

## **Technisch-wirtschaftliche Potentialausschöpfung bei der neuronumerischen Schadensdetektion an Mehrweggütern mittels spatiotemporaler Vibrationsanalyse am Beispiel von Getränkekästen**

### **Technical and Economical Potential Exploitation with Neuro-Numerical Damage Detection at Returnable Goods by Means of Spatiotemporal Vibration Analysis Taking Beverage Crates as Example**

**A. Kasprzyk<sup>1</sup>, J. Forstner<sup>1</sup>, R. Benning<sup>1</sup>, H. Vogelpohl<sup>2</sup> and A. Delgado<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup>: Institute of Fluid Mechanics, Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany; <sup>2</sup>: Chair for Food Packaging Technology, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan, Germany

Spatiotemporale Schwingungsanalyse, Numerische Simulation, Bildverarbeitung, KNN

Spatiotemporal Vibration Analysis, Numerical Simulation, Image Processing, ANN

#### **Zusammenfassung**

Ein zuverlässiges, robustes und automatisierbares Schadenserkenkungssystem für Flaschen und Flaschenkästen erweist sich in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie als unverzichtbar, um die Produkt- und Betriebssicherheit sowie einen reibungslosen Ablauf in der Logistikkette zu gewährleisten. Auch spielt die Gefährdung des Produkt- und Firmenimages durch eine schadensbedingte, potenzielle Verletzung des Kunden in der heutigen Marktwirtschaft eine entscheidende Rolle. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde daher ein im Lebensmittel- und Getränkebereich völlig neuartiges Verfahren zur Detektion von schadhafte Verpackungseinheiten entwickelt, basierend auf einer mechanischen Vibrationsanalyse. Die Schwingungsprofile der Getränke Kästen werden mittels einer CCD-Kamera erfasst, anschließend mit Hilfe einer geeigneten Software ausgewertet und die Daten schließlich mit Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) klassifiziert. Die mechanische Schwingungsanalyse erweist sich als äußerst leistungsfähig und offenbart großes Erweiterungspotenzial.

#### **Einleitung**

In Deutschland laufen derzeit schätzungsweise 400-500 Millionen Mehrwegkästen für CO<sub>2</sub>-haltige Getränke um [1]. Der Anteil der Mineralwasserindustrie beläuft sich dabei auf ca. 165 Millionen Kästen [2], wobei jeder Kasten im Laufe seines Lebenszyklus bereits durchschnittlich 100 Umläufe absolviert hat. Die restlichen 235-335 Millionen Kästen werden hauptsächlich von Brauereien eingesetzt. Bei 4-5 Umläufen Jahr und Einsatzzeiträumen von bis zu 16 Jahren absolvieren diese ca. 70 Umläufe. Neben der zeitlich bedingten Materialalterung sind die Flaschenkästen während der Einsatzdauer auch physikalischen, klimatischen und chemischen Belastungen unterworfen. Diese Belastungen können mechanische Schäden an den Getränke Kästen hervorrufen, welche ihre Gebrauchstüchtigkeit und/oder Maschinengängigkeit zum Teil erheblich beeinträchtigen. Abgesehen von negativen Auswirkungen für den Endverbraucher können derartig

beschädigte Flaschenkästen auch für den Abfüllbetrieb, dessen Eigentum sie sind, weit reichende Folgen haben. So kann das Markenimage leiden, die Sicherheit im Lager- und Transportbereich kann beeinträchtigt werden und die Flaschen sowie deren Ausstattung können beim Verpacken oder beim Transport beschädigt oder zerstört werden. Zudem können beschädigte Flaschenkästen für Getränkeabfüller einen erheblichen Kostenfaktor darstellen. Die Hauptkosten entstehen dabei zum einen durch die Aussortierung und Ersatzbeschaffung defekter Kästen und zum anderen durch Störungen des laufenden Anlagenbetriebes.

