

Kontextbasierte Eventerkennung in der Logistik mit drahtloser Sensornetztechnologie

Sebastian Zöller, Andreas Reinhardt, Ulrich Lampe, André Miede, Ralf Steinmetz

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Multimedia Kommunikation, 64283 Darmstadt,
E-Mail: {Sebastian.Zoeller, Andreas.Reinhardt, Ulrich.Lampe, Andre.Miede, Ralf.Steinmetz}@KOM.tu-darmstadt.de

Abstract

Eine lückenlose Echtzeitüberwachung von Logistikprozessen erlaubt es Events frühzeitig zu erkennen und auf diese angemessen zu reagieren und eröffnet das Potential Haftungsfragen leichter zu klären und Versicherungsprämien zu senken. Mittels drahtloser Sensornetztechnologie wird eine entsprechende Echtzeiterkennung von und -benachrichtigung über Events in Logistikprozessen möglich. Diese muss aber sowohl kosten- und energieeffizient als auch kundenorientiert realisiert werden. Im vorliegenden Beitrag wird hierzu das Konzept der „übertragungsrelevanten Events“ vorgestellt und zur konkreten Umsetzung ein Scoresheet-basiertes Verfahren entwickelt. Die Effizienz und Vorteilhaftigkeit dieses Verfahrens im Vergleich zu anderen Verfahren zur Eventerkennung und -benachrichtigung im Rahmen einer Echtzeitüberwachung von Logistikprozessen wird mittels Simulationsexperimenten gezeigt.

1 Einleitung

Transportprozesse sind heute vermehrt etablierte Prozesse und werden oft im Sinne einer Commodity gesehen. Nichtsdestotrotz können während eines Gütertransports immer wieder unerwartet Ereignisse, so genannte „Events“, auftreten, die den Transportprozess oder den Zustand der transportierten Güter beeinflussen (vgl. z.B. [2] oder [11]). Das Erkennen solcher Events erfolgt heutzutage mittels Sichtkontrollen oder mit Technologien wie RFID (Radio Frequency Identification) i.d.R. Checkpunkt-basiert, z.B. an Umschlagpunkten bzw. bei Gefahrenübergängen. So kann zwischen Eintritt und Erkennung eines Events durchaus eine signifikante Zeitspanne vergehen, die zu verlängerten Reaktionszeiten und verringerten Reaktionsmöglichkeiten führt. Dementsprechend ist eine automatische, frühzeitige Eventerkennung lokal, direkt am Ort der Evententstehung und eine zugehörige Benachrichtigung, möglichst in Echtzeit, wünschenswert, um bspw. frühzeitig Anpassungen des betroffenen Transportprozesses oder nachfolgender Prozesse vornehmen zu können. Weiterhin trägt eine solche Transportüberwachung mit lokaler Eventerkennung in Echtzeit dazu bei Haftungsfragen leichter klären zu können und eröffnet neue Möglichkeiten zur Senkung von

Versicherungsprämien (vgl. [13]). Die Entwicklungen auf dem Gebiet drahtloser Sensornetztechnologie bieten nun die Möglichkeit, eine solche lokale Echtzeiterkennung von Events und eine entsprechende Benachrichtigung zuständiger Entscheidungsträger während eines Transportprozesses zu realisieren (vgl. z.B. [9]). Somit kann die Zeitspanne zwischen dem Auftreten eines Events, dem Erkennen des Events und der Benachrichtigung eines verantwortlichen Entscheidungsträgers auf ein Minimum reduziert werden und ein entsprechend höheres Maß an Supply Chain Visibility erreicht werden. Um dieses Potential der drahtlosen Sensornetztechnologie im Logistikkontext ausschöpfen zu können, gilt es, verschiedene Anforderungen zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei ein kosten- und energieeffizienter Betrieb sowie eine ausreichende Kundenorientierung (vgl. [16]). Als Möglichkeit zur Realisierung einer solchen kosten- und energieeffizienten, kundenorientierten Eventerkennung in Transportprozessen mittels drahtloser Sensornetztechnologie wird im vorliegenden Beitrag ein kontextbewusstes Scoresheet-basiertes Verfahren vorgeschlagen.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 werden zunächst das Potential und die Anforderungen für die Anwendung drahtloser Sensornetztechnologie in der Transportlogistik beschrieben. Abschnitt 3 führt das Konzept der „übertragungsrelevanten Events“ als Grundlage für eine nutzerorientierte, kosten- und energieeffiziente Eventerkennung in Transportprozessen mittels drahtloser Sensornetztechnologie ein. Die konkrete Realisierung dieses Konzepts mittels eines Scoring-basierten Ansatzes wird in Abschnitt 4 beschrieben. Dieser Ansatz wurde mittels einer Simulation evaluiert, deren Ergebnisse in Abschnitt 5 dargestellt werden. Abschnitt 6 beschließt den Beitrag mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Drahtlose Sensornetze – Einsatzpotential in der Logistik

Drahtlose Sensornetze bestehen aus einzelnen, i.d.R. kleinen, drahtlosen Sensorknoten, die gemeinsam ein drahtloses Sensornetz bilden. Diese drahtlosen Sensorknoten können unterschiedlichste Umweltparameter überwachen, z.B. Temperatur, Stöße, Kippwinkel oder Gaskonzentrationen und drahtlos miteinander und mit anderen Systemen kommunizieren. Weiterhin besitzen sie eine Recheneinheit mit Prozessor und Speicherkapazität, sodass erfasste Sensordaten lokal auf den drahtlosen Sensorknoten ausgewertet werden können. Ihre Energie beziehen drahtlose Sensorknoten i.d.R. aus Batterien (vgl. [1]). Mit diesen Sensor-, Kommunikations-, Berechnungs- und Speicherfähigkeiten stellt drahtlose Sensornetztechnologie eine vielversprechende Technologie für eine mögliche Realisierung des Internets der Dinge dar und besitzt ein hohes Anwendungspotential im Bereich der Logistik (vgl. z.B. [4], [9]). So können drahtlose Sensorknoten z.B. in LKWs, Containern oder direkt in einzelnen Packstücken ausgebracht werden, um güterspezifische kritische Umweltparameter kontinuierlich während eines Transportprozesses zu erfassen und lokal gegen gegebene Grenzwerte zu vergleichen, um im Falle einer Grenzwertüberschreitung eine entsprechende Alarmnachricht durch das Sensornetzwerk und über einen so genannten „Gatewayknoten“ an einen verantwortlichen Entscheidungsträger zu senden. Beispielsweise können Sensorknoten in diesem Zusammenhang zur Echtzeit-Überwachung der Temperatur beim Transport temperaturempfindlicher Ware eingesetzt werden, zur Echtzeit-Überwachung von Gaskonzentrationen beim Transport von Lebewesen oder auch zum Erkennen von Erschütterungen beim Transport erschütterungsempfindlicher Güter. Im Vergleich zu

