

Electronic Communications of the EASST  
Volume 17 (2009)



Workshops der  
Wissenschaftlichen Konferenz  
Kommunikation in Verteilten Systemen 2009  
(WowKiVS 2009)

Intelligente Wechselbrückensteuerung für die Logistik von Morgen

Alexander Podlich, Thomas Weise, Manfred Menze, Christian Gorltd

10 pages

Guest Editors: M. Wagner, D. Hogrefe, K. Geihs, K. David  
Managing Editors: Tiziana Margaria, Julia Padberg, Gabriele Taentzer  
ECEASST Home Page: <http://www.easst.org/eceasst/>

ISSN 1863-2122

## Intelligente Wechselbrückensteuerung für die Logistik von Morgen

Alexander Podlich<sup>1</sup>, Thomas Weise<sup>2</sup>, Manfred Menze<sup>1</sup>, Christian Gorldt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> [a.podlich@micromata.de](mailto:a.podlich@micromata.de), [m.menze@micromata.de](mailto:m.menze@micromata.de), <http://www.micromata.de/>  
Micromata GmbH, Marie-Calm-Straße 3, 34131 Kassel

<sup>2</sup> [weise@vs.uni-kassel.de](mailto:weise@vs.uni-kassel.de), <http://www.vs.uni-kassel.de/>,  
Verteilte Systeme, Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel

<sup>3</sup> [gor@biba.uni-bremen.de](mailto:gor@biba.uni-bremen.de), <http://www.biba.uni-bremen.de/>,  
BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH,  
Hochschulring 20, 28359 Bremen

**Abstract:** Die Logistik ist einer der wichtigsten Zweige der Volkswirtschaft. Die effiziente Gestaltung der in sie involvierten Prozesse ist daher, gerade angesichts des zu erwartenden Rückgangs der Ölfördermenge sowie des bekanntermaßen schädlichen Einflusses von CO<sub>2</sub> auf das Klima, von hoher Wichtigkeit. Dennoch gibt es auf diesem Bereich viele bisher nur unzureichend gelöste Probleme.

In diesem Beitrag wird das Inwest-System vorgestellt, das sowohl eine praktische Transportplanung als auch ein Informationssystem, welche alle an der Transportkette beteiligte Nutzer und Komponenten verbindet, zur Verfügung stellt.

**Keywords:** Inwest, Logistik, YellowBox, Sensorknoten, Sensornetz, GPS, GSM, Tourenplanung, Evolutionärer Algorithmus, Middleware

### 1 Einleitung

Eine der zentralen Herausforderungen unserer Zeit ist das stetig steigende Verkehrsvolumen auf den Straßen Europas, das durch den wachsenden Warenverkehr der globalen Import- und Exportwirtschaft verursacht wird. Nach Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) wird die Güterverkehrsleistung von 2005 bis 2030 um 69%, bis 2050 um 110% ansteigen [Bun08, Bun06, vR08]. Es werden immer mehr Waren über immer größere Strecken transportiert und der Bedarf an Transport und Logistik wird immer weiter steigen [vR08].

In Zeiten knapper werdender Energieressourcen und einer für viele Teile der Welt folgenschweren Klimaerwärmung ist diese Prognose besonders bedenklich, stellt sie doch nicht nur die Logistikbranche vor steigende Treibstoffkosten, sondern sagt auch Belastungen für die gesamte Umwelt mit einem erheblich höheren CO<sub>2</sub>-Ausstoß voraus. Energieeffizienz und Umweltschutz sind daher die zwei wichtigsten Gebote für die künftige Verkehrswirtschaft. Steierwald, Kühne und Vogt fordern daher *Verkehrskonzepte, die darauf abstellen, die Strategien zur Gestaltung des Güterverkehrs umzusetzen, müssen integrative Ansätze verfolgen, in denen Maßnahmen aus unterschiedlichen Handlungsfeldern zu Bündeln zusammengefasst werden und diese in den Zusammenhang einer Gesamtverkehrsplanung, d.h. einer gemeinsamen Gestaltung von Personen- und Güterverkehr, gestellt werden.* [SKV05]