In neuester Zeit werden vermehrt Anstrengungen unternommen, serienreife Detektions- und Selektionssysteme zu entwickeln, die eine automatische Erkennung und Klassifikation schadhafter Kästen in Getränkeabfüllanlagen im Durchlauf zuverlässig ermöglichen und sie, wenn nötig, aus dem Mehrwegkreislauf vollautomatisch ausschleusen. Bereits im Rahmen eines früheren Forschungsvorhabens („**Automatische Selektion von Mehrweggütern der Lebensmittel- und Getränkeindustrie mittels Neuronumerik**“ AIF 137/ZN1) erfolgte eine Auseinandersetzung mit der vorab genannten Thematik und die Entwicklung eines im Lebensmittel- und Getränkebereich völlig neuartigen Verfahrens zur Detektion von schadhafte Verpackungseinheiten. Ein Hybrid, bestehend aus numerischer Simulation und künstlicher Intelligenz in Form von KNN, bildet dessen Kern. Die erstmalig in der Getränkebranche zur Erkennung des Gebindezustands eingesetzte, mechanische Schwingungsanalyse zeigt sich als äußerst leistungsfähig und offenbart großes Erweiterungspotenzial. Für die Erfassung der mechanisch generierten Schwingungsantwort wurde ein Laservibrometer eingesetzt.

Ungeachtet der bestätigten, ausgezeichneten Selektionssicherheit und Praxistauglichkeit der genannten neuronumerischen Detektionsmethode, schöpft selbige technisch und wirtschaftlich ihr hohes Potenzial nicht vollständig aus. Daher soll der Fokus bei der Weiterentwicklung des bereits bestehenden, auf mechanischen Schwingungssignalen basierenden neuronumerischen Identifikations- und Selektionssystems auf eine flächenbezogene Erfassung der Schwingungsantworten mittels eines Kamerasystems (spatiotemporale Schwingungsvisualisierung) und eine Verarbeitung der Bildsignale mittels spezieller Software gelegt werden. Zweck dieser Maßnahmen sind die Verringerung der Systemkosten, die Erhöhung der Detektionsrate unter Praxisbedingungen sowie die Verkürzung der maschinellen Bearbeitungszeit.

## **Material und Methoden**

### **1. Numerische Simulation**

Die FEM-Simulation der Schwingungsantwort von Flaschenkästen mit verschiedenen Schadensprofilen erfolgt durch Modellbildung mit der Simulationssoftware ABAQUS der Fa. Simulia. Bei der numerischen Modellierung erfolgt eine Einteilung der Kastenstruktur in 26 Einzelsegmente (Abbildung 1), was wiederum eine Einzelbetrachtung der Reaktionskräfte sämtlicher Segmente gestattet. Die Zeit- und Kostenersparnis, welche sich hierdurch gegenüber konventionellen Methoden ergibt, ist beträchtlich.

Die Simulationsergebnisse liefern die Eingangsdaten zur neuronumerischen Parametrierung der KNN. Bisher steht das CAD-Modell eines Flaschenkastentyps der GDB zur Verfügung.

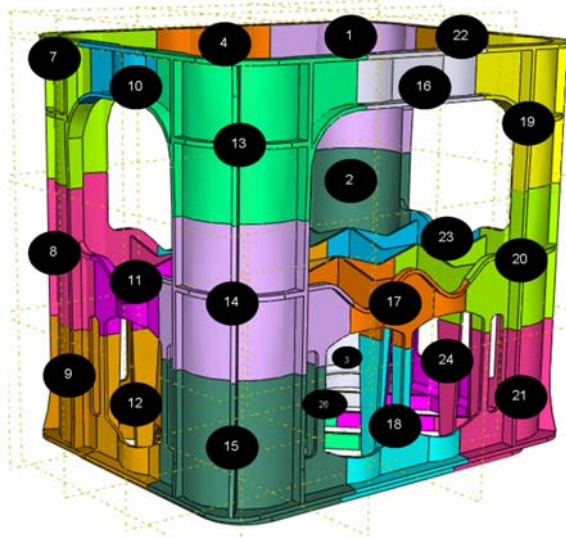


Abb. 1: Segmentierung des Flaschenkastens

## 2. Konfiguration der Mustererkennung

Zur Klassifizierung der gewonnenen Bilddaten werden mit dem Open-Source-Softwaretool MEMBRAIN unterschiedliche KNN definiert. Von Vorteil ist hierbei die einfache Handhabung, insbesondere der Visualisierung, in MEMBRAIN im Gegensatz zu anderen Simulationsprogrammen für KNN. Die Netze basieren auf der Auswertung der gemittelten normalisierten Beschleunigungs- bzw. Auslenkungswerte der betrachteten Kastenkomponente (längsseitige Griffleiste). Die Netzwerktopologien stellen Feedforward-Netze mit zwei verdeckten Schichten (sog. Hidden Layers) dar. Bisher wurden die Netze mit 46 verschiedenen Datensätzen aus den numerischen Simulationen trainiert (26 Datensätze von beschädigten Flaschenkästen und 20 Datensätze von unbeschädigten Flaschenkästen).

