

# **Autonome Sensorsysteme in der Transport- und Lebensmittellogistik**

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik  
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr. Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Reiner Jedermann

wohnhaft in Bremen

Referent: Prof. Dr.-Ing. W. Lang  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Benecke

Eingereicht am: 2. Juli 2009  
Tag des Promotionskolloquiums: 24. November 2009

**Kurzfassung:** Durch eine genauere Überwachung von Lebensmitteln während des Transportes lassen sich Verluste reduzieren und die Warenqualität steigern. Bestehende Fernüberwachungs- oder Telemetriesysteme können dies jedoch nur eingeschränkt leisten. In der Regel wird die Temperatur nur an einer oder zwei Stellen gemessen. Die Auswertung der Daten musste bisher von Hand erfolgen.

In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, das eine räumliche Verteilung der Temperatur und anderer Einflussparameter misst und die Daten bereits im Transportmittel auswertet. Das System passt die Überwachung automatisch an verschiedene Waren an. Dieser intelligente Container kombiniert Technologien aus den Bereichen RFID, drahtlose Sensornetze und Telemetrie, die bisher nur als Einzellösungen eingesetzt wurden.

Energiesparende Prozessoren mit hoher Rechenleistung machen es möglich, Algorithmen zur Bewertung der Daten in das Fahrzeug oder einen an der Ware angebrachten Sensor zu verlagern. Ziel der Arbeit ist es, die Transportüberwachung zu einem autonomen Sensorsystem zu erweitern, welches die Messdaten lokal verarbeitet und selbständig entscheidet, ob eine kritische Situation vorliegt.

Dabei wird ein möglicher Qualitätsverlust von Lebensmitteln anhand eines auf dem dynamischen Temperaturverlauf basierenden Haltbarkeitsmodells abgeschätzt. Die Qualitätsüberwachung je Wareneinheit wird durch einen individuellen sensorischen Frachtbrief in Form eines Softwareagenten ausgeführt. Die Möglichkeiten hierzu werden anhand eines Demonstrationssystems zur Überwachung von Lebensmitteltransporten vorgestellt.

**Abstract:** A concise supervision of food products during transport is an essential precondition for the improvement of their quality and reduction of losses. However, existing remote or telemetric systems implement only parts of the entire supervision task. Standard systems measure temperature only at one or two points, and the evaluation of sensor data has to be done manually.

This thesis presents a system which measures a spatial profile of temperature and other parameters. The idea of remote transport supervision is extended to a self-contained sensor system that locally processes measurement data and detects critical situations autonomously. The algorithms for sensor data evaluation are implemented inside the means of transport; they can either share a common embedded processor unit or run separately on wireless sensors nodes, which are attached to the loaded freight objects.

The system automatically adapts the supervision process to different kinds of goods. This 'intelligent container' combines technologies from different fields, such as RFID, wireless sensor networks, and telemetric system, which have so far been applied separately.