Im folgenden Abschnitt stellen wir das Projekt Inwest vor, welches diese Anforderung erfüllt. In Abschnitt 3 gehen wir zunächst auf die Systemarchitektur von Inwest ein. Dabei sind besonders die Erweiterung von Wechselbrücken um Sensorknoten (Sektion 3.1), die intelligente Tourenplanung und -optimierung (Sektion 3.2), die Bereitstellung aller Logistikinformationen an Nutzer und Kunden (Sektion 3.3) sowie die Middleware, welche alle Systemkomponenten miteinander verbindet (Sektion 3.4) interessant. In Abschnitt 4 ziehen wir ein Fazit und geben Ausblicke auf die noch geplanten Arbeiten am Projekt.

## 2 Das Inwest Projekt

Um dem anwachsendem Verkehr und den daraus entstehenden Anforderungen gerecht zu werden, startete das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) die Förderinitiative *Intelligente Logistik im Güter- und Wirtschaftsverkehr*. Diese beinhaltet das Projekt *Intelligente Wechselbrückensteuerung*, kurz Inwest, welches gemeinsam von der Deutschen Post, der DHL, der Micromata, dem Bremer Institut für Produktion und Logistik, sowie der OHB Teledata durchgeführt wird.

Ziel des Projektes ist die Minimierung des Verkehrsaufkommens im Bereich des Waren- und Güterverkehrs. Dies wird mit Hilfe innovativer logistischer Informations-, Planungs- und Steuerungsverfahren, dem Einsatz neuer Technologien zur Identifikation und Ortung von Transportcontainer (Wechselbrücken) und die Anbindung an geeignete Softwaresysteme erreicht. Erstmals werden somit verschiedenste Ansätze und Techniken aus allen Bereichen der Logistik und Forschung kombiniert, um als Ganzes einen großen Mehrwert sowohl für die Umwelt als auch für die Industrie zu erreichen.

### 2.1 Die Transportkette

Am Beginn und Ende einer Transportkette stehen die Kunden, welche zum einen Güter versenden und empfangen und durch das IT-System des Logistikdienstleisters über den Status ihrer Transportaufträge informiert werden wollen. Diese Aufträge werden z.B. mit Wechselbrücken befördert, von denen LKWs jeweils zwei und Güterzüge bis zu 60 transportieren können. Neben der Zuordnung von Aufträgen zu den Fahrzeugen und Wechselbrücken ist deren Ortung ebenfalls Aufgabe des Logistiksystems. Zusätzlich müssen externe Dienste angebunden werden, von denen z.B. Informationen über die aktuelle Verkehrslage abgefragt werden können, welche dann in den Transportplanungsprozess einfließen.

## 3 Systemarchitektur

Bisherige Forschungsprojekte fokussierten sich meist nur auf jeweils einen, eher theoretischen Teilaspekt dieser Problematik. Inwest hingegen setzt auf einen ganzheitlichen Ansatz und die Verknüpfung mehrerer Technologien und Dienste, um so einen Mehrwert in der logistisch relevanten Informationsgewinnung und Informationsverarbeitung zu erreichen. In den folgenden Abschnitten werden die Komponenten von Inwest vorgestellt, deren zukünftiger Einsatz im produktiven Betrieb bei den Projektpartnern Deutsche Post und DHL vorgesehen ist.



Dimensionen	: 178 x 50 x 100 mm
Schutzklasse	: IP 31
Betriebsspannung:	12 - 32 V
Nennspannung	: 24 V
Betriebstemp.	: -40 bis +80 °C
Lagertemperatur	: -45 bis +85 °C
Speicher	: 1MB RAM, 2-8 MB Flash
CPU	: XC 2267 + ATMEL
Standards	: E1, CE und die Standards der Truckhersteller

Interne Module : CAN Controller, GSM, GPS, Gyro Expansion slot für CE Modul,  
PowerSave Connectors: GSM/GPS Connector, Fakra Main  
Connector AMP Tyco MQS, 26-pin

Schnittstellen : COM Interface 2 x RS-232, CAN-Bus 2 x CAN SAE J 1939

Abbildung 1: Die YellowBox (Quelle: Projektpartner OHB Teledata GmbH).