heutigen Methoden der Erkennung von Events in Transportprozessen, hier also der Verletzung vorgegebener kritischer Umweltparameter, z.B. mittels Sichtprüfungen der transportierten Güter, Klebeindikatoren oder auch RFID-Technologie wird es somit möglich, eine lokale Eventerkennung in Echtzeit zu realisieren und die Zeit zwischen Eventeintritt, Eventerkennung und Eventbenachrichtigung auf ein Minimum zu reduzieren.

Da die Eventerkennung insbesondere im Kontext des Supply Chain Event Managements (SCEM) von entscheidender Bedeutung ist, kann auch gerade in diesem Bereich drahtlose Sensornetztechnologie besonders nutzbringend eingesetzt werden, was zu ersten Entwicklungen in Richtung eines Mobile Supply Chain Event Managements geführt hat (vgl. z.B. [12]). Mit den Eigenschaften und Fähigkeiten der Technologie können im Speziellen die SCEM-Funktionen „Monitor“, „Notify“ und „Measure“ (vgl. zu diesen z.B. [8]) realisiert oder zumindest maßgeblich unterstützt werden. Hierbei können drahtlose Sensorknoten das Prozessmonitoring und die Soll-Ist-Vergleiche zur Eventerkennung im Rahmen der Monitor-Funktion lokal realisieren. Mittels ihrer drahtlosen Kommunikationsschnittstelle kann bei einem Eventeintritt die Benachrichtigung zuständiger Entscheidungsträger in Echtzeit im Sinne der Notify-Funktion erfolgen. Die lokale Speicherung der erhobenen Daten auf den Sensorknoten macht eine nachträgliche Prozessbewertung möglich und bietet eine Datenbasis für langfristige Prozessanalysen im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Somit kann auch die Measure-Funktion im Kontext des SCEM unterstützt werden.

Zur erfolgreichen Realisierung des skizzierten Anwendungspotentials ist eine umfassende Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen notwendig. Diese Anforderungen können verschiedenen Ursprungs sein. Entsprechend wurden in [16] vier Anforderungskategorien unterschieden, die für den Einsatz drahtloser Sensornetztechnologie in Logistikprozessen zu berücksichtigen sind:

- Technologische Anforderungen: Anforderungen, die sich aus den Eigenschaften und Beschränkungen der eingesetzten Technologie ergeben, z.B. energieeffizienter Betrieb aufgrund der eingeschränkten Energievorräte in drahtlosen Sensornetzwerken.
- Regulatorische Anforderungen: Anforderungen, die sich aus gesetzlichen Regelungen oder Standards ergeben, z.B. verfügbare Frequenzbänder für die Datenübertragung.
- Ökonomische und organisationale Anforderungen: Anforderungen, die sich aus ökonomischen Gegebenheiten und der potentiellen Notwendigkeit einer Systemintegration ergeben, z.B. Kosten-Nutzen-Verhältnis des Einsatzes einer drahtlosen Sensornetzlösung.
- Logistikmarkt-spezifische Anforderungen: Anforderungen, die sich aus den Eigenheiten des Logistikmarkts ergeben, z.B. der vorherrschende enorme Kostendruck und die dringende Notwendigkeit der Erfüllung von Kundenanforderungen.

Zwischen einzelnen Anforderungskategorien können Abhängigkeiten festgestellt werden, sodass entsprechende Trade-Off-Effekte zu berücksichtigen sind. Demzufolge dürfen die verschiedenen Anforderungen nicht isoliert voneinander betrachtet werden.

Die Forschung auf dem Gebiet der drahtlosen Sensornetze i.Allg. als auch im Speziellen im Umfeld deren Einsatzes in der Logistikdomäne ist i.d.R. stark technologisch getrieben (vgl. [16]). Demzufolge liegt hier ein großer Fokus auf den technologischen Anforderungen,

sodass z.B. die Realisierung eines energieeffizienten Betriebes durch die Entwicklung neuer Kompressionsverfahren oder energiebewusster Kommunikationsprotokolle verfolgt wird. Aus unserer Sicht ist allerdings insbesondere auch die Berücksichtigung ökonomischer und organisationaler Anforderungen als auch der logistikmarkt-spezifischen Anforderungen in diesem Kontext von grundlegender Bedeutung, im Besonderen Kosteneffizienz und Nutzerorientierung. Entsprechend haben wir ein Konzept entwickelt, das Abhängigkeiten zwischen den Anforderungskategorien ausnutzt, um so eine kosten- und energieeffiziente, nutzerorientierte Erkennung von Events in Transportprozessen mittels drahtloser Sensornetztechnologie zu realisieren. Dieses Konzept basiert auf der Kategorisierung von Events in übertragungsrelevante und nicht-übertragungsrelevante Events, wie sie in Abschnitt 3 eingeführt werden, und der Nutzung eines Scoresheet-basierten Verfahrens zur lokalen Erkennung von übertragungsrelevanten Events auf drahtlosen Sensorknoten, welches in Abschnitt 4 erläutert wird.