A shelf life model, based on the dynamic temperature profile, estimates the amount of quality loss during transport. The quality supervision is implemented as a set of software agents. Each freight object is supervised by an individual 'sensory way bill'. A demonstration system for the supervision of food transports shows the feasibility of this new approach.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Anstehendes Problem und Lösungsansatz .....	5
1.1.	Stand der Technik .....	5
1.2.	Softwareagenten, Autonome Sensorsysteme und Selbststeuerung .....	6
1.3.	Vorgesehener neuer Lösungsbeitrag .....	9
2.	Passive und aktive Technologien zur Transportüberwachung .....	12
2.1.	Aktive Tags und drahtlose Sensornetze .....	12
2.1.1.	Semi-passive Tags .....	13
2.1.2.	Definition im Rahmen dieser Arbeit .....	13
2.1.3.	Drahtlose Sensornetze .....	13
2.1.4.	Protokolle .....	14
2.1.5.	Technische Herausforderungen .....	15
2.2.	Passive Kommunikation .....	15
2.2.1.	Wirkprinzip im Nah- und Fernfeld .....	16
2.2.2.	Frequenzbereiche .....	16
2.2.3.	Physikalische Überlegungen zur Reichweite .....	16
2.2.4.	Wahl des Frequenzbereiches .....	18
2.3.	Leistungsfähigkeit von UHF-RFID im Lebensmittelbereich .....	18
2.3.1.	Verfügbare RFID-Tags .....	19
2.3.2.	Verminderung der Identifikations-/Schreibraten durch wasserhaltige Waren .....	19
2.3.3.	Zeitbedarf zur Datenübertragung .....	23
2.3.4.	Versuche mit bewegter Ware .....	26
2.3.5.	Messung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit .....	29
2.4.	RFID zur Temperaturoaufzeichnung .....	29
2.4.1.	Messabweichung .....	30
2.4.2.	Thermische Reaktionszeit .....	31
2.5.	Grenzen und mögliche Anwendungen von UHF-RFID .....	32
2.5.1.	Vergleich aktiver und passiver Kommunikation .....	32
2.5.2.	Mögliche Lösungen .....	33
2.6.	Telemetrie .....	34
2.6.1.	Sensorik und Außenkommunikation .....	34
2.6.2.	Anwendungsbeispiele .....	35
3.	Erforderliche Messsysteme für neue Planungskonzepte in der Lebensmittellogistik .....	37
3.1.	Neue Konzepte zur Lager- und Transportplanung .....	37
3.1.1.	Steuerung des Lagerbestandes .....	37
3.1.2.	Zuordnung von Chargen zu Transportaufträgen .....	38
3.1.3.	Mögliche Einsparungen durch dynamic FEFO .....	39
3.2.	Sensorsysteme zur Qualitätsüberwachung .....	40
3.2.1.	Time-Temperatur-Indikatoren und Datenlogger .....	40
3.2.2.	Überwachung weiterer Umweltparameter .....	41
3.2.3.	Erforderliche Messauflösung eines Ethylen Sensors .....	43
3.3.	Einflüsse und Störungen der Temperaturverteilung .....	43
3.3.1.	Globale und lokale Einflüsse .....	44
3.3.2.	Aufgaben des Sensornetzes .....	44
3.4.	Experimentelle Bestimmung von Temperaturprofilen .....	44
3.4.1.	Zeitkorrektur der Messwerte .....	46
3.4.2.	Temperaturabweichungen in Seecontainern .....	47
3.5.	Räumliche Interpolation der Messwerte .....	47
3.5.1.	Nomenklatur und Fehlermaß .....	47

3.5.2.	Lineare Interpolationsmodelle .....	47
3.5.3.	Inverse Distanzgewichtung .....	48
3.5.4.	Kriging-Verfahren .....	48
3.5.5.	Kriging mit räumlichem Trend.....	50
3.5.6.	Lineare Kurven-Approximation .....	51
3.5.7.	Vergleich der Interpolations-Verfahren.....	51
3.5.8.	Bewertung der linearen Approximation .....	53
3.5.9.	Mögliche Verbesserungen durch nicht-lineare und Zustandsmodelle.....	54
3.6.	Anzahl der notwendigen Stützstellen .....	55
3.7.	Plausibilitätsprüfung der Messwerte anhand des Kriging- Verfahrens .....	57
3.8.	Verlauf der Warenkerntemperatur .....	58
3.8.1.	Überschlagsrechnung für einen Container .....	58
3.8.2.	Temperaturanstieg innerhalb einer Palette und einzelner Früchte .....	59
3.9.	Zusammenfassung .....	61
4.	Zusammenstellen einer Modellbasis zur Qualitätsvorhersage .....	62
4.1.	Was ist Qualität .....	62
4.1.1.	Skalen zur Bewertung der Qualität.....	62
4.1.2.	Ansätze zur Modellierung .....	63
4.2.	Beschreibung des Reaktionsverlaufs durch Differentialgleichungen.....	63
4.2.1.	Beispiel für Pilze .....	64
4.2.2.	Probleme des Reaktionsmodells.....	65
4.2.3.	Anwendung zur Generierung von Testwerten.....	66
4.3.	Keeping Quality und Shelf-Life .....	66
4.3.1.	Shelf-Life Modell für dynamische Temperatur.....	67
4.3.2.	Abhängigkeit vom Erntezustand .....	68
4.3.3.	Abweichende Temperaturabhängigkeit.....	68
4.3.4.	Zeitpunkt einer Temperaturabweichung.....	68
4.4.	Der Table Shift Approach als weiteres Modell .....	69
4.4.1.	Vergleich mit dem Shelf-Life Modell .....	71
4.4.2.	Monotonie der Referenzkurven .....	71
4.4.3.	Unterschiedliche Reaktionsraten .....	71
4.4.4.	Messtoleranzen der Referenzkurven.....	71
4.5.	Weitere Modelle .....	72
4.6.	Anwendung auf gemessene Daten.....	73
4.7.	Zusammenfassung .....	74
4.7.1.	Shelf-Life Modell .....	74
4.7.2.	Table-Shift-Approach.....	75
4.7.3.	Grenzen und Anwendung der Modelle.....	75
5.	Realisierungsebenen des Entscheidungssystems .....	76
5.1.	Netzwerk intelligenter Objekte.....	76
5.2.	Selbststeuerung durch autonome Prozesse .....	77
5.3.	Erweiterte Kriterien zur Bewertung der Systemperformance .....	77
5.4.	Entscheidungen anhand einer lokalen Sichtweise .....	78
5.5.	Mögliche Implementierungsebenen .....	79
5.6.	Grad der Entscheidungsfreiheit .....	80
5.7.	Kommunikation als einschränkender Faktor .....	81
5.7.1.	Vergleich des Energiebedarfs.....	81
5.7.2.	Informationsquellen und Senken .....	82
5.7.3.	Länge des Kommunikationspfades.....	83
5.7.4.	Beispiel 1: Intelligentes Paket zur adaptiven Routenplanung .....	83
5.7.5.	Beispiel 2: Überwachung sensibler Waren.....	84
5.7.6.	Zusammenfassung .....	85

