

Technisch-wirtschaftliche Potenzialausschöpfung bei der neuro- numerischen Schadensdetektion an Mehrweggütern mittels spatio- temporaler Vibrationsanalyse am Beispiel von Getränkekästen

- Anschluss zu AiF 137 ZN -

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. A. Delgado
Forschungsstelle II:	Technische Universität München Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik Prof. Dr. H.-C. Langowski/Prof. Dr. H. Vogelpohl
Industriegruppen:	Verband Deutscher Mineralbrunnen e.V. (VDM), Bonn Wissenschaftsförderung der Dt. Brauwirtschaft e.V., Berlin Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM), Frankfurt
Projektkoordinator:	Dr. E. Hinzmann, Wissenschaftsförderung der Dt. Brauwirtschaft e.V., Berlin
Laufzeit:	2007 – 2009
Zuwendungssumme:	€ 298.050,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Ein zuverlässiges, robustes und automatisierbares Schadenserkenkungssystem für Flaschen und Flaschenkästen ist in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie unverzichtbar, um nicht nur die Produkt- und Betriebssicherheit, sondern auch 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 - hauptsächlich von Werbung und Preis gesteuerten - Marktwirtschaft gerade für KMU im Konkurrenzkampf eine entscheidende Rolle. Überdies trägt die zuverlässige Aussortierung defekter Packmittel vor der Wiederbefüllung ganz wesentlich zur Verbesserung der Verfahrensökologie und zur Ressourcenschonung bei. Nicht zuletzt ermöglicht sie eine massive Effizienzsteigerung der Abfüllanlage und somit eine Senkung der Betriebskosten. Bei einem Transportumsatz von derzeit

400-500 Mio Kästen mit ca. 4-5 Mrd. Flaschen im Jahr verursachen vor allem beschädigte bzw. gealterte Gebinde und eine große Anzahl von Fremdfabrikaten und teilbaren Stapelkästen enorme Probleme.

Aus diesen Gründen wurde bereits im Rahmen des Vorläufervorhabens „Automatische Selektion von Mehrweggütern der Lebensmittel- und Getränkeindustrie mittels Neuronumerik“ (AiF 137 ZN) ein neuartiges Verfahren zur Detektion von schadhafte Verpackungseinheiten entwickelt, dessen Kern ein Hybrid, bestehend aus numerischer Simulation und künstlicher Intelligenz in Form von künstlichen neuronalen Netzen (KNN), bildete. Ungeachtet der ausgezeichneten Selektionssicherheit und Praxistauglichkeit der entwickelten neuronumerischen Detektionsmethode, konnte bislang das technische und wirtschaftliche Potenzial dieses Verfahrens aufgrund noch offener Fragen nicht ausgeschöpft werden.

Ziel des Anschlussvorhabens war deshalb die Weiterentwicklung des bereits bestehenden Identifikations- und Selektionssystems zur Prüfung im Umlauf befindlicher Flaschen-Transportkästen auf Beschädigungen, welche deren Maschinengängigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen können. Dabei sollte der Fokus, anders als im Vorläuferprojekt, auf eine flächenbezogene Erfassung der Schwingungsantworten mittels eines CCD-Kamerasystems (spatiotemporale Schwingungsvisualisierung) und eine Verarbeitung der Bildsignale mittels spezieller Software gelegt werden. Zweck dieser Maßnahmen war es, einerseits die Systemkosten zu verringern und andererseits die Detektionsrate unter Praxisbedingungen zu erhöhen.

