

Realisierung lokaler Selbststeuerung in Echtzeit *Der Übergang zum intelligenten Container*

Reiner Jedermann¹, Jan D. Gehrke², Martin Lorenz², Otthein Herzog², Walter Lang¹

¹ IMSAS Institute for Microsensors, -Actuators and -Systems, Universität Bremen

² TZI - Center for Computing Technologies, Universität Bremen

Keywords: *Selbststeuerung, Multiagentensysteme, dynamische Qualitätsmodelle, embedded Systems*

Abstract: *Die zentrale und globale Planung logistischer Prozesse stößt aufgrund zunehmender Komplexität logistischer Systeme und steigender Anforderungen an deren Flexibilität an ihre Grenzen. Durch den Paradigmenwechsel zur Selbststeuerung hin wird das Ziel verfolgt, logistische Prozesse durch interagierende autonome Systeme lokal zu koordinieren. Dies beinhaltet die Abkehr von zentraler Planung hin zu einer lokalen Entscheidungsfindung, die in unserem Fall durch ein verteiltes System interagierender Softwareagenten realisiert wird. Dies ermöglicht es, Optimierungspotentiale flexibler zu nutzen und auf mögliche Risiken in Echtzeit zu reagieren. Die lokale Planung berücksichtigt dabei unter anderem Änderungen der Auftrags- und Verkehrslage, aber auch den Verlauf von Umweltparametern, die einen Einfluss auf die Warenqualität haben. Der von uns vorgestellte „intelligente Container“ bietet eine Infrastruktur für selbststeuernde Transportprozesse und bewertet sensorische Informationen über den Warenzustand anhand eines dynamischen Qualitätsmodells. Ein erweiterter elektronischer Frachtbrief wird dazu für eine warenspezifische Überwachung konfiguriert. Der „intelligente Container“ wurde als Prototyp aufgebaut und in ein Demonstrationsszenario zur dynamischen Transportplanung integriert.*

Keywords: *autonomous control, multi agent systems, dynamic quality modelling, embedded systems*

Abstract: *The growing complexity of logistical systems and the increasing demand for flexibility cannot be handled adequately by centralised planning. The paradigm of autonomous control was introduced to manage logistic systems by interacting with local systems. This approach shifts the focus from centralised control instances to localised decision making. Our solution utilises a distributed system of interacting software agents to enable flexible exploitation of optimisation opportunities. Reactions to emerging risks can be planned in real-time. Local planning is based on information about alterations to market and traffic situation as well as internal environmental parameters. A perception process assesses the impact of deviations from the optimal transport conditions to freight quality by an individual dynamic quality model. The user configures an extended electronic consignment note according to the special requirements of the goods. Our prototype of the intelligent container provides the sensor platform and an infrastructure for the required processes as part of a dynamic transport planning system.*

1 Einleitung

Die zunehmende Nachfrage nach individuell zugeschnittenen Produkten und Dienstleistungen hat einen grundlegenden Wandel der ökonomischen Landschaft zur Folge: Märkte, die hauptsächlich von Anbietern gesteuert wurden, entwickeln sich zu Märkten, die verstärkt durch die Nachfrage der Kunden bestimmt sind. Darüber hinaus ist ein steigendes Transportvolumen und die Tendenz zum Stückguttransport in Verbindung mit neuen Anforderungen an Qualität und Umfang logistischer Dienstleistungen zu beobachten.

Um die daraus resultierenden Anforderungen für die Logistik zu erfüllen, untersuchen Forschung und Firmen Lösungen zur Restrukturierung der betroffenen Geschäftsprozesse, die mehr dezentrale Autonomie in der Prozessabwicklung erlauben. Ein Paradigmenwechsel zu einer technischen Selbststeuerung der logistischen Prozesse wird als Voraussetzung für die Bewältigung der zukünftigen Anforderungen bezüglich Flexibilität und Schnelligkeit angesehen [Freit04].

Gleichzeitig zeichnet sich in der Praxis der Trend ab, dass immer mehr Informationen zur Ware in Echtzeit zur Verfügung stehen. Durch Fernüberwachungs- und Telemetrie-

systeme kann der Ort der Ware und Umgebungseinflüsse wie u. a. die Temperatur jederzeit abgefragt werden.

Seit einigen Jahren wird beispielsweise von Langnese-Iglo ein System von Danzas Solutions eingesetzt [Peil02, Seite 246]. Beim Öffnen der Tür an einem unzulässigen Ort und bei Temperaturüberschreitungen wird eine Nachricht über ein GSM-Funkmodul gesendet. IBM und Maersk haben für 2006 ein System angekündigt, das als Modul, vergleichbar zu einem aktiven RFID-Tag, in die Tür des Containers montiert wird. Neben der Temperatur werden die Höhe über Normalnull, Licht und Bewegung übertragen¹. Kühlcontainer auf Seetransporten werden schon vielfach per Power-Cable-Transmission [Wild05, Kapitel 7.2.9.3] überwacht. Derartige Fernüberwachungssysteme, die einen permanenten Zugriff auf sensorische Daten ermöglichen, werden im Folgenden unter dem Begriff „kommunikative Container“ zusammengefasst.

In dieser Arbeit untersuchen wir, wie diese Vielzahl an Informationen in automatisierte Entscheidungsprozesse zur Optimierung der Transportplanung eingebunden werden kann. Die begrenzten Bandbreiten und hohen Kosten der zur Übertragung der sensorischen Informationen benötigten mobilen Kommunikationsverbindungen erfordern es jedoch, Entscheidungsprozesse an den Ort der Datenentstehung zu verlagern.

Anhand der ersten Ergebnisse aus unserem Testaufbau stellen wir vor, wie ein solches selbststeuerndes System durch einen „intelligenten Container“ realisiert werden kann.

Bild 1 zeigt einen Prototyp eines derartigen Systems, das eine selbstkonfigurierende Sensorplattform zur Warenüberwachung, RFID-basiertes Monitoring des Wareneingangs und -ausgangs sowie Softwareplattformen für die Containerüberwachung bzw. die Ausführung der Entscheidungssysteme für das Fahrzeug und die jeweilige Ware einschließt. Der zusätzliche technische Aufwand im Vergleich zu einem „kommunikativen Container“ kann dabei gering gehalten werden, da es möglich ist, die notwendigen lokalen Prozesse innerhalb eines scheckkartengroßen Prozessormoduls auszuführen.



Abb. 1: Prototyp des „Intelligenten Containers“ im Maßstab 1:8. Auf der linken Seite befindet sich der RFID-Reader, in der Mitte zwei Sensorknoten. Ein Scheckkarten großes Prozessormodul an der rechten oberen Rückwand übernimmt die lokale Überwachung. Die Übertragung der warenspezifischen Informationen und der Versand von Warnmeldungen bei drohendem Qualitätsverlust geschehen über das externe Kommunikationsmodul an der rechten Seitenwand.

Auf der Seite der Softwareentwicklung stellt die Umsetzung der angestrebten autonomen Entscheidungsfindung eine besondere Herausforderung dar, da sie in einer dynamischen, transorganisationalen Umgebung unter Zusammenwirkung potentiell sehr vieler heterogener Systeme stattfindet, die in der Lage sein müssen, miteinander zu kooperieren oder sich in einer Konkurrenzsituation zu behaupten.

1 Pressemitteilung von IBM, siehe RFID-Journal, <http://www.rfidjournal.com/article/articleprint/1884/-1/1>

Um die an Entscheidungen beteiligten Prozesse abzubilden, bedienen wir uns des Konzepts der Softwareagenten in einem Multiagentensystem [WoJen95]. Bei der Versorgung des Agentensystems mit Umgebungsinformationen wird zwischen einer Wahrnehmung der Innen- und der Außenwelt des Containers unterschieden. Die Bewertung dieser Informationen wird an jeweils spezialisierte Agenten delegiert. Die Markt- und Verkehrslage wird als Außenwelt durch eine Wissensmanagement-Infrastruktur verwaltet. Um die Innenwelt zu erfassen, werden die auf die Ware einwirkenden Umweltbedingungen durch zahlreiche Sensoren erfasst.

Warenspezifische Agenten zur Warenüberwachung werden quasi parallel zur Fracht entlang der Transportkette mitgeführt. Dieser – von uns so genannte – ‚intelligente Frachtbrief‘ enthält neben Informationen zu Warenart und -ziel die individuellen Transportanweisungen. Er wird aktiv, sobald er in ein neues Transportmittel übertragen wird, und übernimmt die Überwachung der von ihm repräsentierten Ware.

Der Artikel ist weiterhin folgendermaßen gegliedert: Abschnitt 2 gibt einen Überblick über das Systemkonzept. Im darauf folgenden Abschnitt wird die lokale Entscheidungsfindung auf Basis von Umweltinformationen detaillierter vorgestellt (Abschnitt 3). Abschnitt 4 behandelt die technische Umsetzung des Systems. Abschnitt 5 beschreibt ein Anwendungsszenario in einem Demonstrationsaufbau. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick (Abschnitt 6).

2 Systemkonzept

Die aus Sicht der Logistik benötigte Steuerung wird im Paradigma der Selbststeuerung von einem zentralen Disponenten zumindest zum Teil an die logistischen Einheiten selbst delegiert. Die daraus resultierenden Anforderungen an die Entscheidungsfindung vor Ort sind dabei an ein Softwaresystem zu stellen, das Aufgaben von der aktiven Überwachung von Ladung, Kommunikation von Warnhinweisen bis zur vollkommenen Autonomie der Logistiksteuerung übernimmt.

In dem von uns entwickelten System werden Softwareagenten als lokale Entscheidungsträger eingesetzt und dabei von einer Infrastruktur aus Sensoren, Kommunikationsmitteln und Rechenkapazität unterstützt. Die hier gezeigte Implementierung setzt eine solche agentenbasierte Infrastruktur in einem Container ein, wodurch der prognostizierte intelligente Container entsteht.

2.1 Agenten als Entscheidungsträger

Softwareagenten und Multiagentensysteme sind ein führender Ansatz zur Implementierung autonomer und interagierender Softwaresysteme [Demb05]. Ein Agent stellt dabei einen computerimplementierten autonomen Entscheidungsträger dar, der in einer gegebenen Umgebung in der Regel mit Fähigkeiten zur Wahrnehmung seiner Umwelt, zur Wahl seiner Handlungen sowie zur Kommunikation mit anderen Agenten ausgestattet ist. Das Ziel ist es, potentiell komplexe Problemstellungen und Aufgaben, wie die Durchführung eines Transportprozesses, auf mehrere Agenten zu verteilen. Die Problemlösung „entsteht“ bei diesem Ansatz gewissermaßen durch die Kooperation und/oder Konkurrenz der Softwareagenten, die (meist nach individuell rationalen Kriterien) lokal (optimal) handeln [WeiDi04].

Die einfachste Form eines Agenten ist der *reaktive* Agent. Dieser führt zu einer gegebenen (sensorischen) Wahrnehmung stets die gleiche Aktion aus. Eine Minimalanforderung an einen *intelligenten* Agenten ist, dass dieser einen internen („mental“) Zustand besitzt und Entscheidungen abhängig von diesem Zustand trifft [RusNor03]. Der interne Zustand beschreibt das allgemeine und situative Wissen des Agenten und ggf. aktuelle Ziele und Handlungspläne. Ferner sollte der intelligente Agent in der Lage sein, logische Schlussfolgerungen aus vorhandenem Wissen zu ziehen.