3 Übertragungsrelevanz als Grundkonzept zur kontextbewussten Eventkategorisierung

Als zentrale Anforderungen für einen erfolgreichen Einsatz drahtloser Sensornetze zur Eventerkennung in Logistikprozessen wurden in Abschnitt 2 ein sowohl kosten- als auch energieeffizienter Betrieb und eine ausreichende Nutzerorientierung identifiziert. Da die drahtlose Übertragung von Eventinformationen im Vergleich zur Datenspeicherung und Durchführung von Berechnungen auf einem drahtlosen Sensorknoten nicht nur den Energieverbrauch eines drahtlosen Sensorknotens, sondern auch die Kosten im Betrieb durch das Versenden von Nachrichten über kostenpflichtige Kommunikationskanäle, wie Mobilfunknetze oder Satellitenverbindungen, maßgeblich beeinflusst und auch die richtige Informationsmenge und -qualität entscheidend zur Nutzerzufriedenheit in diesem Kontext beiträgt (vgl. [5], [6]), haben wir das Konzept der „übertragungsrelevanten Events“ entwickelt (vgl. [15]). Dieses nutzen wir als Grundlage für eine kontextbewusste, lokale Eventfilterung auf drahtlosen Sensorknoten, die in Transportprozessen zur Eventerkennung eingesetzt werden, um durch eine Minimierung der Datenübertragungen eine Optimierung im Bereich Energie und monetäre Kosten bei ausreichender Informationsmenge und -qualität zu erzielen.

Da in Abschnitt 2 insbesondere das Anwendungspotential drahtloser Sensornetztechnologie im Bereich des SCEM aufgezeigt werden konnte, nutzt das Konzept der übertragungsrelevanten Events das Grundverständnis des Eventbegriffes, wie es insbesondere auch dort verwendet wird. Somit stellen Events in unserem Kontext für bestimmte Adressaten wesentliche Statusveränderungen dar und sind dementsprechend kontextabhängig und signalisieren einen Handlungsimpuls (vgl. z.B. [2], [11]). Diese Events besitzen i.Allg. unterschiedliche Auswirkungen auf die Transportgüter und die betroffenen Prozesse, bspw. in Abhängigkeit des Zeitpunktes ihres Auftretens oder des Ausmaßes der Statusveränderung. Folglich weisen die zugehörigen Eventinformationen auch unterschiedliche Informationswerte abhängig vom aktuellen Kontext, z.B. in Abhängigkeit der Auswirkungen des eingetretenen Events, auf. Weiterhin können auch die Kosten zur Übertragung von Eventinformationen, sowohl im Sinne monetärer Kosten als auch im Sinne des Energieverbrauchs, kontextabhängig unterschiedlich sein. Basierend auf ihrem Informationswert und den potentiell entstehenden Kosten für eine Übertragung der Eventinformationen,

schlagen wir eine Kategorisierung von Events in „übertragungsrelevante Events“ und „nicht-übertragungsrelevante Events“ vor. Ein Event soll dann übertragungsrelevant genannt werden, wenn sein Informationswert größer oder gleich den Übertragungskosten ist und nicht-übertragungsrelevant, wenn der Informationswert kleiner den Übertragungskosten ist (vgl. Gleichungen (1) und (2)).

$$\text{Übertragungsrelevantes Event}_{E_x} \Leftrightarrow \text{Informationswert}_{E_x} \geq \text{Übertragungskosten}_{E_x} \quad (1)$$

$$\text{Nicht-übertragungsrelevantes Event}_{E_x} \Leftrightarrow \text{Informationswert}_{E_x} < \text{Übertragungskosten}_{E_x} \quad (2)$$

Diese Kategorisierung von Events soll am Ort der Eventerkennung, also lokal auf einem drahtlosen Sensorknoten, erfolgen, um so die Datenübertragung auf übertragungsrelevante Eventinformationen zu beschränken, sodass nur Informationen übertragen werden, die es „wert“ sind, übertragen zu werden. Somit wird ein Konzept benötigt, mit dem der Informationswert eines Events und die Übertragungskosten für die Eventinformationen effizient und kontextbewusst lokal auf einem drahtlosen Sensorknoten bestimmt werden können. Hierfür haben wir das im Folgenden beschriebene Scoresheet-basierte Verfahren entwickelt.

4 Scoresheet-basiertes Verfahren zur lokalen Erkennung übertragungsrelevanter Events

In dem hier betrachteten Szenario der Eventerkennung in Transportprozessen gilt es zunächst zu berücksichtigen, dass an dem entsprechenden Transportprozess unterschiedliche Stakeholder mit unterschiedlichen Interessen beteiligt sind. Außerdem ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Güter mit unterschiedlichen Eigenschaften und Empfindlichkeiten gegenüber unterschiedlichen Events transportiert werden. Weiterhin beeinflussen i.Allg. verschiedene Umweltparameter den Güterzustand auch simultan, sodass Umweltparameter mit verschiedenen Maßeinheiten gleichzeitig zu überwachen sind. Somit ist festzustellen, dass zur Erkennung übertragungsrelevanter Events in diesem Kontext unterschiedliche Informationsbedürfnisse und entsprechend unterschiedliche Informationsbewertungen zu berücksichtigen sind. Folglich muss zur Kategorisierung von Events in übertragungsrelevante und nicht-übertragungsrelevante Events, und somit also zur Bestimmung von Informationswert und Übertragungskosten eines Events, ein Verfahren angewendet werden, das ausreichend flexibel und individuell anpassbar ist und auch multidimensionale Zielsysteme unterstützt. Scoring-Verfahren weisen diese Eigenschaften auf (vgl. [14]). Sie werden auch als Punktbewertungsverfahren oder Nutzwertanalyse bezeichnet und dienen i.Allg. dazu, systematisch Alternativen zu vergleichen und mittels einer Bewertung zu sortieren, um Handlungsempfehlungen ableiten zu können, insbesondere wenn nicht ohne Weiteres quantifizierbare Bewertungskriterien zu berücksichtigen sind, z.B. bei der Auswahl geeigneter Absatzkanäle oder EDV-Systeme (vgl. [3]). Dementsprechend erscheint die Entwicklung eines Verfahrens zur Kategorisierung von Events in übertragungsrelevante und nicht-übertragungsrelevante Events im beschriebenen Kontext auf Basis des Prinzips der Scoring-Verfahren als vielversprechend. Konkret haben wir ausgehend vom allgemeinen Aufbau von Scoring-Modellen (vgl. Bild 1) ein Scoresheet entwickelt, das auf einem drahtlosen Sensorknoten eingesetzt werden kann, um lokal bei jedem Eventauftritt das aufgetretene Event aufgrund des Vergleiches seines

Informationswerts und der Übertragungskosten, wie in Gleichungen (1) und (2) beschrieben, als übertragungsrelevant oder nicht-übertragungsrelevant zu kategorisieren.

