

Mit Agenten der Frische auf der Spur



So sieht der intelligente Container im Prototyp aus.

Ein spannendes und praktisches Projekt zum automatischen Monitoring der Warenqualität von Lebensmitteln läuft derzeit an der Uni Bremen. Es wendet RFID-Technologie und Sensoren an und setzt auf sich selbst entlang der Kühlkette weitergebende Software.

R. Jedermann, C. Behrens, W. Lang

Informationen über den Fortschritt von Reifeprozessen werden zu einem immer wichtigeren Element in der logistischen Kette beim Transport von Lebensmitteln. Die EU-Verordnung zur Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln schließt bei genauerem Lesen eine ständige Überwachung der Warenqualität mit ein. Der Aufwand, der vom Spediteur betrieben werden muss, um die EU-Anforderungen zur Qualitätsüberwachung zu erfüllen, zahlt sich für ihn aber erst aus, wenn die Informationen zur Warenqualität in Echtzeit in das Warenfluss-Controlling eingehen können. Durch die Einbeziehung der aktuellen Qualität der Ware in vorausseilende Informationsströme kann der Empfänger seine Kapazitäten genauer planen und frühzeitig reagieren, wenn sich eine Ansammlung von Waren mit kritischem Haltbarkeitsdatum abzeichnet. Herkömmliche Datenaufzeichnungsgeräte und -logger, die erst am Ende des Transportes ausgelesen werden, können dies nicht leisten.

Elemente einer intelligenten Transportmittelüberwachung

Seit 2004 arbeiten 40 Wissenschaftler der Universität Bremen an einem neuen Sonderforschungsbereich zur Selbststeuerung logistischer Prozesse, der Col-

laborative Research Area Autonomous Cooperating Logistic Processes. Neben anderen Gruppen zur Routenoptimierung und theoretischen Arbeiten zur Selbststeuerung entwickelt das Microsystems Center Bremen (MCB) ein autonomes System zur sensorischen Überwachung von Transportmitteln. Kern des Systems ist ein Bordrechner, der als embedded system in das Transportmittel integriert wird. Er bietet eine Plattform für verschiedene Technologien, durch deren Kombination ein permanenter Zugriff auf Daten zur Warenqualität ermöglicht wird. In diesem Artikel stellen wir das grundlegende Konzept vor und gehe insbesondere auf die Verarbeitung der Daten zur Warenbelastung ein.

Erweiterte Sensorik

Derzeitige Überwachungseinrichtungen beschränken sich oft nur auf Messung der Temperatur. Die Geschwindigkeit von Reife- und Verderbeprozessen ist aber von weiteren Umgebungsparametern wie Feuchtigkeit und der atmosphärische Zusammensetzung abhängig, für Fruchttransporte ist insbesondere die Messung der Ethylenkonzentration von besonderer Bedeutung. Im Rahmen des CLEAN-AIR Projektes wurde ein miniaturisierter Gas Chromatograph

zum Nachweis geringster Mengen von flüchtigen organischen Gasen entwickelt. Zur Anpassung der Systemkomponenten an die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Ethylen wird derzeit ein zusätzliches Projekt vorbereitet. Ziel ist es, die Kosten für hochauflösende Ethylenmessungen soweit zu reduzieren, dass ein fester Einbau in Transportmitteln wirtschaftlich sinnvoll ist. Barcode-Etiketten zur Produktverfolgung werden derzeit zunehmend durch RFID-Label ersetzt. Es gibt erste Ansätze, Etiketten zur Warenidentifikation mit einfacher Sensorik auszustatten, wie beispielsweise Zeit-Temperatur-Integratoren. Von der Firma KSW wurde ein Datenlogger mit RFID-Schnittstelle entwickelt. Sie können als zusätzliche Informationsquelle und Referenz bei Verdacht auf Manipulation dienen. Diese Systeme haben aber den prinzipiellen Nachteil, dass sie keine Daten für eine Fernüberwachung bereitstellen können. Um einen permanenten Zugriff zu ermöglichen, müssen die Sensoren über eine aktive Funkkommunikation ansprechbar sein. Passive RFIDs haben in einem bepackten Transportmittel nur sehr begrenzte Reichweiten. Aus wirtschaftlichen Gründen wird es nicht möglich sein, einzelne Collies mit sämtlichen benötigten Sensoren auszustat-

ten. In unserem System ist je Collo nur ein kostengünstiger RFID-Tag notwendig, um das vom Bordrechner verwaltete Sensornetz zu konfigurieren.