In der Transportlogistik können Agenten als Repräsentanten unterschiedlicher logistischer Objekte wie z. B. Transportmittel, Ladungsträger, Ladungsgut, Umschlagplatz oder

Lagerhaus eingesetzt werden. Es können ebenso Parteien wie Auftraggeber und Auftragnehmer oder logistische Dienste wie Routenplanung, Auftragsvermittlung und Warenüberwachung durch Agenten verrichtet werden, die wiederum mit den Agenten der logistischen Objekte kommunizieren.

Der Aufbau von Agentensystemen und die Interaktion der Agenten wurde durch die *Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA)*, jetzt eine Teilorganisation der IEEE, standardisiert. Die FIPA-Standards [FIPA02] umfassen u. a. die Basisarchitektur von Agentensystemen, Aufbau und Semantik zwischen Agenten versendeter Nachrichten (*Agent Communication Language, ACL*) und Protokolle für Abläufe bestimmter Agenteninteraktionen basierend auf der Sprechaktheorie [Aus62, Sea69].

Die wichtigsten Elemente einer ACL-Nachricht sind neben Sender, Empfänger und dem eigentlichen Inhalt eine Interpretationsvorschrift für den Inhalt sowie Angaben zum Sprechakt und dessen Gesprächskontext. Die Interpretation des Inhalts ist definiert durch die Zeichenkodierung, die verwendete (formale) Sprache und eine Ontologie, die dem Inhalt eine eindeutige Semantik zuweist. Der Sprechakttyp wird durch ein so genanntes Performativ klassifiziert. Dieses beschreibt z. B., ob es sich um eine Frage, eine Information, einen Vorschlag, eine Aufforderung oder deren Bestätigung handelt. Der Gesprächskontext ist definiert durch eine zu Beginn vergebene Konversations-ID und das Interaktionsprotokoll (FIPA-IP), dem die Konversation folgt. Interaktionsprotokolle definieren im wesentlichen eine logische Abfolge der Performative der Nachrichten zwischen den beteiligten Agenten und vereinfachen so die Erkennung von Fehlern in der Kommunikation und die Implementierung der Informationsverarbeitung im Agenten. Die FIPA definiert z. B. FIPA-IPs für soziale Entscheidungsmechanismen wie Auktionen, für die Einholung und Verhandlung von Angeboten, für die koordinierte Ausführung von Aktionen sowie die Registrierung für Informationsdienste. Eine begonnene Konversation kann sich dabei an einen oder mehrere Agenten richten [FIPA02].

2.2 Intelligente Infrastrukturen

Selbststeuerung hat zum Ziel, die Robustheit des Systems zu erhöhen, indem Entscheidungsprozesse zum logistischen Objekt hin verlagert werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob die technische Infrastruktur des Entscheidungssystems durch das logistische Objekt selbst oder durch den Ort, an dem sich das Objekt aufhält, bereitgestellt wird.

Der erste Fall setzt voraus, dass die logistischen Objekte wie Kisten und Paletten mit einer eigenen Prozessorplattform und Sensorik ausgestattet werden. Diese Form des „intelligenten Paketes“ lässt sich aufgrund des enormen Kostendrucks in der Logistik derzeit noch nicht realisieren. Problematisch ist insbesondere, dass Transportverpackungen in der Regel nicht zum Absender zurückkehren und eine teure Sensor- oder Prozessorausstattung somit verloren wäre. Auf der Ebene der Versandeinheiten (Collie) werden in der Praxis lediglich die Kosten eines passiven RFID-Tags akzeptiert.

Wir favorisieren daher einen pragmatischen Ansatz, der die Kosten in einmalige Investitionen in die Infrastruktur verlagert. Der jeweilige Raum, in dem sich das Objekt aufhält, stellt eine Plattform für das vom Objekt benötigte Wahrnehmungs- und Entscheidungssystem bereit. Dabei kann es sich um Lagerhallen oder Transportmittel als mobile Räume handeln. Der Raum erkennt anhand eines RFID-Readers, wenn er von einem neuen Objekt betreten wird, fordert die dazugehörige Transport- oder Überwachungsvorschriften an und trifft Entscheidungen im Namen des Objektes.

In der Literatur finden sich seit Ende der neunziger Jahre Ansätze zu intelligenten Umgebungen unter verschiedenen Namen wie „Intelligent House“ [u. a. Less98], „Ubiquitous Computing“, „Pervasive Computing“ oder „Ambient Intelligence“ [Matt05]. Verschiedene eingebettete Systeme sollen sich möglichst unaufdringlich in eine Umgebung integrieren und die Bedürfnisse der Benutzer antizipieren, wie Mattern in seinem Buch „Das Internet der Dinge“ schreibt [Matt05]. Nach einer Lernphase kann

beispielsweise ein intelligentes Haus abschätzen, wann der Benutzer zurückkommt und die Heizung entsprechend regulieren.

Dieser Ansatz kann aufgrund des Kostendrucks nur eingeschränkt auf die Logistik übertragen werden. Weiterhin ist der Lebenszyklus eines Paketes zu kurz um Lernalgorithmen einsetzen zu können. In unserem Ansatz setzen wir daher voraus, dass das Objekt seine Transportanweisung und zumindest einen Teil der für eine intelligente Entscheidungsfindung benötigten Algorithmen mit sich führt. Das physikalische Objekt verfügt dabei über keinerlei Möglichkeiten, diese selbst zu verarbeiten, stattdessen nutzt es die intelligente Infrastruktur als Plattform, um eine Softwarerepräsentation seiner selbst auszuführen. Die Repräsentation des Objektes enthält die für die Warenart spezifischen Bewertungs- und Reaktionsschemata. Die Verknüpfung zwischen Objekt und Softwarerepräsentation ist in **Bild 2** schematisch dargestellt. Die warespezifischen Algorithmen können dabei von einem fest auf der Plattform installierten warespezifischen Teil der Transportplanung unterstützt werden.

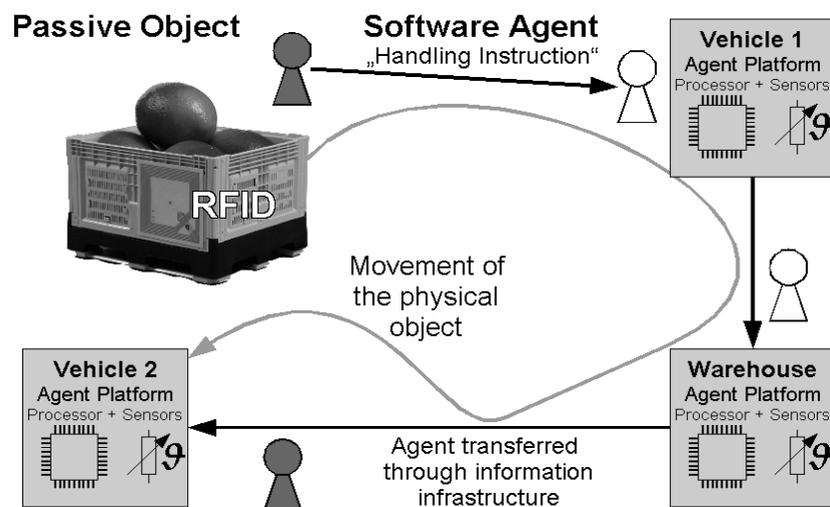


Abb. 2: Die Verknüpfung zwischen Frachtstück und Software Repräsentation: Beim Beladen eines Transportmittels wird ein an der Versandeinheit angebrachter RFID-Tag gelesen und die Übertragung des betreffenden Agenten ausgelöst. Dieser wird entlang der Transportkette quasi parallel zur Ware mitgeführt. Der Warenassistent wird auf der Plattform des jeweiligen Transportmittels ausgeführt, welche die benötigte Prozessorleistung und Sensorik bereitstellt.

2.3 Erweiterter elektronischer Frachtbrief und mobile Agenten

In Analogie zu gängigen Frachtbrief-Konzepten bezeichnen wir diese Softwarerepräsentation des logistischen Objektes als *erweiterten elektronischen* oder *intelligenten Frachtbrief*. Dieser geht jedoch über ein (elektronisches oder papierenes) Formular mit festen und veränderlichen Feldern hinaus. Der Absender konfiguriert ein auf die Warenart bezogenes Überwachungsprogramm und kann es bei Bedarf um individuelle Anweisungen ergänzen. Beispielsweise kann ein spezifischer Zusammenhang zwischen Warenbewertung und Alternativziel definiert werden. Bei der Erstellung des Frachtbriefes wird der Absender durch eine Eingabemaske unterstützt, die Hintergrundwissen über Warentypen offeriert.

Insbesondere die im Frachtbrief enthaltenen Handlungsanweisungen und Entscheidungsschemata legen die Darstellung durch einen mobilen Softwareagenten nahe. Einzelne Reaktionen auf Änderungen des Warenzustandes können als Verhaltensweise (Behaviour) des Agenten implementiert werden.

Da die Speicherkapazität von RFID-Tags in der Regel nicht ausreicht, um den Programmcode eines Softwareagenten abzulegen, werden diese, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, quasi parallel zur Ware über die Kommunikationsinfrastruktur mitgeführt. Die Mobilität der Softwareagenten ist daher eins der wesentlichen Systemelemente. Auf dem RFID-Tag werden neben der eindeutigen Identifikationsnummer nur Adressinformationen gespeichert, um den Agenten vom vorherigen Fahrzeug oder Lager anzufordern.

3 Dynamische Entscheidungsfindung vor Ort

Durch die Verlagerung der Überwachungs- und Steuerungsfunktion in eine lokale Instanz im oder am Container liegt es nahe, als nächsten Schritt zu einer Autonomie der Entscheidungsfindung zu gelangen. Dabei wird die Entscheidungskompetenz (zum Teil) von einer zentralen (dem Disponenten) an eine lokale Instanz delegiert. Eine solche Delegation bedingt, dass lokale Entscheidungen auch Parameter beachten, die bisher nur zentral verfügbar waren.

Der dadurch entstehende hohe Anspruch an eine lokale Entscheidungsfindung wird durch die softwaretechnische Implementierung eines durch Risikomanagement unterstützten Entscheidungsprozesses erfüllt. Die Entscheidungen des Containers stützen sich auf Wissen über die aktuelle Innen- und Außenwelt. Dabei wird eine Entscheidung von einer Planungskomponente vorbereitet, die mehrere alternative Pläne erstellt. Diese werden dann aufgrund von Bewertungskriterien ausgewählt, die u. a. die Zielerreichung und mögliche Risiken einrechnen. Sowohl zur Planerstellung als auch zur Bewertung ist Wissen über den aktuellen Zustand der Umwelt nötig. Die Planungskomponente gibt somit vor, welches Wissen jeweils für Entscheidungen benötigt wird. Dieses Wissen wird proaktiv durch eine Wissensmanagementkomponente akquiriert und aktualisiert.

Als Risiken werden in erster Linie Ereignisse oder Prozesse aufgefasst, die die Erreichung des Ziels eines Transportprozesses gefährden. Dies können z. B. Staus sein, die zu Verspätung führen, Kühlungsausfälle, die die Warenqualität beeinträchtigen, oder eine schlechte Straße in der geplanten Route, welche die Warenintegrität gefährdet.

Eine festgestellte Änderung der im elektronischen Frachtbrief spezifizierten Warenparameter ist der Auslöser für einen neuen Entscheidungsprozess, der in einer autonomen Routen- oder sogar Zieländerung zum Zweck der Minimierung des Risikos für die Ware mündet.