Forschungsergebnis:

Als beispielhafter Kasten kam der Flaschenkasten der Genossenschaft Deutscher Brunnen eG zur Anwendung. Anhand dessen CAD-Zeichnung erfolgten zunächst numerische Simulationen mittels der Finiten Elemente Methode (Simulationssoftware ABAQUS, Simulia), Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung der Prüfeinrichtung sowie zur mechanischen Anregung der Kastenstruktur. Die Untersuchungen zur Prüfeinrichtung umfassten dabei die Gestaltung und optimale Lokalisierung des Stößels zur Anregung, die technische Umsetzung und konstruktive Gestaltung der Arretierung der Flaschenkästen und die Positionierung der Kamera für eine ideale Bilderfassung. Zudem sollten Aussagen über die strukturelle(n) Kastenkomponente(n) für die optische, auslenkungsbasierte Erfassung der Bewegung getroffen werden. Für den zur mechanischen Schwingungsanregung der Flaschenkästen benötigten Stößel wurde eine zylinderförmige Geometrie mit einem Durchmesser von 50mm und einer Höhe von 80mm aus Aluminium (Werkstoffnummer 3.1645.51) gewählt. Die mechanische Anregung erfolgt über ein Schock-Signal. Dies ist von hoher Bedeutung für die optische Erfassung der Schwingungsantwort. Zur Klemmung kam zunächst eine an den kurzen Griffleisten mittig positionierte und rechteckige (Abmessungen: 372 x 50 x 8 mm) Klemmbake aus Edelstahl (Werkstoffnummer 1.4541) zum Einsatz. Es zeigte sich jedoch im Verlauf der Arbeiten, dass eine punktuelle Fixierung am Stapelrand an diagonal gegenüberliegenden Ecken die Detektionsraten erhöht.

Für die optische Erfassung der Bewegung wurden aufgrund der Simulationsresultate (beruhend

auf zwei Aspekten: 1. der maximalen Auslenkung der strukturellen Kastenkomponente und 2. der optischen „Zugänglichkeit/Erfassbarkeit“), die längsseitigen Griffleisten ausgewählt. Die Kamera wurde zunächst seitlich in einem Arbeitsabstand von etwa 40 cm vom Prüfling positioniert. Letztendlich zeigte sich, dass eine Aufnahme der Bewegung von oben bessere Ergebnisse zur Folge hat. Um die Bewegungsreaktion eines Flaschenkastens optisch ausreichend genau erfassen zu können, wurde eine Kamera benötigt, die innerhalb der veranschlagten Prüfdauer eine ausreichende Anzahl von Bildern aufnehmen kann. Zur optimalen Erfassung der Bewegungsdaten müssen bei einer Prüfdauer von 140 ms 18 Bilder aufgenommen werden. Aufgrund der Vorgaben kam eine 12 bit High-Resolution-CCD-Kamera (Auflösung 1.360 x 1.024 Pixel) des Typs „pixelfly vga“ (pco.imaging) zum Einsatz. Dieser Kameratypus erlaubt Aufnahmen mit Bildraten von bis zu 177 Hz und zeigte sich damit als ausreichend schnell, um die mechanisch erzeugten Bewegungsreaktionen eines Flaschenkastens zu erfassen. Die Unterscheidung von beschädigten und unbeschädigten Flaschenkästen basiert dann auf unterschiedlichen Grauwertverschiebungen des betrachteten Kastenausschnitts.

Die für die Durchführung sämtlicher Vorversuche notwendige statische Prüfeinrichtung wurde unter Verwendung der Erkenntnisse aus den numerischen Simulationen konzipiert. Ein auf Maschinenfüßen gelagerter Sockel aus Beton und Stahl (Masse ca. 200 kg) bildete den Unterbau der Anlage. Auf dem Sockel wurden der elektrodynamische Schwingerreger (Typ V555 M6-CE, LDS) und eine Rahmenkonstruktion zur Aufnahme des Flaschenkastenprüflings sowie der Fixier- und Anregungseinheit angeflanscht. Die Kamera und notwendige Beleuchtungseinheiten wurden direkt an der Rahmenkonstruktion befestigt. Hinsichtlich der Beleuchtung zeigte sich, dass diese ausreichend intensiv und reproduzierbar sein muss, um gleichbleibende Bildqualitäten und eine Minimierung der durch die Bewegung verursachte Unschärfe sicherzustellen. Aus diesem Grund wurde die statische Versuchsanlage mittels einer Plane abgedunkelt, um Umgebungseinflüsse auszuschließen und unterschiedliche Beleuchtungen zu testen. Eine erarbeitete Alternative liegt hier in der Verwendung von Flächen-Hochleistungs-LED. Damit ist die Notwendigkeit einer Abdunklung nicht mehr gegeben und zudem kann die Belichtungszeit deutlich reduziert werden.

