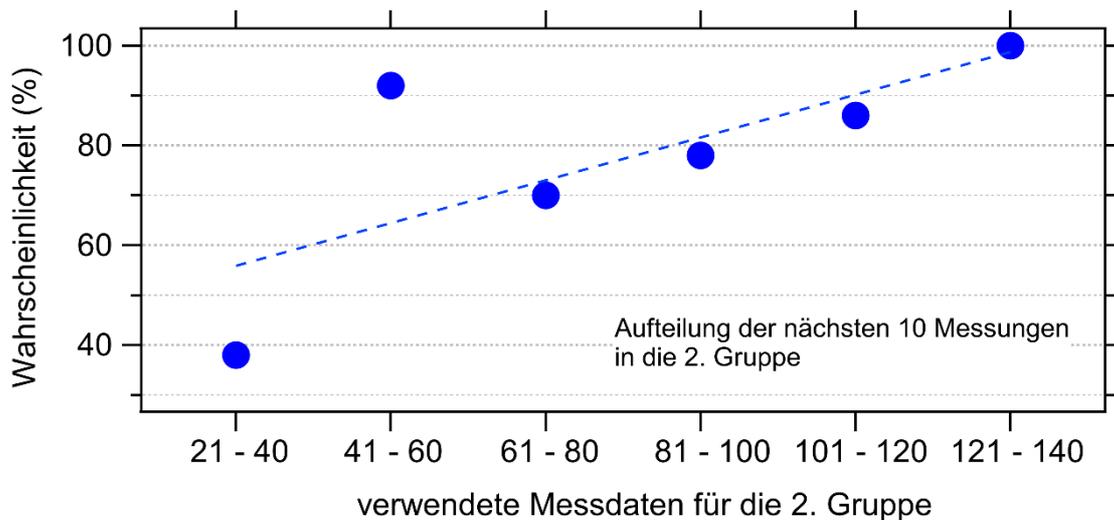


Abb. 8. Wahrscheinlichkeit der Zuordnung der nachfolgenden Messungen in die trainierte vorangegangene Gruppe bei einer Dauerprüfung eines Stabes.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeiten haben gezeigt, dass die Akustische Resonanzanalyse (Klangprüfung) für die schnelle und integrale Prüfung von Miniaturdrehteilen geeignet ist. Eine inline-Prüfung in Taktstraßen erscheint damit möglich. Dabei scheint die breitbandige Impulsanregung geeignet zu sein, aussagekräftige Spektren zu generieren. Der reproduzierbaren Anregung und Auswertung der Prüflinge kommt dabei hohe Bedeutung zu. Die Beschränkung der Auswertung allein auf die Resonanzfrequenzen ist für die Prüfaufgabe nicht ausreichend. Die Abweichung des Prüflingszustandes vom Referenzzustand muss aufgrund komplexerer Eigenschaften des Resonanzspektrums erfolgen. Algorithmen des Maschinellen Lernens sind offenkundig geeignet, Maßabweichungen aber auch Drifteffekte nachzuweisen.

6 Danksagung

Dieses Projekt wurde unter dem Förderkennzeichen ZF4029303PO8 vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert. Wir danken dem Fördermittelgeber herzlich für die Unterstützung.

7 Referenzen

- [1] Ingolf HERTLIN, *Akustische Resonanzanalyse*, Band 5 der Reihe „Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung – ZfP kompakt und verständlich“, Castell-Verlag, Wuppertal, 2003.
- [2] A. BUDÓ, *Theoretische Mechanik*, 12. Auflage, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1990.
- [3] Ute RABE, Kai GENG, Matthias GOEBEL, Ramgopal BALIJEPALLI, Friedhelm WALTE, Bernd VALESKE, *Schwingungen von Stäben als Modell für die Klangprüfung*, DGZfP-Jahrestagung 2010.
- [4] Aurélien GÉRON. *Praxiseinstieg Machine Learning mit Scikit-Learn & Tensorflow – Konzepte, Tools und Techniken für intelligente Systeme*. dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg, 2018.