Die am Entscheidungssystem beteiligten Komponenten werden, sofern die Rechenleistung es zulässt, an den Ort des physikalischen Frachtobjektes, in den „intelligenten Container“ verlagert. Die Entscheidung über Änderungen in der Transportplanung beruht auf einer Bewertung der Innenwelt, d. h. der sensorischen Erfassung des Warenzustandes, und der Wahrnehmung von Verkehrslage und Marktsituation als Außenwelt (siehe **Bild 3**). Diese mobilen Prozesse nutzen die intelligente Infrastruktur des Containers.

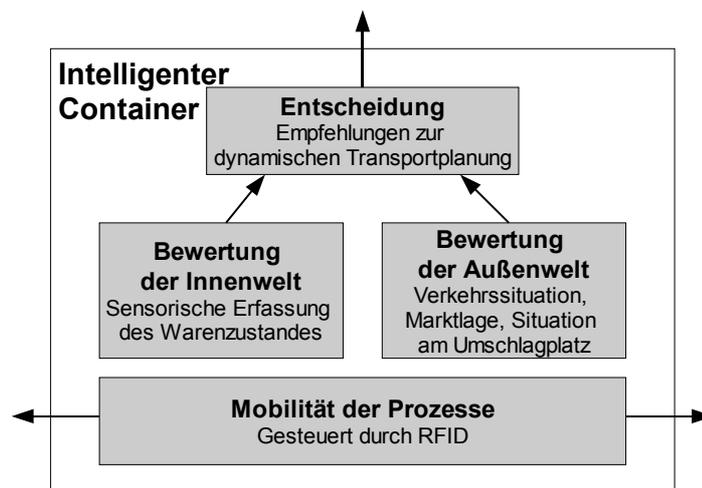


Abb. 3: Komponenten des intelligenten Containers. Entscheidungen werden aufgrund der Wahrnehmung der Innen- und der Außenwelt getroffen. Die Mobilität der Prozesse wird über an der Ware angebrachte RFID-Etiketten gesteuert.

3.1 Wahrnehmung und Selbststeuerung

Nach Bigus [Big01, Seite 235] ist Außenwahrnehmung eine wichtige Voraussetzung für Selbststeuerung. Um Entscheidungen zu treffen, muss ein System ein Bild vom Zustand seiner Umwelt haben. Neben physikalisch wahrnehmbaren sensorischen Daten kann es sich bei den Informationen auch um eine symbolische Darstellung der Verkehrs- oder Transportsituation handeln. Um seine Informationsverarbeitungskapazität auf einem ressourcenbeschränkten Rechner nicht zu überlasten, muss der Agent über intelligente Filtermechanismen verfügen.

In der Regel lassen sich die Zusammenhänge zwischen sensorischer Wahrnehmung und gewünschter Aktion nicht durch ein direktes Reaktionsschema abbilden. Die Auswirkung von abweichenden Umweltbedingung auf die Warenqualität hängt in der Regel von der Vorgeschichte des Transports ab. Der Zustand eines Bewertungsagenten beinhaltet daher das Wissen, wie sich die in der Vergangenheit beobachteten Umweltbedingungen auf die aktuelle Qualität, deren Änderungsgeschwindigkeit und Kurvenverlauf auswirken.

3.2 Wahrnehmung und Bewertung der Innenwelt

Neben der sensorischen Erfassung der Umweltbedingungen stellt die Interpretation dieser Daten die Hauptaufgabe des Wahrnehmungssystems zur Bewertung der Innenwelt dar. Aus Abweichungen von den optimalen Transportbedingungen muss auf eine Warengefährdung oder die Höhe des resultierenden Qualitätsverlustes geschlossen werden. Dabei besteht in der Regel ein nicht linearer Zusammenhang zwischen Höhe und Dauer der Abweichung und der resultierenden Qualitätsänderung. Für eine dynamische Transportplanung ist es nicht ausreichend, Waren in ‚intakt‘ oder ‚beschädigt‘ einzuteilen.

Insbesondere der Transport von sensitiven Waren erfordert ein genaues Wahrnehmungssystem. Beim Transport von Lebensmitteln kann die Komplexität der beteiligten Prozesse, wie beispielsweise von Reifungs-, Verderbe- und Auftauvorgängen nicht allein auf eine Grenzwertüberwachung reduziert werden. Ein anderes Beispiel ist der Transport von Papierrollen, die sehr empfindlich auf Feuchtigkeit und Stöße reagieren.

3.2.1 Ansätze zur dynamischen Modellierung von Qualitätsänderungen

Von diesen Beispielen stellt die Lebensmittellogistik die höchsten Ansprüche an die Qualitätsüberwachung, insbesondere der Transport von Agrarproduktion, da bei dieser Ware wesentliche Teile der Reifungsvorgänge erst nach der Ernte im „Container“ oder speziellen Reifungskammern stattfinden. Dementsprechend finden sich in diesem Bereich auch zahlreiche, sehr detaillierte Untersuchungen dynamischer Qualitätsänderungen. Im

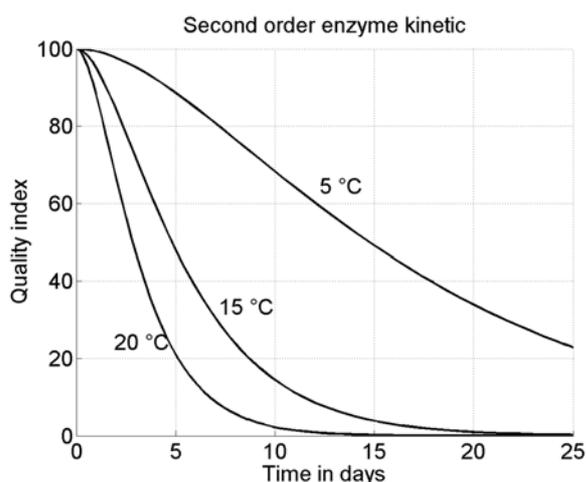


Abb. 4: Typischer Verlauf eines Qualitätsindex in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Degeneration eines Farbstoffes wird anhand der Modellierung einer enzymatischen Reaktion berechnet.

Folgenden werden Modelle aus diesem Bereich vorgestellt, die als Mustervorlage für andere Warenklassen, wie beispielsweise nicht organischer Produkte, dienen können. Die Komplexität der Modelle kann dabei entsprechend der Warenart reduziert werden.

Vom Institut Wageningen [Koot05] werden biochemische Prozesse untersucht, die dem Qualitätsverlust zugrunde liegen. In einem vereinfachten Beispiel werden Farbänderungen der Frucht durch zwei chemische Gleichungen beschrieben, deren Reaktionsgeschwindigkeit nach dem Gesetz von Arrhenius in einem exponentiellen Zusammenhang zur Temperatur steht. Aus einer inaktiven Substanz wird das Enzym „Oxidase“ generiert, das dann in

einem zweiten Schritt einen Farbstoff zersetzt. Die resultierende Farbverlust kann als Index für die verbleibende Warenqualität betrachtet werden, da diese den wesentlichen Faktor bei der Kaufentscheidung durch den Konsumenten darstellt. In **Bild 4** ist ein typischer Verlauf des Qualitätsindex in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur dargestellt.

Das Konzept der „Keeping Quality“ oder „Shelf Life“ wurde von Sprenger im Jahr 1937 [zusammengefasst in Tijs04, Seite 170] veröffentlicht. Es geht nicht auf die internen Prozesse ein, sondern beschreibt lediglich die zu erwartende Lebensspanne des Produktes in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen. Im deutschen Sprachraum beschreibt Pastors mit dem „logistischen Zeitfenster“ [Past04] ein ähnliches Konzept. Es gibt an, welche Zeitspanne verbleibt, in der die Ware den Abnehmer erreichen muss, ohne dass die Qualität unter einen Akzeptanzgrenzwert fällt.

Tijskens und Polderdijk [Tijs96] untersuchten verschiedene lineare und exponentielle verlaufende Reaktionen sowie autokatalytische Prozesse. Sie konnten zeigen, dass bei gleich bleibender Temperatur die Keeping Quality umgekehrt proportional zu einer Konstanten ist, die in einem exponentiellen Zusammenhang zur Temperatur steht (Gesetz von Arrhenius). Da diese antiproportionale Zuordnung unabhängig von der Art der beteiligten Prozesse ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Ansatz auch auf andere Produkte, die nicht aus dem Lebensmittelbereich stammen, übertragen lässt. Durch ein weitergehendes dynamisches Qualitätsmodell lässt sich die Keeping Quality anhand des dynamischen Verlaufs eines Eingangsparameters berechnen [Jed06c].

3.2.2 Mobilität der dynamischen Qualitätsmodelle

Die dynamischen Qualitätsmodelle tragen wesentlich zur Senkung des zu übertragenden Datenvolumens bei. Anstelle einer Fülle von sensorischen Rohdaten müssen nur Änderungen des berechneten Qualitätsindex weitergeleitet werden. Durch eine warennahe Realisierung dieses Bewertungssystems innerhalb des Transportmittels können die Kosten für mobile Kommunikation erheblich gesenkt werden. Die Robustheit des Systems wird erhöht, da eine durchgängige Überwachung auch bei einem Ausfall der Außenkommunikation gewährleistet ist.

Der Ansatz, die Berechnung des Qualitätsindex durch einen lokalen Prozess durchzuführen, basiert auf der im Abschnitt 2.2 vorgestellten intelligenten Infrastruktur. Bei Umladevorgängen wird das Bewertungssystem als ein Element des elektronischen Frachtbriefes „Peer to Peer“ zwischen autonom agierenden Systemen übertragen. Eine zentrale Steuerung oder Verwaltung des Bewertungssystems ist nicht erforderlich. In dieser heterarchischen Architektur stehen bei Umladevorgängen die beteiligten Transportmittel und Warenlager als gleichberechtigte Partner nebeneinander.

3.2.3 Modellierung durch biochemische Time-Temperature-Integratoren

Ein weiterer Ansatz, Qualitätsänderung entlang der Lieferkette zu überwachen, ist die Nachbildung der beteiligten Prozesse durch eine bio-chemische Reaktion mit vergleichbarer Reaktionskinetik. Von der Firma freshpoint² wurden so genannte Time-Temperature-Integratoren (TTIs) für Schweinefleisch entwickelt. Diese sind als selbstklebendes Etikett ausgeführt [Büt05]. Ein Farbstoff wird in Abhängigkeit von der Temperatur zersetzt. Durch Vergleich mit einer Farbskala kann auf die verbleibende Produktqualität geschlossen werden. Der Entwurf von TTIs für neue Produkte ist jedoch sehr aufwendig, da jeweils ein speziell angepasster Farbstoff entwickelt werden muss. Ihr Einsatzgebiet ist die manuelle Wareneingangs- und Ausgangskontrolle; aufgrund mangelnder Kommunikationsschnittstellen können sie für eine automatisierte dynamische Transportplanung nicht eingesetzt werden.

² <http://www.freshpoint-tti.com/>

3.3 Transportplanung und -abwicklung durch Agenten

Neben den im Container anfallenden Sensordaten bezieht das Gesamtsystem „intelligenter Container“ bzw. die beteiligten Softwareagenten auch Informationen von außerhalb in die Entscheidungsfindung ein. Hierzu gehört z. B. die Verkehrslage sowie der Markt freier Transportkapazitäten und zu transportierender Waren. Statt der Überwachung des Containers bzw. seiner Ladung steht bei diesen Entscheidungen die allgemeine Transportplanung und -abwicklung durch koordiniertes Handeln von Agenten im Vordergrund.

