

## **Auf dem Weg zur Selbststeuerung in der Logistik – Grundlagenforschung und Praxisprojekte**

Bernd Scholz-Reiter<sup>1,3</sup>, Michael Freitag<sup>1</sup>, Henning Rekersbrink<sup>1</sup>, Bernd Ludwig Wenning<sup>2</sup>, Christian Gorldt<sup>3</sup>, Wolfgang Echelmeyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme (PSPS)

<sup>2</sup> Fachgebiet Kommunikationsnetze (ComNets)

<sup>3</sup> Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA)

Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse“  
Universität Bremen

### **Zusammenfassung**

Effiziente logistische Prozesse sind vor dem Hintergrund hochdynamischer Märkte und einer zunehmenden Komplexität logistischer Netzwerke mit herkömmlichen Planungs- und Steuerungsmethoden immer schwieriger zu erreichen. Künftig werden Aspekte wie Flexibilität, Adaptivität und Proaktivität im Vordergrund stehen. Dies ist nur durch Dezentralisierung und Autonomie der logistischen Entscheidungsprozesse zu erreichen.

Hier setzt der Bremer Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse“ an. Auf der Basis neuer IuK-Technologien lassen sich künftig intelligente logistische Objekte realisieren und damit Planungs- und Steuerungsprozesse auf die Ebene des physischen Materialflusses verlagern. Die so ermöglichte Selbststeuerung der logistischen Prozesse erfordert neuartige Konzepte und Methoden, die innerhalb des SFB 637 erforscht, entwickelt und nutzbar gemacht werden.

Der Beitrag stellt beispielhaft ein grundlagenorientiertes SFB-Teilprojekte vor, das sich mit der Übertragbarkeit von Internet-Routing-Algorithmen auf Transportnetze beschäftigt. Die Anwendbarkeit der Selbststeuerung wird anhand der vollautomatischen Entladung eines Containers durch ein intelligentes Robotersystem dargestellt.

## 1. Einleitung

Die sich immer schneller verändernden Bedingungen heutiger Märkte haben erhebliche Auswirkungen auf logistische Prozesse und ihre Planung und Steuerung. So führt der Aufbau virtueller Unternehmen und globaler logistischer Verbünde und Allianzen zu einer Zunahme an komplexen, unternehmensinternen und -übergreifenden logistischen Prozessen. Der Wandel von Verkäufer- zu Käufermärkten mit der daraus resultierenden Kundenorientierung als entscheidendem Wettbewerbsfaktor bedingt einen Anstieg des Transportvolumens mit gleichzeitiger Tendenz zur Atomisierung der Ladungen und Anstieg der Lieferfrequenzen. Durch die Zunahme der relativen Knappheit logistischer Infrastrukturen sowie Veränderungen im Zielsystem logistischer Prozesse durch beispielsweise die Verrechnung auch intangibler Kosten und verstärkte Berücksichtigung von ökologischen Zielen ergeben sich komplexe, teilweise sogar widersprüchliche Anforderungen an logistische Planungs- und Steuerungssysteme, wie sie mit heutigen Systemen nicht mehr zu bewältigen sind.

Die dynamische und strukturelle Komplexität von horizontalen und vertikalen Unternehmensverbänden verhindern oftmals die Bereitstellung aller entscheidungsrelevanten Informationen für eine zentrale Instanz und erfordern deshalb adaptive logistische Prozesse mit der Fähigkeit zur Selbststeuerung. Mit dem Begriff „Selbststeuerung“ wird hierbei die dezentrale Koordination autonomer logistischer Objekte in einer heterarchischen Organisationsstruktur bezeichnet [FHS 04], [SWF 04]. Die Autonomie der logistischen Objekte wie Stückgüter, Ladungsträger und Transportsysteme wird dabei durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht. So lassen sich z.B. durch RFID- und Sensortechnologie intelligente Ladungsträger und intelligentes Transportgut bis hinab auf die Ebene des einzelnen Stückguts realisieren. Drahtlose Kommunikationsnetze und Ortungssysteme ermöglichen eine permanente Lokalisierung, Identifizierung und eine Kommunikation mit und zwischen diesen intelligenten Einheiten innerhalb eines logistischen Systems.

Diese und andere neue IuK-Technologien ermöglichen und erfordern neue Steuerungsstrategien und -systeme, die den sich immer schneller verändernden Bedingungen heutiger Märkte besser gerecht werden als die gegenwärtigen Logistiksteuerungs- und -informationssysteme. Erst dadurch ergibt sich die Möglichkeit der selbstständigen und flexiblen Anpassung an veränderte Umweltbedingungen und wechselnde bzw. konkurrierende Zielsetzungen in spezifischen logistischen Domänen. Es werden autonome, dezentrale Steuerungssysteme entstehen müssen, die sich unter Einsatz neuer Methoden und Strategien koordinieren. Dabei stehen Aspekte wie Flexibilität, Adaptivität und Reaktivität auf sich dynamisch verändernde äußere Einflüsse unter Beibehaltung der globalen Ziele im Vordergrund.