Während der Lernphase wird den KNN die Zugehörigkeit der Prüflinge zur Kategorie „Nicht beschädigt“ bzw. „Beschädigt“ in Form von 0 oder 1 vorgegeben. In der Prädiktionsphase liefern die zugehörigen Ausgangsneuronen Werte zwischen 0 und 1. Ein Vergleich mit Schwellwerten, die entsprechend den Anforderungen des Anwenders festgelegt werden, entscheidet über die Zugehörigkeit des Prüflings zu den jeweiligen Schadensklassen. Letztendlich bestimmt der Anwender darüber, welche Schadensformationen zur Aussortierung führen bzw. wo er abhängig vom Schadensbild im fließenden Übergang zwischen „unbrauchbar => Aussortierung erforderlich“ und „neuwertig => Umlauf weiterhin uneingeschränkt möglich“ die Grenze legt.

### Laborversuchsanlagen

Die grundlegenden geplanten Arbeitsschritte des Prüfsystems sind:

1. Die Positionierung des Kastens
2. Die Fixierung mittels Klemmbacke
3. Die mechanische Anregung der Standfläche des Kastens von unten mit der Zielsetzung, Vibrationen der Kastenstruktur zu erzeugen

#### 4. Die Erfassung der Bewegung/des Schwingungsmusters mittels einer CCD-Kamera

Für die experimentellen Untersuchungen kommen zwei verschiedene Laborversuchsanlagen zum Einsatz, die speziell für das Anschlussvorhaben konzipiert und gebaut wurden. Dabei handelt es sich um eine statische und eine dynamische Versuchseinrichtung.

##### Statische Versuchsanlage

In der statischen Versuchsanlage werden sämtliche Voruntersuchungen zur Bilderfassung unter Ausschluss eventueller Fremdeinwirkungen maschineller Peripherie, wie etwa durch Transportbänder hervorgerufene Vibrationen, durchgeführt. Die Anlage soll auch gewährleisten, dass neben dem GDB-Flaschenkastentyp sämtliche zurzeit gängigen Flaschenkastentypen geprüft werden können. Entsprechend musste die gesamte Konstruktion gemäß diesen Anforderungen ausgelegt werden.

Die statische Prüfeinrichtung wurde unter Verwendung der CAD-Software Auto CAD konstruiert. Sie besteht aus einem Stahl-Beton-Sockel, der sowohl die Anregungs-, als auch die Prüfeinheit trägt. Für die mechanische Anregung der Flaschenkästen findet ein elektrodynamischer Schwingerreger Verwendung, welcher an den Sockel angeflanscht ist.

Der Rahmen, der ebenfalls am Sockel fixiert ist, dient der Aufnahme der Flaschenkästen, der Fixiereinheit für selbige und einer ggf. notwendigen Beleuchtungseinheit. Durch die Fixiereinheit wird verhindert, dass der Flaschenkasten aufgrund der mechanischen Krafteinwirkung während der Anregung seine Position ändert. Dazu rastet der Flaschenkasten zum einen beim manuellen Einbringen mit seinem Stapelrand formschlüssig in einem Halterahmen ein und zum Anderen wird er von oben durch eine mittig angebrachte, pneumatisch betätigte und vertikal verfahrbare Klemmbacke aus Edelstahl festgehalten. Zur Krafteinleitung dient ein Aluminiumstößel zylinderförmiger Geometrie, welcher am elektrodynamischen Schwingerreger angebracht ist. Der Aufbau der statischen Versuchsanlage ist in Abbildung 2 dargestellt.

