

Fehlerdiagnose bei verketteten Verpackungslinien

Dr.-Ing. Tobias Voigt, TU München, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik

Dipl.-Ing. Axel Kather, Rockwell Automation GmbH, Global Industry Consultant

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Horst-Christian Langowski, TU München, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik

Prof. Dr. Peter Struss, TU München, Lehrstuhl für Informatik IX

Failure analysis for linked packaging lines

Packaging lines for food and beverages are complex plants consisting out of several linked machines. To increase their today's efficiencies between 50 and 75 percent downtime originating components for downtimes need to be identified. Because of interdependencies along the different material flows within the line this is a difficult task. In the presented research project LineMod models were developed to describe temporal displacements between the plant components. Based on the models, diagnosis solutions were implemented and evaluated in practical scale.

Failure diagnosis, packaging plants,

Diagnose, Abfüll- und Verpackungsanlagen

1 Problemstellung

Das Abfüllen und Verpacken von Getränken und Lebensmitteln ist einer der letzten Schritte in der Wertschöpfungskette bei der Lebensmittelherstellung. Bei den dazu verwendeten Abfüll- und Verpackungsanlagen handelt es sich um hochkomplexe, verkettete Fertigungslinien. Die einzelnen Maschinen, die mit Ausbringungen von bis zu 90.000 Packungen pro Stunde arbeiten, können über mehrere Haupt- und Nebenströme miteinander verbunden sein. Sie bestehen aus einer Vielzahl mechanischer und elektronischer Komponenten, was zu einer erhöhten Störanfälligkeit führt.

Stillstände sind in Abfüll- und Verpackungsanlagen sind jedoch nicht nur aus wirtschaftlichen Erwägungen, sondern insbesondere aufgrund des Packgutes Lebensmittel zu vermeiden. Schwankende Bedingungen oder Unterbrechungen beim Abfüllprozess wirken sich häufig negativ auf die Qualität der Produkte aus [2], [3]. Hierbei sind neben einer mikrobiellen (Re-) Kontamination vor allem Oxidationsprozesse aufgrund einer übermäßigen Sauerstoffaufnahme die qualitätsmindernden Ursachen. Sie führen während der anschließenden Lagerdauer zu Vitaminverlusten, Farbveränderungen, geschmacklichen Beeinflussungen, usw. (siehe z. B. [1] und [17]). Dies führt dazu, dass Lebensmittelverpackungsanlagen im Allgemeinen so ausgelegt werden, dass die Füll- und

Dosiermaschinen als Zentralaggregate möglichst stillstandsfrei arbeiten können. Dazu werden die der zentralen Maschine vor- und nachgeschalteten Anlagenkomponenten mit einer höheren Nennausbringung konzipiert und die Transporteure häufig mit einer zusätzlichen Pufferfunktion ausgestattet. Ferner werden die Einstellausbringungen der Maschinen und die Geschwindigkeiten der Transporteure oft elektronisch gesteuert oder geregelt.

Trotz dieser Vorkehrungen treten bei Anlagenkomponenten stochastisch immer wieder Störungen auf, die über eine Stau- oder Mangelfortpflanzung zu einem Stillstand des Zentralaggregats führen ([15], [16]). Verbunden mit organisatorisch bedingten Stillstandszeiten, die z. B. durch Produktumstellungen oder Wartungsarbeiten entstehen, erreichen Abfüll- und Verpackungsanlage daher heute nur Verfügbarkeiten von 50-75 % (siehe z. B. [7] und [8]).

Um die technische Verfügbarkeit zu erhöhen, ist es möglich, Schwachstellenanalysen in den entsprechenden Anlagen durchzuführen, um die Verursacher für die meisten und längsten Stillstände ausfindig zu machen. Diese Analysen werden derzeit im Rahmen stichprobenartiger Abnahmeversuche durchgeführt [9], [14], [20]. Die Versuchsdurchführung erfolgt dabei durch Experten, bzw. mit der Anlage vertraute Personen, die lediglich bei der Auswertung durch IT-Instrumente unterstützt werden [18]. Dies verursacht zum einen hohe Kosten, da die Aufgabe der Anlagenbeobachtung nicht parallel zur Arbeit durch das in der Anlage verfügbare Personal erledigt werden kann [14], zum anderen ist die statistische Absicherung durch den Stichprobencharakter der Untersuchung eher gering. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Versuchen an ein und derselben Anlage an mehreren Tagen durchaus Schwankungen im Liefergrad von 5 % und mehr auftreten können [21].