## **2. Selbststeuerung logistischer Prozesse**

### **2.1 Ursprünge der Selbststeuerung**

Die Selbststeuerung als Prozess ist eng mit dem Konzept der Selbstorganisation verbunden, wie es vor allem in den Naturwissenschaften zu finden ist. Konzepte, Modelle und Methoden für die Selbststeuerung in der Logistik liefern hauptsächlich:

- Selbstorganisationsphänomene in physikalischen Systemen und deren Modellierung in der Physik und Mathematik,
- Selbststeuerungsmechanismen natürlicher und lebender Systeme, deren Modellierung innerhalb der Biologie und deren software-technischer Umsetzung innerhalb der Informatik,
- systemtheoretische Steuerungskonzepte in Produktion und Logistik.

Während das Phänomen der Selbstorganisation im Allgemeinen auf der globalen Systemebene zu beobachten ist, spielt sich die Selbststeuerung lokal auf der Ebene der einzelnen Systemelemente ab. Diese Art der Selbststeuerung ist ursprünglich eine Eigenschaft natürlicher, lebender Systeme. In den letzten Jahrzehnten wurde vielfach versucht, Eigenschaften lebender Systeme und insbesondere menschliche Eigenschaften auf technische Systeme zu übertragen. Beispielhaft seien hier die „Verteilte Künstliche Intelligenz“ mit ihren Multiagentensystemen, das interdisziplinäre Fachgebiet „Artificial Life“ mit selbstorganisierenden Systemen in Computern oder das Forschungsgebiet „Swarm Intelligence“ mit seinen Koordinationsmechanismen aus biologischen Multiagentensystemen (z.B. Insektenkolonien) genannt. Erste logistische Anwendungen der Selbststeuerung existieren mit den Konzepten des „Holonc Manufacturing System“, des „Bionic Manufacturing System“ und im Bereich naturanaloger Optimierungsverfahren für die Tourenplanung, die Produktionsplanung und für Scheduling-Probleme.

Neben diesen biologisch inspirierten Selbststeuerungsansätzen existieren bereits einige technische Lösungen, z.B. für große Kommunikationsnetze wie dem Internet. Hier müssen die Wege der einzelnen Datenpakete dynamisch festgelegt und optimiert werden. Diese Aufgabe wird aber nicht durch eine zentrale Steuerung, sondern dezentral durch sogenannte Routingalgorithmen gelöst. Durch die Größe und Dynamik des Internets ist eine zentrale Planung der Kommunikationswege praktisch unmöglich – demgegenüber ist die Robustheit der verwendeten dezentralen Verfahrensweise bewiesen. Ansätze zur Übertragung derartiger Routingalgorithmen auf logistische Probleme werden im Kapitel 3 dieses Beitrages untersucht.

## **2.2 Selbststeuerung vs. Fremdsteuerung**

Die Selbststeuerung beinhaltet zwei wesentliche Konzepte: Dezentralität und Autonomie. Der Grad der Dezentralität gibt an, auf welcher Systemebene Steuerungsentscheidungen getroffen werden. Von Selbststeuerung spricht man, wenn der Dezentralitätsgrad die Ebene des physischen Materialflusses erreicht. D.h, die einzelnen logistischen Objekte wie das Transportgut und die Ladungsträger, aber auch die Transportsysteme treffen selbstständig Steuerungsentscheidungen.

Der Grad der Autonomie gibt an, wie viel Entscheidungsmöglichkeiten das einzelne logistische Objekt hat und wie es zu seiner Entscheidung kommt. Voraussetzung dafür ist eine gewisse Intelligenz, die durch IuK-Technologien realisiert wird. Die Basistechnologien sind dabei Identifikation, Sensorik, Ortung, Kommunikation und dezentrale Datenverarbeitungskapazität.

Die Ausprägung von Dezentralität und Autonomie bestimmen nun den Grad der Selbststeuerung. Dieser Selbststeuerungsgrad hängt entscheidend vom betrachteten logistischen System ab. Allgemein kann man jedoch sagen, dass sich logistische Prozesse immer innerhalb zentral vorgegebener Randbedingungen bewegen werden. Aufgabe der Forschung ist es, für bestimmte logistische Szenarien zu bestimmen, welcher Grad der Selbststeuerung sinnvoll und effizient ist. Erste Ergebnisse für die Bereiche Produktions- und Transportlogistik wurden im Bremer Sonderforschungsbereich 637 erarbeitet. Der viel zitierte Paradigmenwechsel von der Fremd- zur Selbststeuerung wird sich in der logistischen Praxis dann eher als Koexistenz beider Steuerungsansätze darstellen. Vor dem Hintergrund der technologischen Entwicklungen hin zum Ubiquitous Computing und zum Internet der Dinge ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Selbststeuerung logistischer Prozesse mehr und mehr durchsetzen wird.