### 3.1 Wechselbrücken als Mobile Sensorknoten

Die Aufgabe der Hardware im Projekt Inwest ist es, an einer Wechselbrücke Daten zu erfassen und diese bei Bedarf über Funk an eine Zentrale weiter zu geben. Das dafür benötigte Gerät wird als *YellowBox* bezeichnet und ist zusammen mit seiner technischen Spezifikation in Abbildung 1 dargestellt. Die Grundfunktionen dieser Box sind Orten, Kommunizieren sowie Identifizieren. Die YellowBox ist für die Datenakquise verantwortlich und sendet Wechselbrückendaten wie zum Beispiel Geokoordinaten an die Software (Middleware). Diese verarbeitet die empfangenen Daten zu Informationen und leitet sie an die operativen IT-Systeme der verschiedenen Anwender weiter.

Die YellowBox besteht dabei aus einem Bordrechner, einem Ortungsmodul (NAVSTAR-GPS [Xu07]), einem Kommunikationsmodul (GSM/GPRS), einer Prozessor- und Speichereinheit sowie einem Energiemodul (Batteriekonzept). Digitale Eingabe- und Ausgabeschnittstellen stellen die Erweiterbarkeit der Box sicher, so dass weitere technische Komponenten angeschlossen werden können, z.B. einem Laderaumüberwachungsmodul.

Ortungsmodule für LKWs in Form von Bordcomputern existieren schon länger, jedoch konnten bisher noch keine solchen Sensorknoten für Wechselbrücken oder andere Ladungsträger in der Praxis eingesetzt werden, da die Energiekosten dafür zu hoch waren und deren Betrieb dadurch zu teuer wurde. Im mobilen Einsatz muss die Hardware spezielle Stromsparfunktionen aufweisen, damit ein möglichst langer und wartungsfreier Betrieb unabhängig von externen Stromquellen, das heißt energieautark, möglich ist. Diese Anforderung wurde seitens der Industriepartner genannt und stellt für die intelligente Wechselbrückensteuerung ein wichtiges Umsetzungskriterium dar. Die Verwendung eines entsprechenden stromsparenden Prozessors ermöglicht das zeit- beziehungsweise ereignisgesteuerte An- und Abschalten der Box, um so eine stromsparende Funktion zu realisieren.

Die YellowBox erfasst über das Ortungsmodul die Positions- und Zustandsdaten der Wechselbrücke, die über das Kommunikationsmodul an weitere Knoten im Netz gesendet werden. Die Datenübermittlung erfolgt mittels eines komprimierten binären Formats über eine GSM In-

frastruktur. Diese Daten werden an ein Softwareinterface übertragen, welche diese in ein XML Format transformiert und an die Inwest Softwareschicht überträgt. Dabei handelt es sich um eine bidirektionale Datenverbindung. Die YellowBox kann somit über die Softwareschicht konfiguriert werden.

### 3.1.1 Hardware Konfiguration

Um einen möglichst langfristigen Betrieb ohne Wartungseingriffe wie Batteriewechsel der YellowBox sicherzustellen, muss die Hardware intelligent konfiguriert werden. Für ein effizientes Arbeiten der Box ist es ebenfalls sinnvoll, diese dem betrieblichen Geschäftsprozess entsprechend der Tourdaten anzupassen. Die Box überträgt die Daten erst bei eintretenden Ereignissen, die zuvor durch die Nutzer konfiguriert wurde. Dieses Verfahren trägt auch dazu bei, dass die Nutzer der Planungs- und Steuerungssystem nicht mit nutzlosen Informationen überflutet werden.