Zwar werden seit einigen Jahren vermehrt Betriebsdatenerfassungssysteme eingesetzt, um die Daten einer Anlage automatisch zu erfassen und auszuwerten, jedoch berücksichtigen diese Werkzeuge bisher lediglich statistische Auswertemethoden [13]. Das Problem bei einer rein statistischen Auswertung ist aber, dass die Störungen lediglich nach ihrer Dauer und Häufigkeit bewertet werden und nicht, wie bei den manuellen Abnahmeversuchen, daraufhin, ob sie auch zu einem Stillstand oder einer Minderausbringung des Zentralaggregats und somit der gesamten Anlage führen. Eine Optimierungsmaßnahme an dem am häufigsten oder am längsten gestörten Aggregat kann unter Umständen für eine Verbesserung der Kennzahlen der Gesamtanlage nutzlos sein. Dies könnte auch eine Ursache dafür sein, dass beispielsweise in der Braubranche die Instandhaltungskosten mit 4,8 %, bezogen auf den Wiederbeschaffungswert, überdurchschnittlich hoch sind [4]. Eine permanente automatische Auswertung von Betriebsdaten, die eine Klassifizierung der Stillstandsursachen am Zentralaggregat der Anlage erlaubt, ist jedoch nicht trivial. Die Anlagenkomponenten sind aufgrund der Pufferfunktionen der verbindenden Transporteure voneinander entkoppelt und Störungen machen sich erst mit einer variablen zeitlichen Verzögerung durch Mangel oder Rückstau bemerkbar. Bild 1 verdeutlicht diese Problematik für einen kleinen Ausschnitt einer verketteten Anlage.

Die verursachende Maschine kann zum Zeitpunkt des Effizienz mindernden Stillstands am Zentralaggregat bereits wieder in Betrieb sein. Eine manuelle Ursachenzuordnung ist zwar möglich, was die Ergebnisse manueller Abnahmen verdeutlichen, jedoch fehlt es an flexiblen, allgemeingültigen und automatisierbaren Ansätzen [19]. Dies ist sicher auch mit der Komplexität der Aufgabestellung zu begründen. Verkettete Abfüll- und Verpackungsanlagen bestehen in der Praxis aus sehr vielen Maschinen und in der Regel drei voneinander abhängigen Materialströmen für die Primär- (z. B. Packung oder Flasche), Sekundär- (z. B. Kartonumverpackung) und Tertiärverpackung (z. B. Palette). Ein beispielhaftes Anlagenschema einer komplexen Abfüll- und Verpackungsanlage für Getränke zeigt Bild 2.