An der Entscheidungsfindung und Transportabwicklung ist eine Vielzahl von Agenten beteiligt. Diese Aufteilung ist zum einen durch verschiedene Rollen und deren entsprechende rechtliche Vertreter begründet, zum anderen entspricht es dem Konzept der Dekomposition eines Problems in Multiagentensystemen zur Steigerung der Flexibilität und Robustheit [Jen01]. Im vorgeschlagenen System existieren außerhalb des Transportcontainers folgende Agenten:

- je Ladung/Sendung ein Ladungsbetreuungsagent (LBA)
- je Fahrzeug ein Transportmittelagent (TMA)
- je Umschlagpunkt (optional) ein Agent zur Ein-/Ausgangsverwaltung
- ein (oder mehrere) Agenten zur Auftragsvermittlung
- ein (oder mehrere) Verkehrsinformationsagenten (VIA)
- ein (oder mehrere) Routenplanungsagenten (RPA)

Der LBA ist im Gegensatz zu den Systemen im Container für die Koordination des gesamten Transportprozesses aus Sicht der Ladung verantwortlich. Hierzu gehören u. a. Informationen über den Warencustand. Darüber hinaus verhandelt der LBA mit adäquaten TMAs über den Transportauftrag.

3.3.1 Koordination zwischen Ladung und Transportmittel

Bei der ersten Kontaktaufnahme von Ladung und Transportmittel kann ein Vermittleragent eine Vorfilterung für die qualifizierte Partnersuche übernehmen. Als Vermittleragenten dienen z. B. Warenumschlagknoten. Derzeit wird die Vermittlung durch einen Agenten in Form eines allgemeinen virtuellen Marktplatzes ausgeführt. Der nächste geplante Schritt umfasst die Vernetzung von mehreren Umschlagknoten zu einem dezentralen Marktplatz.

Da ein TMA bestrebt ist, die Auslastung der eigenen Kapazität zu optimieren, wird bei Vermittleragenten nach zu transportierender Fracht angefragt. Die Annahme einer Fracht durch den Container bzw. den verantwortlichen TMA hängt u. a. von den Transportkosten, dem Start- und Zielort der Fracht, deren Zeitfenster für die Lieferung sowie deren technischen Anforderungen (z. B. Kühlung oder Echtzeit-Sensorüberwachung) ab. Die Transportanfrage der Fracht wird dabei automatisch mit den Fähigkeiten des Containers abgeglichen.

Während des Transports wird regelmäßig durch den TMA und den LBA überprüft, ob die Anforderungen der Fracht eingehalten werden können. Neben dem Warencustand ist die Einhaltung des Zeitfensters zu überprüfen. Hierzu werden Verkehrsinformationen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.3.2), welche die geplante Fahrtroute betreffen. Im Falle einer Gefährdung des Warencustands erstellt der LBA einen Alternativplan, der u. U. den Wechsel des Transportmittels beinhaltet. In diesem Fall verhandelt der LBA mit dem TMA über eine Zieländerung.

3.3.2 Routenplanung

Die Planung zur Auswahl der besten, d. h. hier schnellsten Transportroute wird mit Hilfe eines Routenplanungsagenten durchgeführt. Der RPA berechnet die schnellste Route mit Wissen über das Verkehrsnetz (Verbindungen mit jeweiligen Entfernungen und erlaubten Geschwindigkeiten) unter Einbeziehung der aktuellen Verkehrslage und dem Typ des

anfragenden Transportmittels. Hierbei kommt ein zeitkostenbasierter A*-Algorithmus [RusNor03, S. 97-101] mit Luftlinienheuristik zum Einsatz.

Im Falle einer Verkehrsmeldung, die die aktuelle Route betrifft, fordert der TMA vom RPA eine aktualisierte Route an. Sollte eine Verspätung wahrscheinlich sein, wird der LBA darüber informiert. Die Routenplanung dient neben dem TMA auch dem Transportauftragvermittler. Letzterer sortiert auf Basis der Fahrtentfernungen eines Transportmittels zum Ort einer Ladung die Transportmittel aus, die den Transport nicht innerhalb des Lieferzeitfensters beginnen oder abwickeln können.

3.3.3 Wissensmanagement-Infrastruktur

Die informierte Entscheidungsfindung der Agenten benötigt eine Wissensmanagement-Infrastruktur. Das System sieht eine verteilte agentenbasierte Infrastruktur vor, bei der neben expliziten Wissensmanagement-Diensten auch die für logistische Objekte verantwortlichen Agenten als Sekundärfunktion die Infrastruktur ergänzen [Lan05]. So erhält der TMA z. B. sowohl von zentralen Verkehrsdiensten (VIA) als auch von anderen, kooperierenden Softwareagenten Nachrichten über die Verkehrslage. Voraussetzung für den Wissensaustausch ist, dass die Informationen bzw. das Wissen in einem Format kommuniziert werden, das durch explizite Semantik auf das Domänenwissen (modelliert in Ontologien) bezogen werden kann.

Daher wurde eine Gruppe aufeinander aufbauender Ontologien in der W3C Web Ontology Language OWL spezifiziert, in der Agenten ihr Weltmodell beschreiben, kommunizieren und logische Schlussfolgerungen aus vorhandenem Wissen ziehen können. Die Domänenbeschreibung umfasst u. a. Ontologien für die Transport- und Produktionslogistik sowie Gütertypen.

3.4 Echtzeitreaktionsfähigkeit

Aus der Technik sind viele Regelungssysteme bekannt, bei denen eine Reaktion innerhalb einer bestimmten Zeitspanne garantiert werden muss, wie beispielsweise das Aufblasen eines Airbags oder die Steuerung eines Atomreaktors. Solche Systeme werden in diesem Kontext als echtzeitfähig bezeichnet. Ziel unseres Ansatzes des intelligenten Containers ist es, auf Störungen zu reagieren, bevor ein bleibender Schaden an der Ware entsteht. Dies ist im logistischen Zusammenhang als echtzeitfähig zu bezeichnen. Ein System ist also im logistischen Kontext echtzeitfähig, wenn es *synchron* zu der Zeit, die die Abläufe in der „realen Welt“ verbrauchen, Entscheidungen treffen kann.

Die maximale Reaktionszeit liegt hier bei einigen Entscheidungen im Gegensatz zu technischen Vorgängen im Minuten- oder gar Stundenbereich. Sie ergibt sich beispielsweise aus der Zeit, die die thermische Masse der Ware benötigt, um sich bei einem Ausfall des Kühlaggregates zu erwärmen, oder aus der Zeitspanne, die zur Verfügung steht, bis die letzte mögliche Ausfahrt für eine Alternativroute erreicht wird.

Dabei ist zwischen Echtzeitmonitoring und Echtzeitsteuerung zu unterscheiden. Ein Monitoring stellt lediglich alle relevanten Informationen dem Entscheidungsverantwortlichen zur Verfügung. Eine automatisierte Steuerung löst notwendige Reaktionen selbstständig aus. Hier ist die Rechtzeitigkeit der Aktionsauslösung das entscheidende Kriterium. Die dafür zur Verfügung stehende Zeit ergibt sich aus den Latenzzeiten der für das Monitoring eingesetzten Sensoren und den Eigenschaften der transportierten Ware.

Die in der Praxis zum Qualitätsmonitoring häufig eingesetzten Datenlogger oder die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Time-Temperature-Integratoren können in diesem Sinne nicht als „echtzeitfähig“ bezeichnet werden. Derartige Systeme ohne Fernabfragemöglichkeit können erst bei Ankunft oder beim Umladen manuell ausgelesen werden. Eine Reaktion auf Störungen ist daher erst mit einer Verzögerung möglich, die in den meisten Fällen die Qualitätsverlustspanne der Ware um mehrere Größenordnungen übersteigt.

3.4.1 Voraussetzungen und Risiken

Ob eine Entscheidung rechtzeitig getroffen und ausgeführt werden kann, hängt von verschiedenen Voraussetzungen und Risikofaktoren ab. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass folgende äußere Voraussetzungen gegeben sind:

- Ein Indikator für die Störung lässt sich durch einen Sensor erfassen. Dabei kann es sich um eine direkte physikalische Messung oder Bereitstellung von Informationen aus einer Datenbank oder Wissensbasis handeln.
- Es besteht eine tatsächlich ausführbare Handlungsalternative durch einen Aktuator oder ein Ausführungssystem.
- Sofern Sensor und Aktuator räumlich getrennt sind, muss es möglich sein, die Informationen innerhalb der zur Verfügung stehenden Reaktionsspanne zu übertragen.

Bei der Implementierung des Entscheidungssystems sollen zusätzliche Risiken für die Echtzeitreaktionsfähigkeit so gering wie möglich gehalten werden. Eines dieser Risiken ist die Ausführungszeit der Entscheidungsalgorithmen auf dem Prozessormodul. Wenn eine hohe Anzahl von Agenten entsprechend der Menge der geladenen Versandeinheiten auf dem System ausgeführt werden, sollten diese zu Gruppen zusammengefasst werden.

Für die Gruppenbildung [Ant06] werden verschiedene Komponenten des Agenten berücksichtigt. Es werden die Ähnlichkeiten zwischen den Agenten gesucht. Somit wird erreicht, dass sich Agenten mit ähnlichen Eigenschaften koordinieren, um unnötige Arbeit zu vermeiden, da diese Energie- und CPU-Ressourcen kostet. Mit einer Organisationsstruktur innerhalb einer Gruppe wird diese erforderliche Koordination erlangt. Die Organisationsstruktur besteht aus verschiedenen Rollen, die die Aufteilung von Aufgaben und Beziehungen zwischen den Teilnehmern einer Gruppe bestimmen.

Weiterhin muss die Übertragung des Agenten bei Umladevorgängen so schnell erfolgen, dass eine quasi lückenlose Überwachung gewährleistet ist.

3.4.2 Risiken in Bezug auf die Kommunikation

Die Ausführungszeiten können durch Optimierungen des Frameworks so weit reduziert werden, dass sie kein Risiko für die Echtzeitfähigkeit darstellen. Verzögerungen durch zeitweise Unterbrechung der Kommunikationswege können jedoch zu einem Verlust der Echtzeitfähigkeit führen.

Dabei sind zwei Arten der Kommunikation zu unterscheiden:

1. Kommunikation, deren Notwendigkeit sich aus der Domäne ergibt. In der Logistik wäre das bspw. die Kommunikation eines Auftrags als Bedingung für den Beginn des Logistikprozesses.
2. Kommunikation, die für Entscheidungen während des Prozessablaufs benötigt wird.

Die Notwendigkeit ersterer kann durch Selbststeuerung nahe liegender weise nicht vermieden werden. Die Notwendigkeit von prozessbedingter Kommunikation kann durch lokale Selbststeuerung eingeschränkt werden, da keine entfernte zentrale Entscheidungsinstanz erforderlich ist, zu der eine Kommunikationsverbindung bestehen müsste. Somit verringert die Fähigkeit des Systems, selbst vor Ort Entscheidungen zu treffen, Daten zu integrieren oder allgemein auf Veränderung der Umwelt adäquat zu reagieren, das Risiko, das durch einen langen und/oder nicht in gesicherter Qualität vorhandenen Kommunikationsweg entsteht.

