

# **Komplexität der Bedarfsprognosen und ihre Wirkungen in kooperativen Logistiknetzwerken**

P. Egri<sup>1</sup>, B. Cs. Csáji<sup>1</sup>, Zs. Kemény<sup>1</sup>, L. Monostori<sup>1,2</sup>, J. Váncza<sup>1,2</sup>

Computer and Automation Research Institute  
Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary<sup>1</sup>

Department of Manufacturing Science and Technology  
Budapest University of Technology and Economics, Hungary<sup>2</sup>

## **Abstract**

In diesem Beitrag untersuchen wir grundlegende Elemente der Kooperation in Logistikketten, die auf Informations- und Güterflüssen basieren, einschließlich Austausch unsicherer Pläne. Für die Handhabung der Unsicherheit wird ein hierarchisches Komplexitätsmodell vorgestellt, darüber hinaus beschreiben wir unterschiedliche Qualitätsmaße für die Pläne, die als Basis der Steigerung der Gesamteffektivität der Produktion dienen können. Schließlich zeigen wir eine praktische Anwendung der Konzepte, sowie einige zukünftige Forschungsmöglichkeiten.

Keywords: Bedarfsprognose, Produktionsnetzwerke

## **1 Einleitung**

Die Nachfrage am Markt der Endprodukte wird heutzutage typischerweise von Logistiknetzwerken bedient, die aus autonomen Unternehmen zusammengesetzt sind. Sowohl der Aufbau solcher Netze, als auch die immer kritischer werdenden Kundenansprüche – inklusive kürzerer Durchlaufzeiten – ermöglichen es nicht mehr, die Handhabung der Unsicherheiten des Bedarfs auf traditionelle Weise vorzunehmen. Den Beobachtungen nach überspannen solche Probleme mehrere große Produktionsbereiche, wie Low-Tech- ([MKV+07]) und Hi-Tech-Produktion, pharmazeutische- und Automobilindustrie ([DBL+07]) u.v.m. Da Lagerbestände für ein konstant hohes Dienstniveau in vielen Fällen immer noch unumgänglich sind, sollte die Lagerproduktion entsprechend dimensioniert werden. Da Letzteres aber nur mit Hilfe von Bedarfsprognosen möglich ist, deren Unsicherheiten im Laufe der Zeit stark zunehmen, müssen neue Paradigmen zur Verwaltung der Produktionsnetzwerke herangezogen werden.

Strategische Partnerschaft und enge Kooperation zwischen Unternehmen – wie z.B. elektronischer Datenaustausch (EDI) und lieferantengesteuerter Bestand (VMI) – haben sich in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr verbreitet, um mit zusätzlicher Informationsteilung eine Verbesserung der Ef-

ektivität der Produktion – meistens mit Erfolg, und zum Nutzen beider Teilnehmer – zu erzielen. Die Anwendung solcher neuer Methoden bedeutet jedoch auch die Einführung neuer Dienstleistungen, die bei den Handelspartnern neue Arten von Verträgen und geeignete Leistungsmaße erfordern.

In diesem Beitrag wird der Planung auf taktischer Ebene im Detail nachgegangen, und daher werden Rahmenpläne als vorgegeben angenommen, und die kurzfristige Koordination wird ebenfalls außer Acht gelassen. Bei der Planung können niemandem die Ziele und beabsichtigte Verfahrensweisen anderer Partner völlig bekannt sein, dementsprechend zeugen plötzlich auftretende, akute Vorratsmängel oder -Überflüsse des öfteren über Beeinträchtigungen der Effektivität, die meist durch Unsicherheiten, asymmetrisch verteilte Informationen oder lokal abgegrenzte Autonomie verursacht werden. Eine mögliche Lösung zu diesem Dilemma kann die **Teilung der Informationen bieten**, sowie die **kooperative Planung**, bei der die Interessen der einzelnen Teilnehmer den systemweiten Vorgaben angepasst werden. Solche Systeme zeigen ein komplexes adaptives Verhalten, das aus den relativ einfachen lokalen Beziehungen der Partner hervorgeht. Jedoch verlangt die Industrie Garantien; einerseits für das Hervorgehen einiger nützlicher Merkmale (z. B. hohes Dienstniveau), andererseits gegen unerwünschte Erscheinungen. Ziel unserer Forschung war die Entwicklung eines Planungsmechanismus, wo die wahrheitsgemäße Teilung der Informationen und lokal optimale Produktionsplanung zusammen sowohl den systemweiten, als auch individuellen Interessen gerecht wird. Eine weitere, eher praktische Bestrebung war die Entwicklung von Methoden, die der alltäglichen Führungspraxis nicht fremd sind, und sich auf solche Daten stützen, die in Standardsystemen zur Unternehmensführung verfügbar sind.