Zur Extraktion und Verarbeitung der Bildinformationen wurde auf konventionelle Software, wie z.B. MATLAB (Image Processing Toolbox), zurückgegriffen. Zur Klassifizierung der gewonnenen Bilddaten wurden zunächst mit dem Open-Source-Softwaretool MEMBRAIN, dann mit dem Softwarepaket Statistica unterschiedliche Strukturen für künstliche neuronale Netze entwickelt. Statistica eignet sich insbesondere dazu, eine hohe Anzahl unterschiedlicher Strukturen automatisch zu testen. Die ausgewählten Netztopologien wurden danach auf MATLAB übertragen, um die bereits vorhandene Schnittstelle zur CCD-Kamera von PCO zu nutzen. Die Untersuchungen zu den KNN umfassten die Fragestellungen, welche Datenvorverarbeitungsalgorithmen sich für die Daten besonders eignen und andererseits, welche Topologie der KNN zu den besten Prädiktionsergebnissen führt. Eine automatisierte Datenvorverarbeitung wählt zunächst nach dem Einlesen der Bilder einen aufgrund der Voruntersuchungen festgelegten Ausschnitt des Kastens aus, der ausreichend starke Auslenkungen liefert und eine zuverlässige Detektion der Kanten erlaubt. Nach der Mittelung der Bilddaten erfolgt die Detektion der Kanten. Danach schließt sich die Berechnung der Verschiebungen sowie der Daten zur Bildqualität, z.B. Signal-to-Noise Ratio, an. Zur Klassifizierung erwies es sich als notwendig, die Daten auf eine statische Referenz zu beziehen, d.h. ein erstes Bild wurde vom fixierten Kasten bereits vor der Anregung aufgenommen.

Um die Struktur der KNN festzulegen, wurden drei Alternativen untersucht, (i) die Daten eines Bildes wurden als eigener Datensatz untersucht unabhängig von der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Sequenz, (ii) alle Daten einer Sequenz wurden in ein einziges KNN eingelesen und (iii) für jedes Bild einer Sequenz wurde ein eigenes KNN eingesetzt, dessen Ausgang auf ein weiteres KNN verschaltet wurde. Dieser hierarchische Aufbau zeigte die besten Prädiktionsergebnisse, die an der statischen Versuchsanlage über 95 % betragen.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Die neuronumerische Sortierung von Mehrweggütern schafft eine wesentliche Ergänzung zur Optimierung von getränke- und lebensmittelspezifischen Prozessabläufen. Die betroffenen Einsatzgebiete sind somit in erster Linie die Getränke-, Lebensmittel-, Mess- und Automatisierungstechnik.

