

Xinwei Wang

**Dezentrales Datenmanagement  
in drahtlosen Sensorsystemen  
für die selbststeuernde  
Transportlogistik**

# Dezentrales Datenmanagement in drahtlosen Sensorsystemen für die selbststeuernde Transportlogistik

Dem Fachbereich Physik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades einer  
DOKTOR-INGENIEURIN (Dr.-Ing.)  
vorgelegte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Xinwei Wang  
aus Jilin, China

Referent: Professor Dr.-Ing. R. Laur  
Korreferent: Professor Dr.-Ing. W. Lang

Eingereicht am: 24.02.2020  
Tag des Promotionskolloquiums: 24.11.2020



Berichte aus der Elektronik

**Xinwei Wang**

**Dezentrales Datenmanagement in drahtlosen Sensor-  
systemen für die selbststeuernde Transportlogistik**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7802-2

ISSN 1436-3801

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Im Rahmen des Sonderforschungsprojekts „Selbststeuernde logistische Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ wurden die möglichen Anwendungen und die technischen Grenzen der drahtlosen Sensornetzwerke für die Überwachung der Umgebung im Container und der Warenqualität in der Transportlogistik eingehend untersucht. Die Transportprozesse für Lebensmittel stellen an das Überwachungssensorsystem im Container hohe Anforderungen wie eine hohe Überwachungsqualität, Robustheit der Sensordaten und hohe Energieeffizienz.

Um die Selbststeuerungsfähigkeit des gesamten Sensorüberwachungssystems zu erhöhen, wird das Konzept „**Dezentrales Datenmanagement**“ in der vorliegenden Arbeit entwickelt und untersucht. Dieses Konzept verteilt die energieaufwendigen Aufgaben sowie Datenbewertungen, -verarbeitungen und -austausch auf möglichst untergeordnete Strukturebenen des Sensornetzwerks. Dadurch werden unnötige und unzuverlässige Messdaten bereits lokal und zeitnah reduziert und korrigiert.

Kern des „Dezentralen Datenmanagements“ ist die Behandlung der zeitlich und räumlich redundanten Sensordaten und die fehlerhaften Datenübertragungen, welche die zwei wesentlichen Probleme im Sensorüberwachungssystem mit der beschränkt verfügbaren Energie darstellen. Durch Vergleich mit anderen Verfahren werden die geeigneten selbststeuernden Verfahren für die transportlogistischen Anwendungen ausgewählt, untersucht, implementiert und durch Simulation sowie in der realen Testumgebung validiert.

Die Verfahren des „Dezentralen Datenmanagements“ ermöglichen eine homogene Verteilung der energieaufwendigen Aufgaben auf das gesamte Überwachungssensorsystem. Die redundanten und fehlerhaften Messdaten werden erheblich reduziert. Der Einsatz des gesamten „Dezentralen Datenmanagements“ erzielt ein selbststeuerndes Überwachungssystem mit erhöhter Flexibilität, Energieeffizienz und Überwachungsqualität.



# Abstract

During the German research project „Self-managed logistic processes - change of paradigm and the limitation“ (Selbststeuernde logistische Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen) the University Bremen researched the possible implementation and usage and the technical limitation of the wireless sensor networks as the supervision system in the container. The transport process of food and vegetables requests a high quality, robustness of sensor data and a high energy efficiency of the sensor supervision system.

To enhance the autonomous capability of the sensor system, this work develops the concept „decentralized data management“. This concept distributes the energy-consuming tasks like data evaluation, data processing and data exchange to the possibly deep level of the sensor network structure. This can reduce and correct the unnecessary and unreliable sensor data locally, before they are transmitted to the high level.

The core of the concept „decentralized data management“ consists of two main parts: handling of temporal and spatial redundant data and handling of erroneous data transmission. These two parts of the data management aim to solve significant problems in the sensor supervision system with limited resource. This work chose the most appropriate methods for the transport logistic applications by comparing with other methods. The chosen algorithms were analyzed, implemented and validated by simulation and practical measurements in the container.

The algorithms and methods of the concept „decentralized data management“ enable a homogeneous distribution of the energy consuming tasks to all participants of the sensor system. This leads to a remarkable reduction of the redundant and erroneous sensor data. The „decentralized data management“ achieves an autonomous sensor supervision system with high flexibility, energy efficiency and supervision quality.





# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM) der Universität Bremen und im Rahmen des Sonderforschungsprojekts 637 „Selbststeuernde logistische Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Leuten bedanken, die mir geholfen und mich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Rainer Laur. Professor Laur hat mich immer motiviert und ermutigt, meine Arbeit fertigzustellen, auch als ich schon in der Industrie arbeitete und ich vor einer großen Herausforderung stand. Ich bedanke mich ganz herzlich für seine fachliche Betreuung und die unendliche Geduld und Unterstützung.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Professor Walter Lang für die Übernahme des Korreferats und für die gute Zusammenarbeit in dem SFB Projekt.