Unter der intelligenten Hardwarekonfiguration wird verstanden, dass diese sich den Umweltegebenheiten anpasst und in einen Status versetzt wird, der dem betriebswirtschaftlichen Zweck des Containers entspricht, also zum Beispiel zwischen dem Zustand der Einlagerung und dem Transport auf einer Tour unterscheidet. Für die Hardware bedeutet der jeweilige Status, dass die angeschlossenen Komponenten wie Rüttelsensor, erweiterte Sensorik, Sendeeinheit, etc., unterschiedlich und an die reale Gegebenheit angepasste Ereignisse auslösen können [LDG08]. Beispielsweise kann überprüft werden, ob sich der Container zu bestimmten Zeitpunkten an einem Ort in einem bestimmten Umkreis befindet, so dass die positive Beantwortung dieser Frage als "alles OK" zu werten ist und keine Meldung veranlasst, die negative Beantwortung jedoch einen Abweichung an übergeordnete Systeme meldet.

### 3.1.2 Ergänzende Technologien

Um eine optimale Auslastung von Wechselbrücken zu gewährleisten, ist es notwendig deren Ladezustand zu erfassen. Ein großes Potential liegt in einer automatisierten Laderaumzustandserfassung. Dazu bieten sich optische sowie akustische Verfahren an. Als optisches Verfahren können z.B. Videoscanner eingesetzt werden. Jedoch sind die Anschaffungskosten der Scanner recht hoch. Eine kostengünstigere Alternative stellen hier die akustischen Systeme dar. Im Rahmen des Inwest Projektes werden zur Füllgradüberwachung Ultraschallsysteme in Form eines Demonstrators entwickelt. Dieses Verfahren kann nicht nur zur Wechselbrückenüberwachung genutzt werden, sondern ist auch für eine Vielzahl von logistischen Ladungsträgern (z.B. Container, ULD im Luftfrachtbereich) einsetzbar. Zur Informationsgewinnung ist in den Wechselbrücken ein Sensornetzwerk mit Ultraschallmodulen aufgebaut. Dabei werden an der Decke der Wechselbrücke Ultraschallsensorknoten befestigt, die eine bidirektionale Kommunikation gewährleisten. Die Module messen dabei Entfernungen von der Decke der Wechselbrücke nach unten, respektive von der Decke der Wechselbrücke zu der darunter liegenden Beladung (z.B. Paletten, Stückgut, ...) [LDG08]. Ist die gemessene Entfernung folglich kleiner als die Höhe der Wechselbrücke, meldet der entsprechende Sensor, dass der von ihm überwachte Laderaum belegt ist (siehe Abbildung 2). Durch die Zusammenführung aller Sensordaten entsteht so eine Übersicht über den Auslastungsgrad des überwachten Gesamtladevolumens. Die Datenakquise über

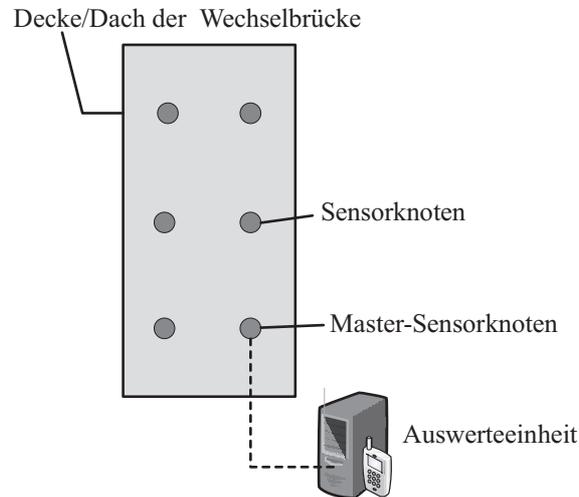


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Laderaumüberwachung.

das beschriebene Sensornetzwerk führt zu einem Masterknoten, welcher die Daten sammelt und bedarfsorientiert zur Verfügung stellen kann. Die Kopplung an die bestehende YellowBox wird über standardisierte Schnittstellen ermöglicht, um die Auslastungsdaten über die angebundene Telematiksysteme in die übergeordnete Middleware zur Planung und Steuerung der Transporte zu übertragen.