## **2.3 Ganzheitliche Betrachtung der logistischen Selbststeuerung**

Die Einführung selbststeuernder Logistikprozesse betrifft nicht nur die Ausstattung der logistischen Objekte mit intelligenter Technologie. Ein entscheidender Punkt ist die Integration der autonomen Objekte in die bestehende IT-Landschaft. Weiterhin ist zu untersuchen, welche Auswirkungen die Selbststeuerung auf das sozio-technische Logistiksystem hat. Hier wird ersichtlich, dass das Paradigma der Selbststeuerung und seine Anwendung auf logistische Prozesse nur aus einer ganzheitlichen und damit interdisziplinären Perspektive zu bearbeiten ist. Eine Grundlage dafür ist ein Systembegriff der Systemtechnik, der ein sozio-technisches System in die Systemebenen „Entscheidungssystem“, „Informationssystem“ und „Ausführungssystem“ unterteilt [Rop 79]. Der Bremer SFB 637 griff dieses Systemverständnis auf und leitete die in Abbildung 1 darge-



paketen realisieren. Das Teilprojekt B1 „Reaktive Planung und Steuerung“ des SFB 637 untersucht deshalb die Übertragbarkeit solcher Routingalgorithmen auf Planungs- und Steuerungsprobleme in Transportnetzen [Scho 98], [WGP 05].

### **3.1 Kommunikations- und Transportnetze**

Für den Transfer von Routingalgorithmen aus Kommunikationsnetzen in logistische Netze muss identifiziert werden, wo Ähnlichkeiten und wo Unterschiede zwischen diesen Netzen bestehen. Offensichtliche Ähnlichkeiten in beiden Netzen sind der Transport von einer Quelle zu einer Senke und die Auswahl mehrerer mögliche Routen für diesen Transport, so dass eine geeignete Routenwahl getroffen werden muss. Die Kriterien, die diese Wahl bestimmen, können jedoch sehr unterschiedlich sein.

Eine weitere Ähnlichkeit ist die Möglichkeit zur Reservierung von Ressourcen in beiden Netzen. In beiden Fällen hat dies mit der Dienstgüte (Quality of Service) zu tun, im Falle der Logistik, um bestimmte Transportkonditionen einzuhalten, im Falle der Kommunikationstechnik, um z.B. Bandbreitenanforderungen zu erfüllen.

Auch die Größe und Dynamik der beiden Netztypen sind sich ähnlich. Wie oben bereits beschrieben, zielt die Selbststeuerung auf die Handhabbarkeit großer logistischer Netze ab, welche in Kommunikationsnetzen durch ihre dezentrale Steuerung erreicht wird.

Es gibt jedoch auch signifikante Unterschiede zwischen Kommunikationsnetzen und logistischen Netzen. Einer dieser Unterschiede ist, dass es im logistischen Netz Transportmittel (Fahrzeuge) und Ladungsträger (Container, Paletten) gibt, die permanent und in begrenzter Anzahl vorhanden sind. Ein echtes Pendant dazu ist in Kommunikationsnetzen nicht direkt zu finden. Diese Hierarchie der beweglichen Objekte führt dazu, dass es unter Umständen zu Interessenskonflikten bezüglich der Routenwahl kommen kann. Wenn z.B. Pakete eine schnelle Route oder Termintreue als Ziel haben, während Fahrzeuge eine hohe Auslastung anstreben, können von beiden Objekten unterschiedliche Routen bevorzugt werden.

Des Weiteren besteht ein Unterschied im Umgang mit Verlusten. In Kommunikationsnetzen ist ein Paketverlust nicht ungewöhnlich, dort wird dann das entsprechende Paket erneut gesendet. Dies ist in der Logistik nicht ohne weiteres möglich, da ein Paket nicht beliebig dupliziert werden kann und somit ein erneutes Versenden kostspielig oder gar unmöglich ist.

Ein sehr signifikanter Unterschied ist die Zeit. In Kommunikationsnetzen spielen sich Routenwahl und Datenübermittlung auf Zeitskalen im Sekunden- oder Millisekundenbereich ab. Die Zeit, die für die Routenwahl benötigt wird, ist im Allgemeinen in Relation zurzeit, die für die Datenübermittlung benötigt wird, nicht vernachlässigbar. In der Logistik dagegen dauert der Transport der Güter erheblich länger (Stunden, Tage). Das

impliziert zum einen, dass der Zeitaufwand zur Ermittlung einer Route deutlich weniger ins Gewicht fällt und damit ein größerer Kommunikationsaufwand zur Ermittlung der aktuellsten Informationen möglich und sinnvoll ist. Zum anderen können sich Informationen bezüglich des Zustands einer Route während des Transports signifikant ändern. Routingprotokolle aus der Datenkommunikation können also nicht direkt übernommen werden. Zum einen müssen die speziellen Anforderungen von Transportnetzen bedient werden. Zum anderen ist es wünschenswert, die Vorteile der Protokolle, wie Robustheit, Ausfallsicherheit oder auch Wartungsarmut, welche sich aus den Transportnetzen ähnlichen Eigenschaften ergeben, beizubehalten.

### **3.2 Routing-Protokolle für Kommunikationsnetze**

Kommunikationsnetze können in zwei Klassen unterteilt werden: Infrastruktur-Netze und Ad-Hoc-Netze. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass in den Infrastruktur-Netzen die Topologie weitgehend statisch ist, während sie sich in Ad-Hoc-Netzen ständig ändert. Weiterhin lassen sich die Protokolle in proaktive, reaktive und hybride Algorithmen aufteilen.