Ausgehend von der beschriebenen Grundidee, Events in übertragungsrelevante und nicht-übertragungsrelevante zu unterscheiden und nur für die übertragungsrelevanten Events Eventinformationen zu übertragen, stellen die beiden Kategorien „übertragungsrelevantes Event“ und „nicht-übertragungsrelevantes Event“ die im Rahmen des Scorings zu bewertenden Alternativen dar, bzw. hieraus abgeleitet die Handlungsalternativen „Eventinformationen übertragen“ und „Eventinformationen nicht übertragen“.

Hinsichtlich des zu berücksichtigenden Zielsystems kann auf Basis der in Abschnitt 2 dargestellten Anforderungen vor dem Hintergrund des hohen Kostendrucks und der eingeschränkten Energieressourcen als oberstes Ziel Effizienz, sowohl im Sinne der Kosteneffizienz als auch im Sinne der Energieeffizienz, identifiziert werden. Diese Effizienzaspekte sind bereits dem Konzept der übertragungsrelevanten Events inhärent, da dort zur Kategorisierung sowohl die monetären als auch die Energiekosten der Datenübertragung mit dem Informationswert des zu kategorisierenden Events verglichen werden. Folglich können Informationswert und Übertragungskosten eines Events als Hauptkriterien für eine Operationalisierung des Zielsystems in Form der Kriterienmenge k (vgl. Bild 1) abgeleitet werden. Um nun aber tatsächlich ein Scoring zur Eventkategorisierung lokal auf einem drahtlosen Sensorknoten durchführen zu können, müssen diese beiden Hauptkriterien weiter detailliert und auf einem drahtlosen Sensorknoten bewertbar gemacht werden.

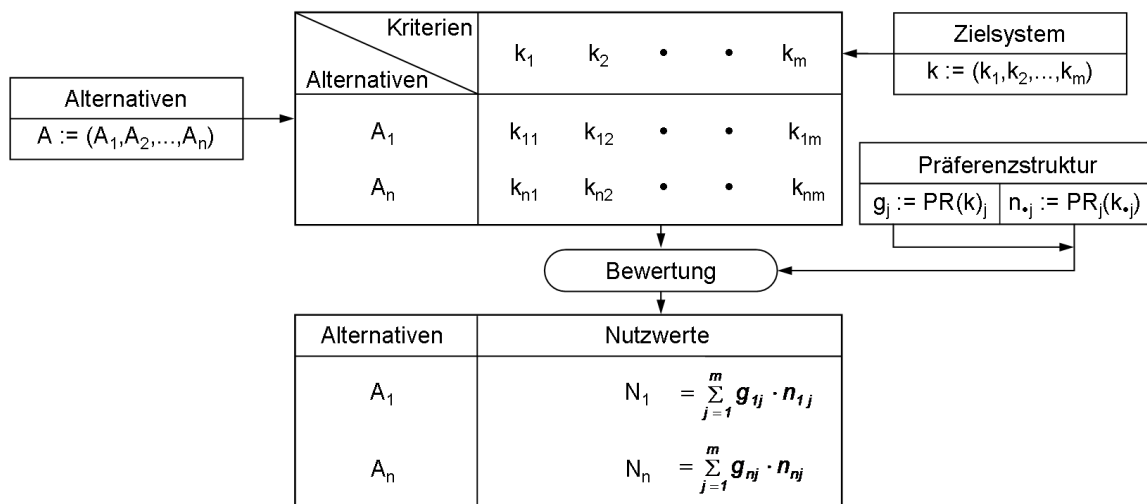


Bild 1: Allgemeiner Aufbau von Scoring-Modellen (basierend auf [14])

Wie bereits erwähnt lassen sich im Zusammenhang mit der Detaillierung des Hauptkriteriums Übertragungskosten monetäre Kosten und der Energieverbrauch zur Datenübertragung unterscheiden. Vor dem Hintergrund einer möglichst langen Lebensdauer des einzelnen Sensorknotens gilt es weiterhin zu berücksichtigen, dass hier nicht nur der absolute Energieverbrauch relevant ist, sondern dieser Wert auch in Relation zu dem zum Zeitpunkt des Scorings noch auf dem Sensorknoten vorhandenen Energievorrat zu bewerten ist, denn eine Datenübertragung ist relativ gesehen umso teurer, umso weniger Energie noch vorhanden ist. So ist z.B. eine Datenübertragung relativ gesehen teurer, wenn bei einer noch langen zu überwachenden Transportzeit nur noch wenig Energie zur Verfügung steht

als wenn für dieselbe Transportzeit noch hohe Energiereserven verfügbar sind. Somit lassen sich als detaillierte und operational auf einem Sensorknoten bewertbare Kriterien für das Hauptkriterium Übertragungskosten die drei Kriterien *Energiekosten der Datenübertragung*, *monetäre Kosten der Datenübertragung* und *aktuelle Energiereserven* ableiten.

Für die Detaillierung und Operationalisierung des Hauptkriteriums Informationswert nutzen wir aus, dass Events unterschiedliche Auswirkungen auf die transportierten Güter und den Transportprozess haben können. Hieraus kann für den Informationswert eines Events abgeleitet werden, dass dieser umso größer ist, umso folgenreicher die Auswirkungen des Events sind. Hierauf aufbauend können nun detailliertere, auf einem drahtlosen Sensorknoten bewertbare Kriterien für das Hauptkriterium Informationswert abgeleitet werden.

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass ein Event, welches mit einem drahtlosen Sensorknoten erkannt wird, also i.d.R. eine Veränderung eines oder mehrerer messbarer Umweltparameter wie eine Temperaturüberschreitung oder ein Stoß, den transportierten Gütern einen Schaden zufügt, z.B. deren Haltbarkeit verringert oder mechanische Beschädigungen hervorruft. Entsprechend besitzen Events i.d.R. physische Auswirkungen auf Transportgüter. Diese Auswirkungen sind abhängig vom Ausmaß der Überschreitung güterspezifischer Grenzwerte und der Dauer einer solchen Überschreitung. Demzufolge leiten wir das *Ausmaß einer Grenzwertüberschreitung* und die *Dauer einer Grenzwertüberschreitung* als Indikatoren für das Ausmaß der physischen Auswirkungen eines Events ab und nutzen sie als zwei operationalisierte Kriterien, um das Hauptkriterium Informationswert zu bestimmen.

Physische Auswirkungen eines Events auf ein Transportgut wirken sich auch direkt auf den Wert des transportierten Guts aus, sodass Events auch monetäre Auswirkungen zugeordnet werden können. Diese können z.B. in einer Wertminderung des Transportguts oder in fälligen Straf- bzw. Versicherungszahlungen bestehen. Hier gehen wir davon aus, dass das Ausmaß der monetären Auswirkungen eines Events mit dem Wert des Transportguts korreliert, sodass der Güterwert als Indikator für die direkten monetären Auswirkungen eines Events und somit als ein weiteres abgeleitetes Kriterium für den Informationswert eines Events verwendet werden kann.

Neben den physischen und direkten monetären Auswirkungen wirkt sich ein Event i.d.R. auch negativ auf die Kundenzufriedenheit aus. Dies beeinflusst wiederum die Beziehung zwischen Logistikdienstleister und Kunden negativ und hat u.a. potentiell Auswirkungen auf den Customer Lifetime Value. Demzufolge können einem Event auch negative indirekte monetäre Auswirkungen zugeordnet werden, deren Schwere in direktem Zusammenhang mit dem Wert eines Kunden für den Logistikdienstleister steht. Daher kann der *Kundenwert* als Indikator für das Ausmaß der indirekten monetären Auswirkungen eines Events und somit als weiteres operationalisiertes Kriterium für den Informationswert verwendet werden.

Die Folgen eines Events sind auch davon abhängig welche Reaktionsmöglichkeiten auf den Eventeintritt einem Entscheidungsträger zum Zeitpunkt des Eventauftritts bzw. der Eventbenachrichtigung noch zur Verfügung stehen. Hier kann festgestellt werden, dass typischerweise die aktuelle Position in der Supply Chain zum Eintrittszeitpunkt eines Events die verfügbaren Reaktionsmöglichkeiten beeinflusst. Außerdem können z.B. Fälle eintreten, in denen ein Event kurz vor Erreichen eines Umschlagpunktes auftritt. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, auf eine Übertragung der Eventinformationen zu verzichten, da das Event

innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne am folgenden Umschlagpunkt erkannt werden kann oder keine Auswirkungen besitzt, da die Güter innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne umgeschlagen oder ausgeliefert werden. Daher leiten wir die Zeit zum nächsten Umschlagpunkt als weiteres Kriterium zur Operationalisierung des Hauptkriteriums Informationswert ab, um so u.a. die aktuelle Position in der Supply Chain beim Eventauftritt zu berücksichtigen.

Insgesamt ergibt sich damit die folgende Menge k an operationalisierten, auf einem drahtlosen Sensorknoten bewertbaren Kriterien für das im Rahmen des Scorings zu berücksichtigende Zielsystem:

$$k := \{ \text{Energiekosten der Datenübertragung, Monetäre Kosten der Datenübertragung, aktuelle Energiereserven, Ausmaß Grenzwertüberschreitung, Dauer Grenzwertüberschreitung, Güterwert, Kundenwert, Zeit zum nächsten Umschlagpunkt} \} \quad (3)$$

Zur Berücksichtigung und Operationalisierung der Präferenzstruktur eines Nutzers im Rahmen des Scorings gilt es nun noch eine Gewichtung für die einzelnen Kriterien in k zu ermöglichen (vgl. Bild 1). Auf Grundlage des Konzeptes der übertragungsrelevanten und nicht-übertragungsrelevanten Events wie in Gleichungen (1) und (2) dargestellt, kann abgeleitet werden, dass die beiden Hauptkriterien Informationswert und Übertragungskosten gleich zu gewichten sind. Dies bedeutet, dass die Summe der Gewichte der einzelnen oben für die beiden Hauptkriterien abgeleiteten Kriterien identisch sein muss. Wir arbeiten hier mit einem Gewicht von 50 Prozentpunkten. Für eine konkrete Bestimmung der einzelnen Gewichte existieren unterschiedliche Möglichkeiten (vgl. bspw. [3], [7]). Wir schlagen die Anwendung eines kombinierten Verfahrens aus paarweisem Kriterienvergleich und Verteilung einer fixen Punktzahl vor. Konkret schlagen wir vor in einem ersten Schritt im Rahmen eines paarweisen Kriterienvergleichs einem Kriterium k_i einen Wichtigkeitswert k_{ij} von 2 zuzuweisen, wenn dieses Kriterium vom betroffenen Nutzer als wichtiger als das Vergleichskriterium k_j erachtet wird. Werden beide Kriterien als gleich wichtig erachtet, soll ein Wichtigkeitswert k_{ij} von 1 zugewiesen werden, wird Kriterium k_i als weniger wichtig als Kriterium k_j erachtet, ein Wichtigkeitswert k_{ij} von 0. Um anschließend den gesamten relativen Gewichtungsfaktor eines Kriteriums k_i zu ermitteln, wird ein relativer Gewichtungsfaktor für dieses Kriterium durch Division der Summe aller relativen Wichtigkeitswerte für dieses Kriterium durch die Summe aller relativen Wichtigkeitswerte aller betrachteten Kriterien vorgenommen.