## 3.2 Tourenplanung

### 3.2.1 Verwandte Arbeiten

Die wissenschaftliche Forschung im Bereich der Tourenplanung und -optimierung geht bis in die 1950er Jahre zurück. In der Literatur wird zwischen exakten und heuristischen Verfahren unterschieden [PT09]. Tourenplanungsprobleme sind in der Regel NP-vollständig [LK81, PT09] und auf Grund der kombinatorische Explosion bereits bei kleinen Szenarien nur durch enormen Rechenaufwand exakt lösbar. Heuristische Verfahren mit schnelleren Antwortzeiten, die dafür jedoch nicht immer eine optimale Lösung finden, sind in den letzten Jahren in diesem Bereich immer mehr in den Vordergrund getreten. Die bekanntesten Vertreter dieser Familie von Algorithmen zum Lösen von Tourenplanungsproblematiken sind u. a. die Tabu-Suche [ADV00, BGG<sup>+</sup>97, BG02], Simulated Annealing [CC02], Ameisensysteme [BHS97, BHS99, DGH<sup>+</sup>02] und insbesondere die evolutionären Algorithmen [WPR<sup>+</sup>09, PT09, MTPC02, AD04, Zhu03, Tha95].

In der Literatur werden jedoch meist spezielle, eher praxisferne Klassen des Tourenplanungsproblems betrachtet. Zudem untersuchen viele Autoren sehr kleine Problemstellungen mit nur 50 bis 100 Kunden [Ral03, PK07, PK07]. Im Inwest-Projekt sind dagegen weitaus größere Datensätze mit mehr als 1000 Kunden und ebenso vielen Haltepunkten, die direkt im aktiven Betrieb der DHL aufgezeichnet wurden, Gegenstand der Forschung.

### 3.2.2 Praxistaugliche Optimierung durch Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen (EAs) sind populationsbasierte, metaheuristische Verfahren, welche Mechanismen wie Mutation, Rekombination, natürliche Auslese und das Überleben des Stärkeren aus der Natur kopieren, um verschiedenste Optimierungsprobleme zu lösen [Wei08, Bäck96]. Aufbauend auf einer intensiven Analyse der Daten und der Logistikprozesse bei den Projektpartnern konnten spezielle Phänotypen sowie Mutations- und Rekombinationsverfahren entwickelt werden, die unter Beachtung von vorher definierten Zielfunktionen eine längerfristige Tourenplanung sowie eine kurzfristige Ad-hoc-Optimierung ermöglichen [WPR<sup>+</sup>09].

Bei umfangreichen Tests zeigte sich, dass der entwickelte Ansatz den aktuell eingesetzten Verfahren bei nahezu beliebigen Parametereinstellungen für den verwendeten evolutionären Algorithmus überlegen ist. So wurden auf den von der DHL zur Verfügung gestellten Daten immer Kilometerersparnisse zwischen 1% und 17% (in der Regel mindestens 5%) erzielt. Auf Veränderungen der aktuellen Verkehrssituation kann schnell reagiert werden, indem der EA zur Ad-hoc-Optimierung aller betroffenen Ladungsträger eingesetzt wird.

### 3.3 Frontend für Disponenten und Kunden

Die Nutzer des im Rahmen von Inwest entwickelten Systems sind auf Grund ihres großen Logistiknetzes über das gesamte Bundesgebiet verteilt. Aus diesem Grund wurde die grafische Benutzeroberfläche als webbasierte Anwendung realisiert. Dafür wurde eine Rich Internet Applikation (RIA) auf der Basis von Adobe Flex für den Client und einem J2EE-Server im Backend umgesetzt.

