Der Klang der Frucht: Zwischen intuitivem Hören und wissenschaftlichen Untersuchungen

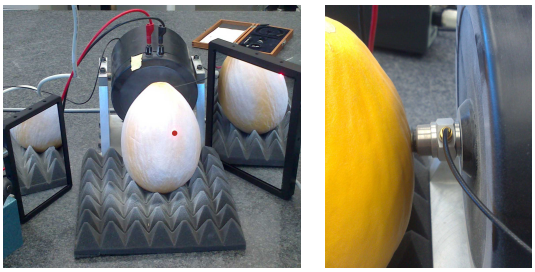
Marcus Guettler, Monika Gatt, Steffen Marburg
Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching b. München, Deutschland, Email: Marcus.Guettler@tum.de

Einleitung

In der modernen Gesellschaft stellen gesunde Nahrungsmittel einen immer wichtiger werdenden Bestandteil einer ausgewogenen Lebensweise dar [4]. Der globale Handel ermöglicht uns, täglich Supermärkte zu besuchen und aus einem breiten Sortiment von Köstlichkeiten zu wählen, ohne uns explizit über Qualitätsmerkmale Gedanken machen zu müssen.
Eine besondere Herausforderung stellt jedoch die Qualitätssicherung von Früchten dar. Häufig kommt es durch lange Transportwege zwischen Anbaugebieten und endgültigem Verkaufsstandort dazu, dass diese verderben bzw. Alterungserscheinungen aufweisen. Als Beispiel dient die Braunfärbung von Bananenschalen, die ausreichen kann, um das Produkt am Markt nicht mehr verkaufen zu können. Eine Einschätzung des Reifeprozesses anhand derartiger äußerer Merkmale ist leicht durchführbar. Allerdings lässt sich selten auf den inneren Reifegrad der Frucht schließen, ohne sie zu öffnen oder zu beschädigen. Daher besteht die Notwendigkeit, anhand von messbaren Größen auf den inneren Zustand von Früchten zu schließen. Eine andere Sichtweise besteht im Kontext der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. In der Arbeit von Stache [6] konnten modale Parameter als Basis eines Fehlerdetektionsalgorithmus verwendet werden, um einen Riss als definierte Form eines Fehlers in der Struktur erfolgreich zu identifizieren.
In der vorliegenden Abhandlung wird die Methode der experimentellen Modalanalyse aus dem Bereich der Strukturdynamik [3, 5] auf das Schwingungsverhalten von Früchten angewandt. Mit dieser Methode ist es möglich, die strukturdynamischen Eigenschaften zu charakterisieren und eine Basis von Ergebnissen bereitzustellen, die zur Qualitätssicherung verwendet werden kann. Mithilfe einer periodischen Krafteinleitung erfolgt die Anregung der Prüfobjekte, hier am Beispiel einer Honigmelone und eines Apfels der Sorte Ambrosia. Mit einem Laser-Doppler-Vibrometer wird die Oberflächenschwinggeschwindigkeit gemessen. Eine anschließende Modalanalyse offenbart das charakteristische Schwingungsverhalten bei spezifischen Frequenzen und liefert geeignete Vergleichsmerkmale, wie Schwingungsformen, Eigenfrequenzen oder auch modale Dämpfungswerte.

Experimente

Für die Experimente wird das Labor der Universität der Bundeswehr München an der Professur für Technische Dynamik genutzt. Da sich die Vorgehensweise für die Untersuchungen von Apfel und Honigmelone ähnelt, beschränkt sich die Beschreibung des Versuchsaufbaus auf den der Honigmelone. Abb. 1 zeigt den experimentellen Aufbau, wobei einerseits die Spiegelkonfiguration und andererseits die Krafteinleitung mittels Shaker und Kraftsensor dargestellt sind. Die Nutzung von Spiegeln, vgl. Abb. 1(a), macht dem Laser-Doppler-Vibrometer (LDV; PSV-400; Polytec) den optischen Zugang aller signifikanten Seiten zugänglich. Ein Netz aus Messpunkten gibt vor, an welchen Stellen die Oberflächengeschwindigkeit mithilfe des LDV, gemessen wird. Der rote Punkt in Abb. 1(a) verdeutlicht einen dieser Messpunkte auf der Oberfläche. Als Schwingungserreger dient ein spannungsbetriebener Shaker. Die Aufzeichnung der eingeleiteten Kraft erfolgt mithilfe eines entsprechenden Sensors (B&K Typ 8200). Für einen kontinuierlichen Kontakt sorgt eine mit Wachs fixierte Kalotte, die üblicherweise für Impulshammertests verwendet wird.