4 Technische Realisierung lokaler Selbststeuerung

Waren, die über das beschriebene selbststeuernde System versandt werden, werden als „passive Objekte“ bezeichnet, da sie nur mit einem passiven Standard-RFID-Tag ausgestattet sind. Sie werden auf ihren Weg entlang der Transportkette durch einen elektronischen Frachtbrief begleitet, der stellvertretend deren Umwelt bewertet und dies

im Falle eines tatsächlichen oder antizipierten Qualitätsverlustes an einen Ladungsbetreuungsagenten (LBA) meldet. Die lokale Bewertung ist auf eine Infrastruktur angewiesen, die am jeweiligen Ort des Objektes eine Plattform bereitstellt, auf der der elektronische Frachtbrief in Form eines Softwareagenten ausgeführt werden kann. Der LBA ist ortsungebunden, kann also im Container oder auf einer externen Plattform ausgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine regelmäßige Kommunikationsverbindung zum intelligenten Container besteht, um die lokale Bewertung in die Entscheidungsfindung einbeziehen zu können.

Ein weiterer Softwareagent repräsentiert die Entscheidungsinstanz Fahrzeug. Dieser Agent entscheidet autonom entsprechend für ihn gültiger „business rules“ über die mitzuführenden Ladungen und die konkrete Fahrtroute. Die Agenten sind in eine dezentrale Wissensmanagement-Infrastruktur eingebunden, die entscheidungsrelevantes Wissen bereitstellt. Hierzu gehört z. B. Wissen über das Transportnetz oder konkrete Fahrtrouten sowie die aktuelle Markt- und Verkehrslage. Im Folgenden wird beschrieben, wie die technische Infrastruktur für lokale Selbststeuerung im Einzelnen aufgebaut ist.

4.1 Elemente einer intelligenten Infrastruktur

Die Infrastruktur besteht aus mehreren „intelligenten Containern“ oder Transportmitteln sowie Lagerräumen, die über eine im Prinzip identische Ausstattung verfügen. Die Ankunft neuer Waren wird mittels eines RFID-Readers überwacht. Ein Prozessormodul bietet die Möglichkeit zur Ausführung des Frachtbriefes als mobiler Agent. Die Steuerung der Mobilität der Prozesse erfolgt durch einen als „CargoManager“ bezeichneten Agenten, welcher für die Verwaltung der Ladung eines Fahrzeuges zuständig ist. Er fordert den Frachtbrief für neue Ladungsstücke an und startet eine lokale Instanz des betreffenden Agenten. Zum Senden von Warnmeldungen und zur Anforderung des Frachtbriefes von einem anderen Fahrzeug oder Lager ist eine Außenkommunikationseinheit erforderlich. Die Umweltbedingungen innerhalb des Containers werden durch ein Sensorsystem erfasst.

4.1.1 Einsatz von RFID-Technologien

RFID-Technologien werden eingesetzt, um die Mobilität des elektronischen Dokuments zu steuern. Die Türen der Transportmittel oder alternativ der Laderampen werden mit Lesegeräten ausgestattet. Entsprechend dem Stand der RFID-Technologie müssen gewisse Einschränkungen bei der Systemauslegung hingenommen werden. Ein Zugriff auf die im RFID-Tag gespeicherten Informationen ist nur während des Be- oder Entladens möglich, wenn die Ware am Lesegerät vorbeigeführt wird. Der Inhalt eines bepackten Containers kann aufgrund der sehr begrenzten Reichweiten und der gegenseitigen Abschirmung der Waren nicht komplett gescannt werden. Änderungen des Qualitätszustandes und ein Protokoll über Störungen der Transportbedingungen müssen daher in der Überwachungseinheit des Transportmittels zwischengespeichert werden. Beim Entladen können diese Daten dann auf dem RFID-Tag aktualisiert werden.

Eine Speicherung des elektronischen Frachtbriefes auf dem RFID-Tag lässt sich in der Praxis ebenfalls kaum realisieren. Zum einen sind derzeit nur RFID-Tags bis zu einer Speichergröße von 1 KBit verfügbar. Zum anderen ist die Datenübertragung bei den eingesetzten HF-Tags (ISO 15693) mit effektiv 1 KBit pro Sekunde recht langsam. Von dem neuen „UHF-Generation 2“-Protokoll ist eine deutliche Verbesserung zu erwarten; aber auch hier ist die Bandbreite aufgrund gesetzlicher Bestimmungen begrenzt. Weiterhin muss das Risiko berücksichtigt werden, dass der Schreibvorgang auf dem RFID-Tag beim Entladen fehlschlägt und der Frachtbrief somit verloren wäre.

In unserem Ansatz enthält der RFID-Tag daher nur wenige Adressinformationen. Beim Entladen schreibt jedes Transportmittel die Netzwerkadresse, unter der es erreichbar ist, auf den Tag. Unter dieser Adresse wird dann der Frachtbrief vom nächsten Transportmittel auf Basis der Seriennummer des RFID-Tag über einen entsprechenden Agentendienst angefordert. Bei der Konfiguration der Wareninformation wird zusätzlich

die Adresse des Warenabsenders einmalig auf den Tag geschrieben. Diese wird verwendet, falls die erste Adresse nicht lesbar oder das Transportmittel nicht erreichbar ist. Dadurch ist es auch bei Nichtverfügbarkeit eines zentralen Servers möglich, Umladevorgänge durch lokale Prozesse zu überwachen.

4.1.2 Plattform für Mobile Agenten

Die eigentliche Informationsverarbeitung der mobilen Agenten geschieht auf einem Prozessormodul, das in den Container integriert ist. Bei der Auswahl des Prozessors muss eine Überdimensionierung der Rechenleistung unbedingt vermieden werden, da sie im direkten Zusammenhang zu Stromverbrauch, Platzbedarf und Preis steht.

Bei Vorversuchen hat sich gezeigt, dass das Agentenframework auch auf Systemen mit einer deutlich geringeren Leistung als der eines PCs lauffähig ist. Der von uns verwendete Intel ARM XScale Prozessor hat bei einer Taktfrequenz von 400 MHz eine Leistungsaufnahme von etwa einem Watt. Module in Scheckkartengröße³ werden zu einem Preis zwischen 100 und 250 Euro angeboten.

Da das Agentenframework auf der Programmiersprache Java basiert, muss für das Zielsystem eine entsprechende Virtual Machine zur Ausführung des Codes zur Verfügung stehen. Die zum Konzept der Sprache gehörende automatische Freigabe von unbenutzten Speicherbereichen hat sich jedoch in der Vergangenheit als sehr hinderlich bei der Anwendung von Java für Echtzeitanwendungen erwiesen. Ein so genannter Garbage-Collector durchsucht den Speicher in unregelmäßigen Abständen und blockiert dabei den Prozessor. Antwortzeiten eines Prozesses können daher nicht garantiert werden. Die Jamaica Virtual Machine von Aicas⁴ setzt ein Realtime-Garbage-Collection Verfahren ein, um unvorhersehbare Blockaden des Prozessors zu verhindern. Die Programmausführung wird zusätzlich dadurch beschleunigt, dass statische Anteile des Codes im Voraus kompiliert werden.

Es wurde eine auf mobile Geräte zugeschnittene spezielle Version⁵ des JADE-Agentenframeworks [Mor04] verwendet. Diese musste an mehreren Stellen angepasst werden, da für den ARM-Prozessor einige Java-Bibliotheksfunktionen nicht vollständig implementiert sind. Das Framework ist erst ab einer Arbeitsspeichergröße von 32 MByte lauffähig⁶. Es hat sich gezeigt, dass Java-Code auf dem ARM-Prozessormodul etwa 50- bis 100-mal langsamer als auf einem Pentium PC mit einer Taktrate von 3 GHz ausgeführt wird.

Das Format, in dem Nachrichten zwischen verschiedenen Systemkomponenten ausgetauscht werden, soll unabhängig von der Art der jeweiligen Plattform und des Betriebssystems sein. Die interne Darstellung des Frachtbriefes wird daher anhand eines definierten Vokabulars in eine Zeichenkette entsprechend der FIPA-Spezifikation serialisiert [FIPA02]. In einem zweiten Schritt wird diese in ein HTTP-Protokoll verpackt. Das Erstellen einer solchen ACL-Nachricht hat sich als sehr rechenintensiv erwiesen. Durch Optimierung der in der ursprünglichen Form sehr ineffizienten Implementierung konnte der Übersetzungsvorgang um den Faktor drei beschleunigt werden.

Die für die Übertragung eines Frachtagenten vom Lager in ein Transportmittel benötigte Zeit liegt derzeit bei ca. 8 Sekunden. Im Vergleich zu dem genannten Zeithorizont von Minuten oder Stunden für die zugehörigen logistische Entscheidungsprozesse, kann dieser Wert für einzelne Frachtstücke toleriert werden. Um aber die Echtzeitreaktionsfähigkeit beim gleichzeitigen Verladen mehrerer Objekte nicht zu gefährden, sind weitere Optimierungen am Framework notwendig.

3 DilnetPC der Firma SSV-Embedded, Hannover, www.ssv-embedded.de

4 www.aicas.de

5 Light Extensible Agent Platform LEAP, siehe auch: Using JADE-LEAP to implement agents in mobile devices (Antonio Moreno, Aida Valls, Alexandre Viejo) <http://jade.tilab.com/papers-exp.htm>

6 Die Hälfte dieses Speichers wird jedoch vom Betriebssystem Linux belegt

Das ausgewählte Prozessormodul stellt einen guten Kompromiss zwischen Rechenleistung und Preis dar. Durch sorgfältige Programmierung können Übertragungs- und Antwortzeiten im unteren Sekundenbereich erzielt werden. Eine genauere Beschreibung der Realisierung von mobilen Agenten auf embedded Systems findet sich bei Jedermann [Jed06a].

4.1.3 Ablauf der Übertragung des Frachtbriefes

Die Übertragung des Agenten, der den Frachtbrief repräsentiert, wird durch das Lesen des RFID-Tag ausgelöst. Dabei verwalten sich die Frachtagenten größtenteils selbstständig, ein für die Administration des Laderaumes zuständiger „CargoManager“ muss nur aktiv werden, wenn der Agent auf dem lokalen System noch nicht initialisiert, oder dessen symbolischer Name unbekannt ist. Auf der Seite des Laderaumes, der eine Ware abgibt, werden folgende Schritte ausgeführt:

- Der CargoManager empfängt eine Anfrage und sucht den zugehörigen Frachtagenten entsprechend der Identifikationsnummer. Anschließend leitet er die Anfrage an den Frachtagenten weiter.
- Der Frachtagent beendet die Berechnung des dynamischen Qualitätsmodells und sichert seinen aktuellen Zustand in den elektronischen Frachtbrief.
- Der Frachtbrief wird zusammen mit den warenspezifischen Softwareerweiterungen an das neue Transportmittel gesendet.
- Der Frachtagent wartet auf eine Bestätigungsmeldung und beendet sich dann selber.

