

# Schoko-Nikoläuse unter Beobachtung

## Datenlogger in Polycarbonat-Formen ermöglichen Prozessüberwachung

Für die Ermittlung von Belastungen im Schokoladen-Verarbeitungsprozess statet das Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart Schokoladenformen der Hans Brunner GmbH mit Datenloggern aus, die Informationen aus dem Verarbeitungsprozess liefern und so die Identifikation kritischer Lasten ermöglichen. Daraus lassen sich Optimierungsmaßnahmen ableiten, um eine möglichst hohe Lebensdauer zu gewährleisten.



Schokoladefiguren oder -tafeln werden mithilfe von Formen hergestellt, in denen sich bei starker Beanspruchung Risse bilden können. Datenlogger können dabei unterstützen, kritische Parameter im Verarbeitungsprozess zu identifizieren © Hans Brunner GmbH

Formen aus Polycarbonat sind im Schokoladen-Verarbeitungsprozess zahlreichen unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Dazu zählt neben Temperatureinflüssen durch das Einfüllen warmer Schokolade und das anschließende Durchlaufen einer Kühlstrecke auch eine hohe mechanische Belastung, die sowohl zum Verteilen der Schokolade in der Form, als auch zur Entformung des Produkts am Ausschlagwerk aufgebracht wird. Weiterhin kommen unterschiedlichste Reinigungsmedien zum Einsatz, um Rückstände von den Formen zu entfernen, bevor diese erneut den Prozess durchlaufen.

Um Formen gezielt für die Anlagen von Kunden zu optimieren, wurden im Forschungsprojekt Inform ausgewählte Schokoladenformen mit Datenloggern bestückt. Diese erfassen die auftretenden Belastungen in der Produktion, um Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Hierdurch soll eine höhere Lebensdauer der Formen unter den gegebenen Bedingun-

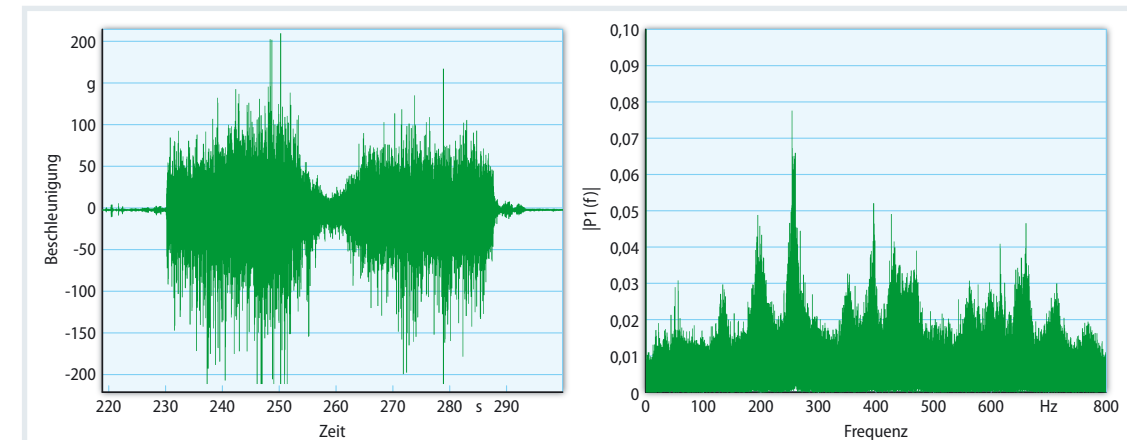
gen gewährleistet werden. Dieser Artikel soll aufzeigen, welche Parameter im Verarbeitungsprozess kritisch sein können und wie man diese identifizieren kann. Mit der entwickelten Vorgehensweise lassen sich solche Parameter eliminieren, ohne die Produktionszeit zu erhöhen oder das Produkt zu beeinträchtigen.