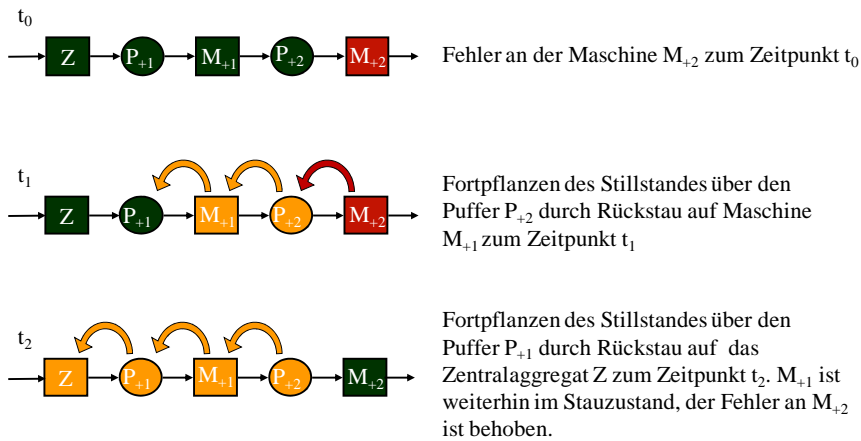


Bild 1: Fehlerfortpflanzung durch einen Rückstau auf das Zentralaggregat

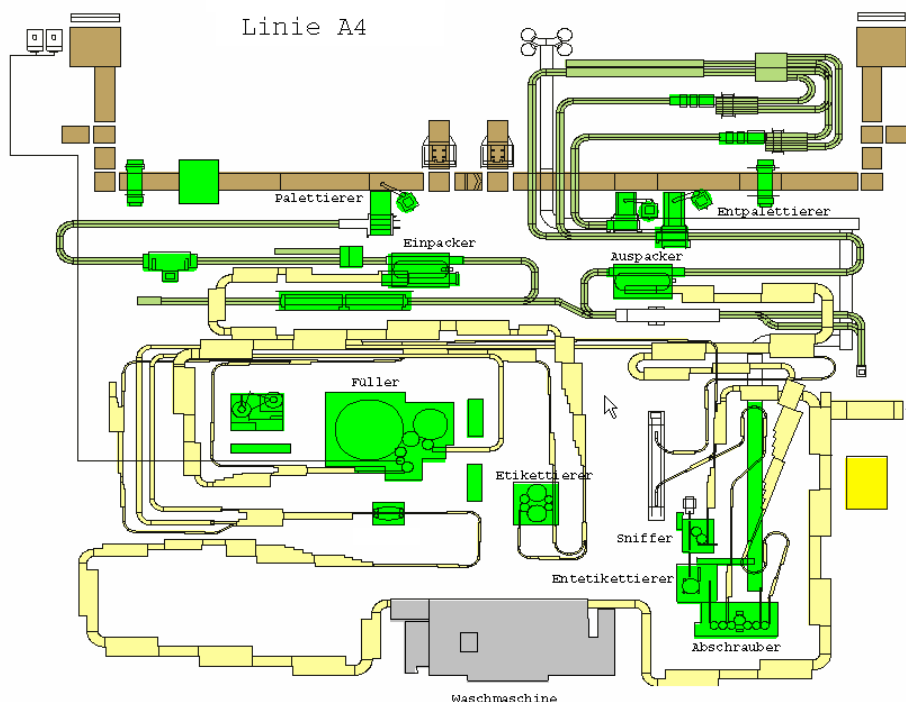


Bild 2: Anlagenschema einer Mineralwasserabfüllanlage für Kunststoffmehrwegflaschen

Ziel eines Forschungsprojekts mit dem Titel Diagnosemodelle für verkettete Abfüll- und Verpackungslinien in der Lebensmittelindustrie (LineMod - AiF 233 ZBG) war es deshalb, Grundlagen und Modelle zu entwickeln, die Werkzeuge für eine automatische Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen ermöglichen. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf die einfache Anpassbarkeit an unterschiedliche Anlagenkonstellationen gelegt. Das Forschungsprojekt wurde gemeinschaftlich von den Forschungsstellen Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik der TU München, Fraunhofer-Anwendungszentrum Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik in Dresden und Lehrstuhl für Informatik IX der TU München bearbeitet.

2 Vorgehensweise

Voraussetzung war zunächst das Schaffen einer einheitlichen Datenbasis mit den für eine Diagnose benötigten Informationen. Auf Basis der Weihenstephaner Standards für die

Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen [12] wurde eine klassenorientierte Ontologie für die Bereitstellung von Betriebsdaten in Lebensmittelverpackungsanlagen geschaffen. Zusätzlich wurden die für eine horizontale Diagnose (Fehlerlokalisierung) notwendigen Datenpunkte in einer standardisierten Datenbankschnittstelle aufgelegt, so dass die einzelnen, herstellereigenen Datenbanken in diese überführt werden konnten.

Auf der Grundlage dieser Informationen und grundsätzlicher mathematischer Zusammenhänge der Fehlerfortpflanzung in verketteten Produktionsanlagen wurde ein Komponenten-orientiertes, numerisches Modell des Verhaltens von Abfüllanlagen als Grundlage Diagnose entwickelt. Die kontextfreien Komponentenmodelle wurden dabei in der Simulationsumgebung MatLab/SIMULINK® umgesetzt und validiert. Die Modelle konnten dabei das reale Verhalten sowohl isoliert als auch im Verbund reproduzieren.