## **2 Ein Komplexitätsmodell von Unternehmensnetzwerken**

Heutzutage wird es in immer mehr Wissenschaften nötig, die Komplexität eines Systems, einer Struktur oder einer Aufgabe zu messen, und daraus Grenzen oder quantitative Zusammenhänge zu erhalten: neben Informatik und Ingenieurwesen stößt man auch in „traditioneller“ Mathematik, Physik, Chemie, Biologie und Sozialwissenschaften immer häufiger auf diese Aufgabe [LG99]. Als Vorbereitung zur Komplexitätseinschätzung wird in diesem Abschnitt ein abstraktes Modell der zusammenarbeitenden Unternehmen vorgestellt. Dies beinhaltet drei Untermodelle (siehe auch Überblick in Bild 1): die Beschreibung der Umwelt (mit stochastischen Prozessen), das Modell des Unternehmensnetzwerkes (auf Netzwerktheorie basierend), sowie das Modell der Zusammenarbeit (als komplexes adaptives System abgebildet).

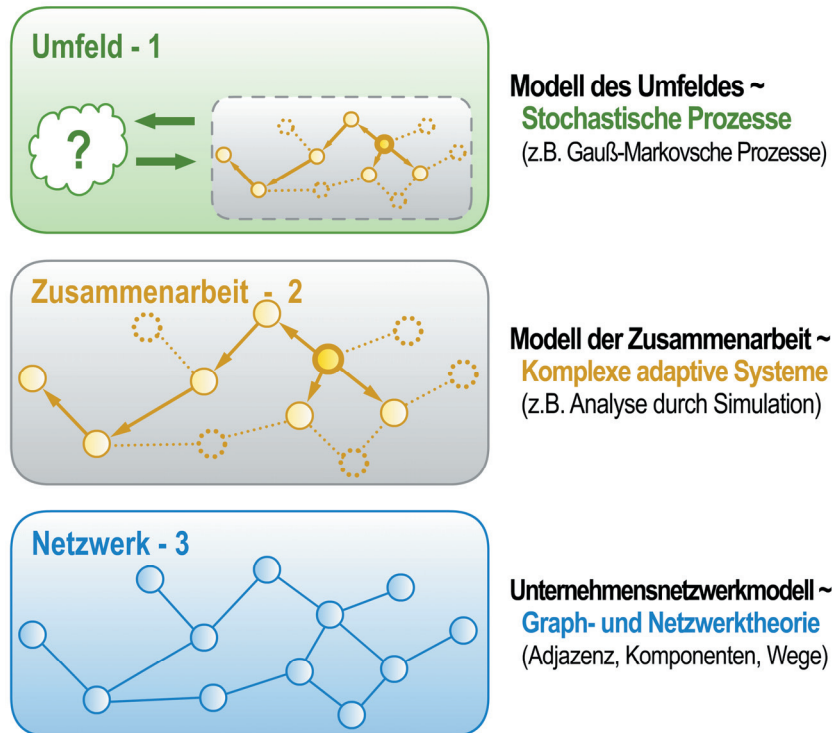


Abbildung 1: Konzeptueller Überblick des vorgeschlagenen semi-formalen Modells

Falls das Modell die Komplexität beschreiben und zahlenmäßig ausdrücken kann, kann es zur Identifizierung der Hauptursachen der Komplexität in verschiedenen Arten der Zusammenarbeit herangezogen werden. Auch könnte ein solches Modell zum gemeinsamen Anhaltspunkt und zur Grundlage weiterer Forschung zur Handhabung der Komplexität werden, und daher kann es ferner Hilfe bei der Entwicklung von Entscheidungshilfesystemen zur Planung und Steuerung von Unternehmensnetzwerken dienen. Beispielsweise könnten solche Modelle die theoretischen Grundlagen der Leitung von Zusammenarbeit bereichern (wie bei Lieferketten, die in einem unsicheren, sich schnell ändernden Umfeld funktionieren). Daher sind sie womöglich auch von großer praktischer Bedeutung.

## 2.1 Das Modell des Umfeldes

Um ein wirksames Modell des Unternehmensnetzwerkes aufzubauen, sollte auch dessen Umfeld abgebildet werden, denn letzteres beeinflusst nicht nur die Zusammenarbeit, es treibt sie gegebenenfalls auch voran. Unserer Ansicht nach sollten hierbei alle Faktoren des Umfeldes herangezogen werden, die die Zusammenarbeit auf irgendeine Weise beeinflussen, z. B. die Kunden, und die allgemeine Lage der Wirtschaft. Damit die Komplexität des Modells jedoch auf einem hinnehmbaren Niveau bleibt, verwenden wir ein sehr abstraktes Umfeldmodell, in welchem das unsichere Verhalten des Umfeldes durch eine multivariate Zufallsvariable beschrieben werden soll.