Das Web-Frontend vereinfacht das Auffinden von logistischen Objekten wie z.B. Aufträgen, Wechselbrücken, Fahrzeugen und Orte durch eine clusterfähige Volltextsuche, deren Grundlage ein verteilter Suchindex bildet. Das Suchergebnis wird in Objekttypen bzw. Kontexten dargestellt und nach einem Ranking (Trefferwahrscheinlichkeit) sortiert. Durch diese Suche wird die Transparenz über die eingesetzten Ressourcen erhöht und eine effektivere Nutzung der Wechselbrücken am Standort ermöglicht. Verschiedene visuelle Aufbereitungen der Daten wie beispielsweise eine GoogleMaps-Integration verbessern zusätzlich die Übersicht.

### 3.4 Middleware

Derzeit existieren verschiedene Technologien, die in der Logistik genutzt werden, um Optimierungen in der Planung und Steuerung zu erreichen. Meist werden diese Systeme jedoch isoliert voneinander eingesetzt [LDG08]. So existieren in der Regel keine netzübergreifenden Softwarekomponenten wie etwa Frachtbörsen. Eine globale Sicht auf alle relevanten Daten fehlt somit ebenfalls.

Die Anforderungen an eine universelle Middleware für ein Logistiksystem sind vielfältig, da über sie viele Probleme der Disposition gelöst werden sollen. Aus Sicht der Kunden und der Betreiber soll eine durchgängige Dokumentation über die Bewegung und den Einsatz der Wechselbrücke möglich sein, mit der das Verfolgen der Container und Aufträge unterstützt werden kann. Diese Verfolgung muss durchgängig sein, also auch bei dem Einsatz unterschiedlicher Verkehrsmittel in der Transportkette, so z.B. der Kombination von Zug- und anschließendem Lastkraftverkehr, zuverlässig funktioniert. Als Inwest stellt für beide Benutzergruppen eine

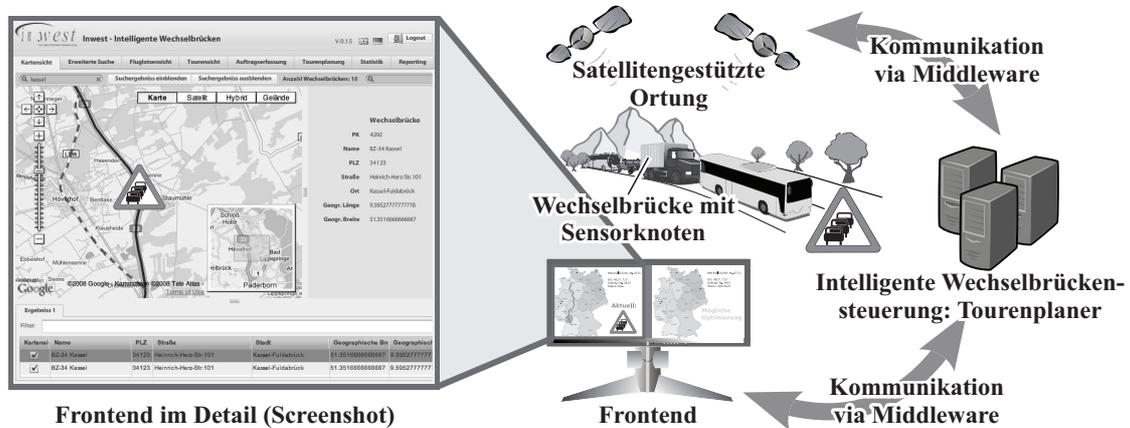


Abbildung 3: Das Inwest-System im Einsatz: Sensorknoten, Middleware, Tourenplanung und Frontend.

Schnittstelle bereit, die als Stand-Alone-Lösung die erforderlichen Anbindungen zum Transportmanagementsystem bzw. zur Hofsteuerung und Standortsicherung aufweist. Eine weitere Anforderung, die von der Inwest Middleware erfüllt wird, ist eine detaillierte Rollen- und Rechteverwaltung.