Fernüberwachung und waren-vorausseilende Informationsströme

Das System ist nicht auf eine Fernüberwachung beschränkt, es versendet auch aktiv Nachrichten. Neben fixen Informationen wie Menge und Chargennummer erhält der Abnehmer vor dem Eintreffen der Ware bereits Informationen über einen möglichen Qualitätsverlust, um seine Kapazitätsplanung entsprechend auszurichten. Unter Autonomie des Transportmittels verstehen wir zunächst, dass das Transportmittel sich auch ohne menschliches Zutun an verschiedene Güter anpasst. Auch bei abgerissener Funkverbindung verrichtet es seinen Dienst. Eine manuelle Auswertung der Daten ist wegen ihrer großen Menge nicht möglich, das System leitet daher nicht Sensorwerte weiter, sondern führt bereits eine Beurteilung des Einflusses auf die Warenqualität

durch. Mit zunehmendem Grad der Autonomie wird das System in Zusammenarbeit mit der Transportplanung selbstständig Entscheidungen treffen wie bei Warengefährdungen vorzugehen ist und Vorschläge erstellen wie ein eventueller Schaden minimiert werden kann.

Parameter des Qualitätsverlaufs

Um mögliche Transportrisiken zu erkennen, muss das System laufend Informationen über den Warencustand ermitteln. Neben der aktuellen Qualität sind insbesondere eine Vorhersage des Warencustandes zum geplanten Entladezeitpunkt und eine Abschätzung der Zeitspanne, die maximal noch für den Transport zur Verfügung steht, von Bedeutung. Agrarprodukte stellen dabei eine besondere Herausforderung für die Sensorik und für die Modellierung dar. Biochemische Prozesse sind mit der Ernte nicht abgeschlossen. Ein Teil des Reifungsvorganges findet erst während des Transportes statt. An der Universität Wageningen in den Niederlanden finden derzeit zahlreiche Untersuchungen zur

messtechnischen Erfassung der Warenqualität statt. Dabei muss zwischen direkten Indikatoren, wie beispielsweise der Farbe, und Einflussgrößen, wie der Temperatur, die auf die Qualität wirken, unterschieden werden. Die direkten Indikatoren lassen sich in der Regel nur vor dem Verpacken messen. Während des Transportes können nur Qualitätsänderungen aufgrund der gemessenen Umwelteinflüsse vorhergesagt werden. Der zeitliche Verlauf dieses Qualitätsindex zeigt ausgehend vom Erntezustand zunächst einen geringen Abfall, dann einen deutlichen Verlust je Zeiteinheit, bis er sich schließlich auf einen niedrigen Wert einpegelt. Das logistische Zeitfenster ist die Zeitspanne innerhalb der der Transportvorgang abgeschlossen sein muss, damit der Qualitätsindex die Akzeptanzgrenze des Warenempfängers nicht unterschreitet.

Zustandsgrößen eines warenbegleitenden Modells

Eine durchgehende Überwachung muss auch bei einem Wechsel des Transport-

Anzeige



Der Sensorknoten soll helfen, den Frischestatus verderblicher Waren zu verfolgen.

mittels gewährleistet sein. Das Qualitätsmodell wird beim Umladen an das nächste Fahrzeug übergeben. Neben der mathematischen Beschreibung des warespezifischen Verlaufes muss der aktuelle Zustand übergeben werden. Der zeitliche Verlauf des Qualitätsindex kann durch einen Satz von Differentialgleichungen beschrieben werden, solche Modelle existieren beispielsweise für Pilze und Tomaten. Man benötigt bestimmte Zustandsgrößen und Parameter, um aus den gemessenen Umwelteinflüssen und aus dem sortentypischen Verlauf Vorhersagen des Qualitätsindex zu berechnen. Die mathematische Beschreibung vereinfacht sich erheblich, wenn in einem vereinfachten Näherungsmodell anstelle eines direkten Qualitätsindex die verbleibende Länge des logistischen Zeitfensters als Zustandsgröße gespeichert wird. Diese so genannten Keeping Quality oder Shelf Life Modelle berechnen den Verlust an Resthaltbarkeit je Zeiteinheit gemäß dem Gesetz von Arrhenius für die Temperaturabhängigkeit von chemischen Reaktionen. Dabei werden in unseren Prototypen verschiedene Anfangszustände durch unterschiedliche Parametersätze abgebildet.