Da das Umfeld sich mit der Zeit verändert, betrachten wir gleich eine Sequenz solcher Variablen, die auch als stochastischer Prozess bezeichnet wird [PP01].

Stochastische Prozesse sind Standardmodelle, wie sie beispielsweise in Statistik, Signalverarbeitung oder maschinellem Lernen Verwendung finden. Sie bestehen aus einer Variablensequenz  $X_1, X_2, \dots, X_{t-1}, X_t, X_{t+1}, \dots$ , wo jedes  $X_t$  eine Zufallsvariable ist, die als eine Funktion zwischen der abgetasteten Abbildung des Raumes eines Wahrscheinlichkeitsmaßes und dem messbaren Raum der möglichen Resultate ausgedrückt werden kann. Die Variablen beschreiben also ein Ereignis, welches aus der Sicht des Beobachters unsicher ist. Multivariate Zufallsvariablen ergeben einen Vektor, zumal sie einem Element des Abstraumes mehrere Werte zuordnen. Sie können mit Hilfe ihrer Verteilungen adäquat angegeben werden.

Das vorgeschlagene Modell hält das Umfeld für einen stochastischen Prozess, welches als stationär (oder als Markovscher Prozess) angenommen werden kann, d. h., wir kümmern uns nicht um die innere Struktur und die inneren Zusammenhänge des Umfeldes. Zwar erhält man dadurch eine „Black Box“, jedoch hat man immer noch mit einem formalen statistischen Modell zu tun. In unserem Modell kann der Zustand des Umfeldes zu jedem Zeitpunkt  $t$  durch eine multivariate Zufallsvariable  $X_t$  beschrieben werden, wo jedes Element  $X_{t,j}$  eine einwertige Zufallsvariable ist, die einen bestimmten, von uns als wichtig betrachteten Aspekt des Umfeldes zu beschreiben hat. Einige solcher Aspekte sind die Anzahl der Aufträge, die Anzahl der bestellten Produkte, Liefertermine, die Treue der Kunden, externe Kosten, die Lage der Wirtschaft (Zinsen, Währungskurse, Anlagenpreise), oder gar auch die soziale, kulturelle oder politische Situation.

Um die Komplexität der Zufallsvariablen auszudrücken, kann man das Konzept der Entropie heranziehen [Shan48]. Es sollte angemerkt werden, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariable durch angesammelte historische Daten geschätzt werden kann. Ein möglicher Ansatz zur Verwendung der Entropie als Qualitätsmaß der Prognosen wird in [STH07] vorgestellt.

## **2.2 Statische Netzwerkmodelle**

Es wird angenommen, dass die Kerntopologie eines Unternehmensnetzwerkes quasi-statisch ist oder sich langsam ändert, und sie daher mit der Netzwerktheorie adäquat modelliert werden kann.

Moderne Netzwerktheorie [Bara02], [Newm03], und daher auch Netzwerk- und topologische Komplexität beruht auf der Graphtheorie, einer der grundlegenden Theorien der diskreten Mathematik. Ihre Geschichte kann bis auf

die 1735 datierte Lösung des Königsberger Brückenproblems von Euler zurückgeführt werden.

Die Bestandteile der Graphen können den Elementen eines Firmennetzwerkes auf natürliche Weise entsprechen, z. B.:

- Ecken ~ Unternehmen oder Funktionalitäten,
- Kanten ~ Verbindungen zwischen Unternehmen oder Funktionalitäten,
- Eckengewichte ~ Produktionskapazitäten,
- Eckennamen ~ Kompetenzen,
- Kantennamen ~ Verbindungstyp,
- Kantengewichte ~ Stärke der Zusammenarbeit,
- Farben, Bezeichnungen, Gewichte ~ Rollen, Objekttypen, Größen.

Die Netzwerktheorie hat viele „Serienlösungen“ zu Komplexitätsmaßen parat, die auch zum Ausdrücken der Komplexität der Kernstruktur von Unternehmensnetzwerken herangezogen werden können [Newm03], wie z. B. auf Inzidenzrelationen, Symmetrien, Entropien oder Komponenten basierende Maße, Durchgangszahlen, A/D-Indizes. Die Ergebnisse der Netzwerktheorie ermöglichen die direkte Anwendung der Maße zur statischen Beschreibung eines Unternehmensnetzes.