Für eine optimale Überwachung von Wechselbrücken und zur rechtzeitigen Identifikation etwaiger Problemstellungen werden externe Systeme an die Middleware angeschlossen. Dazu zählen diverse Schnittstellen zu den Softwaresystemen der DHL und weiterer Logistiknetze, zu Hofsteuerungssystemen und zu Wetter- und Verkehrsinformationsdiensten. Mit Hilfe dieser Datenquellen können aktuelle Störungsfälle erkannt und Routen optimiert und umgeplant werden.

Die Verknüpfung dieser externer Datenschnittstellen sowie aller bisher genannter Komponenten ermöglicht einen noch nie da gewesenen Mehrwert für Tourenplaner. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3 am Praxisbeispiel einer Ad-hoc-Optimierung visualisiert. Der Verkehrsinformationsdienst hat gemeldet, dass sich auf der originalen Route (durchgezogen) ein Stau ereignet hat. Die Middleware hat dieses Ereignis registriert und an die Benutzerschnittstelle weitergeleitet. Der zuständige Mitarbeiter erkennt alle betroffenen Transportfahrzeuge und löst daraufhin eine Ad-hoc-Optimierung aus. Der evolutionäre Algorithmus liefert die neue, gestrichelt dargestellte Route, woraufhin der Mitarbeiter dann die notwendigen Maßnahmen einleiten kann. In Folge dessen konfiguriert die Middleware die YellowBoxen in den Wechselbrücken der umgeleiteten LKWs auf die neue Route um.

## 4 Fazit

Das Forschungsprojekt stellt in mehrerer Hinsicht einen Wendepunkt in der Logistik dar. Wo herkömmliche Methoden bisher nur Teilaspekte des Frachtverkehrs verbessern konnten, deckt der Inwest-spezifische TechnologiemiX das gesamte Spektrum logistischer Planung sinnvoll und flächendeckend ab. Durch die Kombination von mobilen Sensorknoten mit einem schnellen und

präzisen Tourenplanungssystem entsteht ein zukunftsfähiges Instrument zur Steuerung und Optimierung des Frachtverkehrs. Ebenso wie der Einsatz von Sensorknoten stellt auch das Tourenplanungssystem an sich bereits eine signifikante Verbesserung im Vergleich zu aktuellen Planungssystemen dar. Im Gegensatz zu nahezu allen anderen Forschungsarbeiten ist es für den praktischen Einsatz geeignet und kann zudem Problemstellungen einer höheren Größenordnung lösen. Doch nicht nur diese Komponente führt zu einer großen Kilometerersparnis. Auch die bessere Übersicht der Mitarbeiter über die Logistikprozesse durch das neue System trägt dazu bei.

Ob auf Straße oder Schiene, ob Luftfracht oder Seecontainer: Mit Hilfe der Intelligenten Wechselbrückensteuerung kann der Güterverkehr künftig drastisch reduziert werden. Dadurch werden nicht nur die Energiekosten der Logistikunternehmen gesenkt, auch die Umwelt profitiert von der Vermeidung schädlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## Literatur

- [AD04] E. Alba, B. Dorronsoro. Solving the Vehicle Routing Problem by Using Cellular Genetic Algorithms. In *Proceedings of the 4th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, EvoCOP 2004*. Pp. 11–20. 2004.
- [ADV00] A. Amberg, W. Domschke, S. Voß. Multiple center capacitated arc routing problems: A tabu search algorithm using capacitated trees. *European Journal of Operational Research (EJOR)* 124(2):360–376, 2000.  
[doi:10.1016/S0377-2217\(99\)00170-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00170-8)
- [Bäc96] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*. Oxford University Press, 1996.
- [BG02] O. Bräysy, M. Gendreau. Tabu Search heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *TOP: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research* 10(2):211–237, 2002.  
[doi:10.1007/BF02579017](https://doi.org/10.1007/BF02579017)
- [BGG<sup>+</sup>97] P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin, J.-Y. Potvin, É. D. Taillard. A Parallel Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 5(2):109–122, 1997.
- [BHS97] B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss. Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem. In *2nd International Conference On Metaheuristics*. 1997.
- [BHS99] B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss. An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research* 89:319–328, 1999.  
[doi:10.1023/A:1018940026670](https://doi.org/10.1023/A:1018940026670)
- [Bun06] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. *Verkehr in Zahlen 2006/2007*. Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, Hamburg, Deutschland, 2006.