Selbstkonfiguration des Überwachungssystems

Das Überwachungssystem des Transportmittels passt sich an die individuellen Eigenschaften der geladenen Waren an. Die für diese Selbstkonfiguration benötigten Informationen lassen sich in drei Blöcke ordnen. Die Messanforderung legt fest, welche Größen in welcher

Genauigkeit und mit welcher Häufigkeit gemessen werden. Dabei ist ein Kompromiss zu finden bezüglich der zeitlichen Auflösung, da häufige Messungen die Batterien der drahtlosen Sensoren zu sehr belasten. Die Messanforderung wird durch eine Parametertabelle dargestellt. In der Nähe kritischer Werte wird die Messhäufigkeit erhöht. Jeder Warentyp erfordert eine eigene spezifische Bewertungsfunktion, die festlegt, wie die Reife- und Verderbedynamik anhand sensorischer Werte zu beurteilen ist. Die Bewertungsfunktion ermittelt den aktuellen Qualitätsindex und die Beschleunigung des Alterungsprozesses durch Abweichung der Umweltbedingungen. Diese beiden Werte werden mit eingestellten Warnschwellen verglichen. Die Darstellung erfolgt entweder durch mathematische Funktionen oder durch Näherungskurven. Im dritten Informationsblock legt der Wareneigentümer fest, welche Reaktionen bei Störungen erfolgen sollen. Diese können von einer Nachricht an eine festgelegte Adresse bis hin zur Änderung der Transportroute reichen. Die Reaktionsschemata werden in einen Planungsagenten zusammengefasst. Der Planungsagent entscheidet ebenfalls welche Informationen vorab an den Warenempfänger versandt werden.

Transport der Informationen

Ein vollständig selbststeuerndes System würde alle benötigten Informationen durch Anfragen an Datenbanken und Wissensbasen in einem globalen Netzwerk ermitteln. Zur praktischen Anwendung in der Lebensmittellogistik

ist es jedoch einfacher, wenn vom Hersteller den Waren eine Transport- oder Überwachungsanweisung fest zugeordnet wird. Im Idealfall werden alle Informationen durch einen RFID-Chip mit hoher Speicherkapazität zusammen mit der Ware transportiert. Während der Beladung werden die Daten in den Bordrechner übertragen und Änderungen beim Entladen zurückgeschrieben. Beim Aufbau unseres Demonstrationssystems hat sich die technische Umsetzung jedoch als sehr schwierig herausgestellt. Die wesentlichen Teile der Überwachungsanweisung sollten daher als produktbegleitender Informationsstrom über ein breitbandiges Netz mit hoher Übertragungssicherheit weitergeleitet werden. Hierzu stehen Mobilfunk, Satellitenkommunikation und, wie in unserem Demonstrator, ein WLAN-Netz des Umschlagplatzes zur Verfügung. Auf dem RFID-Tag werden neben der festen Identifikationsnummer nur Informationen zur Warenart gespeichert. Damit der Empfänger unabhängig von einem globalen Netz die Warenqualität beurteilen kann, werden zusätzlich noch der Qualitätsindex und ein komprimiertes Sensorprotokoll abgelegt. Letzteres ist im einfachsten Falle eine Liste mit Zeitpunkten der Überschreitungen von Grenzwerten.

Einsatz von dynamischem Code

Die Übertragung und Verarbeitung der Messanforderung als Parametertabelle ist unkritisch. Für die Bewertungsfunktion und den Planungsagenten muss jedoch eine Form gefunden werden, die einerseits zur drahtlosen Übertragung aber insbesondere auch zur Verarbeitung auf Systemen mit eingeschränkter Rechenleistung geeignet ist. Software-Applets werden im Internet bereits millionenfach eingesetzt. Sie werden von einem Server auf einen lokalen Rechner übertragen und dort als Hilfsprogramm ausgeführt, beispielsweise um ein Formular zu öffnen. Durch ihr plattformunabhängiges Format bietet die Sprache Java ideale Voraussetzungen hierzu. Bewertungsfunktionen und Reaktionsschemata lassen sich gut in der Form von dynamischem Java-Code programmieren.

ren. Mobile Softwareagenten sind eine Weiterentwicklung des Konzeptes des dynamischen Codes. Sie sind kleine Programme, die ihre Umgebung beobachten und autonom Entscheidungen treffen. Der Anwender kann Agenten aussenden, um auf einem entfernten Rechner oder embedded system Sensoren abzufragen und Überwachungsaufgaben wahrzunehmen. Mit einfachen Befehlen kann ein Agent Nachrichten an einen anderen versenden, egal ob sich dieser auf demselben Rechner oder einem entfernten System mit anderer Architektur und Systemleistung befindet. Die Agenten lassen sich remote starten und steuern, sie können sich sogar selbst im Netzwerk verschicken. Solche Kommunikationsmechanismen können die gesamte Lieferkette für Lebensmittel abdecken. Dabei werden leistungsfähigen PCs oder Server mit den mobilen Einheiten der Transportmittel verknüpft. Ein Frachtagent begleitet die Ware auf ihrem Weg. Er wird parallel zum physikalischen Objekt durch das Informationsnetzwerk transportiert. Diese Migration wird in unserem Beispiel durch einen RFID-Reader veranlasst. Sobald die Ware in ein anderes Transportmittel verladen wird, wird über einen »Gelbe-Seiten-Service« erfragt wo sich der zugehörige Agent derzeit befindet und ein »move«-Befehl versandt.