Die Markteinführung des erweiterten Selektionssystems könnte durch Unternehmen erfolgen, die sich im Kerngeschäft mit Maschinen- und Anlagenbau befassen. Diese Branche erzielte 2003 mit ihren rund 868.000 Beschäftigten in ca. 6.000, meist mittelständischen Betrieben einen Umsatz von 142 Mrd. €. Insbesondere im Bereich der Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen mit einem Umsatz von 8,4 Mrd. € (4,1 Mrd. € allein im Bereich der Verpackungsmaschinen) beherrscht Deutschland derzeit international mit einer Exportquote von ca. 80 % bzw. einem Anteil am Weltexport von 27 % den Markt. Die Einführung eines innovativen Verfahrens zur Schadenserkenkung von Mehrweggütern bietet die Möglichkeit, diese Position weiter zu festigen und auszubauen. Dabei ist die Unterstützung durch Hersteller von industriellen Messsystemen erforderlich. Auf diesem Gebiet sind in Deutschland ca. 600-700 Hersteller tätig. Ihr Jahresumsatz liegt bei etwa 15 Mrd. €. 30 % ihrer Produktion werden direkt exportiert. Berücksichtigt man in Anlagen oder Maschinen eingebaute Messsysteme, ergibt sich eine Exportquote von 60 -70 %. Hochgerechnet sind 2.000 - 2.500 Firmen – vom Ingenieurbüro bis zum spezialisierten Dienstleister – im erweiterten Bereich der Sensorik tätig. Dort erwirtschaften etwa 250.000 Mitarbeiter rund 18-20 Mrd. € pro Jahr.

Als Anwender der Ergebnisse kommen primär Getränkehersteller in Betracht. Hier sind exemplarisch die 226 überwiegend mittelständischen Mineralbrunnenbetriebe (92 % kmU, 14.000 Beschäftigte, 165 Mio. umlaufende Kästen) und die Brauindustrie mit 1.274 Braustätten in Deutschland (davon 804 kleine und ca. 400 mittelständische Brauereien, 33.400 Beschäftigte, 150 Mio. umlaufende Kästen) zu nennen. Die Ausnutzung bestehender Ressourcen und Infrastrukturen bei einer kostenminimierten Effizienzoptimierung der Leergutsortierung unterstützt damit vor allem kleine und mittlere Unternehmen, da gerade diese einen hohen Anteil an Mehrweggebinden aufweisen. So erfordert die im Mineralbrunnenbereich bisher vorgeschriebene Aussortierquote von 0,6 % eine Neuanschaffung von ca. 6 Mio. Kästen pro Jahr. Ein zuverlässiges Sortiersystem, das die Aussortierung auf tatsächlich defekte oder überalterte Kästen beschränkt, erspart den Mineralbrunnenbetrieben bei einer Reduktion der Sortierquote um nur 0,1% bereits die Neuanschaffung von 1 Mio. Kästen im Jahr.

Eine Übertragung der Ergebnisse auf weitere Bereiche der Lebensmittelindustrie (z. B. für Hersteller von alkoholfreien Getränken, aber auch für die Nicht-Getränkeindustrie, z. B. Hersteller von Glaskonserven), des Life-Science-Bereichs (für in Glasbehältnissen verpackte Pharmazeutika) und der Technischen Chemie erscheint bei einer Anpassung des entwickelten Verfahrens auf Glasgebilde durchaus möglich.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2009.
2. Benning, R., Forstner, J., Procelewska, J., Luschmann C. und Delgado, A.: Cognitive and hybrid approaches as means for process optimization. Food Manucfact. Effic. 3, 41-47 (2010).
3. Benning R., Forstner J., Hu, M., Groß F., Mauermann M., Majschak J.-P., Franke S., Vogelpohl H. und Delgado A.: Vibrationsanalyse zur Zustandserkennung von Gütern in der Lebensmittelindustrie. Tagungsband, VVD 2009 – Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik, 19.-20.03.2009, Dresden, 141-153 (2009).

Weiteres Informationsmaterial:

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen
Tel.: 09131/8529-500, Fax: 09131/8529-503
E-Mail: antonio.delgado@Istm.uni-erlangen.de

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW
Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik
Weihenstephaner Steig 22, 85350 Freising-Weihenstephan
Tel.: 08161/71-3126, Fax: 08161/71-4515
E-Mail: langowski@wzw.tum.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn
Tel.: 0228/372031, Fax: 0228/376150
E-Mail: fei@fei-bonn.de

... ein Projekt der **Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)**

gefördert durch/via:

