

Fehlerdiagnose bei verketteten Verpackungslinien

Modellbasierte Diagnose für Abfüll- und Verpackungsanlagen

Tobias Voigt, Stefan Flad, Horst-Christian Langowski, Peter Struss, Technische Universität München; Axel Kather, Rockwell Automation Deutschland

Um die geringen Verfügbarkeiten der komplexen Abfüll- und Verpackungsanlagen von 40-70% zu steigern, müssen Hauptstillstandsversucher identifiziert werden. Wechselwirkungen innerhalb der verketteten Linien machen dies schwierig. Deshalb wurden Modelle erarbeitet, die die zeitlichen Abhängigkeiten innerhalb von Abfüll- und Verpackungsanlagen berücksichtigen. Auf deren Grundlage entstanden Diagnoselösungen für die Lebensmittelindustrie, die an beispielhaften Anwendungen evaluiert wurden.

Diagnose / Abfüll- und Verpackungsanlagen / Betriebsdatenerfassung

Fault Diagnosis for Linked Packaging Lines

Model-based Diagnosis for Bottling and Packaging Plants

Components that cause downtimes of complex bottling and packaging plants need to be identified to increase the overall efficiency which today is between 40 and 70 percent. This is a difficult task due to interdependencies among the different material flows within the line. Therefore, models were developed to describe temporal interrelations within the plants. Based on these models, diagnosis solutions for food industry were implemented and evaluated in practical scale.

Fault diagnosis / packaging plants / production data acquisition

Problemstellung

Das Abfüllen und Verpacken ist einer der letzten Schritte in der Wertschöpfungskette bei der Herstellung von Getränken und Lebensmitteln. Die dazu verwendeten Abfüll- und Verpackungsanlagen sind hochkomplexe, verkettete Verarbeitungslinien. Sie bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Maschinen, die mit Ausbringungen von bis zu 90.000 Packungen pro Stunde arbeiten. In der Regel existieren drei voneinander abhängige Materialströme: Für die Primärverpackung (z. B. die Flasche), die Sekundärverpackung (z. B. Kartongen) und die Tertiärverpackung (z. B. die Palette). Bild 1 veranschaulicht diese Komplexität an einem Anlagenschema einer Abfüll- und Verpackungsanlage für Getränke.

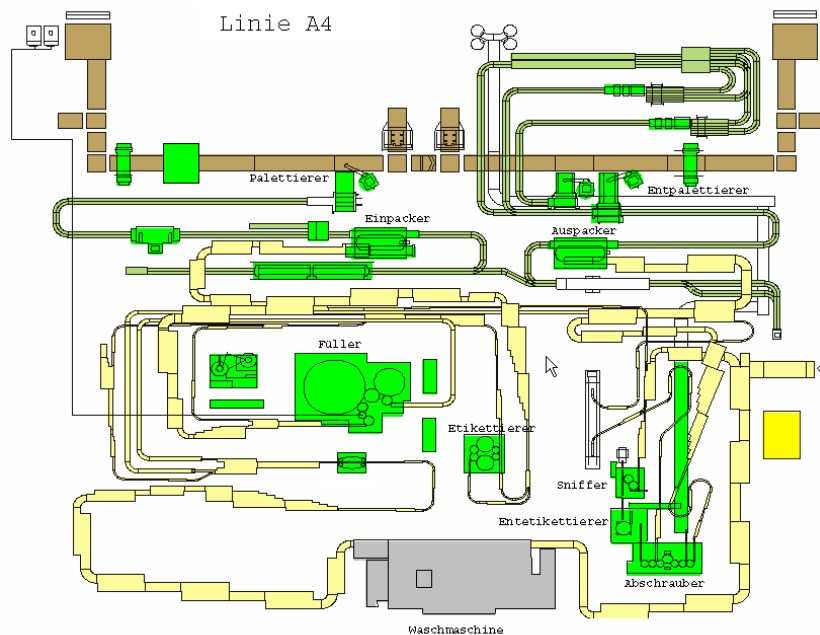


Bild 1: Anlagenschema einer Mineralwasserabfüllanlage für Kunststoffmehrwegflaschen

Stillstände dieser Anlagen sind aus wirtschaftlichen Erwägungen und besonders im Hinblick auf die Qualität der abgefüllten Lebensmittel zu vermeiden. Schwankende Bedingungen oder Unterbrechungen beim Abfüllprozess wirken sich häufig negativ auf die Qualität der Produkte aus. Hierbei sind neben einer mikrobiellen (Re-) Kontamination vor allem Oxidationsprozesse durch atmosphärischen Sauerstoff die qualitätsmindernden Ursachen. Sie führen während der anschließenden Lagerdauer zu Vitaminverlusten, Farbveränderungen oder geschmacklichen Beeinflussungen. Bei den einzelnen Anlagenkomponenten treten immer wieder Störungen auf, die über eine Stau- oder Mangelfortpflanzung zu einem Stillstand des Zentralaggregats führen können. Abfüll- und Verpackungsanlagen erreichen daher heute nur Verfügbarkeiten von 40-70 %.

Um die verfügbarkeitsmindernden Anlagenschwachstellen zu identifizieren, werden seit einigen Jahren automatisch Maschinendaten erfasst. Bei deren Auswertung kommen statistische Methoden zum Einsatz, welche die Störungen der einzelnen Komponenten nach ihrer Dauer und Häufigkeit bewerten. Eine aus den statistischen Ergebnissen abgeleitete Optimierungsmaßnahme an dem am häufigsten oder am längsten gestörten Aggregat kann zwar die Eigenstöranfälligkeit des Aggregats verringern, aber möglicherweise für eine Verbesserung der Gesamtanlageneffizienz nutzlos sein. Zur Effizienz- und Qualitätsverbesserung müssen gezielt diejenigen Anlagenkomponenten identifiziert werden, die zu einem Stillstand des abfüllenden Zentralaggregats führen, das die Nennausbringung der Anlage vorgibt.

Bild 2 verdeutlicht diese Problematik anhand eines Gantt-Charts, in dem die Maschinezustände einer weiteren Beispielanlage über die Zeit farblich dargestellt sind.

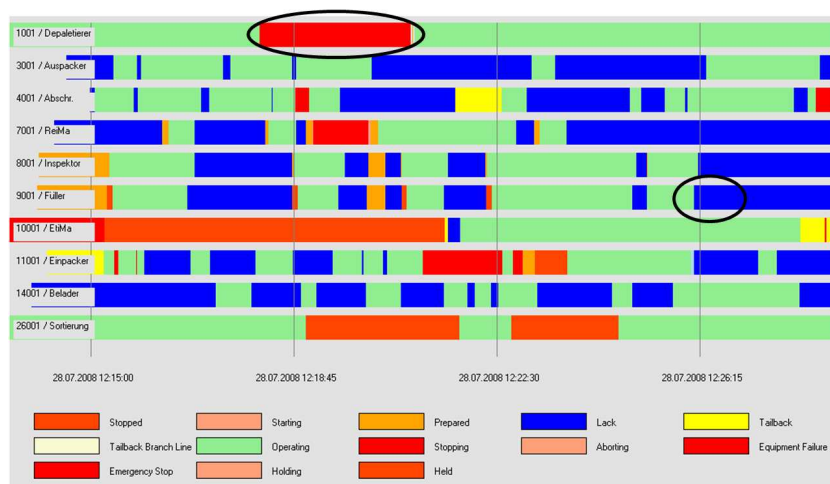


Bild 2: Fehlerfortpflanzung durch einen Rückstau auf das Zentralaggregat

Die Anlagenkomponenten sind aufgrund der Pufferfunktionen der verbindenden Transporteure voneinander entkoppelt. Störungen machen sich daher erst mit einer variablen zeitlichen Verzögerung durch Mangel oder Rückstau bemerkbar. Der in Bild 2 rechts mittig markierte Mangelzustand (engl.: lack) des Zentralaggregats (Füller) ist aus Effizienz- und Qualitätssicht negativ zu bewerten. Ursache hierfür war die oben markierte Störung der Palettenentlademaschine (Depaletierer). Diese könnte beispielsweise durch Fremdmaterial auf einer Leergutpalette hervorgerufen worden sein, wobei die Störursache vom Maschinenbediener schnell behoben werden konnte. Die verursachende Maschine war somit zu Beginn des Stillstands am Zentralaggregat bereits seit längerer Zeit wieder in Betrieb.

Eine automatische Auswertung der Maschinendaten unter dem Aspekt, ob eine Störung an einem Aggregat auch zu einem Stillstand oder einer Minderausbringung des qualitätsgebenden Abfüllprozesses führt, wurde bisher nicht realisiert. Die exakte Ursachenzuordnung kann in derartigen Fällen bisher nur manuell erfolgen. Manuelle Schwachstellenanalysen liefern aber aufgrund des Stichprobencharakters keine statistisch abgesicherten Ergebnisse und sind zudem personal- und zeitintensiv. Für ein kontinuierliches Anlagenmonitoring wünschen sich Anlagenbetreiber deshalb flexible, allgemeingültige und automatisierbare Ansätze, die eine kontinuierliche Anlagendiagnose ermöglichen.

Ansatz

Um die geforderten Werkzeuge für eine automatische Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen zu ermöglichen, wurde das interdisziplinäre Forschungsprojekt „LineMod - Diagnosemodelle für verkettete Abfüll- und Verpackungslinien in der Lebensmittelindustrie“ durchgeführt. Dieses Forschungsvorhaben (FV-Nr.233 ZBG) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert.

Hauptzielsetzung war das Schaffen einer Bibliothek aus Diagnosemodellen, die das Abbilden der Prozessabläufe und zeitlichen Fortplanzung von Ursache und Wirkung innerhalb einer Abfüll- und Verpackungsanlage ermöglichen. Aus einer solchen Bibliothek heraus sollte dann für die unterschiedlichen Anlagenkonstellationen lediglich auf Basis der Anlagenstruktur ein Diagnosemodell der gesamten Anlage erstellt werden können. Durch Kombination mit einem generischen Diagnose-Algorithmus sollte ein anlagenspezifisches Diagnosesystem automatisch generierbar werden, ohne dass weitere Programmierarbeiten erforderlich sind. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf die einfache Anpassbarkeit an unterschiedliche Anlagenkonstellationen gelegt.

Für das Modellieren der verketteten Abfüll- und Produktionslinien wurden von zahlreichen Autoren analytische Ansätze verfolgt. So zeigt beispielsweise [8], dass auf Basis von Markov-Ketten die Belegung von Puffern näherungsweise vorhergesagt werden kann. Es handelt sich hierbei um stochastische Modelle, die die Zustandsübergänge einer Anlage in Differentialgleichungssystemen beschreiben. Ähnliche Ansätze, mit dem Ziel der Vorhersage von Anlageneffizienzen bzw. Ausbringungen, verfolgt z. B. auch [4]. Allen stochastischen Modellansätzen gemeinsam ist jedoch, dass lösbar bzw. numerisch iterierbare Gleichungssysteme nur erreicht werden, wenn zuvor zahlreiche Vereinfachungen vorgenommen wurden. Aufgrund dieser sind sie für das Ableiten von praxistauglichen Diagnosealgorithmen nicht geeignet.

Besser geeignet für Diagnosefragestellungen sind Verhaltensmodelle aus kontextfreien Modellkomponenten. Hierbei wird zwischen der strukturellen Beschreibung des Gesamtsystems und der Verhaltensbeschreibung der Komponenten unterschieden. Die Komponentenmodelle werden in einer Modellbibliothek abgelegt, die unabhängig von der Struktur des Gesamtsystems wiederverwendet werden kann. Einen entsprechenden Ansatz verfolgt die standardisierte Modellierungssprache MODELICA [6]. Hiermit wurden bereits Modelle für die Diagnose technischer Systeme wie elektrischer Schaltkreise [1] erstellt. Auch in zahlreichen Projekten wurden auf Basis von Bibliotheken kontextfreier Modellkomponenten konsistenzbasierende Diagnoseansätze verfolgt. Beispielsweise erfolgte Fehlersuche bei der Stromerzeugung und Verteilung [12]. Für die Luft- und Raumfahrt wurde Diagnose und Selbstrekonfigurierung für Raumsonden der NASA [15] oder Diagnose von Helikopter-Getrieben [14] betrieben. Zu nennen sind auch das kommerzielle Überwachungssystem für Gasturbinen „TIGER“ [13] oder die Erzeugung von Fehlerbäumen für die Gabelstaplerdiagnose [3]. Eine besondere Bedeutung erlangten in den letzten Jahren Anwendungen für Fahrzeugsysteme. Die Motorsteuerung oder das Anti-Blockier-System wurden in Form von On-Board- oder Offline-Diagnosesystemen entwickelt und getestet ([2] oder [10]).

Die genannten Arbeiten bestätigen die Eignung eines komponentenorientierten Modellierungsansatzes für die Diagnose dynamischer Systeme. In diesen wurden bisher jedoch noch keine verketteten Anlagen aus mehreren Maschinen betrachtet, wie sie Verpackungslinien darstellen. Durch die Verbindung der Komponenten in der Abfülllinie über speicherfähige Transportstrecken kommt es zur zeitlichen Fortpflanzung von Stillständen (Lücken) und Ausbringungsschwankungen über viele Minuten. Deshalb wurden für die im Projekt LineMod verfolgten Diagnosezwecke durch physikalische Modellierung des Transports neue numerische Verhaltensmodelle für die störungsfrei arbeitenden Komponenten einer Abfüll- und Verpackungsanlage abgeleitet (OK Verhalten), die zeitlichen Abhängigkeiten der Anlagenkomponenten in geeigneter Weise berücksichtigen.

Kontextfreie Modellkomponenten

Um einen breiten Einsatz und eine Wiederverwendung der Modelle zu ermöglichen, erfolgte die Modellierung nach dem genannten Prinzip der Kontextfreiheit. Dies bedeutet, dass keinerlei Annahmen getroffen wurden, die die Komponente in einen impliziten Zusammenhang setzt. Der Zusammenhang zwischen mehreren Komponenten ergibt sich erst aus der Systemstruktur einer Abfüll- und Verpackungsanlage.

Auf Basis der grundsätzlichen Funktionen von Maschinen und Transporteuren in Verpackungsanlagen wurde zunächst die Modellkomponente Material Transporter (MT) geschaffen, die die wesentlichen Aspekte beider Anlagenelemente in sich vereinigt. Die grundsätzliche Überlegung dazu ist, dass sowohl Maschinen als auch Transporteure Objekte befördern. Da in mehreren Arbeiten nachgewiesen werden konnte, dass diskrete Transportprozesse auch in geeigneter Weise durch kontinuierliche Modelle abgebildet werden können (siehe z. B. [11]), wurde bei MT ein flussorientierter Ansatz gewählt. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass theoretische Objektflüsse auch über die Maschinengeschwindigkeiten und die Fördergeschwindigkeiten der Transporteure berechnet werden können, was vor allem da notwendig ist, wo exakte Zählwerte fehlen. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Es wird keine detaillierte Beschreibung der Verteilung der Elemente auf dem Transporteur/Puffer oder in der Maschine benötigt, um das OK Verhalten der Komponente zu beschreiben.
- Die Objekte folgen einem typischen Weg über den Transporteur, sofern sie nicht durch andere Objekte auf dem Transporteur daran gehindert werden.
- Die transportierten Objekte sind Stückgüter und in ihrer räumlichen Ausdehnung unveränderlich ($in.d_o = out.d_o$).
- Die transportierten Objekte verändern sich nicht über den Transportprozess und sind bei einer Komponente alle vom gleichen Typ.
- Die Kapazität der Komponente (C) ist konstant.
- Die Richtung des Transports innerhalb einer Komponente ist konstant.
- Es ist keine explizite Modellierung der Steuerung enthalten.

Eine Darstellung einer Komponente MT in Form eines Transportpuffers zeigt Bild 3.

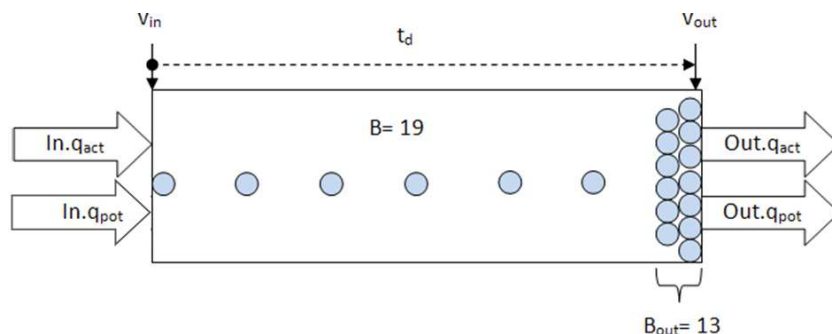


Bild 3: Beispielhafte Darstellung einer MT-Komponente

Aufgrund der kontextfreien Modellierung wird bei den Flüssen zwischen einem potentiellen ($in.q_{pot}$ und $out.q_{pot}$) und einem tatsächlichen, aktuellen Fluss ($in.q_{act}$ und $out.q_{act}$) der Komponente unterschieden. Der potentielle Fluss stellt dabei den Fluss dar, den die Komponente ohne Berücksichtigung des strukturellen Zusammenhangs annehmen könnte. Der aktuelle Fluss repräsentiert den tatsächlichen Fluss im Zusammenspiel mit anderen Komponenten. v_{in} bzw. v_{out} bezeichnen die maximalen Geschwindigkeiten, mit der Objekte in die Komponente ein bzw. austreten können.

Eine Komponente kann potentiell mit ihrer Eingangsgeschwindigkeit v_{in} Objekte aufnehmen, so lange die Komponente nicht gefüllt ist und keine mechanische Sperre dies verhindert. Ist die Kapazität der Komponente ausgeschöpft, ist der Objektfluss das Minimum des über die Geschwindigkeit bestimmten Flusses in die Komponente und des aktuellen Flusses aus der Komponente, wiederum unter der Annahme, dass keine mechanische Sperre den Fluss unterbricht. Dies ergibt (1):

$$(1) \quad \begin{aligned} in.q_{pot}(t) &= \frac{v_{in}(t)}{d_0} f_{\text{Bes}} B(t) < C \\ in.q_{pot}(t) &= \min\left(\frac{v_{in}(t)}{d_0}, out.q_{act}(t)\right) f_{\text{Bes}} B(t) = C \end{aligned}$$

Die Anzahl der Objekte in der Komponente hängt von den pro Zeiteinheit zu- und abgeführten Objekten ($in.q_{act}$ und $out.q_{act}$) ab, woraus folgt:

$$(2) \quad \frac{dB(t)}{dt} = in.q_{act}(t) - out.q_{act}(t)$$

Die Anzahl der am Ausgang der Komponente verfügbaren Objekte B_{out} wird von den abgeführten und den vor der Totzeit t_d zugeführten Objekten bestimmt. B_{out} ist eine virtuelle Größe, die die Objekte beziffert. Demnach hängt der potentielle Fluß aus der Komponente heraus $out.q_{pot}$ bei genügend zur Verfügung stehenden Objekten B_{out} von der Ausgangsgeschwindigkeit v_{out} ab. Ansonsten ist entweder der um die Totzeit t_d vorausgegangene Eingangfluss $in.q_{act}$ maßgebend oder die Ausgangsgeschwindigkeit v_{out} begrenzend. Dies ergibt:

$$(3) \quad \begin{aligned} out.q_{pot}(t) &= \frac{v_{out}(t)}{d_0} f_{\text{Bes}} B_{out}(t) \geq 1, \text{ sonst gilt :} \\ out.q_{pot}(t) &= \min\left(\frac{v_{out}(t)}{d_0}, in.q_{act}(t - t_d)\right) \end{aligned}$$

Potentiell am Output der Komponente verfügbar sind also die Elemente B_{out} , die sich mindestens für die Dauer der Totzeit t_d auf dem Transporteur befinden. Die Totzeit t_d ist damit unter Annahme 2 als die typische Zeit definiert, die ein Objekt vom Eingang einer Komponente bis zum Ausgang der Komponente benötigt. Für B_{out} ergibt sich:

$$(4) \quad \frac{dB_{out}(t)}{dt} = in.q_{act}(t - t_d) - out.q_{act}(t)$$

In analoger Weise wurden zwei weitere Modellkomponenten entwickelt. Die Komponente Combine Element (CE) modelliert die Kombination von zwei Objekttypen unterschiedlicher Anzahl zu einem neuen Objekttyp. Das Separate Element (SE) wurde als Gegenstück zum CE modelliert. Hiermit können Prozesse abgebildet werden, mit welcher Packungen auch wieder in ihre Komponenten aufgetrennt werden (z. B.: das Trennen eines Leergutkastens in Flaschen und Kasten).

In den dargestellten Komponenten werden aufgrund der kontextfreien Betrachtungsweise lediglich die potentiellen Flüsse in die Komponente und aus ihr heraus betrachtet. Die aktuellen Flüsse hängen neben diesen potentiellen auch von den mit dem MT verbundenen anderen MTs ab. Um dies zu berücksichtigen, wurde eine Komponente Transportation Connector (TC) modelliert. Hierbei handelt es sich um eine virtuelle Komponente. Sie besteht lediglich aus Interfaces, die abbilden, dass der aktuelle Fluss aus einer Komponente das Maximum ihres potentiellen Flusses und des aktuellen Flusses in die nächste Komponente hinein ist.

Durch Kombination der Modellkomponenten MT, CE, SE und TC können in einfacher Weise Modelle beliebiger Anlagenkonstellationen erstellt werden. Diese sind dann mit experimentell in der Praxis zu ermittelten Werten für die Geschwindigkeiten, Ausbringungen, Totzeiten und Kapazitäten zu parametrieren. Eine ausführliche Darstellung aller Komponenten findet sich in [7] und [9].

Modellvalidierung durch numerische Simulation

Um die Komponenten zu validieren, wurden ihre Modelle in MATLAB/Simulink[®] erstellt und verschiedenen Simulationsversuchen unterzogen. Der Test der Einzelkomponenten reproduzierte das erwartete Verhalten. Zudem wurde ein Modell einer Beispielanlage (vgl. Bild 1) erstellt, das aus den Einzelkomponenten zusammengesetzt wurde. Neben dem generellen Verhalten der Komponenten und der Modellanlage wurden vor allem die Fehlerfortpflanzung durch Stau- und Mangel validiert. Hierbei bildete das Gesamtmodell die für die Anlagendiagnose wichtige Stau- und Mangelfortpflanzung qualitativ richtig ab. Zur quantitativen Überprüfung wurden bei der realen Anlage die Zeiten ermittelt, die für das Füllen von unterschiedlichen Puffern benötigt werden, und mit den Modellprognosen verglichen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse für vier Behältertransportpufferstrecken der betrachteten Beispielanlage.

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen und berechneten Vollfahrzeiten einzelner Puffer

Puffer	Gemessene Zeit für das Vollfahren [s]	Berechnete Zeit für das Vollfahren [s]	Abweichung [%]
BT1	254	236	-7,1
BT3	265	263	-0,05
BT5	345	341	-1,2
BT6	242	210	-13

Beobachtungsdaten für die Diagnose

Um die entwickelten Modelle für die Diagnose nutzen zu können, muss deren Verhalten mit dem realen Maschinen- und Anlagenverhalten verglichen werden. Für die hierzu notwendige Beobachtungsdatenbasis wurden Methoden benötigt, mit denen Daten der betrachteten Systeme aufgenommen, konzentriert und ggf. aufbereitet werden können. Im Forschungsprojekt LineMod wurden als Grundlage hierfür die „Weihenstephaner Standards für die Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen (WS)“ [5] herangezogen. Neben der technischen wird in den WS auch eine inhaltliche Schnittstellenspezifikation anhand einer Beispielanlage für die Verarbeitung von Mehrweggebinden festgelegt. Diese definiert genau, welche Daten bei einem Betriebsdatenerfassungssystem gefordert bzw. empfohlen werden sowie deren Datenformat, den Ablageort in der Datenbank und den Lese-/Schreibzugriff. Im Rahmen von LineMod konnten die WS auf die gesamte Verpackungsbranche erweitert werden, womit die Grundlage dafür gelegt wurde, dass zukünftig auch außerhalb der Getränkeindustrie auf standardisierte Daten für eine Anlagendiagnose zugegriffen werden kann. Als Ergebnis steht für alle Abfüll- und Verpackungsbetriebe in der Lebensmittelindustrie sowie dem zuliefernden Maschinenbau eine entsprechend ihrer Bedürfnisse sowohl inhaltlich als auch physikalisch spezifizierte Schnittstellendefinition zur Verfügung.

Für die im Projekt LineMod erforderlichen Diagnosedaten wurde unter der Bezeichnung „diagnostic data“ eine einheitliche „Projekt-Datenstruktur“ geschaffen. Das ermöglichte es, in dem vorwettbewerblichen Forschungsprojekt, Betriebsdatenbanken verschiedener Hersteller mit unterschiedlicher Datenbankstruktur zu nutzen. Hierfür wurden Prozeduren entwickelt und programmtechnisch umgesetzt, mit deren Hilfe Betriebsdaten aus herstellerspezifischen Datenerfassungssystemen automatisch in die „Projekt-Datenstruktur“ überführt werden können.

Diagnosealgorithmen

Aufbauend auf den Modellkomponenten wurden Diagnosealgorithmen entwickelt. Hierzu wurden sowohl eine Vorgehensweise, die anhand der Anlagenstruktur regelbasiert einen rekursiven Programmablauf und damit einen Entscheidungsbaum realisiert, als auch ein Algorithmus zur konsistenzbasierten modelbasierten Diagnose umgesetzt.

Ausgangspunkt des regelbasierten Algorithmus ist jeweils ein Stillstand am Zentralaggregat. Stillstände können auf Grund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Datenlage vier konkrete Ursachen haben (vgl. dazu die Betriebszustände nach WS [5]).

- NoOperation: Stopped, Stopping, Starting, Prepared
- Failure: Holding, Held, Aborting, Equipment Failure, External Failure, Emergency Stop
- Lack: Lack, Lack Branch Line
- Tailback: Tailback, Tailback Branch Line

In den Fällen *NoOperation* und *Failure* (Kein Betrieb, Fehler) ist eine Diagnose trivial. Sie ist auf den jeweils anliegenden Betriebszustand zurückzuführen. Im Falle *Lack* (Mangel) ist die vorgeschaltete Maschine zu einem früheren Zeitpunkt zu untersuchen, im Falle eines *Tailbacks* (Stau) die nachgeschaltete ebenfalls zu einem früheren. Der untersuchte Zeitraum ist jeweils eine Funktion vom Startzeitpunkt des Maschinenstops, der Pufferkapazität und der Totzeit eines Puffers. Die mathematischen Grundlagen folgen aus den Modellgleichungen der zugehörigen Komponenten.

Die Auswertung erfolgt entsprechend Bild 4. Ein Stillstand der Maschine M wird zuerst auf Eigenfehler untersucht. Ist die Untersuchung positiv, wird das Ergebnis in die Ergebnisliste geschrieben, sonst wird M auf Mangel geprüft. Liegt dieser Fall vor, muss dieselbe Analyse am Vorgängeraggregat M_{-1} wiederholt werden. Anderenfalls wird M auf Stau getestet. Ist das Ergebnis positiv, wird die Nachfolgemaschine (M_{+1}) beobachtet. Sollte auch die Stausituation nicht eingetreten sein, müssen andere Ursachen gefunden werden. Diese können unbeobachtbare Gründe sein wie beispielsweise ausgeleitetes Transportgut oder Blockierung eines zwischengeschalteten Puffers.

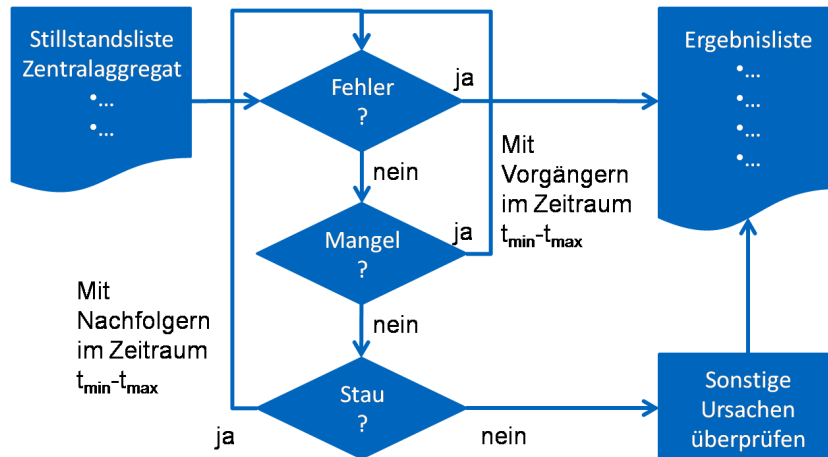


Bild 4: Rekursiver Regelaufruf

Findet sich bei einer Analyse als Ursache eine Maschine M_{+1} oder M_{-1} , so werden sie jeweils auf dieselbe Weise analysiert. Sobald eine Komponente mit Eigenfehler gefunden ist, sind die Diagnose abgeschlossen und der Grund für den Stillstand des Zentralaggregats identifiziert.

Beim konsistenzbasierten Diagnoseansatz wird das aus den genannten Komponenten erstellten Anlagenmodell vorhergesagte OK Verhalten aller Komponenten mit dem anhand der Betriebsdaten dokumentieren realen Verhalten verglichen. Kommt es zu Inkonsistenzen, die in diesem Fall als Symptome bezeichnet werden, wird eine Diagnose angestoßen. Als Symptome wurden in LineMod rein qualitativ Stillstände des Zentralaggregats untersucht.

Das Auffinden dieser Symptome erfolgt mit dem „Symptom Scanner“. Es wird eine Anfrage an den „Data Interpreter“ geschickt, der mit Hilfe der Daten aus der Datenbasis die entsprechenden Symptome mit ihrer zeitlichen Ausdehnung wieder zurück gibt (siehe Bild 5). Die Symptome werden nun an die Diagnosemaschine (*Diagnosis*) übergeben. Dort wird über die Modellgleichungen ein relevanter Zeitraum ermittelt und mögliche Hypothesen, also bestimmte Anlagenkomponenten mit einem „Not OK“ Verhalten, die zum Eintreten des Symptoms geführt haben könnten, mit den Beobachtungen (Observations) in der Datenbank verglichen. Werden Hypothesen für das „NOT OK“ Verhalten einzelner Komponenten durch die Datenbasis bestätigt, ist ein möglicher verantwortlicher Symptomverursacher gefunden. Liegen zu wenige Beobachtungsdaten vor, ergibt sich in vielen Fällen dennoch eine deutliche Einschränkung der möglichen Verursacher.

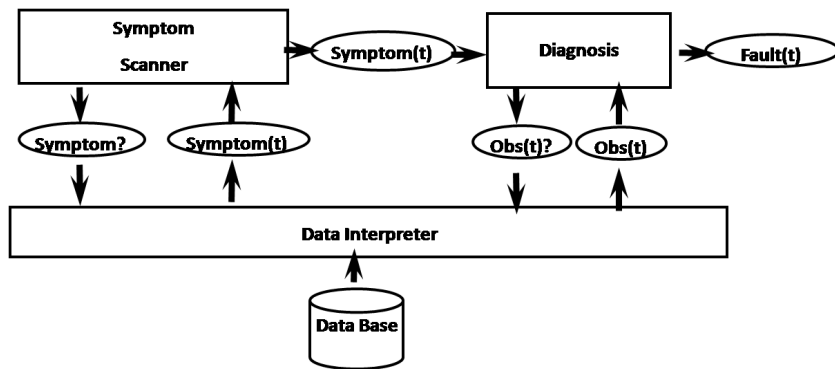


Bild 5: Architektur der Modelbasierten Diagnoserlösung [9]

Im Unterschied zum regelbasierten Algorithmus wird nicht entlang der Materialströme nach nur einem Stillstandsverursacher gesucht, sondern vielmehr jeder potentielle Verursacher betrachtet und entschieden, ob dieser auf Grund der Beobachtungsdaten für ein Symptom in Frage kommen kann.

Ergebnisse

Beide Diagnosealgorithmen wurden programmtechnisch umgesetzt und anhand ihrer Diagnosegüte bewertet. Als Diagnosegüte wurde hierbei verstanden, in wie weit die automatische Diagnose bei Anlagenstillständen die gleiche verursachende Komponente findet, die ein Expertenteam bei manueller Anlagenanalyse identifizieren würde. An zahlreichen Testtagen wurden hierzu Anlagenstillstände in zwei Versuchsanlagen aus der Getränkeindustrie beobachtet und protokolliert. Hierbei wurden die Ursachen von insgesamt 415 Anlagenstillständen ermittelt.

Der regelbasierte Algorithmus lieferte hierzu zu 93%, der konsistenzbasierte zu 96% übereinstimmende Ergebnisse. Da aber eine Zuordnung direkt am Zentralaggregat verursachter Stillstände trivial ist, interessiert vor allem, wie viele der vor Ort beobachteten 159 Stau- bzw. Mangelzustände am Zentralaggregat richtig ihren Verursacher zugeordnet werden. Der regelbasierte Algorithmus lieferte hierbei zu 81%, der konsistenzbasierte zu 89% übereinstimmende Ergebnisse.