Proaktive Algorithmen implizieren, dass jedem Netzknoten ständig eine Route (oder zumindest eine Richtung) zu jedem möglichen Zielknoten bekannt ist. Das bedeutet, jeder Knoten hält Routentabellen vor, aus denen ersichtlich ist, welchen Weg ein Datenpaket zu seinem Ziel "gehen" muss. Vorteil eines proaktiven Algorithmus ist, dass die Übertragung von Daten sofort geschehen kann, ein Nachteil dagegen ist, dass die Tabellen ständig aktuell gehalten werden müssen, was in großen oder sich schnell ändernden Netzen zu einem großen Kommunikations-Overhead führen kann.

Im Gegensatz dazu wird bei reaktiven Algorithmen nur dann Routeninformation ausgetauscht, wenn eine Route gesucht wird. Die Knoten haben hier nicht ständig Kenntnis über die Routen zu anderen Knoten, sondern die Routen werden bei Bedarf mittels so genannter „Route Requests“, die sich durch das Netz bewegen, ermittelt. Der Vorteil ist hier der Wegfall der ständigen Kommunikation zur Aktualisierung der Routeninformationen, ein Nachteil dagegen ist die durch die Ermittlung einer Route auftretende Verzögerung, bevor Nutzdaten verschickt werden können.

Um die Vorteile von proaktiven und reaktiven Algorithmen zu kombinieren, sind so genannte hybride Algorithmen entwickelt worden. Diese verhalten sich z.B. für Routen zu benachbarten Knoten proaktiv und für Routen zu entfernten Knoten reaktiv. Für weitere Details und konkrete Protokolle sei hier auf die einschlägige Literatur, z.B. [Per 01], verwiesen.

Auch in großen selbststeuernden Transportnetzen kann nicht vorausgesetzt oder gefordert werden, dass an jedem Knoten im Netz die gesamte Netzstruktur bekannt ist. Auch

ist es realistisch anzunehmen, dass Informationen über den Netzzustand nicht exakt, sondern mit Ungewissheiten behaftet sind. Geht man davon aus, dass Ungewissheiten über einen bestimmten Netzabschnitt abgebaut werden können, wenn man zeitlich oder räumlich diesen näher kommt, so erscheinen reaktive oder hybride Algorithmen wesentlich besser für Transportnetze geeignet. Aufgrund der besseren dynamischen Eigenschaften wurden hier zunächst die Ad-Hoc Protokolle genauer untersucht und als erste Implementierung der Übertragung von Routingalgorithmen in die Logistik ein Algorithmus entworfen, der sich an aus der Kommunikationstechnik bekannte reaktive ad-hoc Verfahren anlehnt<sup>1</sup> [WGP 05]. Der Algorithmus funktioniert folgendermaßen: Ein Knoten hat hier nur Kenntnis über die Routen zu seinen direkten Nachbarknoten. Benötigt nun ein Fahrzeug eine Route zu einem Zielknoten, so fragt es an dem Knoten, an dem es sich befindet, nach einer Route zu seinem Ziel. Ist das Ziel ein Nachbarknoten, so kann der Knoten direkt antworten, falls nicht, leitet er die Anfrage an seine Nachbarknoten weiter. Diese verfahren jetzt genauso, bis eine Route zum Ziel gefunden wurde. Werden mehrere Routen gefunden, so wird die günstigste (schnellste) davon ausgewählt. Berücksichtigt wird hier auch, dass das Fahrzeug in bestimmten Abständen zum Heimatknoten zurückkehren soll.

In der momentanen Implementierung wird die für ein Fahrzeug gefundene Route nicht während der Fahrt geändert. In der Realität ist aber z.B. die erwartete Fahrzeit auf einer Teilstrecke häufig tageszeitabhängig. Da ein Fahrzeug oft mehrere Stunden unterwegs ist, kann es sein, dass eine Teilstrecke, die zum Start noch sehr günstig erschien, dies nicht mehr ist, wenn das Fahrzeug sie erreicht. Dies führt zu einer Problemstellung, auf die im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird. Auch wurde in dieser ersten Implementierung versucht, die Routen der Pakete und der Fahrzeuge mittels eines einzigen Protokolls zu ermitteln. Die Fahrzeuge benutzen zwar Routen, welche Pakete benötigen, um an ihr Ziel zu gelangen, die Auslastung der Fahrzeuge spielt jedoch keine Rolle. Im nächsten Schritt soll daher eine Trennung der Anforderungen von Paketen und Fahrzeugen erfolgen, worauf in Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

### **3.3 Dynamik von Transportnetzen**

Ein Hauptproblem bei der Übertragung von Routingprotokollen liegt in den unterschiedlichen Zeitskalen der beiden Netze. Ein in einem Kommunikationsnetz ermittelter Weg wird umgehend benutzt und die Zeit, in der ein Datenpaket diesen Weg beschreitet, ist so kurz, dass eine gravierende Veränderung des Netzes während des Weges von den verwendeten Routingprotokollen ausgeschlossen wird. Anders verhält es sich in einem Transportnetz. Hier ist durch die langen Transportzeiten sehr wohl davon auszu-

---

<sup>1</sup> ad-hoc on demand distance vector routing



gehen, dass sich während des Transportes die Kantengewichtungen ändern. Dieser Unterschied ist unabhängig vom gewählten Routingprotokoll und soll im Folgenden näher untersucht werden. Hierbei wird eine optimale Routenwahl vorausgesetzt und die Kantengewichtung als Kantenlänge interpretiert<sup>2</sup>.