6.	Der intelligente Container .....	86
6.1.	Warenüberwachung durch warenspezifische Softwareagenten.....	86
6.1.1.	Der sensorische Frachtbrief.....	87
6.1.2.	RFID zur Steuerung des Informationsflusses.....	88
6.2.	Auswahl des Softwareframeworks .....	89
6.2.1.	Das JADE Framework für Softwareagenten .....	89
6.2.2.	Erweiterung der Agentenmobilität .....	90
6.3.	Management der warenspezifischen Agenten .....	91
6.3.1.	Softwarekomponenten des Transportmittels .....	92
6.3.2.	Weitere Komponenten der Lagersoftware.....	93
6.3.3.	Elemente der Nachricht ‚PackageData‘ .....	93
6.3.4.	Befehle zur Agentenübertragung.....	95
6.3.5.	Format der Nachricht.....	96
6.3.6.	Ablauf der Agentenübertragung im Demonstrationsszenario .....	96
6.3.7.	Erweitertes Demonstrationsszenario .....	99
6.4.	Hardware des Demonstrationssystems .....	99
6.4.1.	Prozessormodul .....	100
6.4.2.	RFID Reader.....	100
6.4.3.	Sensornetzwerk.....	101
6.4.4.	Externe Kommunikation.....	101
6.4.5.	Stromversorgung .....	101
6.5.	Realisierung auf einem Embedded System .....	101
6.5.1.	Java auf embedded Systems .....	102
6.5.2.	Agentenframework für embedded Systems.....	102
6.6.	Ressourcenbedarf und Systemperformance.....	103
6.6.1.	Speicher der Prozessorplattform.....	103
6.6.2.	Datenvolumen bei der Kommunikation .....	103
6.6.3.	Rechenzeit .....	103
6.7.	Alternative Frameworks .....	106
7.	Weitere lokale Entscheidungsprozesse .....	107
7.1.	Berechnung von Haltbarkeitsmodellen auf der Ebene der Sensorknoten .....	107
7.1.1.	Ziele und Schwierigkeiten bei der Umsetzung.....	108
7.1.2.	Darstellung von Fließkommazahlen als Integer .....	108
7.1.3.	Skalierung der Parameter des Shelf-Life Modells.....	108
7.1.4.	Berechnung eines Modellschrittes.....	109
7.1.5.	Umsetzung der Exponentialfunktion.....	110
7.1.6.	Energiebedarf zur Berechnung des Modells.....	111
7.1.7.	Anwendung.....	112
7.1.8.	Überwachung der Kühlkette durch intelligente RFID.....	113
7.2.	Verlagerung der Routenplanung in das Transportmittel .....	114
7.2.1.	Beispielszenario und heuristischer Ansatz .....	114
7.2.2.	Umsetzung und Simulation .....	115
8.	Zusammenfassung .....	118
8.1.	Systemebenen und Grad der Autonomie .....	119
8.1.1.	Vorhersage der Resthaltbarkeit durch autonome Prozesse.....	120
8.1.2.	Verteilte Prozesse zur Routenplanung.....	121
8.2.	Einschränkende Faktoren bei der Umsetzung lokaler Prozesse .....	122
8.2.1.	Energie als einschränkender Faktor.....	122
8.2.2.	Einschränkungen passiver Funktechnologien .....	123
8.3.	Selbststeuerung in der Transportüberwachung.....	123
8.3.1.	Sensorknoten als selbststeuernde Objekte.....	124
8.4.	Verbesserung der Transportüberwachung durch autonome Sensorsysteme .....	125

9.	Referenzen und Verzeichnisse .....	127
9.1.	Bilder .....	127
9.2.	Tabellen .....	128
9.3.	Referenzen .....	128