Durch diesen relativen Gewichtungsfaktor ist das relative Gewicht für ein Kriterium k_i bestimmt. Zur Bestimmung des spezifischen absoluten Gewichts des Kriteriums schlagen wir in unserem Ansatz vor, das Verfahren der Verteilung einer festen Punktzahl zu verwenden. Ausgehend von der oben beschriebenen Gleichgewichtung der beiden Hauptkriterien Informationswert und Übertragungskosten mit 50 Prozentpunkten, schlagen wir vor jeweils diese 50 Prozentpunkte, die die Summe der Subkriterien eines Hauptkriteriums bilden sollen, auf die Kriterien dadurch zu verteilen, dass der relative Gewichtungsfaktor mit diesen 50 Prozentpunkten multipliziert wird. Dies führt zur Bestimmung eines Gewichtes für ein Kriterium k_i wie in Gleichung (4) beschrieben.

$$\text{Gewicht}(k_i) = g(k_i) = \text{relativer Gewichtungsfaktor}(k_i) \cdot 50\% = \frac{\sum_j k_{ij}}{\sum_i \sum_j k_{ij}} \cdot 50\% \quad (4)$$

Nachdem die Alternativenmenge A und die Kriterienmenge k hergeleitet wurden und dargestellt wurde, wie den einzelnen Kriterien in k systematisch Gewichte zugeordnet werden können, wird dieser Input in ein Scoresheet integriert (vgl. Bild 2). Dieses Scoresheet wird nun bei jedem Eventauftritt mit den gegebenen Inputparametern und auf Basis einer Sieben-Punkt-Likert-Skala anhand des aktuellen Kontextes auf dem drahtlosen Sensorknoten ausgewertet, sodass nun Events lokal als übertragungsrelevant und nicht-übertragungsrelevant kategorisiert werden können und entsprechend eine Übertragung der korrespondierenden Eventinformationen veranlasst wird oder nicht. Die konkrete Entscheidung, ob ein Event als übertragungsrelevant oder nicht-übertragungsrelevant eingeordnet wird erfolgt basierend auf der Definition übertragungsrelevanter Events (vgl. Gleichungen (1) und (2)) durch Subtraktion der Summe der gewichteten Scores der Kriterien des Hauptkriteriums Übertragungskosten von der Summe der gewichteten Scores der Kriterien des Hauptkriteriums Informationswert. Wenn diese Differenz einen Wert größer oder gleich Null aufweist, wird das Event als übertragungsrelevant eingeordnet und die Eventinformationen übertragen. Weist die Differenz einen Wert kleiner Null auf, wird das Event als nicht-übertragungsrelevant kategorisiert und die Eventinformationen entsprechend nicht übertragen.

Kriterien:	Gar nicht 0	Mittel 3	Maximum 6	Score	Gewicht (%)	Gewichteter Score	
Informationswert							
▪ Ausmaß Grenzwert- überschreitung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S_{IW_1}	g_{IW_1}	$GS_{IW_1} = g_{IW_1} \cdot S_{IW_1}$
▪ Dauer Grenzwert- überschreitung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S_{IW_2}	g_{IW_2}	$GS_{IW_2} = g_{IW_2} \cdot S_{IW_2}$
▪ Güterwert	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S_{IW_3}	g_{IW_3}	$GS_{IW_3} = g_{IW_3} \cdot S_{IW_3}$
▪ Kundenwert	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S_{IW_4}	g_{IW_4}	$GS_{IW_4} = g_{IW_4} \cdot S_{IW_4}$
▪ Zeit zum nächsten Umschlagpunkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	S_{IW_5}	g_{IW_5}	$GS_{IW_5} = g_{IW_5} \cdot S_{IW_5}$
Übertragungskosten							
▪ Energiekosten der Datenübertragung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$S_{ÜK_1}$	$g_{ÜK_1}$	$GS_{ÜK_1} = g_{ÜK_1} \cdot S_{ÜK_1}$
▪ Monetäre Kosten der Datenübertragung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$S_{ÜK_2}$	$g_{ÜK_2}$	$GS_{ÜK_2} = g_{ÜK_2} \cdot S_{ÜK_2}$
▪ Aktuelle Energiereserven	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	$S_{ÜK_3}$	$g_{ÜK_3}$	$GS_{ÜK_3} = g_{ÜK_3} \cdot (6 - S_{ÜK_3})$
Gesamtscore =						$\sum_{i=1}^5 GS_{IW_i} - \sum_{j=1}^3 GS_{ÜK_j}$	

Bild 2: Scoresheet zur lokalen Erkennung übertragungsrelevanter Events

5 Simulation – Experimente und Ergebnisse

Um die Effizienz unseres Scoresheet-basierten Verfahrens zu untersuchen, haben wir verschiedene Simulationen eines temperaturgeführten Transportes mit einer Transportdauer von fünf Tagen durchgeführt. Hierbei haben wir unser Verfahren mit einem *periodischen Reporting-Verfahren* verglichen und einem *Grenzwert-basierten Verfahren*. Das periodische Reporting-Verfahren versendet in regelmäßigen Abständen Statusnachrichten. Das Grenzwert-basierte Verfahren vergleicht auf einem drahtlosen Sensorknoten die aktuellen Messwerte mit vorgegebenen Grenzwerten und erkennt ein Event bei einer Grenzwertverletzung. Nur in diesem Fall werden entsprechende Informationen übertragen.

Da unserem Verfahren die Idee zugrunde liegt, lokal auf einzelnen drahtlosen Sensorknoten über das Versenden von Eventinformationen zu entscheiden, haben wir uns in den Simulationen auf die Betrachtung des Verhaltens eines einzelnen drahtlosen Sensorknotens konzentriert. Als Vergleichskriterium zwischen den Verfahren verwenden wir die Anzahl der versendeten Datenpakete und den Energieverbrauch des drahtlosen Sensorknotens, aus dem wir die am Ende des simulierten Transportprozesses verbleibende Energie ableiten. Als initiales Energiebudget verwenden wir einen Wert von 10000 Joule. Dies entspricht ungefähr der Energie zweier wiederaufladbarer AA-Akkuzellen, welche in den meisten drahtlosen Sensorknoten als Energiequellen zum Einsatz kommen. Weiterhin nutzen wir in der Simulation die in Tabelle 1 angegebenen Energieverbräuche für die verschiedenen Betriebsmodi des Sensorknotens, die aus Datenblättern aktueller drahtloser Sensorknoten entnommen wurden.