Abbildung 2 zeigt ein sich veränderndes Netz, auf dem zum Zeitpunkt  $t=0$  eine optimale Route vom linken zum rechten Eckknoten bestimmt wurde. Diese Route wird bis zum Ziel verfolgt und nicht mehr geändert. Es ist einsichtig, dass es sich bei dieser Route nicht zwangsläufig um die optimale Route für die gesamte Zeit handeln muss.

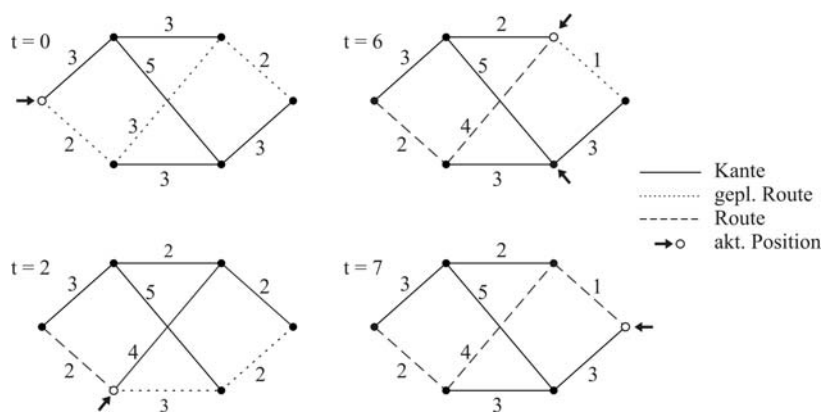


Abbildung 2: Optimale Route zum Zeitpunkt  $t = 0$ .

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, kann man versuchen, in jedem Knoten erneut die optimale Route zu bestimmen. Ein solches Verfahren wird reaktives Routing genannt<sup>3</sup>. In Abbildung 3 ist dieses Verfahren dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t=0$  wird wie im ersten Verfahren die aktuell optimale Route bestimmt. Am Knoten, zum nächsten Zeitpunkt  $t=2$ , wird erneut die aktuell optimale Route bestimmt, welche sich aufgrund der Verkürzung des unteren Weges von der vorherigen unterscheidet. Das Routingverfahren ändert also die geplante Route, wenn eine Reaktion notwendig ist. Allerdings führt auch dieses Verfahren nicht zum Gesamtoptimum – es führt in diesem Beispiel sogar zu einer längeren Route als das vorherige Verfahren.

<sup>2</sup> Im Prinzip können hierzu auch andere Metriken benutzt werden, das Beispiel vereinfacht sich jedoch, wenn man Kantenlängen benutzt.

<sup>3</sup> Im Gegensatz zu der oben genannten Reaktivität bezieht sich „reaktiv“ hier auf die Reaktion auf sich während des Weges verändernder Kantengewichtungen und nicht auf die Art, wie und wann eine Route bestimmt wird.

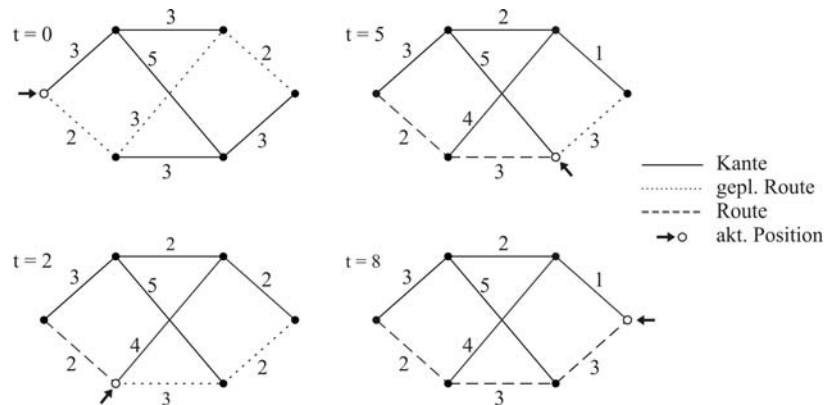


Abbildung 3: Reaktives Routing.

Die logische Konsequenz für das Routing in sich verändernden Netzen ist, den zukünftigen Netzzustand in das Routing mit einfließen zu lassen. Es ist leicht ersichtlich, dass bei vollständiger Information über alle zukünftigen Netzzustände die über die Gesamtzeit optimale Route gefunden werden kann (Abb. 4), welche in der Regel kürzer ist, als die durch die vorherigen Verfahren ermittelten Wege.