## 2.3 Modell der Zusammenarbeit

Die wahrscheinlich wichtigsten Elemente der Zusammenarbeit von Unternehmen verhalten sich dynamisch und sind daher schwer zu modellieren oder zu analysieren. In diesem Abschnitt schlagen wir vor, das dynamische Verhalten eines Unternehmensnetzwerkes als komplexes adaptives System (engl. CAS) zu modellieren. CAS ist ein neues Paradigma [Holl92], dessen Zielsetzung die Untersuchung der Strukturen und der Dynamik des Systems und die Frage zusammenfasst, wie die Adaptivität des Systems Komplexität erzeugt.

Ein CAS kann als Multiagentensystem (MAS) aufgefasst werden, in welchem „ein entscheidender Teil der Umgebung eines Agenten aus anderen adaptiven Agenten besteht, so dass die Anpassungsbemühungen eines jeden Agenten teilweise zur Anpassung an andere adaptive Agenten verwendet werden“. Solch ein Agent kann jede Entität mit Selbstorientierung (wie Zellen, Spezies, Individuen, Unternehmen oder Nationen) repräsentieren.

Umweltbedingungen ändern sich auch wegen der Wechselwirkung der Agenten, als sie um dieselben Ressourcen konkurrieren oder auf ein bestimmtes Ziel hinzu zusammenarbeiten. Das ändert wiederum das Verhalten der Agenten. Die bemerkenswerteste Erscheinung eines CAS ist das Hervorgehen von hochstrukturierten kollektiven Verhaltensmustern aus der Wechselwirkung von einfachen Subsystemen. Dies zeigt auch Abbildung 2

mit dem Hervorgehen eines adaptiven Verhaltens aus der lokalen Wechselwirkung der Agenten.

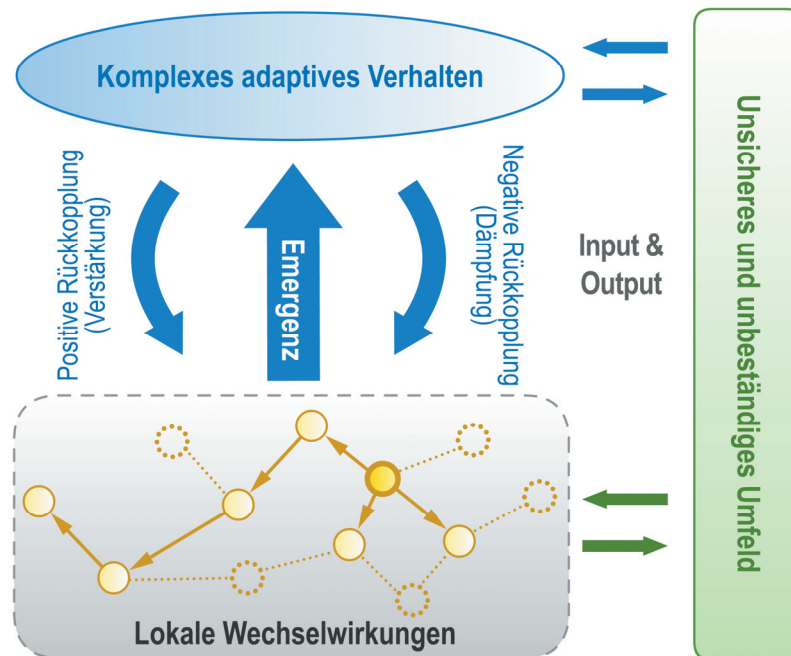


Abbildung 2: Emergenz in komplexen adaptiven Systemen (CAS)

Einige der typischen Eigenschaften eines CAS sind Dynamik mit zusammenhängenden räumlichen und zeitlichen Effekten; Korrelationen, die große Entfernungen und Zeitintervalle überspannen; sowie eng gekoppelte Freiheitsgrade und nicht vertauschbare Systemelemente, um nur die wichtigsten Merkmale zu nennen. Sowohl ein CAS, als auch sein Umfeld entwickeln sich zusammen, um sich in einem Quasi-Gleichgewichtszustand zu halten.

CAS ergeben einen natürlichen Rahmen zur Modellierung von Strukturen, wie zusammenarbeitende Unternehmen, und zur Untersuchung derer Komplexität [CsM08]. Ein Unternehmen kann einem Agent entsprechen, der in einer unsicheren und sich ändernden Umwelt mit anderen Agenten Verbindungen eingeht. Hierbei soll darauf hingewiesen werden, dass es schon eine größere Palette von Produktionssteuerungsansätzen auf MAS-Basis gibt [CsMK06].

Beim Entwerfen eines CAS sind Schwierigkeiten, wie z. B. nichtlineare Erscheinungen, lückenhafte Daten und Wissen, die kombinatorische Explosion der Zustände, dynamische Änderungen der Umwelt und der Rahmenaufgabe zu handhaben. Die zentrale Frage dabei ist die Realisierung eines künstlichen Systems, das seinen Zweck unter unvorhersagbaren Bedingungen erfüllen kann. Komplexe Systeme zeigen jedoch Verhaltensmuster,

die als archetypisch oder prototypisch bezeichnet werden können. Um solche Systeme handhaben zu können, soll daher eine geeignete Balance zwischen Steuerung und Emergenz gefunden werden.