Ruhezustand	Sensor-abtastung	Datenübertragung	Datenverarbeitung (Periodisch)	Datenverarbeitung (Grenzwert-basiert)	Datenverarbeitung (Scoresheet-basiert)
2 mJ (pro 10 Sekunden-Zyklus)	1 μ J	135 mJ	Keine Verarbeitung	1 mJ	5 mJ

Tabelle 1: Energieverbrauchswerte für die Simulation verschiedener Betriebsmodi

Bei der Simulation des periodischen Reporting-Verfahrens wurde auf Basis von [10] ein Abtast- und Sendeintervall für den simulierten drahtlosen Sensorknoten von 10 Sekunden gewählt. Für die Simulation des Grenzwert-basierten Ansatzes und unseres Scoresheet-basierten Ansatzes wurden basierend auf den Angaben in [6] Temperaturgrenzwerte von 8°C und 15°C gewählt. Weiterhin wurden für die Simulation unseres Scoresheet-basierten Verfahrens die in Tabelle 2 angegebenen Parameter verwendet.

	0	1	2	3	4	5	6	Gewicht (in %)
Ausmaß Grenzwert-überschreitung ¹	0%	]0%,10%],]0%,-10%]	]10%,20%],]-10%,-20%]	]20%,30%],]-20%,-30%]	]30%,40%],]-30%,-40%]	]40%,50%],]-40%,-50%]	>+50%, <-50%	12.5
Dauer Grenzwert-überschreitung ¹	0	]0h,2h]	]2h,4h]	]4h,6h]	]6h,10h]	]10h,16h]	>16 h	20
Güterwert ²						X		2.5
Kundenwert ²				X				2.5
Zeit zum nächsten Umschlagpunkt ¹	[0,1/7[	[1/7,2/7[	[2/7,3/7[	[3/7,4/7[	[4/7,5/7[	[5/7,6/7[	[6/7,7/7[	12.5
Energiekosten der Datenübertragung ²				X				8.5
Monetäre Kosten der Datenübertragung ²				X				8.5
Aktuelle Energie-reserven ¹	[0,1/7[	[1/7,2/7[	[2/7,3/7[	[3/7,4/7[	[4/7,5/7[	[5/7,6/7[	[6/7,7/7[	33

¹ dynamische Auswertung während des Transports

² statischer Wert, vor dem Transport definiert

Tabelle 2: Scoresheet-Parameter für die Simulation des Scoresheet-basierten Verfahrens

Die Ergebnisse unserer Simulationen können Bild 3 entnommen werden. Wie erwartet wächst die kumulierte Anzahl an übertragenen Datenpaketen für das periodische Verfahren linear mit dem gewählten Sensor- und Sendeintervall von 10 Sekunden. Dies führt im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren zu einem höheren Energieverbrauch, der ein schnelleres Absinken der verbleibenden Energiereserven des drahtlosen Sensorknotens verursacht und zu einer entsprechend kürzeren Lebenszeit des drahtlosen Sensorknotens führt. Im Vergleich zwischen Grenzwert-basiertem Verfahren und Scoresheet-basiertem

Verfahren werden die Vorteile einer lokalen Kategorisierung von Events in übertragungsrelevante und nicht-übertragungsrelevante Events anhand des entwickelten Verfahrens ersichtlich. Zu Beginn der Simulation verhalten sich beide Verfahren noch ähnlich, da anfangs hohe Temperaturüberschreitung von mehr als 10°C sowohl beim Grenzwert-basierten Verfahren als auch, u.a. aufgrund des Ausmaßes der Grenzwert-überschreitung, beim Scoresheet-basierten Verfahren eine entsprechende Datenübertragung auslöst. Die später auftretenden geringen, kurzzeitigen Temperaturüberschreitungen führen dann allerdings dazu, dass beim Grenzwert-basierten Verfahren immer wieder Datenübertragungen initiiert werden, beim Scoresheet-basierten Verfahren diese ab dem Erreichen einer bestimmten Energiereserve allerdings aufgrund ihrer kurzen Dauer und ihres geringen Ausmaßes als nicht-übertragungsrelevante Events kategorisiert werden und keine Datenübertragungen stattfinden. Dies führt zu Einsparungen an Datenübertragungen und Energie. Beim Auftreten der massiven Grenzwertüberschreitung nach ca. 70 Stunden verhalten sich der Grenzwert-basierte Ansatz und der Scoresheet-basierte Ansatz wieder nahezu gleich, da aufgrund des hohen Ausmaßes der Temperaturüberschreitung und auch der Dauer dieses Event vom Scoresheet-basierten Verfahren wieder als übertragungsrelevant identifiziert wird und deshalb eine Datenübertragung stattfindet. Zusammenfassend kann über den gesamten Simulationsverlauf festgestellt werden, dass der Scoresheet-basierte Ansatz im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren sowohl im Bereich der kumulierten Anzahl an Datenübertragungen als auch im Bereich der Energieeffizienz (abgebildet in Form der noch verbleibenden Energie am Ende des simulierten Transportes) am besten abschneidet. Dies führt nicht nur zu einer längeren Lebenszeit des drahtlosen Sensorknotens, sondern durch die geringere Anzahl an Datenübertragungen auch zu weniger kostenpflichtigen Funkverbindungen zur Datenübertragung an Entscheidungsträger, was sich positiv auf die Kosteneffizienz auswirkt. Letztlich kann aus Nutzersicht ebenfalls eine verbesserte Qualität der übertragenen Daten festgestellt werden, da die Datenübertragung explizit auf Basis der Nutzerpräferenzen erfolgt, wie sie im Scoresheet abgebildet wurden.