Herrn Professor Alberto Garcia-Ortiz und Herrn Professor Karl-Ludwig Krieger danke ich herzlich für die Übernahme der Prüfertätigkeit.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dieter Silber und Herrn Professor Walter Anheier für ihr Interesse an meiner Arbeit und ihre Anwesenheit bei meinem Promotionskolloquium.

Weiterer Dank gilt Frau Karin Zielinski, Herrn Ole Bischoff, Herrn Jochen Rust und allen Kolleginnen und Kollegen, die zusammen mit mir am ITEM gearbeitet haben, für die gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung.

Ich möchte mich auch bei den Studentinnen und Studenten bedanken, die mich bei meiner Forschung unterstützt haben, stellvertretend seien hier Frau Yangyang Zhang und Herr Zan Li genannt.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Zhenyu und meiner ganzen Familie, die mich immer bedingungslos unterstützt haben. Obwohl meine Eltern meine Arbeit nicht mehr sehen können, bin ich ganz sicher, dass sie sich für mich freuen und stolz auf mich wären.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Eigener Beitrag . . . . .	3
1.3	Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Drahtlose Sensornetze für die selbststeuernde Transportlogistik</b>	<b>7</b>
2.1	Selbststeuerung der Transportlogistik . . . . .	8
2.2	Drahtlose Sensornetze . . . . .	11
2.2.1	Sensorknoten . . . . .	11
2.2.2	IEEE 802.15.4-Standard und ZigBee . . . . .	13
2.3	Anforderung der selbststeuernden Transportlogistik an die Sensorsysteme . . . . .	15
2.4	Struktur des Überwachungssystems . . . . .	17
2.5	Dezentrales Datenmanagement . . . . .	19
2.5.1	Management redundanter Sensordaten . . . . .	19
2.5.2	Management fehlerhafter Sensordaten . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Redundanzmanagement</b>	<b>23</b>
3.1	Dynamische Steuerung der Messintervalle . . . . .	24
3.1.1	Dynamische Steuerung der Messintervalle im Container . . . . .	25
3.1.2	Prädiktion der Entwicklungstendenz der Messwerte . . . . .	26
3.1.2.1	Die Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	26
3.1.2.2	Modifizierte Adams Methode . . . . .	28
3.1.2.3	Künstliche neuronale Netze . . . . .	29
3.1.2.4	Auswahl des Prädiktors . . . . .	35
3.1.3	Fine-Tuning der KNN-Struktur . . . . .	39
3.1.3.1	Auswahl der KNN-Architektur für zwei Parameter . . . . .	39
3.1.3.2	Auswahl der optimalen Lernrate . . . . .	42
3.1.4	Bestimmung der Messintervalle . . . . .	42
3.1.5	Auswertung des Verfahrens . . . . .	44
3.2	Erkennung der räumlich redundanten Sensorknoten . . . . .	49
3.2.1	Ähnlichkeit der Messdatenreihen . . . . .	49
3.2.2	Auswahl der räumlich redundanten Clustermember . . . . .	51
3.2.3	Auswertung der Erkennung der räumlich redundanten Sensorknoten . . . . .	53

3.2.3.1	Auswertung der Ähnlichkeit von Sensordaten . . . . .	53
3.2.3.2	Auswertung der Auswahl räumlich redundanter Cluster- member . . . . .	57
3.3	Hybridverfahren zur Steuerung der Kommunikationshäufigkeit . . . . .	61
3.3.1	Konzept und Vorgehensweise . . . . .	61
3.3.2	Simulation des Hybridverfahrens . . . . .	63
3.3.2.1	Einfluss von zeitlicher und räumlicher Redundanz . . . . .	63
3.3.2.2	Überwachungsqualität . . . . .	69
3.4	Zusammenfassung . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Fehlermanagement</b> . . . . .	<b>73</b>
4.1	Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit der Kommunikation im Container . . . . .	74
4.1.1	Untersuchung der Einflussfaktoren . . . . .	74
4.1.2	Fehlertypen der Signalübertragung . . . . .	77
4.2	Verfahren zur Fehlererkennung und -korrektur der Signalübertragung . . . . .	77
4.2.1	ARQ Verfahren im Standard IEEE 802.15.4 . . . . .	77
4.2.2	Vorwärtsfehlerkorrektur . . . . .	79
4.2.2.1	Linearer Blockcode . . . . .	81
4.2.2.2	Quasi-Zyklischer Code . . . . .	83
4.3	Ausgewählter FEC Code - (16, 8) QCC . . . . .	83
4.4	Hybridverfahren von ARQ und FEC . . . . .	87
4.4.1	OhneFEC-Zustand . . . . .	88
4.4.2	FEC-Zustand . . . . .	88
4.5	Implementierung und Auswertung . . . . .	89
4.5.1	Verbesserung der Übertragungsqualität durch Hybrid-ARQ . . . . .	89
4.5.2	Ressourcenverbrauch . . . . .	91
4.5.2.1	Speicherbelegung . . . . .	91
4.5.2.2	Energieverbrauch . . . . .	91
4.6	Zusammenfassung . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Betrachtung des gesamten Systems</b> . . . . .	<b>99</b>
5.1	Autonomie des Überwachungssystems . . . . .	101
5.2	Auswirkung auf das Überwachungssystem . . . . .	102
5.3	Umsetzbarkeit für allgemeine Überwachungsaufgaben . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>105</b>
<b>A</b>	<b>Auswertung Ähnlichkeit der Sensordaten</b> . . . . .	<b>109</b>
<b>B</b>	<b>Ablaufdiagramme</b> . . . . .	<b>115</b>
B.1	Verfahren zur Erkennung der räumlich redundanten Sensorknoten . . . . .	116
B.2	Hybrid-ARQ Verfahren: Verlauf beim Sender . . . . .	117
B.3	Hybrid-ARQ Verfahren: Verlauf beim Empfänger . . . . .	118