(a) Spiegelkonfiguration (b) Krafteinleitung

Abbildung 1: Messaufbau: Honigmelone

Ergebnisse

Aus den Messungen der Oberflächengeschwindigkeiten und der eingeleiteten Kraft werden Frequenzspektren mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) gebildet und Übertragungsfunktionen (engl. FRF) berechnet. Anschließend wird über alle Messpunkte gemittelt. Abb. 2 zeigt diese gemittelte FRF der Honigmelone im Frequenz-

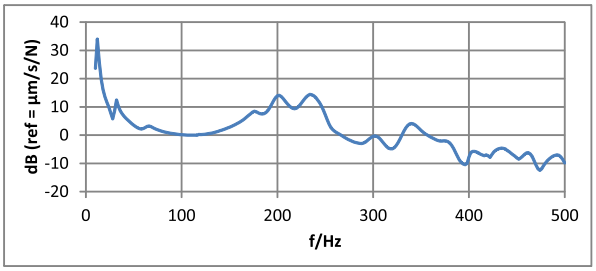
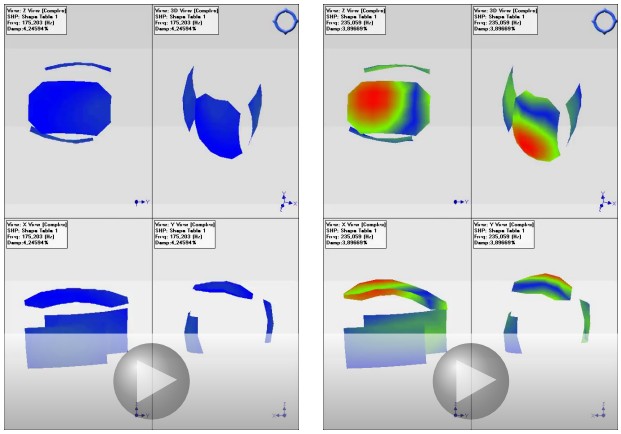
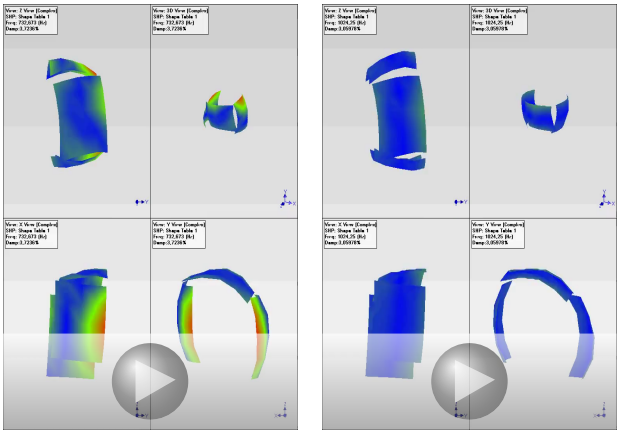


Abbildung 2: Gemittelte FRF-Spektrum der Honigmelone



(a) Mode1: $f = 175\,Hz$ (b) Mode3: $f = 235\,Hz$

Abbildung 3: Eigenformen der Honigmelone



(a) Mode1: $f = 733\,Hz$ (b) Mode3: $f = 1024\,Hz$

Abbildung 5: Eigenformen des Apfels

bereich bis $f_{max} = 500\,Hz$. Die experimentelle Modalanalyse erlaubt eine Visualisierung der typischen Schwingungsformen und verknüpft diese mit den zugehörigen Eigenfrequenzen. Obwohl die Honigmelone bis $f_{tot} = 3\,kHz$ vermessen wird, sind lediglich die Messwerte bis zu einer Frequenz von $f_{max} = 500\,Hz$ brauchbar. Darüber unterschreiten sie die Rauschgrenze des LDV und bleiben deshalb unberücksichtigt. Exemplarisch illustriert Abb. 3 eine derartige Animation der Ergebnisse für die erste und dritte Mode der Honigmelone[1]. Diese Moden finden sich bei $f = 175\,Hz$ und bei $f = 235\,Hz$. In allen aufgeführten Animationen verbindet die y-Achse die Ober- und Unterseite der Frucht.