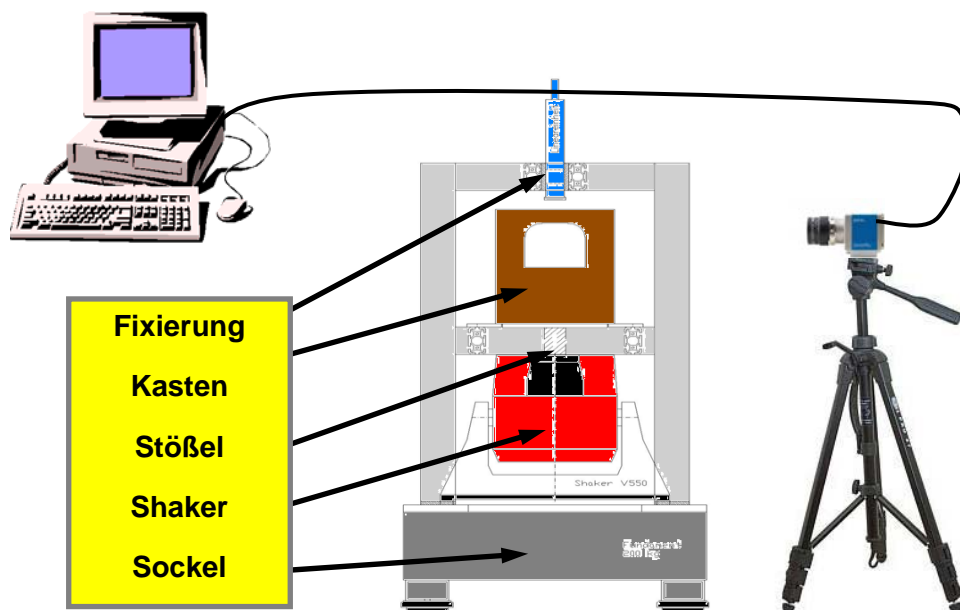


Abb. 2: Statische Versuchsanlage

## Dynamische Versuchsanlage

Die dynamische Versuchseinheit wurde in der Vergangenheit für Funktionsprüfungen und für weitere Vorversuche mit einem Laservibrometer zur Erfassung des Schwingungsmusters ausgestattet und betrieben. Für die gegenwärtigen experimentellen Untersuchungen musste die Anlage teilweise modifiziert werden. Diese Modifikationen betreffen vorwiegend die Substitution des Laservibrometers zur Erfassung der Schwingungsantwort durch ein Kamerasystem sowie Änderungen des Programmcodes zur Steuerung des Prüfablaufs.

Die mechanische Anregung des Prüflings geschieht, im Gegensatz zur statischen Versuchsanlage, mit einem pneumatisch betriebenen Schwingerreger. Dieser übt einen Schockimpuls von unten auf den Kasten aus. Für die Verwendung eines pneumatischen Schwingprüfsystems spricht neben der geringen Baugröße auch seine geringe Störanfälligkeit, gerade in der relativ feuchten Umgebung einer Abfüllanlage.

## **Ergebnisse**

Anhand der technischen Daten des GDB Flaschenkastentyps bzw. dessen CAD-Zeichnung, erfolgten in numerischen Simulationen mittels der Finiten Elemente Methode (Simulationssoftware ABAQUS) Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung und optimalen Lokalisierung des Stößels zur mechanischen Anregung der Kastenstruktur. Darüber hinaus sollten die Simulationsversuche Aufschluss über die technische Umsetzung und konstruktive Gestaltung der Arretierung der Flaschenkästen, über die Positionierung der Kamera für eine ideale Bilderfassung sowie über die strukturelle(n) Kastenkomponente(n) für die optische, auslenkungsbasierte Erfassung des Schwingungsspektrums geben.

Für den zur mechanischen Schwingungsanregung der Flaschenkästen benötigten Stößel zeigte sich eine zylinderförmige Geometrie mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 80 mm als besonders geeignet. Als Werkstoff kommt Aluminium (Werkstoffnummer 3.1645.51) zum Einsatz. Der Stößel trifft, von unten kommend, mit seiner vollen Querschnittsfläche in das Zentrum der Standfläche des Kastens (Abbildung 3).