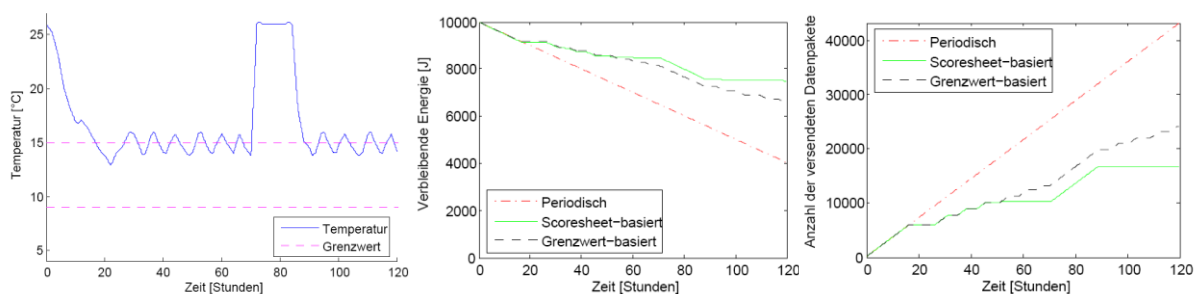


Bild 3: Temperaturkurve und Grenzwerte, Anzahl der versendeten Datenpakete und verbleibende Energie für einen simulierten Transport von 120 Stunden

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde das Anwendungspotential drahtloser Sensornetztechnologie zur Echtzeit-Eventerkennung und -benachrichtigung in der Logistik skizziert und verschiedene Anforderungen für einen erfolgreichen Einsatz in diesem Kontext dargestellt. Hierbei wurden als besonders wichtige Anforderungen ein kosten- und energieeffizienter Betrieb und eine hohe Kundenzufriedenheit identifiziert. Als grundlegendes Konzept zur

expliziten Adressierung dieser Anforderungen wurde das Konzept der übertragungsrelevanten Events eingeführt. Zur Realisierung dieses Konzepts für eine effiziente, kontextbasierte Eventerkennung und -benachrichtigung in Transportprozessen mittels drahtloser Sensornetztechnologie wurde ein Scoresheet-basiertes Verfahren entwickelt. Im Rahmen von Simulationsexperimenten konnten die Effizienz und die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens im Vergleich zu einem periodischen und einem Grenzwert-basierten Reporting-Verfahren gezeigt werden.

Da das aktuelle Verfahren nur die Handlungsalternativen Übertragen oder Nicht-Übertragen von Eventinformationen betrachtet, besteht hier u.a. die Möglichkeit das Verfahren noch um weitere Handlungsoptionen, wie z.B. das Speichern und spätere Versenden von momentan nicht-übertragungsrelevanten Eventinformationen zu erweitern. Außerdem gilt es Möglichkeiten für eine dynamische Veränderung des verwendeten Scoresheets zu untersuchen, um so eine Anpassung an sich ändernde Umstände zu ermöglichen.

7 Literatur

- [1] Akyildiz, IF; Su, W; Sankarasubramaniam, Y; Cayirci, E (2002): Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* 38:393-422.
- [2] Bretzke, W-R; Klett, M (2004): Supply Chain Event Management als Entwicklungspotenzial für Logistikdienstleister. In: Beckmann, H (Hrsg.), *Supply Chain Management – Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen*. Springer, Berlin.
- [3] Domschke, W; Scholl, A (2005): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. 3. Auflage. Springer, Berlin.
- [4] Fleisch, E; Mattern, F (Hrsg.) (2005): Das Internet der Dinge. Springer, Berlin.
- [5] Jedermann, R; Behrens, C; Laur, R; Lang, W (2007): Intelligent containers and sensor networks. In: Hülsmann, M; Windt, K (Hrsg.), *Understanding autonomous cooperation and control in logistics*. Springer, Berlin.
- [6] Jedermann, R; Schouten, R; Sklorz, A; Lang, W; van Kooten, O (2006): Linking keeping quality models and sensor systems to an autonomous transport supervision system. In: Kreyenschmidt, J; Petersen, B (Hrsg.), *Proceedings of the 2nd International Workshop Cold Chain Management*. Bonn.
- [7] Kahle, E (2001): Betriebliche Entscheidungen. 6. Auflage. Oldenbourg, München.
- [8] Nissen, V (2002): Supply Chain Event Management. *Wirtschaftsinformatik* 44(5): 477-480.
- [9] Ruiz-Garcia, L; Barreiro, P; Rodriguez-Bermejo, J; Robla, JI (2007): Review. Monitoring the intermodal, refrigerated transport of fruit using sensor networks. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5(2):142-156.
- [10] Son, VQ; Wenning, B-L; Timm-Giel, A; Görg, C (2009): A model of wireless sensor networks using context-awareness in logistic applications. In: *Proceedings of the 9th International Conference on ITS Telecommunications*. Lille.

- [11] Stölzle, W. (2008): Supply Chain Event Management. In: Klaus, P; Krieger, W (Hrsg.), *Gabler Lexikon Logistik*. 4. Auflage. Gabler, Wiesbaden.
- [12] Teuteberg, F; Weberbauer, M (2006): Mobile Supply Chain Event Management. In: Pfohl, H-C; Wimmer, T (Hrsg.), *Wissenschaft und Praxis im Dialog*. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg.
- [13] Traulsen, H; Kaffenberger, C; Pflaum, A (2010): Senkung der Versicherungsprämien bei Überlandtransporten mittels geeigneter Smart Object Technologien. In: Kolla, R (Hrsg.), *Tagungsband des 9. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze*. Würzburg.
- [14] Zangemeister, C (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4. Auflage. Wittemann, München.
- [15] Zöllner, S; Reinhardt, A; Meyer, M; Steinmetz, R (2010): A concept for cross-layer optimization of wireless sensor networks in the logistics domain by exploiting business knowledge. In: *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Local Computer Networks*. Denver.
- [16] Zöllner, S; Reinhardt, A; Meyer, M; Steinmetz, R (2010): Deployment of wireless sensor networks in logistics – potential, requirements, and a testbed. In: Kolla, R (Hrsg.), *Tagungsband des 9. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze*. Würzburg.