Klopft man mit dem Finger an die Melone, nimmt man denjenigen typischen Ton wahr, der der Frequenz der ersten Mode entspricht. In Analogie zu Strukturschwingungen einer Kugel ist die erste Mode der Melone mit einer Dipolmode vergleichbar. Dieser Vergleich bekräftigt das Vertrauen in die gewonnenen Resultate.

Schwingungen beim Apfel werden in einem höheren Frequenzbereich beobachtet, vgl. Abb. 4. Unterhalb von

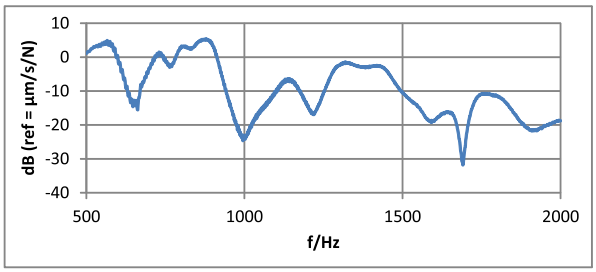


Abbildung 4: Gemittelte FRF-Spektrum des Apfels

$f_{min} = 500\,Hz$ lassen sich keine Eigenschwingungen der Struktur identifizieren. Oberhalb von $f_{max} = 2\,kHz$ unterschritten die Messwerte, analog zu denen der Honigmelone, die Rauschgrenze. Aus der Liste der Moden, die sich verlässlich berechnen lassen, d.h. MAC[2]-Werte größer als $0,85$, werden in Abb. 5 die Animationen der ersten bei $f = 733\,Hz$ und der dritten Mode bei $f = 1024\,Hz$ dargestellt.

Es ist nicht neu und bereits vereinzelt in der Literatur zu finden [1, 2, 7], dass derartige Schwingungsformen tatsächlich mess- und berechenbar sind.

[1] Für die Animationen ist der Adobe Flash Player notwendig.

[2] MAC: Modal Assurance Criterion

Zusammenfassung und Ausblick

Es war das Ziel der Untersuchung zu zeigen, dass die experimentelle Modalanalyse ein leistungsfähiges Werkzeug darstellt, um strukturdynamische Untersuchungen an Früchten durchzuführen. Ein wichtiger Vorteil der vorgestellten Methodik liegt in der zerstörungsfreien Behandlung der Prüfobjekte. Eine handelsübliche Honigmelone und ein Apfel der Sorte Ambrosia standen im Mittelpunkt der experimentellen Untersuchungen. Für beide Objekte lassen sich strukturspezifische Merkmale, z.B. Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen, berechnen. Diese bieten die Möglichkeit zur objektiven und belastbaren Qualitätskontrolle.

Schwerpunkte der zukünftigen Forschung sind zum einen die stochastische Verteilung der Messwerte bei der Betrachtung von mehreren Prüfobjekten einer Sorte, um einen Vertrauensbereich der Ergebnisse zu definieren. Dadurch ist es möglich, Merkmale zu entwickeln, die zulässige von unzulässigen Reifegraden unterscheiden. Zum anderen entsteht die Forderung nach einer kostengünstigen und zuverlässigen Messmethode, um dieses Verfahren der industriellen Anwendung zuzuführen.

Literatur

[1] Chen, H. und De Baerdemaeker, J.: Modal-analysis of the dynamic behavior of pineapples and its relation to fruit firmness. *Transactions of the ASAE* **36**(5) (1993), pp. 1439–1444

[2] Diezma-Iglesias, B.; Ruiz-Altisent, M. und Barreiro, P.: Detection of Internal Quality in Seedless Watermelon by Acoustic Impulse Response. *Biosystems Engineering* **88**(2) (2004), pp. 221–230

[3] Ewins, D.J.: *Modal Testing: Theory, Practice and Application.* (second edition), Hertfordshire: Research Studies Press Ltd., 2000

[4] Lemke, H.: *Ethik des Essens. Eine Einführung in die Gastrosophie.* Berlin: Akademie, 2007

[5] Magnus, K. und Popp, K.: *Schwingungen.* Stuttgart: B.G. Teubner, 2005

[6] Stache, M.; Guettler, M. und Marburg, S.: A precise non-destructive damage identification technique of long and slender structures based on modal data. *Journal of Sound and Vibration* **365** (2016), pp. 89–101

[7] Zude, M.; Herold, B.; Roger, J.-M.; Bellon-Maurel, V. und Landahl, S.: Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *Journal of Food Engineering* **77**(2) (2006), pp. 254–260