### Monitoring von Prozessparametern

Da die exakten Prozessparameter in der Schokoladenverarbeitung bislang meist auf Basis von Erfahrungen eingestellt und nicht überwacht werden, ist es zunächst erforderlich, diese möglichst exakt zu ermitteln. Hierfür wird ein Datenlogger in Formen für unterschiedliche Schokoladenhersteller integriert, der eine Aufzeichnung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und 3-Achsen-Beschleunigung im Verarbeitungsprozess ermöglicht. Da Schokoladenformen während der Dosierung und Verteilung der Schokolade bis

zum Ausklopferwerk seitlich in Schienen geführt werden, wird der Datenlogger im Zentrum an der Formenunterseite integriert, um die maximal auf die Form wirkenden Beschleunigungswerte zu erfassen. Es resultiert somit eine Vielzahl an Sensordaten, die sowohl für die Identifikation der kritischen Herstellungsparameter als auch als Randbedingungen für Simulationen genutzt werden können.

Eine Analyse der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte des Datenloggers zeigt bei den untersuchten Formen, dass sie keine kritischen Einflussfaktoren darstellen können. Auch eine eventuelle Spannungsrissebildung durch Reinigungsmedien kann bei den betrachteten Formen nach einer Analyse der Reinigungsmedien ausgeschlossen werden. Somit rückt der Einfluss von auftretenden mechanischen Belastungen als kritischer Parameter in den Fokus. Die Analyse der Beschleunigungswerte zeigt, dass hohe Schockbelastungen auf den Rüttelstrecken bei der Schokoladen-



**Bild 1.** Aufgezeichnete Beschleunigungswerte in vertikaler Richtung (links) sowie Darstellung des Frequenzspektrums (rechts)

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

verarbeitung auftreten. Hierbei kommt es in vertikaler Richtung zu den höchsten mechanischen Belastungen, die durch eine regelmäßige Vorzeichenumkehr gekennzeichnet sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Form zu einer Schwingung angeregt wird. Neben der Amplitude ist diese auch durch ihre Frequenz gekennzeichnet. Exemplarisch wird der Verlauf der Beschleunigung in vertikaler Richtung bei einer Abtastfrequenz von 1600 Hz auf der Rüttelstrecke im Herstellungsprozess in **Bild 1 links** dargestellt. Um den Einfluss der Schwingungsfrequenz zu ermitteln, kann eine Fourier-Transformation auf die Beschleunigungswerte angewandt werden. Hieraus resultiert direkt ein Frequenzspektrum (**Bild 1 rechts**), das eine eindeutige Identifikation der Anregungsfrequenzen ermöglicht.

Es kann somit gezeigt werden, dass im Prozess nicht nur eine Einzelfrequenz vorliegt, sondern eher eine Vielzahl an Anregungsfrequenzen, die sich zu einer Schwingung überlagern. Dennoch sind einzelne Peaks im Frequenzspektrum erkennbar, d.h. es liegen einzelne Frequenzen vor, mit denen die Form tendenziell stärker schwingt. Als kritische Prozessparameter rücken somit sowohl die Schwingungsamplitude als auch die Anregung mit kritischen Schwingungsfrequenzen in den Fokus der weiteren Untersuchungen.

### Simulation

Parallel zum Monitoring der Prozessparameter sollen Simulationen ein besseres Verständnis der kritischen Prozessparameter liefern, die eine Rissentstehung in den Formen begünstigen. Zunächst erfolgte eine Modalanalyse um zu untersuchen, ob die Schwingungsfrequenz mit den Eigen-

frequenzen der Form übereinstimmt. Der Einfluss der Schwingungsamplitude wurde anschließend in einer transient strukturalmechanischen Simulation analysiert. Für beide Simulationen wurde die Software Ansys (Hersteller: Ansys, Inc.) eingesetzt.

Um dabei eine möglichst realitätsnahe Simulation der Schokoladenformen zu ermöglichen, wurden alle relevanten Werkstoffparameter für die eingesetzten, unterschiedlichen Polycarbonattypen experimentell ermittelt. Dies umfasst die Ermittlung des E-Moduls und der Querkontraktionszahl sowie die Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens. Darüber hinaus wurden auch Wärmekapazität, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient ermittelt. Das für die Simulation benötigte Polycarbonat-Werkstoffmodell konnte somit speziell auf den Anwendungsfall angepasst werden. Die Simulationsparameter der Umgebung resultieren darüber hinaus direkt aus den aufgezeichneten Loggerdaten. Für eine möglichst allgemeingültige Aussage bezüglich der Eigenfrequenzen, wurde eine vereinfachte Schokoladenform mit fünf Längs- und elf Querrippen aufgebaut, die sich in äquidistanten Abschnitten befinden. Hierbei wurde die Rippendicke gezielt von 1,5 mm über 2,5 mm bis zu 3,5 mm variiert.