# *INHALTSVERZEICHNIS*

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur des dezentralen Datenmanagements im Sensorsystem . . . . .	3
2.1	Containerumschlag im Hamburger Hafen vom Jahr 1990 bis 2018 nach [20]	8
2.2	Das Konzept des Intelligenten Containers . . . . .	10
2.3	Hauptkomponenten eines Sensorknotens . . . . .	11
2.4	Aufbau des ZigBee-Netzwerk nach [15] . . . . .	14
2.5	Netzwerktopologie drahtloser Sensornetze nach IEEE 802.15.4 . . . . .	14
2.6	Temperaturverteilung in einem Kühlcontainer nach [34] . . . . .	16
2.7	Strukturebenen des Überwachungssensorsystems im Container . . . . .	18
2.8	Struktur des Sensornetzes im Container und die Entscheidungen auf jeder Systemebene . . . . .	21
3.1	Konzept des Verfahrens zur dynamischen Steuerung der Messintervalle . . . . .	26
3.2	Verarbeitung der Information in einem künstlichen Neuron . . . . .	30
3.3	Häufig verwendete Formen der Aktivierungsfunktion $\phi(x)$ . . . . .	31
3.4	Vorwärtsprädiktion in KNN . . . . .	33
3.5	Backpropagation in KNN . . . . .	33
3.6	Eingangsmessdaten für Auswahl des Prädiktors . . . . .	35
3.7	Genauigkeit der verschiedenen Datenabschätzungsverfahren . . . . .	36
3.8	Abschätzung der Temperatur Variation mit verschiedenen Datenprädiktoren	37
3.9	Laufzeit der drei Prädiktoren . . . . .	38
3.10	Abschätzungsfehler der verschiedenen KNN-Varianten . . . . .	40
3.11	Laufzeit der verschiedenen KNN-Varianten . . . . .	41
3.12	Verschiedene KNN-Architekturen für Überwachung zweier Umweltparameter	41
3.13	Ideale Dateneingang für Auswahl der optimale $\eta$ . . . . .	42
3.14	Abhängigkeit Geschwindigkeit der Konvergenz von der Lernrate $\eta$ . . . . .	43
3.15	Platzierung der Sensorknoten im zwei-TEU Container . . . . .	45
3.16	Messdaten und Messintervalle im Bereich A: (a) Temperatur und entsprechende Intervalle (b) Feuchtigkeit und entsprechende Intervallen (c) Endgültige Messintervalle . . . . .	46