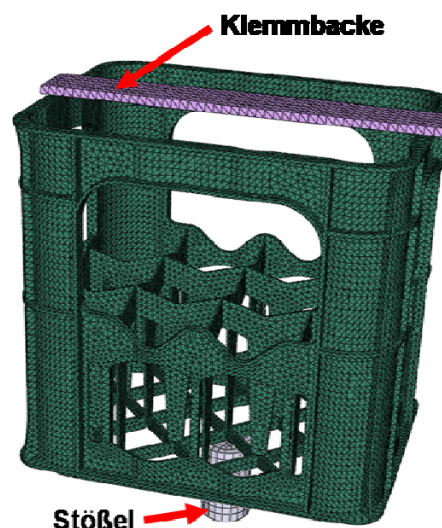


Abb. 3 Gewählte Konfiguration zum Fixieren und Anregen des Flaschenkastens

Die mechanische Anregung der Flaschenkästen erfolgt in Form eines Schock-Signals (Anregungsdauer ca. 10 ms). Eine schockförmige Krafteinleitung erweist sich im Gegensatz

zum bisherigen sinusförmigen Signal für die optische Erfassung der Schwingungsantwort mittels CCD-Kamera als ideal, da die eingeleitete Kraft schnell genug abklingt, um im Messintervall die resultierende Bewegungsreaktion der Kastenstruktur erfassen zu können.

Die Konstruktionen neuerer Flaschenkastentypen weisen, im Gegensatz zu älteren Kastentypen (z. B. GDB-Flaschenkasten oder Euro-Flaschenkasten), keinen Stapelvorsprung auf. Daher wird der Flaschenkasten für die Untersuchungen dieses Forschungsprojektes idealerweise während der Anregung im Bereich der stirnseitigen Griffleisten von oben mittels einer einzelnen, mittig positionierten Klemmbacke fixiert. Diese Lösung stellt die Kompatibilität der Fixiereinheit mit bzw. deren Adaptierbarkeit an sämtliche gängigen Flaschenkastentypen sicher. Die Klemmbacke (Abbildung 3) besteht aus Edelstahl (Werkstoffnummer 1.4541) und ist von rechteckiger Gestalt (Abmessungen: 372 x 50 x 8 mm). Beschädigungen der stirnseitigen Griffleisten sollen bereits während der Fixierung durch Verwendung eines kraftbasierten Endschalters erkannt werden.

Für die optische Erfassung des Schwingungsspektrums werden, aufgrund der Simulationsresultate (beruhend auf zwei Aspekten: 1. der maximalen Auslenkung der strukturellen Kastenkomponente und 2. der optischen „Zugänglichkeit/Erfassbarkeit“), die längsseitigen Griffleisten ausgewählt (Abbildung 4).

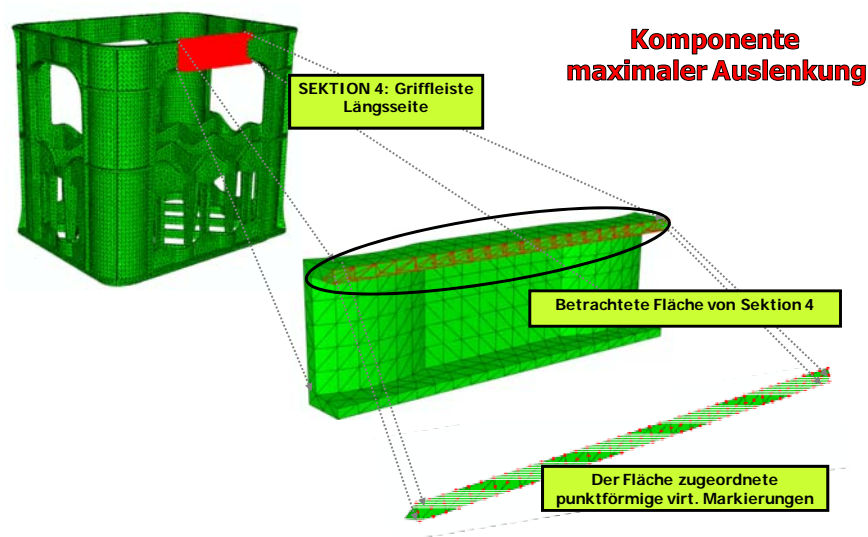


Abb. 4: Kastenkomponente für die spatiotemporale Erfassung der Schwingungsantwort

Die Kamera wird in einem Arbeitsabstand von ca. 30 cm vom Prüfling positioniert. Um die Bewegungsreaktion eines Flaschenkastens optisch ausreichend genau erfassen zu können, wird eine Kamera benötigt, die innerhalb der veranschlagten Prüfdauer von 70 ms mindestens 8 bis 10 Bilder der relevanten Kastenkomponenten aufnehmen kann. Folglich muss eine CCD-Kamera Verwendung finden, die eine Bildrate von mindestens 143 Bildern pro Sekunde (143 fps) besitzt. Aufgrund dieses Zusammenhangs kommt eine 12 bit High Resolution CCD-Kamera (Auflösung 1360 x 1024 Pixel) zum Einsatz. Dieser Kameratypus erlaubt Aufnahmen mit Bildraten von bis zu 177 Hz und ist damit ausreichend schnell, um die mechanisch erzeugten Bewegungsreaktionen eines Flaschenkastens zu erfassen. Der oben genannte Arbeitsabstand der Kamera zum Flaschenkasten erfordert ein Objektiv mit einer festen Brennweite von 25 mm (z. B. Pentax M-Serie C2514). Die Triggerung der Kamera erfolgt unter Nutzung des Hall-Effektes. Hierzu ist, wie Abbildung 5 zeigt, ein

Magnet-Sensor-System am Stößel befestigt, welches bei dessen Bewegung die Bildaufnahme auslöst.

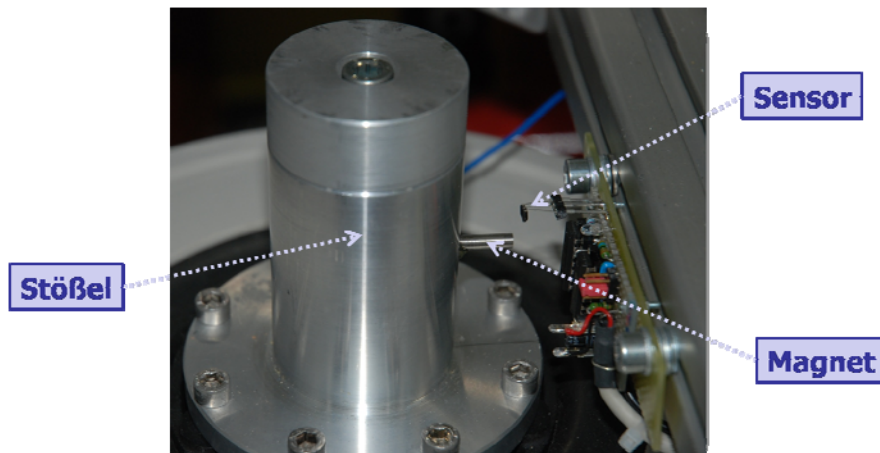


Abb. 5: Vorrichtung für die externe Triggerung der CCD-Kamera

Eine Unterscheidung von beschädigten und unbeschädigten Flaschenkästen basiert auf einer unterschiedlich großen Auslenkung der längsseitigen Griffleisten.

Zur Extraktion und Verarbeitung der Bildinformationen wird auf die konventionelle Software VISION ASSISTANT der Firma National Instruments zurückgegriffen. Damit können vertikale Bewegungen punktförmiger Markierungen auf der längsseitigen Griffleiste durch Auswertung einer Bildsequenz erfasst und Unterschiede der Bewegungsmuster (beschädigt/unbeschädigt) extrahiert werden. Abbildung 6 zeigt vorläufige Resultate der experimentellen Untersuchungen an unbeschädigten und beschädigten Flaschenkästen. Bei den exemplarisch dargestellten Beschädigungen handelt es sich um Risse im Gefach.