Durch die Bestimmung der Eigenfrequenzen kann gezeigt werden, dass kein hoher Einfluss der Rippendicke auf die jeweilige Eigenfrequenzlage zu erkennen ist (**Bild 2**). Auch wenn an dieser Stelle eine vereinfachte Form ohne Kavitäten betrachtet wird, konnte in weiteren Simulationen zusätzlich gezeigt werden, dass dieses Ergebnis auch für reale Formen mit Kavitäten gilt. Auf den Einfluss der Eigenfrequenzlage auf ein mögliches Versagen

der Form wird näher bei der später folgenden vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse eingegangen.

Um den Einfluss der Schwingungsamplitude zu untersuchen, wurde das Verhalten der Formen im Rahmen einer transient strukturalmechanischen Simulation analysiert. Dabei wurde die Auslenkung des Formenzentrums gegenüber dem un- »

## Die Autoren

**Sebastian Joas, M.Sc.**, ist seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart; [sebastian.joas@ikt.uni-stuttgart.de](mailto:sebastian.joas@ikt.uni-stuttgart.de)  
**Prof. Dr. rer. nat. habil. Marc Kreutzbrück** leitet am IKT seit 2014 den Lehrstuhl für zerstörungsfreie Materialprüfung.

## Dank

Das Forschungsprojekt Inform (Nummer ZF4041124EB8) wird von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

## Service

### Digitalversion

» Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-12](http://www.kunststoffe.de/2020-12)

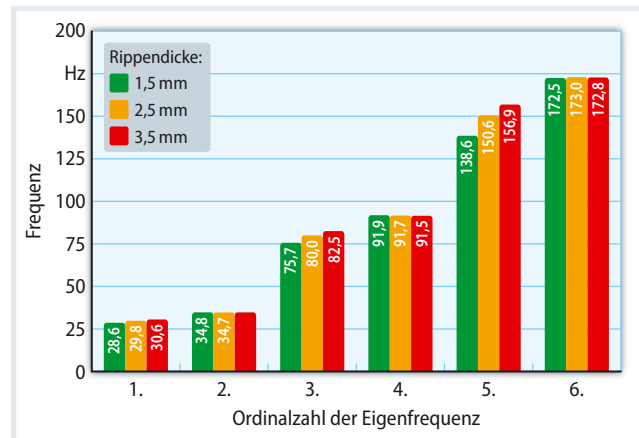
### Weitere Informationen

» Mehr zur Hans Brunner GmbH und zu Schokoladenformen aus Kunststoff:  
 » [www.hansbrunner.de](http://www.hansbrunner.de)



**Bild 2.** Darstellung der ersten sechs Eigenfrequenzen einer Schokoladenform mit unterschiedlichen Rippendicken

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



verformten Zustand für unterschiedliche Beschleunigungen berechnet. Es kann gezeigt werden, dass es bereits bei einer Beschleunigung von  $15 \text{ m/s}^2$  zu einer vertikalen Auslenkung des Formenzentrums von ca. 26,5 mm kommt. Mit zunehmender Rippendicke sinkt sie auf 24 mm ( $d = 2,5 \text{ mm}$ ) bzw. ca. 23 mm ( $d = 3,5 \text{ mm}$ ). Dies entspricht den Erwartungen, da die Steifigkeit der Form durch höhere Rippendicken gesteigert werden kann. Auch dieses Ergebnis ist auf reale Formen mit Kavitäten übertragbar und wird in der vergleichenden Ergebnisbetrachtung näher erläutert.