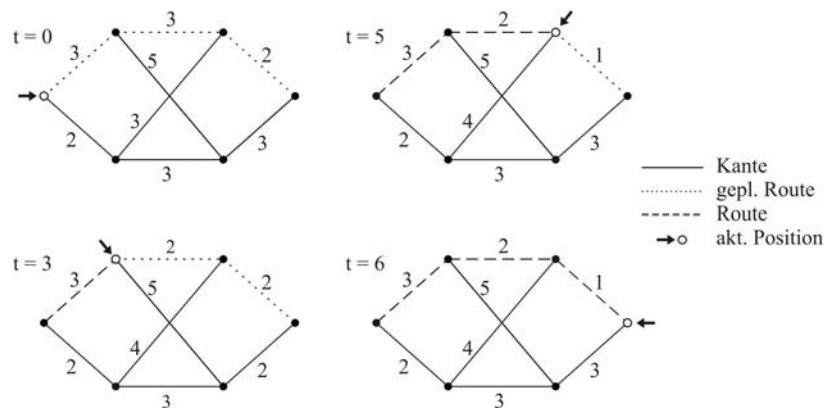


Abbildung 4: Routing mit Zukunftsinformationen.

In einem Transportnetz kann man jedoch nicht annehmen, dass der zukünftige Netzzustand vollständig bekannt ist. Vielmehr kann dieser nur geschätzt werden und ist demnach mit Ungewissheiten behaftet. Mit einem numerischen Versuch kann man für das Beispielnetz zeigen, dass auch bei fehlerhafter Schätzung meist eine gute Route gefunden wird. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse dieses Versuches aufgetragen. Das klassi-

sche Routingverfahren (Abb. 2) liefert mit 160% bei einer festgelegten Netzdynamik<sup>4</sup> im Mittel eine um 60% längere Route als die über die gesamte Zeit optimale Route (=100%). Durch ein reaktives Routing lässt sich dies auf ca. 130 % verbessern. Ein schätzungsbasiertes Routing dagegen liefert im Mittel eine noch kürzere Route, wenn die Standardabweichung der Schätzung kleiner als 40% ist. D.h. in diesem Fall, dass schon eine sehr grobe Schätzung<sup>5</sup> der zukünftigen Netztopologie ein verbessertes Routing ermöglicht. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch eine Neuberechnung der Route in jedem Knoten erreichen, also durch ein schätzungsbasiertes und reaktives Routingverfahren.

Diese Abschätzungen lassen sich nicht ohne weiteres auf größere Transportnetze übertragen, sie sind jedoch ein Indiz für die Richtigkeit der Annahme, dass Schätzungen über die zukünftige Netztopologie ein Routingverfahren für dynamische Netze wesentlich verbessern. Eine genauere mathematische Untersuchung wird derzeit durchgeführt.

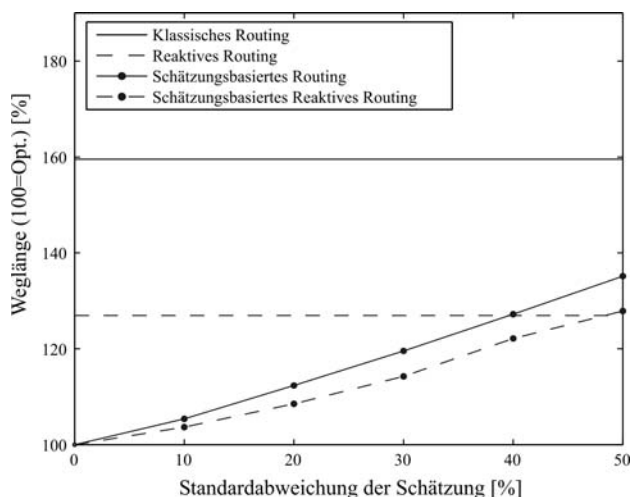


Abbildung 5: Vergleich verschiedener Routingverfahren.

### 3.4 Verknüpfung von Paket- und Fahrzeug-Routing

Wie schon in Abschnitt 3.1 erläutert, besteht ein zweiter struktureller Unterschied zwischen Kommunikations- und Transportnetzen in der Anzahl der Objektarten, für die ein Weg gefunden werden muss. In einem Kommunikationsnetz müssen nur den Datenpa-

<sup>4</sup> Unter Netzdynamik ist hier eine gewisse Änderungsrate und -höhe der Kantengewichtungen zu verstehen.

<sup>5</sup> Für die Simulation wurde das wahre Kantengewicht mit einem normalverteilten Fehler der angegebenen Standardabweichung versehen und dieser Wert als Schätzung angenommen.

keten Routen zugeordnet werden. In einem Transportnetz dagegen benötigen sowohl die zu transportierenden Pakete als auch die sie transportierenden Fahrzeuge eine Route.