Die entsprechenden Schritte auf der Seite des Empfängers nehmen folgenden Ablauf:

- Der RFID-Reader meldet die gelesene Identifikationsnummer und die Adressinformationen an den CargoManager.
- Der CargoManager sendet eine Anfrage an den durch die Adresse spezifizierten Frachtraum und wartet, bis er einen Frachtbrief als Antwort erhält.
- Ein entsprechender Agent wird mit den dynamischen Code-Erweiterungen gestartet. Die Zustandsvariablen werden mit den Parametern aus dem Frachtbrief initialisiert.
- Der Agent sendet eine Bestätigungsmeldung an das vorherige Transportmittel
- Die Qualitätsüberwachung wird auf dem Zielsystem fortgesetzt

4.1.4 Außenkommunikation

Zur Übertragung der Frachtbriefe und zum Versand von Nachrichten zwischen den lokalen Prozessen ist eine entsprechende Außenkommunikation notwendig. Vom Partnerinstitut ComNets im Sonderforschungsbereich 637 wurde eine Kommunikationseinheit entwickelt, die automatisch das jeweils günstigste Netz wählt und dabei Faktoren wie Kosten, Bandbreite, Sicherheit und Abdeckung berücksichtigt. In der Nähe eines stationären Lagers oder Umschlagplatzes wird in der Regel WLAN zur Verfügung stehen. Wenn das Transportmittel dieses Netz verlässt, muss die Kommunikation über kostenpflichtige Netze wie GPRS oder UMTS erfolgen. Eine Kommunikation über Satellit ist derzeit noch nicht an das System angebunden. Die Größe der Datenpakete liegt zwischen 0,5 und 2 KByte. Zur Übertragung eines Qualitätsmodells müssen zusätzlich 4 bis 8 KByte veranschlagt werden.

4.1.5 Interne Architektur des Sensorsystems

Die Beobachtung der Umweltbedingungen innerhalb des Transportmittels erfolgt durch ein drahtloses Sensornetz, welches die räumliche Verteilung von Parametern wie Temperatur, Feuchte, Licht, Gaskonzentrationen und Vibrationen erfasst.

Durch mangelnde Außenisolation und Blockade des Luftstromes des Kühlaggregates kann insbesondere die Temperatur räumlich stark variieren. In der Praxis werden Temperaturdifferenzen von 5° C oder mehr innerhalb eines Containers beobachtet [Wild05, Kapitel 8.4.3.1.2]. Das Sensornetz besteht aus einzelnen batteriebetriebenen Sensorknoten, die mit einer auf niedrigen Energieverbrauch optimierter Kommunikations-einheit mit begrenzter Reichweite ausgestattet sind.

Bild 5 zeigt einen dieser im SFB 637 entwickelten Sensorknoten⁷. Um die Reichweite zu erhöhen, werden Nachrichten von entfernten Knoten innerhalb des Sensornetzes gegebenenfalls über mehrere Station (Hops) im Sensornetz weitergeleitet. Die Sensorknoten sind Bestandteil der Infrastruktur des Transportmittels. Zusätzliche an der Ware angebrachte Knoten können das Sensorsystem ergänzen.

Die technischen Details des Sensorsystems sind in Jedermann [Jed06b] beschrieben. Bis auf die Messung von Gaskonzentrationen werden im Sensorsystem kommerziell verfügbare Bauteile verwendet. Bei Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass insbesondere das gasförmige Hormon „Ethylen“ einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeit von Reifungsprozessen hat. Die Entwicklung eines für den mobilen Einsatz geeigneten Sensors steht noch aus.

Die daher nach dem Beladen erforderliche Neukonfiguration des Sensornetzes kann als selbststeuernder Prozess betrachtet werden. Jeder Knoten sucht in seiner Umgebung nach möglichen Kommunikationspartnern und entscheidet, über welchen Weg er Nachrichten weiterleitet. Die Weiterleitung einer Nachricht kann aber auch verweigert werden, beispielsweise bei niedrigem Batteriestatus.

Die Hauptaufgabe beim Design eines solchen Netzwerkes ist es, den Energieverbrauch der Knoten zu senken, um die Wartungsintervalle zur Erneuerung der Batterien so weit wie möglich zu verlängern. Die wichtigsten Kostenfaktoren in Bezug auf den Energieverbrauch sind die Kommunikations- und Messvorgänge. Durch Einsatz spezieller Mikrocontroller liegt die zur Administration des Sensorknotens notwendige Energie unter denen der anderen Systemkomponenten. Der eingesetzte Mikrocontroller erlaubt derzeit jedoch nicht die Realisierung komplexer selbststeuernder Algorithmen.

Die technischen Möglichkeiten, den Energieverbrauch der analogen Komponenten der Kommunikations- und Sensoreinheiten zu senken, sind sehr begrenzt. In Bezug auf digitale Recheneinheiten sind jedoch weitere Leistungssteigerungen zu erwarten. Die Leistung von Desktop-Prozessoren wird nach dem Gesetz von Moore extrapoliert, nachdem sich die Anzahl der Transistoren je Chipfläche alle 18 Monate verdoppelt bei gleichzeitig sinkendem Stromverbrauch je Transistor. Auch wenn dieses Gesetz für Mikrocontroller nur eingeschränkt gültig ist, kann dennoch von einer deutlichen Steigerung der Rechenleistung je Leistungseinheit, gemessen in Million Instructions per Watt (MIPS / Watt), ausgegangen werden⁸.



Abb. 5: Sensorknoten zur drahtlosen Übertragung von Messwerten innerhalb des Containers. Derzeit stehen Module für Temperatur, Feuchtigkeit, Licht und Erschütterungen zur Verfügung.

⁷ Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik, Universität Bremen

⁸ siehe auch Abbildung 2 in Mattern 2005, Seite 42

Es wird daher zukünftig möglich sein, durch Verlagerung von Entscheidungsprozessen auf die Sensorknoten „teure“ Kommunikations- und Messvorgängen einzusparen. Ein intelligenter Sensorknoten kann dann beispielsweise entscheiden, ob ein Messwert so weit abweicht, dass er weitergeleitet werden soll, oder ob er erst Werte von Nachbarknoten anfordert, um seine Messung zu stützen. Ein besonders energieintensiver Sensor (z. B. Gasdetektion) wird erst aktiviert, wenn andere, leichter zu messende Parameter dies indizieren. Eine eingehende Erforschung dieses Ansatzes steht jedoch noch aus.

4.2 Außenwahrnehmung und Entscheidungsfindung

Die Entscheidungsfindung im Namen der Ladung und des Transportmittels wird jeweils durch separate Agenten realisiert. Diese sind aufgrund ihrer Speicher- und Rechenanforderungen bisher nicht für die Ausführung auf dem Prozessormodul der Embedded Platform geeignet. Daher steht für diese Agenten und weitere Agenten, die logistische Informations- und Vermittlungsdienste anbieten (siehe Abschnitt 3), eine separate Softwareplattform auf der Basis eines handelsüblichen Intel-Notebooks zur Verfügung. Sowohl die Agenten der Embedded Platform als auch die Agenten auf dem PC verwenden die Agentenplattform JADE [Bell03]. Darüber hinaus sind die Agenten für die Ladungsbetreuung (LBA) bzw. das Transportmittel (TMA) nicht ortsgebunden. Prinzipiell ist eine gemeinsame Ausführung auf dem Embedded System daher machbar und wird zumindest für den LBA für zukünftige Entwicklungen des Systems angestrebt.

Als Ausführungsort des TMA ist eine separate Plattform zu bevorzugen, da dieser unter Umständen mehrere Container oder Laderäume zu verwalten hat. Die logistischen Dienste Transportvermittlung zur Vorfilterung und Beschleunigung der Partnersuche zwischen TMA und LBA, Routenplanung (RPA) für das Transportmittel, Verkehrsinformation (TIA) sowie sonstige Wissensmanagement-Dienste kooperieren in der Regel mit mehreren Transportmitteln und Ladungen. Daher ist für diese Dienstageanten ein Ausführungsort angebracht, der nicht an das Transportmittel oder den Container gebunden ist. Die Transportvermittlung kann z. B. an Umschlagpunkten lokalisiert sein. Wissensmanagement-Dienste sind dezentral konzipiert und können auch in Kooperation unter den TMA angeboten werden, beispielsweise um Verkehrsinformationen auszutauschen.

Die Routenplanung, ausgeführt durch einen Routenplanungsagenten (RPA), ist als dezentraler, aber unter Agenten gemeinsam genutzter Dienst realisiert. Routenplanung könnte ebenso als integrierte Komponente oder dedizierter Dienst des Transportmittelagenten umgesetzt werden. Dies entspricht eher der Analogie zum lokalen Navigationssystem und vermeidet die Überlastung eines gemeinsam genutzten Dienstes.

5 Ablauf eines Demonstrationsszenarios

Für Testzwecke und zur Veranschaulichung der Selbststeuerung wurde das beschriebene System in der Maschinenhalle des BIBA an der Universität Bremen aufgebaut. Wege in der Maschinenhalle dienen als Modell für ein vereinfachtes Verkehrsnetz. Während der Fahrt eines Demonstrator-Modell-Lkw (**Bild 6**) werden Positionsdaten anhand von im Boden eingelassenen RFID-Tags generiert⁹. Die Plattform zur Ausführung lokaler Prozesse wurde in einen Modellcontainer im Maßstab 1:8 integriert. Die Eingabe von Lieferaufträgen und Konfiguration des Frachtbriefes erfolgt über einen PC. Weitere Rechner stehen als Plattform für die Agenten bereit, welche die Planung und koordinierte Abwicklung des Transports übernehmen oder logistische Dienstleistungen wie Transportvermittlung oder Verkehrsinformation anbieten.

⁹ Globale Positionssysteme (GPS) sind in geschlossenen Räumen nicht einsetzbar. Ferner ist die Auflösung der Positionsdaten zu gering für das Modellszenario.

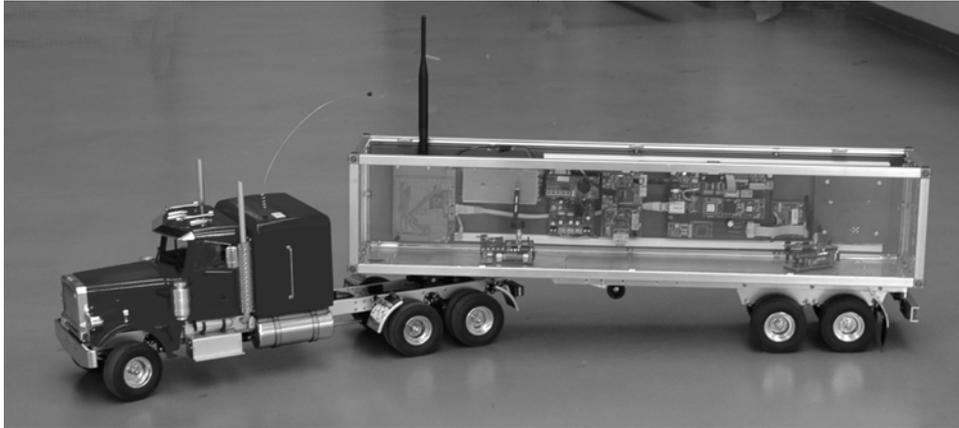


Abb. 6: Ferngesteuerter Modell LKW im Maßstab 1:16, die Komponenten des "intelligenten Containers" sind in den Auflieger integriert.