Auf den Modellkomponenten aufbauend wurden in zwei unterschiedlichen Herangehensweisen Methoden für die Anlagendiagnose entwickelt:

2.1 Rekursiv regelbasierter Ansatz

Zum einen wurden regelhafte Zusammenhänge erarbeitet, die als Wissensbasis für regelbasierte Systeme dienen können. Die Validierung dieser Regeln in einem Software-System wurde jedoch mithilfe eines klassischen, nicht wissensbasierten Algorithmus durchgeführt.

2.2 Modell- und konsistenzbasierter Diagnoseansatz

Grundsätzlich werden für die Realisierung der modellbasierten Diagnose die Struktur und die kausalen Zusammenhänge eines zu untersuchenden Systems in einem Modell nachgebildet [11]. Dabei wird eine Unterscheidung zwischen der strukturellen Beschreibung und der Verhaltensbeschreibung der einzelnen Elemente gemacht. Die Verhaltensmodelle werden in einer Modellbibliothek abgelegt, die unabhängig von der Struktur des Problems wiederverwendet werden können [6]. Die Verhaltensmodelle ergeben zusammen mit der Systemstruktur die vollständige Systembeschreibung. Diese Trennung erleichtert die Wartung und Wiederverwendung modellbasierter Diagnosesysteme.

Das Modell wird dann mit dem realen System verglichen, indem die Eingangsvariablen des Systems auch als Eingangsvariablen des Modells dienen. Der Vergleich des Verhaltens von System und Modell über die Ausgangsvariablen kann für die Analyse des Systems genutzt werden. Auch die umgekehrte Analyse der Eingangsvariablen auf Basis der Ausgangsvariablen ist möglich [5].

Die im Forschungsprojekt LineMod entwickelten Modelle wurden für den Zweck der modellbasierten Diagnose zu qualitativen Modellen abstrahiert. Diese qualitativen Modelle wurden in der modellbasierten Diagnosemaschine RAZ'R der Firma OCC'M Software genutzt, um die Fehlerlokalisierung durchzuführen.

3 Ergebnisse

Das Forschungsprojekt LineMod befand sich zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung noch in Bearbeitung. Folgende Ergebnisse waren bis zum Projektabschluss Ende Oktober 2008 absehbar:

3.1 Strukturierte Vorgaben für Diagnosedaten

Grundlage für die Beobachtung des Abfüll- und Verpackungsprozesses waren im Forschungsprojekt LineMod die „Weihenstephaner Standards für Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen“ [12]. Diese konnten durch das Umbenennen und Hinzufügen von Datenpunkten sowie das Schaffen einer hierarchischen Ontologie so erweitert werden, dass sie für alle Abfüll- und Verpackungsanlagen in der Lebensmittelindustrie anwendbar sind [10]. Für die im Projekt LineMod erforderlichen Diagnosedaten wurde mit der „diagnostic-data“-Tabelle eine einheitliche Datenstruktur geschaffen und Prozeduren entwickelt, mit deren Hilfe Betriebsdaten aus verschiedenen herstellereigenen Datenerfassungssystemen automatisch in diese Tabelle überführt werden können.

3.2 Diagnosemodellkomponenten

Mit Hilfe mathematischer Modellierung des Transports wurden kontextfreie Modellkomponenten für verarbeitende Maschinen und Transporteure, zusammenführende und trennende Maschinen sowie deren Verbindungen innerhalb einer Gesamtanlage entwickelt. Diese Modellkomponenten wurden sowohl einzeln als auch im Anlagenkontext durch numerische Simulation mit Hilfe von MatLAB/Simulink validiert. Es zeigte sich, dass die Modellkomponenten das Abbilden des Verhaltens von Abfüll- und Verpackungsanlagen unterschiedlicher Konstellation mit hinreichender Genauigkeit ermöglichen.

3.3 Algorithmen für die Verursacherdiagnose von Anlagenstillständen und Minderleistungen

Aufbauend auf den Modellkomponenten wurden Diagnosealgorithmen entwickelt. Diese ermöglichen die Lokalisierung von Ursachen einzelner akuter Stillstände und Minderleistungszeiträume der Füllmaschine. Hierzu wurden sowohl eine Vorgehensweise, die anhand der Anlagenstruktur einen rekursiven Programmablauf und damit einen Entscheidungsbaum realisiert, als auch ein Algorithmus zur konsistenzbasierten modellbasierten Diagnose umgesetzt. Die Diagnosealgorithmen wurden jeweils anhand von Simulations- und Praxisdaten validiert. Beide lieferten gute Diagnoseergebnisse und wurden in eine Demonstratorapplikation für die automatische Anlagendiagnose implementiert, wobei sich der modellbasierte Ansatz als deutlich robuster bei Lücken in den Beobachtungsdaten zeigte.

4 Diskussion

Wie anhand der Demonstratorapplikation basierend auf realen Betriebsdaten gezeigt wurde, können mit Hilfe der entwickelten Algorithmen ein Großteil der technisch bedingten Effizienzverluste ihren verursachenden Anlagenkomponenten zugeordnet werden. Der verfolgte modellbasierte Ansatz zeigt sich hierbei als robustes Werkzeug und wird die zügige Entwicklung von Prototypen für Diagnosesysteme durch die Industriepartner ermöglichen.

Die zum Abschluss des Projektes absehbaren Ergebnisse bieten die Möglichkeit, Stillstände und Minderleistungen am Zentralaggregat einer Abfüll- und Verpackungsanlage ihren Verursachern zu 90 % richtig zuzuordnen (vgl. Bild 3).

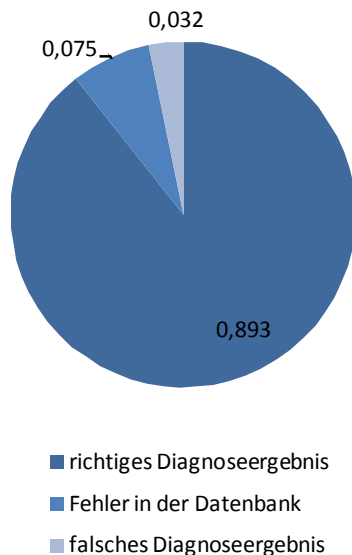


Bild 3: Ergebnisse der automatischen Diagnose von 187 Anlagenstillständen aus zwei unterschiedlichen Abfüll- und Verpackungsanlagen (reale Testfälle, jeweils verursacht durch eine dem Zentralaggregat vor- oder nachgeschaltete Anlagenkomponenten, Projektstand LineMod, August 2008)

Während der Projektbearbeitung hat sich aber auch gezeigt, dass etwa 40 % aller in der Praxis auftretenden Fälle von Effizienzminderungen nicht direkt durch einzelne Anlagenkomponenten verursacht werden, wie sie in LineMod betrachtet wurden. Häufig sind Stillstandsursachen nicht einzeln ausschlaggebend, sondern Effizienzverluste treten erst im Zusammenspiel mehrerer Fehler auf.

Viele der untersuchten Stillstände und Minderleistungen waren nicht durch technische Komponenten innerhalb des betrachteten Systems der Abfüll- und Verpackungsanlage begründet, sondern in einem vor- oder nachgeschalteten Prozess wie z. B. der Leergutlogistik oder der Materialversorgung. Auch viele Chargen- bzw. Artikelwechsel führten zu Umstellungs- und Anfahrverlusten.

Nicht immer konnte die für einen Anlagenstillstand verantwortliche Maschine kausal richtig zugeordnet werden. In einigen Fällen verarbeitete eine nach der Datenlage störungsfrei arbeitende Maschine Objekte falsch. Die Auswirkungen zeigten sich aber erst in der „Nichtverarbeitbarkeit“ dieser Objekte in einer anderen Maschine, die dann als vermeintlicher Stillstandsverursacher diagnostiziert wurde.

Obwohl im Projekt von Beginn an auf einheitlich definierte Erfassung von Beobachtungsdaten nach [12] gesetzt wurde, stellt die Aufzeichnung korrekter Betriebsdaten von ausreichender Genauigkeit in der industriellen Praxis nach wie vor eine Herausforderung dar. Nicht plausible Maschinenzustandsinformationen, stark rauschende oder fehlende Daten verhinderten in einigen Fällen die Diagnose.

5 Ausblick

Um das gesamte Potenzial der im Forschungsprojekt LineMod geleisteten grundlegenden Modellierungsarbeit und dem erfolgreich umgesetzten Ansatz der modellbasierten Diagnose für Abfüll- und Verpackungsanlagen zu erschließen, wird ein Anschlussprojekt mit dem Namen Modellbasiertes Effizienzanalysetool für verkettete Abfüll- und Verpackungslinien (LineMET) angestrebt. Dieses soll die bisherigen Systemgrenzen erweitern und Lösungen für die dargestellten noch nicht bewertbaren Fälle erarbeiten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Ahvenainen, R.: Novel food packaging techniques. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2003
- [2] Back, W.: Sekundärkontaminationen im Abfüllbereich. Brauwelt 134 (1994), Nr. 16, S. 686-690 u. 692-695
- [3] Blüml, S.; Fischer, S.: Handbuch der Fülltechnik. Hamburg: Behrs, 2004
- [4] Capgemini Deutschland GmbH: Studie: Leistungsreserven der Instandhaltung in Brauereien. Bad Homburg, 2001
- [5] de Kleer J.; Kurien, J.: Fundamentals of Model-based Diagnosis. In Proceedings of the Fourteenth International Workshop on Principles of Diagnosis, DX'03, Washington D.C., 2003, S. 1 - 12. And in Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes SAFEPROCESS 2003. Washington, D.C., U.S.A., 2003, S. 25 – 36
- [6] Dressler, O.; Puppe, F.: Knowledge Based Diagnosis – Survey and Future Directions. In: XPS-99: Knowledge Based Systems, 5th Biannual German Conference on Knowledge Based Systems, Würzburg, Springer: Heidelberg, 1999
- [7] Evers, H.: Anforderungen und Auslegung von künftigen Abfüllanlagen. VLB Berlin, Unterlagen zur 89. brau- und maschinentechnischen Arbeitstagung der VLB, 2002
- [8] Funk, P.; Jackson, M.: Experience based diagnostic and condition based maintenance within production systems. In: Proceedings of COMADEM 2005, The 18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 2005
- [9] Haider, M.: Schwachstellenanalyse an PET-Linien. Getränkeindustrie (2006), Nr. 9, S. 22-24
- [10] Haufe, C., Kather, A.: Ontologie für Betriebsdaten – Praktikables Modell für die Kommunikation zwischen Produktionsmaschinen und BDE-Systemen. Verpackungs-Rundschau (03/2008), S. 51-53
- [11] Heller, Frank: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Universität Paderborn, 2003
- [12] Kather, A.; Voigt, T.: Weihenstephaner Standards für die Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen - Teil 1: Physikalische Schnittstellenspezifikation, Version 2005.03; Teil 2: Inhaltliche Schnittstellenspezifikation, Version 2005.03; Teil 3: Datenauswertung und Berichtswesen, Version 2005.01; Teil 4: Überprüfung und sicherer Betrieb, Version 2005.01, TU München, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik, 2004-2006
- [13] Keck, R.: K wie Kostensenkung. Brauindustrie 90 (2005), Nr. 6, S. 10-13
- [14] Langer, M.: Auf die Ausnutzung kommt es an – Effizienzsteigerung im Flaschenkeller für den Mittelstand. In: Brauindustrie 92 (2007), Nr. 5, S. 18-20
- [15] Mexis, N. D.: Handbuch Schwachstellenanalyse und –beseitigung, Köln, 1994
- [16] Mexis, N. D.: Handbuch Schwachstellen-Analyse erfolgreiches Instrument zur Kostensenkung u. Unternehmenssicherung, Köln, 1990
- [17] Robertson, G. L.: Food Packaging – Principles and Practice. 2. Ausgabe, CRC Press: Boca Raton
- [18] Vogelpohl, H.: Ergebnisse und Erfahrungen aus Abnahmeversuchen. Brauwelt 146 (2006), Nr. 7, S. 174-178
- [19] Voigt, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004
- [20] Voigt, T.; Grabrucker, R.; Vogelpohl, H.: Abnahmeversuche bei Getränkeabfüllanlagen. Der Weihenstephaner 71 (2003), Nr. 3, S. 110-116
- [21] Voigt, T.; Kather, A.; Langowski, H.-C.: Information Technology as a supporter to increase the availability of filling and packaging plants. Proceedings of the 31st EBC Congress, Venedig. Nürnberg: Hans Carl, 2007, auf CD