Sowohl die regelbasierte als auch die konsistenzbasierte Diagnoserlösung wurden in einer Demonstratorapplikation implementiert, die von der Datenaufbereitung realer Betriebsdaten bis hin zur Ergebnisvisualisierung (vgl. Bild 6) automatische Anlagendiagnosen über variable Diagnosezeiträume ermöglicht.

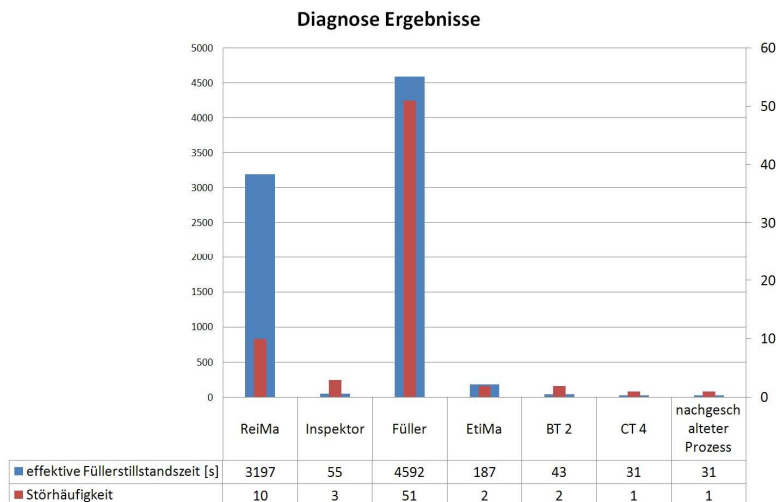


Bild 6: Beispielhafte Ergebnisdarstellung aus der LineMod-Demoapplikation

Die als Projektpartner vertretenen Zulieferfirmen äußerten Interesse an einer zügigen industriellen Umsetzung der bereits erreichten Ergebnisse. Ein Maschinenbauzulieferunternehmen hat bereits begonnen, die bei der Entwicklung des rekursiven Diagnosealgorithmus gewonnenen Erkenntnisse in seine Produkte einfließen zu lassen. Ein mittelständisches Systemhaus plant eine Pilotumsetzung der konsistenzbasierten Diagnoselösung.

Diskussion und Ausblick

Die zum Abschluss des Projektes vorliegenden Ergebnisse bieten die Möglichkeit, Stillstände und Minderleistungen am Zentralaggregat einer Abfüll- und Verpackungsanlage ihren Verursachern zu hohem Anteil richtig zuzuordnen. Der konsistenzbasierte Ansatz zeigte sich als robuster bei Lücken in den Beobachtungsdaten.

Während der Projektbearbeitung hat sich aber auch gezeigt, dass etwa 40 % aller in der Praxis auftretenden Fälle von Effizienzmindernungen nicht direkt durch Stillstände einzelner Anlagenkomponenten verursacht werden und deshalb in LineMod nicht 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.

Um das gesamte Potenzial der in LineMod geleisteten grundlegenden Modellierungsarbeit und dem erfolgreich umgesetzten Ansatz der modellbasierten Diagnose für Abfüll- und Verpackungsanlagen zu erschließen, wird ein im Juni 2009 gestartetes Anschlussprojekt unter dem Titel „LineMET - Modellbasiertes Effizienzanalysetool für verkettete Abfüll- und Verpackungslinien“ die bisherigen Systemgrenzen erweitern und Lösungen für die dargestellten noch nicht bewertbaren Fälle erarbeiten.

Fazit

Die vorliegenden Ergebnisse bieten die Möglichkeit, Stillstände und Minderleistungen am Zentralaggregat einer Abfüll- und Verpackungsanlage ihren Verursachern zu hohem Anteil richtig zuzuordnen. Um das gesamte Potenzial grundlegenden Modellierungsarbeit und dem umgesetzten Ansatz der modellbasierten Diagnose für Abfüll- und Verpackungsanlagen zu erschließen, wird ein Anschlussprojekt die bisherigen Systemgrenzen erweitern und weitere Lösungen erarbeiten.

Referenzen

- [1] Åkerlund, P.: Model-based diagnosis using MathModelica. Examensarbeit, Avdelning Institut, Department of Electrical Engineering, 2001
- [2] Cascio, F.; Console, L.; Guagliumi, M.; Osella, M.; Panati, A.; Sottano, S.; Theseider-Dupré, D.: Strategies for on-board diagnostics of dynamic automotive systems using qualitative models. AI Communications, 1999

- [3] Cunis, R.; Struss, P.: India – Intelligente Diagnose in der industriellen Anwendung. In: Holtz, L.; Struss, P.; Guckenbiehl, T. (Hrsg.): Intelligent Diagnosis in Industrial Applications, Shaker Verlag: Aachen, 2001, S. 1-9
- [4] Han, M-S.; Park, D-J.: Performance analysis and optimisation of cyclic production lines. IEEE Transactions 34 (2002), Nr 4, S 411-422
- [5] 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
- [6] Modelica® - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling Language Specification Version 3.0, 2007
- [7] o. V.: Diagnosemodelle für verkettete Abfüll- und Verpackungslinien in der Lebensmittelindustrie (LineMod), Abschlussbericht AiF ZUTECH Projekts (233 ZBG), 2008, anfordern bei der Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e. V. (IVLV), <http://www.ivlv.de>
- [8] Spinellis, D.; Papadopolous, C. T.: A simulated annealing approach for buffer allocation in reliable production lines. In: Annals of operations research 93 (2000), S. 373-384
- [9] Struss, P.; Kather, A.; Schneider, D.; Voigt, T.: Qualitative Modeling for Diagnosis of Machines Transporting Rigid Objects. In Proceedings of the 22nd International Workshop on Qualitative Reasoning, Boulder, Co, 2008
- [10] Struss, P.; Price, C.: Moving forward – Model-based Systems in the Automotive Industry. In: AI magazine 24 (2003) Nr. 4 S.17–34
- [11] Suri, R.; Fu, B. R.: On using continuous flow lines to model discrete production lines. In: Journal of Discrete Event Dynamic Systems, 4 (1994), S. 129-169
- [12] Thiébaux, S. et al.: Supply Restoration in Power Distribution Systems – A Case Study in Integrating Model-Based Diagnosis and Repair Planning. In: Horvitz, E., & Jensen, F. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Conference on Uncertainty in AI (UAI-96), Portland, OR, USA, 1996, S. 525–532
- [13] Trave-Massuyes, L.; Milne, R.: Gas Turbine Condition Monitoring Using Qualitative Model Based Diagnosis. In IEEE Expert Magazine, 1997
- [14] Wang, W.; Wong, A. K.: Autoregressive Model-Based Gear Fault Diagnosis. In: Journal of Vibrations and Acoustics, 124 (2002), S. 172-179
- [15] Williams, B.; Nayak, P.: A Model-based Approach to Reactive Self-Configuring Systems. In 7th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX96), Montreal, 1996