Die Schwierigkeit, die Wirkung der einzelnen Eigenschaften der Agenten auf ihr kollektives Verhalten zu begreifen betont die Wichtigkeit der Simulation als Mittel zum Entwurf und zur Optimierung solcher Systeme. In dieser Hinsicht soll die passende Balance zwischen Simulation und Theorie angepeilt werden; unsere weitere Forschungstätigkeit wird auch diesen Weg einschlagen.

### 3 Bewertung der Bedarfsprognosen

Wie es im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, geht das Verhalten eines Netzwerkes aus den einzelnen Wechselwirkungen seiner Agenten hervor. Demnächst wird ein spezielles Modell auf der Ebene der Zusammenarbeit untersucht, welches das Ziel hat, das unnötige Ansteigen der Umfeldunsicherheit zu verhindern, und wirkt damit dem sogenannten Peitscheneffekt entgegen. Drei Typen der Unsicherheit können als Hauptprobleme bei der Produktionsplanung auf einem turbulenten Markt identifiziert werden: Frequenzen, Schwankungen und Streuungen [Wien06]. Dies ist zwar zutreffend für ein einzelnes Unternehmen, doch bei Betrachtung einer ganzen Lieferkette steigt die Unsicherheit der Prognosen auch wegen der Prozesscharakteristik, wie das in Abbildung 3 demonstriert wird.

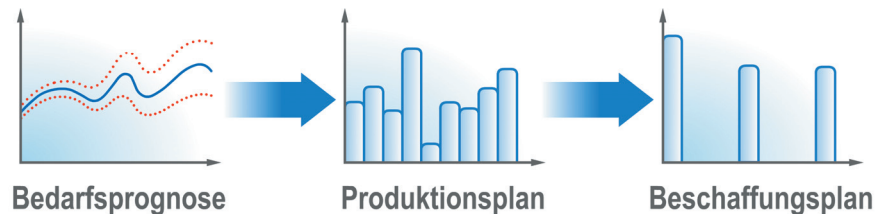


Abbildung 3: Verlust der Information im Planungsprozess

Die Bedarfsprognose, die meist teilweise mit statistischen Methoden erstellt wird, leidet unter den zuvor genannten Unsicherheiten. Praktische Produktionsplanungssysteme können jedoch stochastische Aufgaben nicht behandeln, daher werden die Prognosedaten in deterministische Werte umgewandelt, die um Sicherheitsbestände zum Schutz gegen Nachfrageschwankungen ergänzt werden [HS96]. Hiernach wird die Produktion geplant, wobei noch mehrere Nebenbedingungen und Ziele (wie Kapazitätsgrenzen, verfügbares Personal, balancierte Produktion, Wirtschaftlichkeit usw.) beachtet werden. Aus diesem Plan kann die entsprechende Nachfrage nach Bauteilen errechnet werden, jedoch wird in diesem Schritt öfters zu Aggregation und Anpassung an Losgrößen gegriffen. Die unerwünschte Ei-

genschaft dieser Prozedur ist, dass eventuell kleinste Änderungen der Bedarfsprognose einen völlig anderen Beschaffungsplan ergeben. Mit lieferantengesteuertem Bestand (engl. VMI) kann diesem letzten Schritt vorgebeugt werden, sobald Bauteile nach Produktionsbedarf und nicht per Bestellung geliefert werden [SAP03]. Demnächst verwenden wir daher den Begriff „Prognose“ im Sinne einer sich direkt aus dem Produktionsplan ergebenden Vorhersage ohne Aggregation, und untersuchen die Koordinierung des Lieferkanals unter dem Angebot einer Kompensation, die der Lieferant für das Anbieten einer VMI-Dienstleistung erhält.

### 3.1 Messung der Prognosequalität bei rollendem Zeithorizont

Ein verbreiteter Ansatz bei praktischen Systemen ist die Planung mit rollendem Zeithorizont, wobei Prognosen in jeder Periode so erstellt werden, dass zwei aufeinanderfolgende Vorhersagen der Länge  $n$  überlappend insgesamt  $n-1$  Perioden abdecken. Im überlappenden Intervall wird die ältere Prognose durch die neuere ersetzt, die anhand neu verfügbarer Information erstellt wurde.

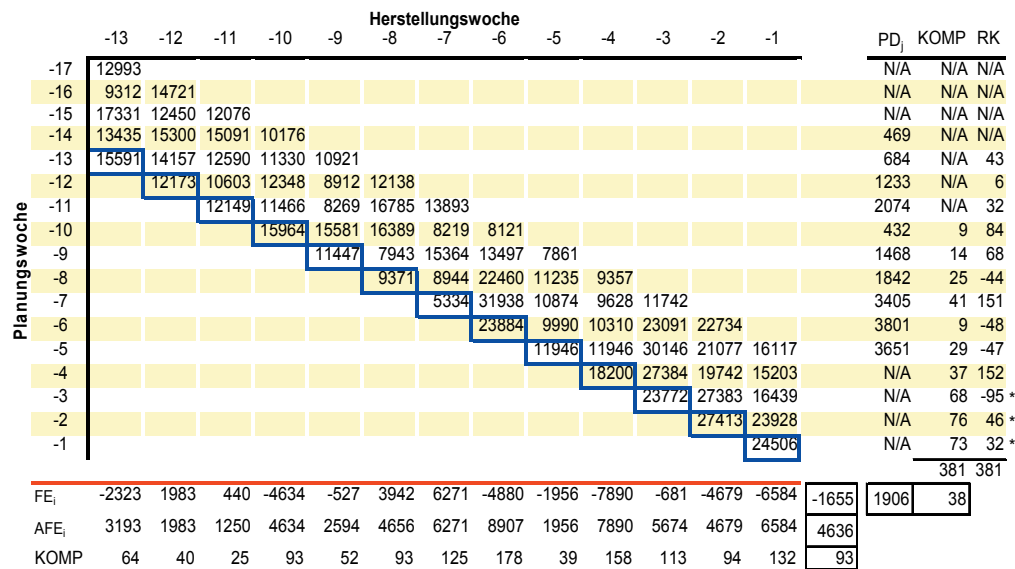


Abbildung 4: Verwendungsprognose mit rollendem Zeithorizont

Das Hauptkriterium des Herstellers ist der Unterschied zwischen geplantem und tatsächlichem Verhalten, gemessen an der Ungenauigkeit der Prognose. In unserem Beispiel soll  $f_{i,j}$  die Prognose für die Periode  $i$  (erstellt in Periode  $j$  ( $j+1 \leq i \leq j+n$ )) bezeichnen, während  $u_i$  für den tatsächlichen Verbrauch in Periode  $i$  stehen soll. Abbildung 4 zeigt wirkliche Daten aus einer industriellen Anwendung (wie in Abschnitt 4 beschrieben), nämlich die wöchentliche Nachfrage für ein bestimmtes Verpackungsmaterial. Die gegenwärtige Woche hat den Index 0, die Tabelle beinhaltet also historische



Daten. Jede Zeile stellt eine Prognose für die nächsten  $n=4$  Wochen dar, die in der jeweiligen Woche erstellt wurden.

Eine Möglichkeit, die Ungenauigkeit der Prognose relativ zum tatsächlichen Verbrauch auszudrücken, ist die Differenz zwischen tatsächlichem und prognostiziertem Verbrauch in einer gegebenen Periode:

$FE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n}^{i-1} (f_{i,j} - u_i)$ . Beispielsweise ist der Prognosefehler für die Periode  $-3$  (errechnet anhand Perioden  $-7, \dots, -4$ ) gleich  $-681$ ; dies heißt, dass der Verbrauch im Durchschnitt untergeschätzt wurde. Hierbei bereitet es womöglich Probleme, dass Unter- und Überschätzungen ihre Wirkungen gegenseitig ausgleichen können. Letzteres kann mit der Verwendung absoluter Differenzen vermieden werden, die die Größe der Fehleinschätzung erfassen, nicht aber die Polarität:  $AFE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n}^{i-1} |f_{i,j} - u_i|$ . Hiernach kann für die zuvor genannte Periode  $-3$  ein absoluter Fehler von  $5674$  angegeben werden. Der Durchschnitt der Fehler über einen Zeithorizont (z. B.  $4636$ ) charakterisiert die systematische Qualität der Prognosen.

Solche Typen der Ungenauigkeitsmessung sind für den Fall einer kontinuierlichen Produktion geeignet, wo eine plötzliche Änderung der Nachfrage eine Neuplanung der Herstellungsvorgänge bewirken kann. Falls die Nachfrage aus einem Lagerbestand befriedigt wird, verursachen Nachfrageschwankungen ein viel kleineres Problem, so dass für den letzteren Fall ein anderes Ungenauigkeitsmaß vorgeschlagen werden kann. Dafür schlagen wir eine **Abweichung** der in Periode  $j$  erstellten Prognose als die absolute Differenz zwischen der insgesamt prognostizierten und tatsächlich realisierten Größe vor, formal ausgedrückt:  $PD_j = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=j+1}^{j+n} (f_{i,j} - u_i) \right|$ . In dem hier aufgeführten Beispiel wurde in der Periode  $-8$  eine Prognose für Perioden  $-7, \dots, -4$  erstellt, deren Summe von den tatsächlichen Werten um  $1842$  abgewichen hat. Falls man den Durchschnitt der Abweichungen ( $1906$ ) mit dem Durchschnitt der Fehler vergleicht, stellt man fest, dass letzteres üblicherweise größer ist, da hierin die Strafmaße für Abweichungen doppelt erhalten sind.

Es soll angemerkt werden, dass es auch ein drittes Maß gibt, nämlich die sogenannte **Nervosität** des Systems, die den Unterschied zwischen zwei überlappenden Intervallen zahlenmäßig ausdrückt.

### 3.2 Ungenauigkeit als Basis der Kompensation

Heutzutage verbreitet sich strategische Partnerschaft immer mehr, und dementsprechend wird VMI als Dienstleistung für Kunden immer öfter angeboten. Dies hat zur Folge, dass sich Kunden nicht mehr festen Bestellungen verpflichten müssen; sie geben lediglich Prognosen an, während die Lieferanten ihre Logistik effektiver planen können, solange die Nachfragen erfüllt

werden. Das führt üblicherweise zur Steigerung der Effektivität des gesamten Netzwerkes. Sollte aber der Kunde – entweder aus Mangel an Motivation oder aus Interesse an verzerrten Daten – falsche Prognosen angeben, steigen in erster Linie die Kosten des Lieferanten. Daher sollte der Lieferant – da er im Grunde eine Dienstleistung durch die Übernahme der Logistiksteuerung anbietet – über den Preis des gelieferten Materials belohnt werden. Hierbei schlagen wir vor, dass diese Belohnung anhand der Unsicherheit der Bedarfsprognose errechnet wird, damit die Kunden auch ein Interesse an der Verbesserung ihrer Vorhersagen haben.

Sollte z. B. der Kunde für die Ungenauigkeit seiner Prognose zur Kasse gebeten werden, ist er definitiv motiviert, die bestmögliche Prognose an den Lieferanten weiterzugeben. Die letzte Zeile der Abbildung 4 beinhaltet eine entsprechende Kompensation  $c_1 * AFE_i$ , wo  $c_1=0,02$  die Kompensationseinheit darstellt. Dies kann auch zur Kostenteilung unter Geschäftspartnern verwendet werden, wobei wir diese Möglichkeit zunächst nicht weiter untersucht haben. Derselbe Fall wird komplizierter aus der Sicht der Abweichung, sobald sich der Kunde für eine beliebige Neuverteilung der Nachfrage innerhalb des Zeithorizontes entscheidet. Beispielsweise würde die Abweichung der Prognose für Periode  $-10$  auch dann gleich  $432$  bleiben, wenn man die Vorhersage der Perioden  $-9, \dots, -6$  für Abschnitt  $-9$  erstellen würde.

Es sollte auch angemerkt werden, dass die Kompensation für diese Abweichung ( $c_1 * PD_j=9$ ) erst in Periode  $-6$  fällig wäre, da erst dann der Bedarf für die Abschnitte  $-9$  bis  $-6$  bekannt wird. Aus Platzgründen kann es hier nur ohne Beweis mitgeteilt werden, dass eine im voraus gezahlte erwartete Entschädigung (auch **rollende Kompensation** genannt) beide zuvor genannte Probleme lösen kann, und dabei die Kunden zur Verbesserung der Genauigkeit ihrer Prognosen motiviert. In unserem Beispiel bezeichnet RK die resultierenden zu zahlenden Beträge (wobei mit \* angemerkt wird, dass die Kompensationen der Wochen  $-3$  bis  $-1$  wegen ihrer inkompletten Horizonte aus der Rechnung ausgeschlossen werden, und daher die Summen der letzten 2 Spalten gleich bleiben). In einigen Perioden kann es auch vorkommen, dass die Zahlungen negativ werden, da die Kompensationen zuvor überschätzt wurden. Wenn die Zahlungen nicht in jeder Periode, sondern in größeren Zeitabständen fällig werden, kann man gegebenenfalls auch Zinsen verrechnen. Dieser Kompensationsansatz kann aber auch zu Produkten mit kurzem Lebenszyklus erweitert werden [VEM08].