Der Demonstrator erlaubt es, Risiken wie Verkehrsstörungen, Kommunikationsausfälle und Abweichung der Umweltbedingungen nachzustellen. Die von den Bewertungssystemen der Innen- und Außenwelt versendeten Nachrichten an die Entscheidungssysteme können an einem Bildschirm verfolgt werden. Die Fahrt des Modell-Lkw in der Maschinenhalle und weiterer simulierter Fahrzeuge werden dort auf einer schematischen Landkarte visualisiert, die sich an dem Grundriss der Maschinenhalle orientiert (**Bild 7**). Die simulierten Fahrzeuge und Ladungen dienen der Steigerung der Komplexität des Gesamtzenarios. Das System zur Transportplanung und -steuerung übernimmt die selbstgesteuerte Koordination zwischen Umschlagknoten, Transportmitteln und Ladungen. Diese jeweils als Agenten realisierten logistischen Objekte (Lkw bzw. Ladung) verhandeln über Transportaufträge und ändern gegebenenfalls die Route (*Lkw*) oder das aktuelle Transportmittel (*Ladung*), um eine mögliche Gefährdung der Warenqualität oder des Liefertermins abzuwenden.

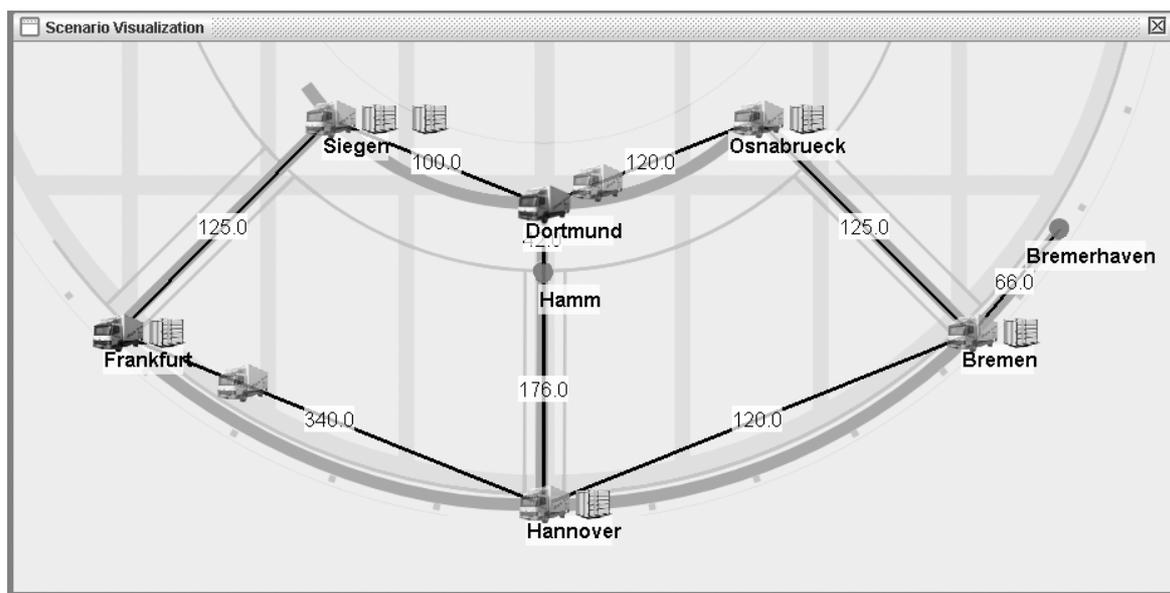


Abb. 7: Monitoring-Ausschnitt - Visualisierung des Grundrisses der Maschinenhalle mit Verkehrsnetz sowie der Position der Transportmittel und Ladungen.

Im folgenden ist der Ablauf eines typischen Transportszenarios in einem vereinfachten Verkehrsnetz beschrieben. Dabei soll eine mit RFID-Tags gekennzeichnete Lkw-Ladung Frischfisch als Kühltransport von einem Lagerhaus in Bremerhaven zum Großmarkt in Frankfurt am Main befördert werden. Nach dem Erstellen des entsprechenden Auftrags läuft das Szenario selbstgesteuert ab. Durch manuelle Eingriffe werden jedoch Störgrößen (Stau, Defekt des Kühlaggregates) eingefügt, die die Agenten erkennen sowie autonom und flexibel bewältigen müssen. Darüber hinaus wird das gewählte Transportmittel als Modell durch einen Menschen ferngelenkt. Die eigentlichen Entscheidungen treffen Agenten und geben diese ggf. zur Ausführung an Menschen weiter. Die Agent-Mensch-Kommunikation erfolgt über einen Handcomputer (PDA) bzw. einen Monitoringstand.

Generierung des Transportauftrages und des Frachtbriefes

Vom Absender wird eine Ware für den Transport bereitgestellt. Nachdem die Ware einen RFID-Reader passiert hat, erscheint eine Eingabemaske (**Bild 8**), die auffordert, die Daten des neuen Transportauftrags und des zugehörigen Frachtbriefes einzugeben. Der Benutzer wählt zunächst aus, welche Warenart mit dem an der Transportverpackung befestigten RFID-Tag verknüpft ist. Anschließend kann er die vorgeschlagenen Überwachungsparameter korrigieren und das Transportziel eingeben.

Transportkoordination und -planung

Die Erstellung des Transportauftrages für die Ladung stößt die Erstellung eines Agenten an, der fortan für diese spezielle Ladung als Betreuungsagent (LBA) fungiert. Der LBA läuft auf einer separaten

Softwareplattform, ist aber prinzipiell ortsungebunden. Nach Erhalt des Frachtbriefes durch einen Agenten des Ausgangslagerhauses versucht der LBA, ein passendes Transportmittel zu akquirieren. Hierzu schaltet der Agent einen Vermittleragenten ein, der über freie Transportmittel und deren Grundeigenschaften (z. B. Position, maximale Nutzlast, Spezialfähigkeiten wie Kühlung) informiert ist. Passende und freie Transportmittel, die wiederum durch Agenten repräsentiert sind, werden daraufhin vom Vermittler über die potentielle Ladung informiert.

Im gegebenen Szenario sind nur zwei Lkw mit dem nötigen Kühlaggregat ausgestattet, um den Frischfisch sicher von Bremerhaven nach Frankfurt zu transportieren. Der erste befindet sich in Frankfurt, der zweite in Dortmund. Der Transportmittelagent (TMA) des Lkw aus Frankfurt entscheidet, dass das Angebot zu weit entfernt ist, um ausreichend attraktiv zu sein. Der TMA des Lkw in Dortmund hingegen sendet einen Transportvorschlag an den LBA der Ladung Frischfisch in Bremerhaven. Da kein weiteres Transportmittel einen Vorschlag übermittelt und der Vorschlag des Lkw aus Dortmund

Abb. 8: Graphische Oberfläche zur Konfiguration des Frachtbriefes. Der Absender legt Warenart- und den Typ des dynamischen Qualitätsmodells fest. Die bereitgestellten Modellparameter können manuell angepasst werden.

konform zu den Transportanforderungen ist, entscheidet der LBA, das Angebot anzunehmen, und teilt dies dem entsprechenden TMA mit.

Der akquirierte Lkw plant nun seine Route nach Bremerhaven und schaltet dazu einen Routenplanungsagent (RPA) ein, der Informationen über die aktuelle Verkehrslage einbezieht. Sowohl TMA als auch RPA sind bei einem Verkehrsinformationsdienstagenten (VIA) registriert, um auf Änderungen der Verkehrslage reagieren zu können. Der RPA schlägt die Fahrt über die A 1 und A 27 über Bremen vor und der Lkw beginnt seine Fahrt. In Bremerhaven eingetroffen wird der Ladungsbetreuungsagent (LBA) über die Ankunft informiert. Die Verladung wird durch das Einlesen des an der Ladung befindlichen RFID-Tag mit dem RFID-Reader im Laderaum des Kühl-Lkw detektiert.

Während der Verladung plant der Lkw-Agent mit Hilfe des RPA die Fahrtroute nach Frankfurt am Main. Der RPA schlägt die Fahrt über die A 27 und A 7 über Hannover und Kassel mit Anschluss A 5 bis nach Frankfurt vor. Bei Abschluss der Verladung wird der Fahrer des Lkw durch die Anzeige im PDA über die Route informiert.

Start und Übertragung des Überwachungsagenten

Nachdem eine Bestätigung über die erfolgte Transportplanung eingetroffen ist, wird der Überwachungsagent gestartet. Die Adressen des derzeitigen Gastrechners im Lager des Absenders und des Rechners für die Agenten der Transportabwicklung (TMA, LBA) werden auf den RFID-Tag geschrieben. Unter diesen Adressen können die folgenden Fahrzeuge die zur Ware gehörenden Agenten ansprechen und den Frachtbrief anfordern.

Nach dem Einladen fordert das Fahrzeug den Frachtagenten über das Informationsnetzwerk an. Der Agent wird lokal gestartet und überprüft zunächst, ob alle zur Überwachung der Ware notwendigen Sensoren vorhanden sind. Erst dann erfolgt eine Freigabe für die Abfahrt.

Verkehrsstörung

Durch einen Eingriff am Monitoringstand wird ein (simulierter) Stau auf der A 7 zwischen dem Walsroder Dreieck und Hannover ausgelöst, während sich der Modell-Lkw kurz vor Bremen befindet. Wegen der Registrierung beim Verkehrsinformationsdienst erhält der Lkw die Nachricht über den Stau und kontaktiert umgehend den Routenplanungsagenten, um ggf. eine bessere Ausweichroute ausgehend von der aktuellen Position und Verkehrslage zu ermitteln. Der RPA ermittelt nun die Strecke über die A 1 Richtung Dortmund als beste Route. Der Lkw-Agent passt seinen Fahrplan entsprechend an und informiert den Fahrer über den PDA. Der Stau, die getroffene Entscheidung des Lkw-Agenten und die neue Fahrtroute können über den Monitoringstand nachvollzogen werden.

Kommunikationsausfall

Um Kommunikationsausfälle zu simulieren, kann an der externen Kommunikationseinheit des Transportmittels ein Modul mechanisch entfernt werden. Die Einheit schaltet automatisch auf ein anderes verfügbares Netz um. In der graphischen Benutzungsoberfläche des Monitoringstands wird das jeweils gewählte Netz angezeigt.

Anstieg der Warenbelastung

Der Frachtagent bewertet die Auswirkung von Abweichungen der Umweltbedingungen auf die Warenqualität. Ein kurzzeitiger Anstieg der Temperatur durch Öffnen der Tür oder regelmäßige Abtauvorgänge hat nur geringe Auswirkungen.

Über eine spezielle Taste an den Sensorknoten lässt sich ein Temperaturanstieg simulieren, der beispielsweise einer ausgefallenen Kühlung entspricht.

Wenn die verbleibende Warenqualität unter eine Warnschwelle fällt, wird eine entsprechende Nachricht an den Ladungsbetreuungsagenten versandt. Die zu einer Ware

gehörenden Warn- und Kontrollmeldungen sind im **Bild 9** dargestellt. Auf der A 1 hinter Osnabrück wird der Temperaturanstieg angestoßen. Vor Dortmund erfährt der LBA von der Überschreitung der Warnschwelle.

Time	Location	Message	UID	Product	Priority	Astress	Cstress
15:15:04	Vehicle_IP-99	Quality loss, take immediate action!	e004010000586cf6	Tomatos	yellow	50,0	0,5
15:13:22	Vehicle_IP-99	Freight is losing quality	e004010000586cf6	Tomatos	normal	25,0	0,5
15:13:06	Vehicle_IP-99	Freight moved to new transport	e004010000586cf6	Tomatos	normal	21,0	0,5
15:12:50	Vehicle_IP-99	Freight moved to new transport	e004010000586b7e	Cucumber	normal	2,25	0,25
15:12:36	Warehouse-1	Freight item waiting for transport	e004010000586b7e	Cucumber	normal	0,25	0,25
15:12:12	Warehouse-1	Freight item waiting for transport	e004010000586bf6	Lettuce	normal	0,2	0,2
15:11:54	Warehouse-1	Freight item waiting for transport	e004010000586cf6	Tomatos	normal	0,5	0,5

Freight: Tomatos @ Vehicle_IP-99 : Quality loss, take immediate action!