### Rasterelektronenmikroskopie

Für die Identifikation der kritischen Prozessparameter ist eine detaillierte Analyse auftretender Defekte notwendig, um deren Entstehung besser zu verstehen. Hierfür wurden zunächst einzelne defekte Schokoladenformen analysiert, wobei ein von der Formenrückseite ausgehender Riss an den Rippen festgestellt werden konnte. Zuvor wurde bereits im Rahmen von Spritzgießsimulationen ausgeschlossen, dass mechanische Schwachstellen, z.B. Bindenähte, an

den Positionen der Risse vorhanden sind. Die jeweiligen Rissflanken werden für die Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie präpariert, um Informationen über den Versagensmechanismus zu erhalten. In **Bild 3** ist sowohl der Rissinitiierungsbereich als auch die Rissausbreitungsrichtung zu erkennen. Die Rissausbreitung scheint zyklisch abzulaufen, was anhand des periodischen Voranschreitens des Risses und der charakteristischen Rastlinien erkennbar ist. Dieser Verlauf ist bei allen analysierten Formen zu beobachten und wird im nachfolgenden Abschnitt unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Ergebnisse interpretiert.

### Zusammenführung der Ergebnisse

Um kritische Prozessparameter zu identifizieren und somit die Ursache des bei einzelnen Formen vorliegenden, von der Formenrückseite ausgehenden Risses zu ermitteln, werden abschließend die Ergebnisse des Datenloggers mit den Simulationsergebnissen und den Untersuchungen des Rissbilds mittels Rasterelektronenmikroskopie zusammengeführt.

Das Monitoring der Prozessparameter zeigt sowohl hohe Beschleunigungswerte als auch eine stärkere Schwingung der Form mit einzelnen Frequenzen. Eine Schwingung mit einer einzelnen kritischen Eigenfrequenz kann nach ersten experimentellen Optimierungen der Form allerdings ausgeschlossen werden. Hierfür wurde die Rippendicke einer Form um 1,2 mm erhöht. Die Ausfallzahlen der Form wurden infolgedessen immens reduziert. Da die Modifikation der Rippendicke auf Basis der durchgeführten Modalanalyse allerdings zu keiner signifikanten Änderung der Eigenfrequenzen führen würde, ist ein Versagen aufgrund der Anregung mit einer kritischen Eigenfrequenz unwahrscheinlich. Somit könnte die Rissbildung auf eine erhöhte Schwingungsamplitude zurückzuführen sein. Aufgrund des von der Formenrückseite ausgehenden Risses konnte im Vorfeld bereits auf den kritischen Belastungsfall geschlossen werden, der in **Bild 4** dargestellt ist.

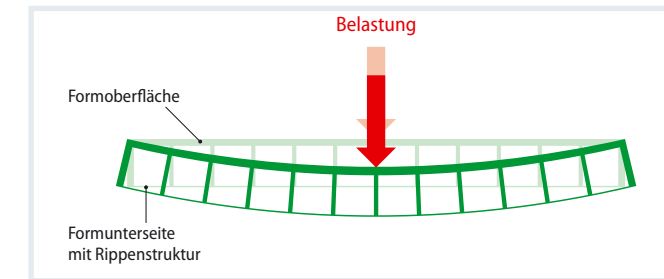
Demzufolge sind zwei mögliche Stellen im Schokoladen-Produktionsprozess als kritisch zu bewerten. Dazu zählen sowohl eine Rüttelstrecke zum gleichmäßigen Verteilen der Schokolade in der Form als auch die finale Entformung der Schokolade am Ausschlagwerk, wobei die Form von der Rückseite ausgehend für kurze Zeit mit einer Kraft beaufschlagt wird und eine Durchbiegung in Richtung der Formenoberseite hervorgerufen wird. Dabei könnte bei der durch das Ausschlagwerk hervorgerufenen Rückschwingung ein ähnlich kritischer Belastungsfall hervorgerufen werden.

Da die Schadensbilder bei den untersuchten Formen bereits nach kürzeren Zeiten auftreten, kann ein klassischer Ermüdungsbruch ausgeschlossen werden. Anhand der Rasterelektronenmikrosko-

pieaufnahmen wird deutlich, dass die Rissausbreitung auf der Rüttelstrecke erfolgen muss, da ein zyklisches Voranschreiten des Risses bereits nach dessen Initiierung zu erkennen ist. Das Rissbild ist auf das damit verbundene Öffnen und Schließen der Rissflanken zurückzuführen, die zur Entstehung von Rastlinien führen. Es handelt sich somit um einen Schwingungsbruch, der allerdings bereits nach einer geringeren Zyklenzahl auftritt und durch eine Überbelastung auf der Rüttelstrecke hervorgerufen wird. Durch die fortschreitende Rissausbreitung nimmt der tragende Restquerschnitt ab, wodurch schließlich ein Gewaltbruch hervorgerufen werden könnte. Eine Rissentstehung am Ausschlagwerk kann ausgeschlossen werden; sie würde zu einem abweichenden Rissbild führen, zunächst ohne zyklisches Fortschreiten, dafür mit größerer Schädigungszone.