- [Bun08] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). (*Innovationspolitik, Informationsgesellschaft, Telekommunikation*) *Mobilität und Verkehrstechnologien – Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, Deutschland, Apr. 2008.
- [CC02] Z. J. Czech, P. Czarnas. Parallel simulated annealing for the vehicle routing problem with time windows. In *10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP'02)*. Pp. 376–383. IEEE Computer Society, 2002. doi:10.1109/EMPDP.2002.994313
- [DGH<sup>+</sup>02] K. Doerner, M. Gronalt, R. F. Hartl, M. Reimann, C. Strauss, M. Stummer. Savings Ants for the Vehicle Routing Problem. In *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops 2002*. Pp. 11–20. Springer-Verlag, 2002. doi:10.1007/3-540-46004-7\_2
- [LDG08] M. Lewandowski, M. Dittmer, C. Gorltd. Projekt Invest. Meilensteinbericht 1, BMWi-Projekt Invest, 2008.
- [LK81] J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan. Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Networks – An International Journal* 11(2):221–227, Sommer 1981. doi:10.1002/net.323011021
- [MTPC02] P. Machado, J. Tavares, F. B. Pereira, E. J. F. Costa. Vehicle Routing Problem: Doing It The Evolutionary Way. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*. P. 690. 2002.
- [PK07] G. Pankratz, V. Krypczyk. Benchmark data Sets for dynamic vehicle routing problems. 2007. Data sets [http://www.fernuni-hagen.de/WINF/inhfrm/benchmark\\_data.htm](http://www.fernuni-hagen.de/WINF/inhfrm/benchmark_data.htm) (gelesen 2008-10-27).
- [PT09] F. B. Pereira, J. Tavares (eds.). *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem*. Studies in Computational Intelligence 161. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. doi:10.1007/978-3-540-85152-3
- [Ral03] T. Ralphps. Vehicle Routing Data Sets. 2003. Data sets <http://www.coin-or.org/SYMPHONY/branchandcut/VRP/data/> (gelesen 2008-10-27).
- [vR08] M. von Randow. Güterverkehr und Logistik als tragende Säule der Wirtschaft zukunftssicher gestalten. In Baumgarten (ed.), *Das Beste Der Logistik: Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Pp. 49–53. Bundesvereinigung Logistik (BVL), Springer, Berlin/Heidelberg, Deutschland, 2008.
- [SKV05] G. Steierwald, H. D. Künne, W. Vogt. *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Springer, Berlin, Deutschland, 2., neu bearbeitete und erweiterte edition,

2005.

doi:[10.1007/b138349](https://doi.org/10.1007/b138349)

- [Tha95] S. R. Thangiah. Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms. In *Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers*. Pp. 253–277. CRC, 1995.
- [Wei08] T. Weise. *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*. 2008. Kostenloses elektronisches Buch über Optimierungsverfahren, Evolutionäre Algorithmen und andere Metaheuristiken. Online verfügbar unter <http://www.it-weise.de/> (gelesen 2008-12-13).
- [WPR<sup>+</sup>09] T. Weise, A. Podlich, K. Reinhard, C. Gorltd, K. Geihs. Evolutionary Freight Transportation Planning. In *3rd European Workshop on Evolutionary Computation in Transportation and Logistics (EvoTRANSLOG'09)*. 2009. Zur Veröffentlichung eingereicht.
- [Xu07] G. Xu. *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Springer, 2003, 2007.
- [Zhu03] K. Q. Zhu. A Diversity-Controlling Adaptive Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. In *15th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. Pp. 176–183. IEEE Computer Society, 2003.  
doi:[10.1109/TAI.2003.1250187](https://doi.org/10.1109/TAI.2003.1250187)