Abb. 9: Warenmeldungen während des Transportes. Angezeigt werden Zeitstempel, gegenwärtiger Ort der Ware, Art der Meldung, Identifikationsnummer, Warenart, Priorität und Maße für die Warenbelastung (Spalte Astress und Cstress).

Rettenungsplan

Der LBA verarbeitet die Warnmeldung, indem er die möglichen Auswirkungen auf den Erfolg des Transports bzgl. Warenqualität und Pünktlichkeit analysiert und ggf. Gegenmaßnahmen einleitet. Im Szenario interpretiert der LBA den Anstieg der Temperatur als Gefährdung der Warenqualität unter Einbeziehung der noch zurückzulegenden Strecke. Daher entschließt sich der Agent, das Transportmittel zu wechseln. Für die nötige Umladung wird ein Kühlagerhaus gesucht, um die Kühlkette einzuhalten. Auf der Basis seiner lokalen Wissensbasis identifiziert der LBA ein Kühlhaus in Hamm als günstigsten Umladepunkt. Die Wahl des Kühlhauses wird dabei u. a. von dem Umweg dorthin und den anfallenden Kosten vor Ort abhängig gemacht.

Der Transportmittelagent wird über die Umplanung informiert. Jener ermittelt umgehend mit Unterstützung des Routenplanungsagenten die Route nach Hamm und bestätigt die Planänderung dem LBA. Dieser akquiriert daraufhin einen Ersatz-Lkw. Der weiterhin in Frankfurt stehende (simulierte) Kühl-Lkw nimmt dieses Mal die Transportaufforderung an und fährt Richtung Hamm, um die Ladung abzuholen. Währenddessen hat der TMA des Modell-Lkw das Kühlaggregat als defekt gemeldet und wartet auf Reparatur.

Schließlich kommt die Ladung Frischfisch trotz der Störungen innerhalb des Zeitfensters in Frankfurt an. Der intelligente Frachtbrief wird nach RFID-Detektion beim Ausladen in das lokale Kühlhaus zur Auswertung übertragen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Papier wurde die erste für Demonstrationsszenarien funktionsfähige Entwicklung eines intelligenten Containers vorgestellt. Das System besteht zum einen aus einem Embedded System zur Integration in Transportcontainer und zum anderen aus einem ortsungebunden agentenbasierten Entscheidungssystem auf einem PC für die Selbststeuerung der logistischen Objekte. Das Embedded System erlaubt eine flexible und kontinuierliche Sensorüberwachung mit Hilfe mobiler Softwareagenten, die einen intelligenten Frachtbrief repräsentieren. Die Sensordaten werden vor Ort von Agenten bewertet und ggf. als Warnung an Ladungsbetreuungsagenten kommuniziert. Eine RFID-basierte Warenetikettierung erlaubt die Überwachung von Warenflüssen und die Steuerung der Übertragung des intelligenten Frachtbriefs.

Der gesamte Transportprozess ab dem Zeitpunkt der Spezifikation des Transportauftrags samt Überwachungsanforderungen wird selbstgesteuert durch koordiniertes Handeln der einzelnen Agenten abgewickelt, die bestimmte Objekte wie Transportmittel, Ladungen oder Lagerhäuser repräsentieren oder spezialisierte Dienstleistungen wie Sensorüber-

wachung und -bewertung oder Routenplanung anbieten. In einem Demonstrationsaufbau wurde die Funktionsfähigkeit des Systems und die Robustheit bezüglich Störungen wie dem Ausfall eines Kühlaggregates oder Verkehrsstaus durch automatische Umplanung gezeigt.

Bei der Umsetzung der Software hat sich gezeigt, dass das eingesetzte Agentenframework JADE teilweise sehr rechenzeitintensiv ist. Insbesondere das Übersetzen der Nachrichten in symbolische Informationen anhand eines definierten Vokabulars benötigt viel Prozessorleistung. Auf dem Prozessormodul kann daher vorerst nur die Mobilitätssteuerung und die Bewertung der Innenwelt ausgeführt werden. Die Verarbeitung von Verkehrs- und Marktinformationen sowie die Entscheidungsprozesse zur Transportsteuerung werden derzeit auf einem PC realisiert.

Der Zeitrahmen, den das System benötigt, um Entscheidungen zu treffen, liegt unterhalb der durch die Außenwelt begrenzten Reaktionszeiten. Reaktionen können in Echtzeit erfolgen, d. h. bevor ein erkanntes Warenrisiko zu einem Schaden führt oder die Möglichkeit einer alternativen Transportroute verpasst ist.

Auch wenn der Übergang zum intelligenten Container derzeit noch nicht vollständig vollzogen werden kann, zeigt unser System, dass es schon heute möglich ist, Selbststeuerungseinheiten in Transportmittel zu integrieren. Durch weitere Optimierungen am Agentenframework und abzusehende Weiterentwicklungen in der Prozessortechnologie ist jedoch vorhersehbar, dass sich eine intelligente Steuerung in einigen Jahren vollständig in einem Frachtcontainer realisieren lässt.

Literaturverzeichnis

- [Ant06] Antunez Congil, L. J.: *Dynamische Gruppenbildung von Intelligenten Agenten für die Transportlogistik*. Diplomarbeit, Universität Bremen, März 2006.
- [Aus62] Austin, J. L.: *How to Do Things with Words*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1962.
- [Bell03] F. Bellifemine, F.; Caire, G.; Poggi, A.; Rimassa G.: Jade – a white paper. In: TILAB "EXP in search of innovation", Vol. 3, September 2003, Italy
- [Big01] Bigus, J.: *Intelligente Agenten mit Java programmieren*. Addison-Wesley, München, 2001.
- [Büt05] Bütgenbach, M. und Haarer, D.: Der blaue Punkt – praktischer Einsatz des industriell gefertigten Time-Temperature-Integrator (TTI). 11. Frische- und Lebensmittel-Logistik-Tagung, Krefeld, 02.11.2005.
- [Demb05] Dembski, N.; Timm, I. J.: Contradictions between Strategic Management and Operational Decision-Making - Impacts of Autonomous Processes to Decision-Making in Logistics. In: Palwar, K. S. et al. (eds.): *Innovations in Global Supply Chain Networks. Proceedings of the 10th International Symposium on Logistics*. University of Nottingham Business School, 2005, pp. 650-655.
- [FIPA02] Foundation for Intelligent Physical Agents (2002): *FIPA Standard Status Specifications*. Internet: <http://www.fipa.org/repository/standardspecs.html>
- [Freit04] Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management*, 20(2004)1, S. 23-27.
- [Jed06a] Jedermann, R. and Lang, W.: Mobile Java Code for Embedded Transport Monitoring Systems. In: Grote, C. and Ester, R. (eds.): *Proceedings of the Embedded World Conference 2006, February 14-16, Nuremberg, Germany*. Vol 2., pp. 771-777. Franzis Verlag, Poing.
- [Jed06b] Jedermann, R.; Behrens, C.; Westphal, D.; Lang, W.: Applying autonomous sensor systems in logistics; Combining Sensor Networks, RFIDs and Software Agents. In: *Sensors and Actuators A (Physical)*. (In press)
- [Jed06c] Jedermann, R.; Schouten, R.; Sklorz, A.; Lang, W. and van Kooten, O.: Linking keeping quality models and sensor systems to an autonomous transport supervision system. In: *2nd intern. Workshop on „Cold-Chain-Management“, 8th and 9th May 2005, Bonn, Germany*.

- [Jen01] Jennings, N. R.: An agent-based approach for building complex software systems. In: Communications of the ACM, 44(4), pp. 35-41, 2001.
- [Koot05] van Kooten, O.: *Quality changes in food logistics - Ripening modelling and affection to supply chain management*. Vortrag im Rahmen des SFB 637 am 25.11.05 in Bremen.
- [Lan05] Langer, H.; Gehrke, J. D.; Hammer, J.; Lorenz, M.; Timm, I. J.; Herzog, O.: Emerging Knowledge Management in Distributed Environments. In: *Proceedings of the AAMAS 2005 Workshop on Agent-Mediated Knowledge Management (AMKM-05)*. Universiteit Utrecht, The Netherlands, 2005.
- [Less98] Lesser, A. et. al.: A Multi-Agent System for Intelligent Environment Control. UMass Computer Science Technical Report 1998-40.
- [Matt05] Mattern, F.: Die technische Basis für das Internet der Dinge. In: Fleisch, E. und Mattern, F. (Hrsg.): *Das Internet der Dinge*. Springer, Berlin, 2005, S. 39-66.
- [Mor04] Moraitis, P. and Spanoudakis, N.. 4th International Symposium "From Agent Theory to Agent Implementation" (AT2AI4), in: Proceedings of the 17th European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2004), Vienna, Austria, April 13 - 16, 2004.
- [Past04] Pastors, P. M.: Allgemein gültige Prinzipien des Qualitätsverlust- bzw. Verderb-Verhaltens von Frische-Produkten und (leicht-) verderblichen Lebensmitteln und die Konsequenzen für das 'logistische Fenster'. ZGFLL 1/2004, S. 1-14, Krefeld.
- [Peil02] Peilsteiner, J. P.; Truskiewitz, G.: *Handbuch Temperaturgeführter Logistik*. Behr's Verlag, Hamburg, 2002.
- [RusNor03] Russell, S. J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [Sea69] Searle, J. R.: *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1969.
- [Tijs96] Tijsskens, L. M. M and Polderdijk, J. J.: A generic model for keeping quality of vegetable produce during storage and distribution. In: [Tijs04], pp. 171-185.
- [Tijs04] Tijsskens, L. M. M.: *Discovering the Future. Modelling Quality Matters*. PhD thesis, Wageningen Universiteit, 2004. (Promotor Olaf van Kooten)
- [Timm04] Timm, I. J.: *Dynamisches Konfliktmanagement als Verhaltenssteuerung In telligenter Agenten*. Ph.D. thesis, Universität Bremen, Bremen, 2004. (Promotor Otthein Herzog)
- [WeiDi04] Weigand, H. and Dignum, V.: *I am autonomous, you are autonomous*. In Matthias Nickles, Michael Rovatsos, and Gerhard Weiss (eds.), Agents and Computational Autonomy: Potential, Risks, and Solutions, vol. 2969 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Heidelberg. ISBN 3-540-22477-7, 2004 (pp. 227236).
- [Wild05] Wild, Y.; Scharnow, R. and Rühmann, M.: *Containerhandbook*, Vol. 3. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Berlin, 2005.
- [WoJen95] Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Intelligent Agents: Theory and Practice. In: The Knowledge Engineering Review 10(2), pp. 115-152, 1995.

Kontaktadresse

Dipl. Ing. Reiner Jedermann, Universität Bremen, FB1
IMSAS Institut für Mikrosensoren, -aktuatoren und -systeme
Otto-Hahn-Allee, NW1, D-28359 Bremen, GERMANY
rjedermann@imsas.uni-bremen.de, www.sfb637.uni-bremen.de
Tel 0421/218-4908, Fax 0421/218-4774

Diese Arbeit wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse“ unterstützt.