Zielvorgaben und Gründe der Routenwahl unterscheiden sich deutlich von einander. Während die Pakete eine Route benötigen, welche sie bis zum Liefertermin von ihrem Standort an ihr Ziel bringt, benötigen die Fahrzeuge Routen, welche ihnen eine hohe Auslastung garantieren, jedoch kein festes Ziel ansteuern. Zusätzlich hängen beide Routenentscheidungen jedoch sehr eng zusammen, denn beide Seiten benötigen zur Routenwahl Informationen über die Routen der jeweils anderen Seite. Ein Paket kann nur seinen eigenen Weg bestimmen, wenn es weiß, auf welchen Kanten es von einem Fahrzeug mitgenommen wird. Ein Fahrzeug kann seine Auslastung auf einem bestimmten Weg nur dadurch bestimmen, dass es Informationen über die Strecken der Pakete besitzt.

Dieses Dilemma kann nur durch eine Form der Kommunikation zwischen beiden Objekten aufgelöst werden. Vorgeschlagen wird dazu eine indirekte Kommunikation<sup>6</sup>. Pakete können ihre beabsichtigte Route an jedem beteiligten Knoten anmelden. Diese Informationen können von Fahrzeugen zur Routenplanung genutzt werden und Fahrzeuge melden dann ebenfalls ihre beabsichtigte Route an den beteiligten Knoten an. Diese Information kann dann wiederum von Paketen benutzt werden. Da nicht alle Objekte in einem Transportnetz zur gleichen Zeit ihre Route planen, sondern permanent Pakete auftauchen oder ihr Ziel erreichen, sind zu jedem Zeitpunkt Informationen zur Routenplanung vorhanden.

Dieser Ansatz der indirekten Kommunikation bietet zwei entscheidende Vorteile: Zum einen können auch gleiche Objekte untereinander ihre Wege abstimmen, z.B. können Pakete zu stark frequentierte Knoten meiden, um einem Stau beim Be- oder Entladen zu entgehen. Zum anderen können über diese Anmeldungen die im vorherigen Abschnitt geforderten Informationen über den zukünftigen Netzzustand gut geschätzt werden, denn ein Anmelden bedeutet zwangsläufig eine Aussage darüber, wo und wann ein Objekt anzutreffen sein wird.

### **3.5 Zusammenfassung und Ausblick**

Eine Übertragung von Routingprotokollen aus der Datenkommunikation erscheint im Hinblick auf die Ähnlichkeiten von Kommunikations- und Transportnetzen sinnvoll. Die damit verbundenen Vorteile der dezentralen Steuerung durch Routingprotokolle lassen sich übertragen und stimmen mit den Zielvorstellungen einer Selbststeuerung

---

<sup>6</sup> Andere Ansätze zur Selbststeuerung, wie z.B. Agentenbasierte Ansätze, wählen hier eine direkte Kommunikation über Verhandlungen.

überein. Eine Anpassung der Protokolle ist jedoch aufgrund spezifischer Anforderungen der Transportnetze notwendig und wurde im Grundsatz skizziert.

Eine grundsätzliche Übertragbarkeit wurde bereits durch eine erste Implementierung eines Routingprotokolls in eine Transportnetzsimulation nachgewiesen. Im nächsten Schritt werden die angesprochenen Protokollanpassungen in die Transportnetzsimulation integriert, sprich eine Schätzung des zukünftigen Netzzustands mit dessen Verarbeitung beim Routing und die Trennung in Paket- und Fahrzeugrouting. Hiermit lassen sich dann die Eignung und Leistungsfähigkeit der Routingverfahren für die Selbststeuerung untersuchen. Neue Einsichten im Bereich des Routings in sich stark verändernden Netzen werden hierdurch erwartet.

#### **4. Praxisprojekte: Robotersysteme in der Verteillogistik**

Im Umfeld des Bremer Sonderforschungsbereiches 637 läuft eine Reihe von Praxisprojekten, die die Idee der logistischen Selbststeuerung Schritt für Schritt umsetzen. So wird z.B. am Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA) der Einsatz von Robotersystemen in der Verteillogistik untersucht. Zusammen mit intelligenten Identifikations-, Sensor- und Ortungstechnologien bilden solche Robotersysteme einen Grundbaustein für die Selbststeuerung logistischer Prozesse.

##### **4.1 Intelligente Roboter für automatisierte Entladesysteme**

In der Logistik werden Roboter heute vor allem für das Palettieren, Packen oder Kommissionieren eingesetzt. In der Verteillogistik sind sie jedoch selten anzutreffen, da die Ent- und Beladesituationen meistens durch chaotisch gelagerte, lose Stückgüter in Containern, Rollbehältern und Lkw-Laderäumen charakterisiert sind, für die bisher keine technische Lösungen zur Automatisierung verfügbar sind. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2002 am BIBA in einem Verbundprojekt damit begonnen, ein System zur automatischen Entladung von Wechselcontainern zu entwickeln.