Technische Umsetzung

Wie wird ein derartiges System zur Warenüberwachung nun umgesetzt? Ein an der Tür des Transportmittels oder der Laderampe angebrachter RFID-Reader erfasst die Identifikationsnummer und die Warenart. Anhand der eindeutigen Identifikationsnummer wird der entsprechende Bewertungsagent angefordert, konfiguriert und auf der Agentenplattform

gestartet. Die benötigten Zustandsgrößen werden gemeinsam mit dem Bewertungsagenten übertragen. Der Bewertungsagent überwacht durch Zugriff auf ein Sensorsystem den Qualitätszustand der Ware. Wenn eine Gefährdung festgestellt wird, sendet er eine Nachricht an den zugehörigen Planungsagenten. Dieser kann sich ebenfalls im Transportmittel aber auch auf einem zentralen Rechner der Transportplanung befinden. Im letzteren Fall erfolgt die Kommunikation über ein externes drahtloses Netz, beispielsweise WLAN. Der Planungsagent veranlasst notwendige Reaktionen um einen möglichen Schaden abzuwenden. Die Funktionsfähigkeit eines solchen Systems konnte an einem ersten Prototypen demonstriert werden. Als Bordrechner wurde ein Intel XScale ARM Prozessor mit einer Taktfrequenz von 400 MHz gewählt, der inklusive 32 MByte Speicher etwa die Größe einer Scheckkarte hat. Es stehen derzeit zwei Softwarevarianten zur Verfügung. Die erste konfiguriert eine Überwachung von Temperatur und Feuchtigkeit anhand von auf RFID-Tags gespeicherten Daten. Beim Entladen wird eine eventuelle Zustandsänderung der Ware auf den Tag zurück übertragen. Über einen Webbrowser ist der Qualitätszustand aller geladenen Waren abrufbar. Anstelle der Berechnung des Qualitätsindex werden hier jedoch zunächst nur kritische und absolute Grenzwerte überwacht. Die zweite Variante demonstriert die autonome Überwachung mittels Softwareagenten. Ein Planungsagent ist jedoch aus Performancegründen nicht innerhalb des Transportmittels realisiert. Meldungen bei Warenegefährdungen werden stattdessen über eine graphische Schnittstelle an den Benutzer ausgegeben. Beim Verladen des Transportgutes wird der Bewertungsagent auf das Transportmittel übertragen. Als Bewertungsagent

Für Literatur und weitere Informationen wenden Sie sich an

Dipl. Ing. Reiner Jedermann
Universität Bremen, FB1, MCB
rjedermann@imsas.uni-bremen.de
Tel 0421/218-4908

Im Internet ist das Projekt zu finden unter
www.intelligentcontainer.eu

gent wurden zunächst nur Keeping Quality / Shelf Life Modelle realisiert. Dabei wählt der Benutzer von Hand zwischen verschiedenen Anfangs- oder Erntezuständen. Sobald genauere warenspezifische Modelle vorliegen, werden diese in das System integriert. Die autonome Transportüberwachung lässt sich mit einem Agentensystem zur Transportkoordination kombinieren, das unserem Partnerinstitut TZI (Center for Computing Technologies, Universität Bremen) entwickelt wurde. Die den Frachtstücken zugeordneten Planungsagenten werden auf einer externen Rechnerplattform ausgeführt. Sie reagieren auf Verkehrsstörungen und Qualitätsänderungen und erstellen Vorschläge um durch eine geänderte Transport- oder Routenplanung auf erkannte Risiken zu reagieren. Um einen wartungsfreien Betrieb der Sensorknoten über Monate hinweg zu ermöglichen, werden derzeit durch ein weiteres Institut der Universität Bremen, dem ITEM (Institute for Electromagnetic Theory and Microelectronics), Bausteine für einen neuen energieoptimierten drahtlosen Kommunikationsstandard erprobt. In Zusammenarbeit mit Rungis Express, einer Tochter der Cool Chain Group Holding AG werden derzeit Temperaturprofile von Kühlfahrzeugen vermessen. Erste Praxistests des Gesamtsystems sind für 2007 geplant. ◀