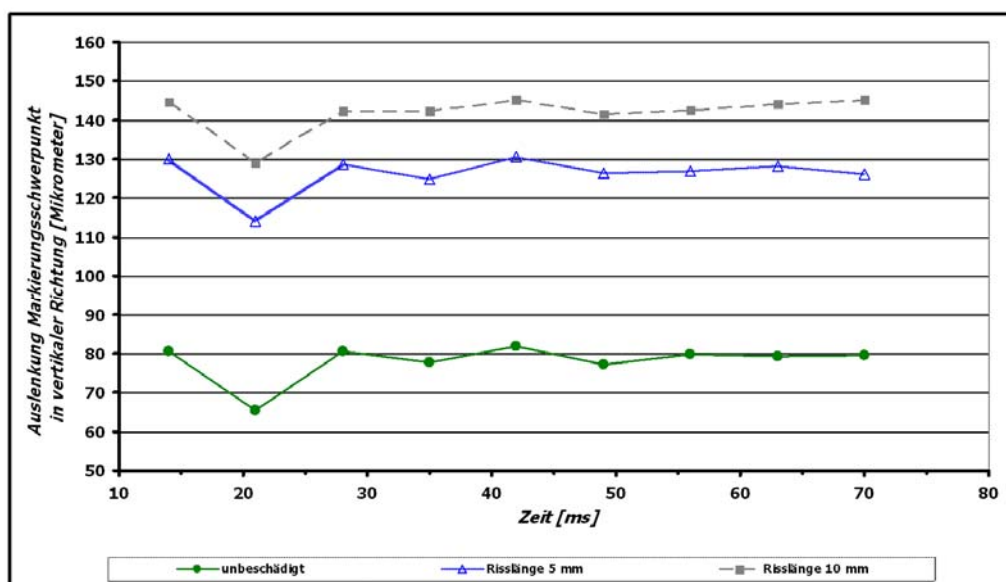


Abb. 6: Bewegungsmuster der längsseitigen Griffleiste über die Dauer eines Prüfzyklus

Die Grafik zeigt deutlich, dass beschädigte Flaschenkästen klar aufgrund der wesentlich größeren Bewegungsreaktionen der längsseitigen Griffleiste erkannt werden können.

Bevor die Datenklassifizierung durch die KNN stattfinden kann, müssen die gewonnenen und extrahierten Bilddaten zunächst vorverarbeitet (z. B. normalisiert) werden. Dies kann z. B. mit der *built-in function* der Software ABAQUS erfolgen.

Es wurde eine Feedforward-Netztopologie mit zwei verdeckten Schichten (Hidden Layers) gewählt. Es wurde sowohl mit auslenkungsbasierten als auch mit beschleunigungsbasierten Netzen experimentiert. Dabei zeigten sich die beschleunigungsbasierten Netze für eine experimentelle Verifikation als besonders geeignet. Eine erarbeitete Alternative besteht aus 8 Eingangsneuronen und 2 Ausgangsneuronen. Die Eingangsneuronen geben dabei die gemittelten normalisierten und mittels Fast Fourier Transformation (FFT) mathematisch modifizierten Beschleunigungswerte zu unterschiedlichen Zeiten wieder. Die beiden Ausgangsneuronen repräsentieren die Zustände „unbeschädigt“ (Ausgangsneuron 1 = 0 und Ausgangsneuron 2 = 1) bzw. „beschädigt“ (Ausgangsneuron 1 = 1 und Ausgangsneuron 2 = 0). Diese Vorgehensweise dient der Absicherung der Prädiktion, da beide Neuronen für eine einwandfreie Klassifizierung entgegengesetzte Zustände annehmen müssen. Gegenwärtig umfasst das Training des Netzes 46 Datensätze (26 Datensätze von beschädigten Flaschenkästen und 20 Datensätze von unbeschädigten Flaschenkästen). Um die Selektionssicherheit insgesamt auf das erforderliche Maß von mindestens 99,5 % zu erhöhen, muss das zukünftige Training jedoch noch eine wesentlich größere Anzahl an Datensätzen umfassen.

### **Weiterer Projektverlauf**

Der weitere Projektverlauf umfasst noch folgende Arbeitsschritte:

- Verfeinerung der Bilderfassung und -verarbeitung
- Weiterentwicklung der Bilddatenverarbeitung
- Validierung und Verifikation der Neuronalen Netze
- Weitere experimentelle Untersuchungen an beschädigten Flaschenkästen
- Implementierung in Abfüllanlage und Adaptierung d. Systems an Praxisbedingungen

### **Dankesworte**

Dieses Vorhaben wurde aus den Mitteln der industriellen Gemeinschaftsforschung (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) via AiF über den Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI) gefördert. AiF-Projekt Nr.: AiF-FV 231 ZN.

### **Literatur**

- [1] Zacharias, J.: Automatische Schadenserkenkung an Getränkekästen mittels Neuronumerik. Technische Universität München, Dissertation, 2003
- [2] Gesellschaft deutscher Brunnen: Mehrweg in der Mineralwasserbranche: URL: <http://www.gdb.de>. 2006.