Im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten stehen vor allem die Integration von RFID-Leseinheiten in vorhandene Robotersysteme sowie Untersuchungen zur Umsetzung der Selbststeuerung. Als Ziel wird die Entwicklung von voll automatisierten Entladesystemen für die Verteillogistik verfolgt. Zur Realisierung der Selbststeuerung müssen zunächst alle Verteilprozesse automatisiert werden. Dazu wurde im BIBA ein vollautomatisches Robotersystem zur Entladung von Wechselbehältern für standardisierte Packstücke entwickelt. Ein Laserscanner erfasst den Container-Innenraum, d.h. die Lage der Packstücke und übermittelt die Daten an die Robotersteuerung, die damit die Zielkoor-

dinaten für den Greifer des Roboters bestimmt. Der Roboter kann somit Pakete unterschiedlicher Größe und Form mit einem Gewicht bis zu 31,5 Kilogramm aus dem Container ausladen und auf ein Förderband ablegen. Die möglichen Einsatzorte für dieses Robotersystem sind Logistikzentren, die loses Stückgut aus Containern und Wechselbrücken entladen.

## **4.2 Intelligente Pakete steuern Roboter**

Als nächster Projektschritt wird die Handhabungstechnologie mit Radiofrequenz-Identifikationstechniken (RFID) kombiniert. Dabei werden die Packstücke mit RFID-Tags versehen, die neben der ID-Nummer weitere logistik-relevante Daten wie z.B. Informationen zur Destination des Paketes enthalten. Im vollautomatisierten Handhabungsprozess tauscht das Paket diese Zielinformation mit dem Robotersystem aus und der Roboter bewegt das gegriffene Paket dann entsprechend dieser Daten weiter. Dies ist ein erster Schritt zur Selbststeuerung des Verteilprozesses. Das „intelligente“ Paket steuert seinen Verteilprozess selbst.

In einem nächsten Schritt soll untersucht werden, ob die Erkennung der Lage und Größe der Pakete im Container-Innenraum durch die „intelligenten“ Pakete selbst erfolgen kann. Dazu muss der RFID-Tag zunächst Daten über die Größe seines Paketes enthalten. Weiterhin müssen die Tags in der Lage sein, über ein Ortungssystem ihre Lage und Orientierung im Container-Innenraum zu ermitteln. Diese Daten über Lage und Größe des Pakets werden dann dem Robotersystem mitgeteilt, das daraufhin die Bewegung zum Paket und für das Zugreifen berechnet und ausführt.

Anhand der beschriebenen Projektschritte wird der Weg zur Selbststeuerung logistischer Prozesse deutlich. Einzelne Steuerungsaktivitäten werden Schritt für Schritt auf die zu transportierenden Güter verlagert. Dazu benötigt das Transportgut einen bestimmten Grad an Intelligenz, die mit den in Abschnitt 2.2 genannten IuK-Technologien realisiert wird. Diese Technologien ermöglichen eine gewisse Autonomie des einzelnen Transportgutes. Je mehr Intelligenz und damit Autonomie das einzelne Paket erhält, umso höher der Grad der Selbststeuerung.

Im konkreten Fall der Entladung von Containern und der Verteilung der Pakete durch Roboter würde die Selbststeuerung der Pakete solche Verteilanlagen und Robotersysteme universell für viele unterschiedliche Verteilprozesse nutzbar machen. Ein neues Geschäftsmodell kann die Betreiber solcher Verteilanlagen in die Lage versetzen, über 24 Stunden Verteilleistungen an verschiedene Dienstleister zu verkaufen. Die Nutzung der hier vorgestellten Systeme ermöglicht erste innovative Kommissioniervorgänge unter der Berücksichtigung des Ansatzes zur Selbststeuerung logistischer Prozesse.

## 5. Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund immer komplexer werdender Logistiknetzwerke und einer zunehmenden Dynamik logistischer Prozesse führen aktuelle und künftige technologische Hard- und Softwareentwicklungen zu einem grundlegenden Paradigmenwechsels in der Steuerung und dem Management logistischer Prozesse. Es entstehen autonome, dezentrale Steuerungssysteme, die sich unter Einsatz neuer Methoden und Strategien koordinieren. Die dafür notwendigen logistischen, informationstechnischen und organisatorischen Konzepte, Modelle, Methoden und Werkzeuge werden innerhalb des Bremer Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse“ erforscht und entwickelt.

## Förderung

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

## Literatur

- FHS 04 Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. *Industrie Management* 20(2004)1, S. 23-27.
- Per 01 Perkins, C. E.: *Ad hoc networking*. Addison-Wesley, Boston u. a. 2001.
- Rop 79 Ropohl, G.: *Eine Systemtheorie der Technik*. München 1979.
- Scho 98 Scholz-Reiter, B.: Chancen und Möglichkeiten der reaktiven Planung und Steuerung von intermodalen Stückgütertransporten. In: Fluhr, M. (Hrsg.): *Innovative Lösungen für den Verkehr von morgen*. inTime, Berlin 1998, S. 32-48.
- SWF 04 Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Freitag, M.: Autonomous logistic processes: New demands and first approaches. In: Monostori, L. (ed.): *Proc. of 37th CIRP-ISMS*, Budapest, Hungary, 2004, pp. 357-362.
- WGP 05 Wenning, B.-L.; Görg, C.; Peters, K.: Ereignisdiskrete Modellierung von Selbststeuerung in Transportnetzen. *Industrie Management* 21(2005)5, S. 53-56.