3.17	Messdaten der Temperatur im Bereich A: (a) Die Temperaturdaten Referenz mit einem konstanten Intervall von 2,5 min (b) Temperaturdaten mit dynamischen Intervallen (c) Temperaturdaten mit der gleichen Anzahl von Messungen wie (b), wobei die Messungen gleichmäßig auf den gesamten Prozess verteilt werden . . . . .	47
3.18	Messdaten der relativen Feuchtigkeit im Bereich A: (a) Die Feuchtigkeitsdaten Referenz mit einem konstanten Intervall von 2,5 min (b) Feuchtigkeitsdaten mit dynamischen Intervallen (c) Feuchtigkeitsdaten mit der gleichen Anzahl von Messungen wie (b), wobei die Messungen gleichmäßig auf den gesamten Prozess verteilt werden . . . . .	47
3.19	Abschätzung der Ähnlichkeit der Sensordatenreihen . . . . .	50
3.20	Simulationsinput für Auswertung des Verfahrens zur Erkennung der räumlich redundanten Sensordaten . . . . .	54
3.21	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_2$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	55
3.22	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	55
3.23	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_3$ und $CM_4$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	56
3.24	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_4$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	56
3.25	Räumliche Verteilung der Überwachungsaufgaben auf alle beteiligten Clustermitglieder . . . . .	58
3.26	Konzept des Hybridverfahrens zur Steuerung der Kommunikationshäufigkeit	62
3.27	Zeitlicher Verlauf des Hybridverfahrens . . . . .	63
3.28	Temperatur-Input für Simulation des Hybridverfahrens . . . . .	64
3.29	Anzahl der gesendeten Nachrichtenpakete von fünf Clustermitgliedern mit verschiedenen Varianten . . . . .	65
3.30	Relativer Fehler der Überwachung von drei Ereignissen mit den fünf Verfahren	67
3.31	Anteil der gesendeten Pakete bei den Ereignissen mit den fünf Verfahren . . . . .	68
3.32	Überwachungsqualität mit dem Hybridverfahren . . . . .	70
3.33	Zeitliche Verteilung der aktiven Clustermitglieder . . . . .	71
4.1	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Kommunikationszuverlässigkeit . . . . .	75
4.2	Verhältnis RSSI-Werten und Sendeleistungsstufe (vgl. mit Tabelle 2.2) im geschlossenen Container . . . . .	76
4.3	Empfangene Signalstärke aller Sensorknoten bei geöffneter und geschlossener Tür mit verschiedenen Sendeleistungsebenen (vgl. mit Tabelle 2.2) . . . . .	78
4.4	Anzahl der fehlerhaften Bytes bei verschiedenen RSSI-Werten . . . . .	79
4.5	Fehlertypen der Funkübertragung im Container . . . . .	80
4.6	Das systematische Format eines $(n, k)$ linearen Blockcodes . . . . .	81
4.7	Platzierung des Netzwerks für Verifizierungstest des Hybrid-ARQ Verfahrens	89

4.8	BER und PER ohne und mit FEC im Container . . . . .	90
4.9	Transmission eines Nachrichtenpakets . . . . .	92
4.10	Stromverbrauch beim Senden der Nachrichtenpakete mit 20 und 40 Bytes . . . . .	93
4.11	Stromverbrauch beim Empfang der Nachrichtenpakete mit 20 und 40 Bytes . . . . .	94
4.12	Decodierungszeit von einem Codewort . . . . .	95
4.13	Vergleich des Energieverbrauches . . . . .	97
A.1	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_2$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	109
A.2	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_3$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	110
A.3	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_4$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	110
A.4	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_1$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	111
A.5	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_2$ und $CM_3$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	111
A.6	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_2$ und $CM_4$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	112
A.7	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_2$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	112
A.8	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_3$ und $CM_4$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	113
A.9	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_3$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	113
A.10	Auswertung der Ähnlichkeit der Datenreihen von $CM_4$ und $CM_5$ mit Signatur und Kreuzkorrelation . . . . .	114
B.1	Prozess der Gruppeneinteilung der Sensorknoten (Clustermembers, abk. CM) nach der Ähnlichkeit der Sensordaten . . . . .	116
B.2	Hybrid-ARQ Verfahren: Aktivitäten des Senders in den verschiedenen Zuständen . . . . .	117
B.3	Hybrid-ARQ Verfahren: Aktivitäten des Empfängers in den verschiedenen Zuständen . . . . .	118

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zentrale und selbststeuernde logistische Paradigmen nach [3] . . . . .	9
2.2	Programmierbare Sendeleistung Konfiguration CC2420 [11] . . . . .	12
2.3	Betriebsspannung der Komponenten des TeloB Sensorknotens[11, 60] . . . . .	13
3.1	Vergleich der zwei KNN-Architekturen . . . . .	39
3.2	Anzahl der Messwerte mit den dynamischen Messintervallen . . . . .	45
3.3	Vergleich der Überwachungsqualität von Verfahren mit dynamischen und festen Intervallen . . . . .	48
3.4	Anteil der aktiven Zeit aller Sensorknoten . . . . .	60
3.5	Ereignisse während des Transportprozesses . . . . .	66
4.1	Syndrome für (16, 8) QCC . . . . .	85
4.2	Syndrome für 2-Bit-Fehler (Ein Bit im Information-Block und ein Bit im Parity-Block) . . . . .	86
5.1	Autonomiegrad des Datenmanagements . . . . .	101
5.2	Vergleich der Auswirkung des dezentralen Datenmanagement auf das Sen- sorsystem . . . . .	102
5.3	Umsetzbarkeit der Verfahren des dezentralen Datenmanagements . . . . .	104