### Fazit

Die entwickelte Vorgehensweise ist geeignet um kritische Parameter im Scho-



**Bild 4.** Schematische Darstellung des für die Rissentstehung kritischen Belastungsfalls

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

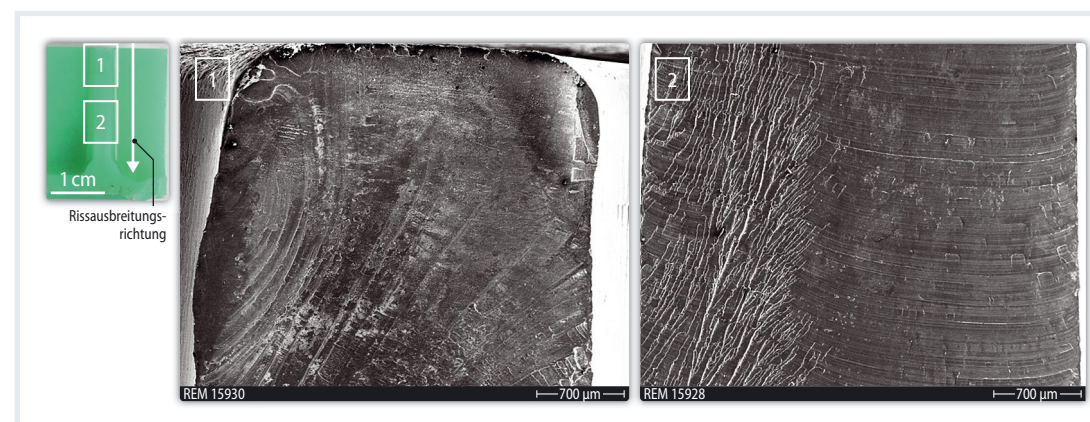
koladen-Verarbeitungsprozess zu identifizieren. Dabei liegen keine kritischen Anregungsfrequenzen vor, sondern in den analysierten Schadensfällen vielmehr hohe Anregungsamplituden. Sowohl auf Basis der Loggerdaten als auch mittels Rasterelektronenmikroskopie konnte die Rüttelstrecke als kritische Stelle im Produktionsprozess ermittelt werden. Eine mögliche und vergleichbar einfache Lösung kann bereits durch Erhöhung der Rippendicken herbeigeführt werden. Die Reduktion der Anregungsamplitude im Schokoladen-Verarbeitungsprozess stellt eine weitere mögliche Alternative dar. Erste Ergebnisse zeigen, dass hierdurch

Ausfallzahlen immens reduziert und somit eine höhere Zuverlässigkeit der Formen erreicht werden kann.

Im Rahmen weiterer Arbeiten sollen Datenlogger in Formen für unterschiedliche Hersteller integriert werden, um statistisch repräsentative Daten zu erhalten und damit die kritische Belastungsschwelle für Formen mit unterschiedlichen Kavitäten ermitteln zu können. Auf lange Sicht wird es hierdurch möglich, eine mit Sensorik ausgestattete Form den Produktionsprozess bei verschiedenen Herstellern durchlaufen zu lassen und damit gezielt individuell optimierte Formen für den Kunden bereitzustellen. ■

**Bild 3.** Vollständig aufgebrochener Riss (links) mit Rissausbreitungsrichtung sowie REM-Aufnahmen der markierten Positionen. Zu erkennen sind die Rissentstehung (1) sowie die zyklische Risspropagation anhand der Rastlinien (2)

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



# ADDITIVE FERTIGUNG

## fokus: kunststoff

Innovativ Kunststoffbauteile fertigen

10. - 11. Februar 2021

Sicher - Informativ - Interaktiv

Jetzt digital teilnehmen!

Digitales Event

Jetzt zur Tagung anmelden:  
[www.additivefertigung-kunststoff.de](http://www.additivefertigung-kunststoff.de)