Manuskripteingang: 5.5.2009

Dr.-Ing. *Tobias Voigt* (1973 geboren) ist seit 1999 Diplomingenieur für Brauwesen und Getränketechnologie. Nach verschiedenen Praxiserfahrungen (Privatbrauerei Gentner, Wolframseschenbach; Spaten-Franziskaner-Bräu GmbH, München; Gordon Biersch Brewing Company, San Jose(CA) USA; Syskron GmbH, Freising) war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik (Prof. Weisser) tätig und promovierte 2004 zum Dr.-Ing.. Derzeit forscht er als Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (Univ.-Prof. Horst-Christian Langowski) mit den Schwerpunkten „Informationstechnologie in der Brau und Lebensmittelindustrie“, „Betriebsdatenerfassung“ sowie „Simulation und Optimierung von Abfüll- und Verpackungsanlagen“ und strebt die Habilitation an.

Adresse: Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik, Weihenstephaner Steig 22, D-85350 Freising, Tel. +49 81 61/71-43 77, E-Mail: Tobias.Voigt@wzw.tum.de

Dipl.-Ing. *Stefan Flad* (geboren 1982) erlangte seine Hochschulreife im Jahre 2002 am Dom-Gymnasium Freising. Danach studierte er von Oktober 2003 bis November 2008 an der Technischen Universität München Mechatronik und Informationstechnologie mit dem Abschluss Diplom-Ingenieur Universität. Seit Januar 2009 ist er am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik in Weihenstephan angestellt und arbeitet dort als Doktorand im Bereich Diagnose von verketteten Abfüll- und Verpackungsanlagen.

Adresse: Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik, Weihenstephaner Steig 22, D-85350 Freising, Tel. +49 81 61/71-43 76, E-Mail: Stefan.Flad@wzw.tum.de

Axel Kather (geboren 1978) studierte Brauwesen und Getränketechnologie an der Technischen Universität München / Weihenstephan. Im Juni 2003 beendete er das Studium als Diplom-Ingenieur und begann seine Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik. Er absolvierte nebenher an der FernUniversität Hagen den Zusatzstudiengang Praktische Informatik und schloss im September 2007 den Studiengang Computer Science mit einem Mastertitel (M. Comp. Sc.) ab. Er beschäftigte sich am Lehrstuhl mit der Betriebsdatenerfassung und der automatischen Wissensverarbeitung von Daten aus Abfüllanlagen mit Mitteln der künstlichen Intelligenz und wird in Kürze promovieren. Seit April 2008 ist er als Industry Technical Consultant bei Rockwell Automation Deutschland tätig.

Adresse: Industry Technical Consultant, Rockwell Automation GmbH, Tel. +49 8161 4 96 57 42, E-Mail: akather@ra.rockwell.com

Prof. Dr. rer. nat. *Horst-Christian Langowski* (geboren 1954) war bis zu seiner Berufung an die TU München am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (Fraunhofer IVV) als Abteilungsleiter für Materialentwicklung beschäftigt. Seit Anfang 2004 leitete er dieses Institut kommissarisch in Nebentätigkeit. Im September 2007 wurde er von der Fraunhofer-Gesellschaft zum Institutsleiter berufen. Der Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik kooperiert personell und fachlich sehr eng mit dem Fraunhofer IVV: Bei Packstoffen, Packmitteln und verpackten Produkten mit den Abteilungen Materialentwicklung, Lebensmitteltechnologie und Produktsicherheit und Analytik im Hauptinstitut in Freising, beim maschinellen Abfüllen / Abpacken mit dem Fraunhofer-Anwendungszentrum für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (Fraunhofer AVV) in Dresden.

Adresse: Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik, Weihenstephaner Steig 22, D-85350 Freising, Tel. +49 81 61/71-31 26, E-mail: langowski@wzw.tum.de

Prof.Dr. habil. *Peter Struss* (geboren 1949) ist Professor an der Technischen Universität München und leitet die Arbeitsgruppe Modellbasierte Systeme und Qualitative Modellierung am Lehrstuhl für Bildverstehen und wissensbasierte Systeme. Er erhielt sein Diplom in Mathematik an der Universität Göttingen, promovierte an der Universität Kaiserslautern in Informatik und habilitierte an der TUM in der Theorie der auf multiplen Modellen basierenden Diagnose.

Adresse: Technische Universität München, Computer Science Department, Chair IX, Prof. Dr. Bernd Radig, Boltzmann Str. 3, D-85748 Garching, Tel. +49 89 289-17776, E-Mail: struss@in.tum.de