## **4 Praktische Anwendung**

Das von uns implementierte System behandelt Daten sowohl auf taktischer, als auch auf der Operationsebene, und ist auch imstande, Engpässe vorherzusagen. Die sogenannte Logistische Plattform (LP) erweist Dienstleis-

tungen für ein ungarisches Herstellernetzwerk mit einem zentralen Unternehmen, das Großserienprodukte nach Kundenwunsch herstellt, und sich den Produkten mehrerer (interner und externer) Lieferanten bedient. Das System überbrückt verschiedene Aspekte über drei Dimensionen. Erstens unterstützt es den Informationsaustausch zwischen Unternehmen für eine automatisierte Vorratsbewirtschaftung an Bauteilen. Zweitens überspannt es verschiedene Schichten der Planungshierarchie. Die dritte Dimension ist entlang der Zeit ausgerichtet: es unterstützt die Überbrückung der Lücken zwischen prognostiziertem Bedarf und zukünftig geplanten Vorräten, und wertet auch die Genauigkeit der Pläne vergangener Epochen im Lichte derer tatsächlichen Ausführung aus. Die Daten des numerischen Beispiels im Abschnitt 3 wurden auch diesem System entnommen, wobei der Einfachheit wegen der Zeithorizont auf lediglich vier Wochen reduziert wurde.

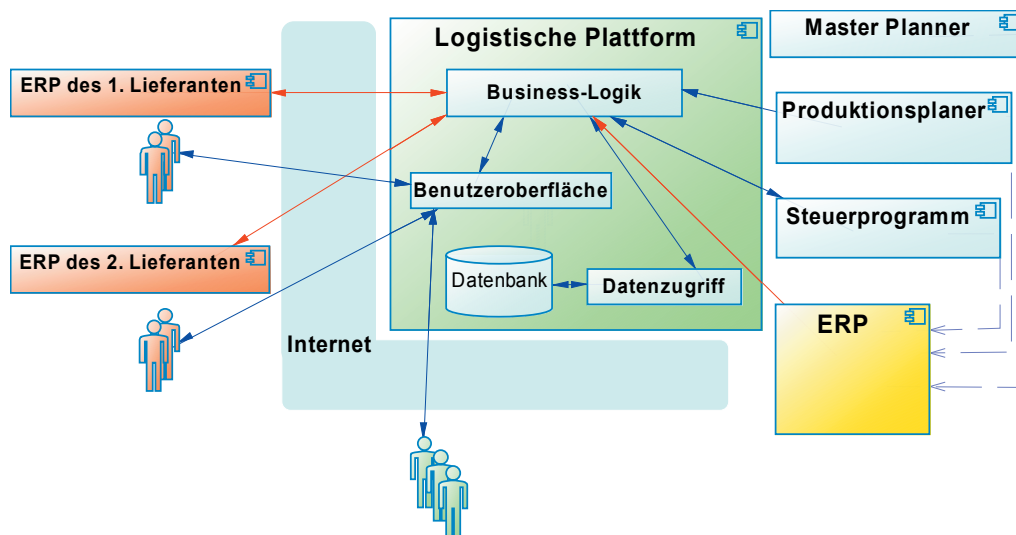


Abbildung 5: Architektur der Logistischen Plattform

Wie es aus der Abbildung ersichtlich wird, stellt die LP eine Schnittstelle zum Informationsaustausch zwischen verschiedenen Systemen bereit, und bietet auch eine Benutzeroberfläche zur nahezu echtzeitigen Überwachung der Vorräte an Bauteilen an. Um die Eingriffe in andere Systeme und den Gesamtaufwand an Software-Entwicklung zu minimieren, wurde die Kommunikation mit anderen Systemen mit direktem Datenbankzugriff realisiert. Auf kurzem Zeithorizont steht eine Verbesserung der LP durch XML-Meldungsschemata bevor, die sich gegenwärtig schon in Entwicklung zur Realisierung einer meldungsbasierten Kommunikation befinden. Letzteres ist bereits ein Schritt in Richtung Dienstorientierter Architektur (engl. SOA).

Die LP findet nun seit Monaten Anwendung bei den Planern des Herstellers und dessen Lieferanten, und behandelt etwa zehntausend Arten von Bauteilen. Bereits die Anlaufphase dieser Anwendung hat gezeigt, dass sie die Entwurfsvorgaben erfüllt [VEK07] und dabei auch die Detektierung, Vorher-

sage und Vermeidung von tatsächlichen und erwarteten Konfliktsituationen versieht. Die LP kann die Benutzer dazu verhelfen, dynamische Information aus verschiedenen – womöglich heterogenen – Quellen manuell oder gar automatisch zu vergleichen und zu analysieren. Die diesbezügliche Arbeit des Planungspersonals wird durch hochentwickelte Filterfunktionen und mehreren aufgabenorientierten Berichten unterstützt. Wie es sich herausgestellt hat, hilft die LP auch bei der Detektierung von Fehlern und Inkonsistenzen bei bereits angewandten Planungsprozessen und Datenadministration.

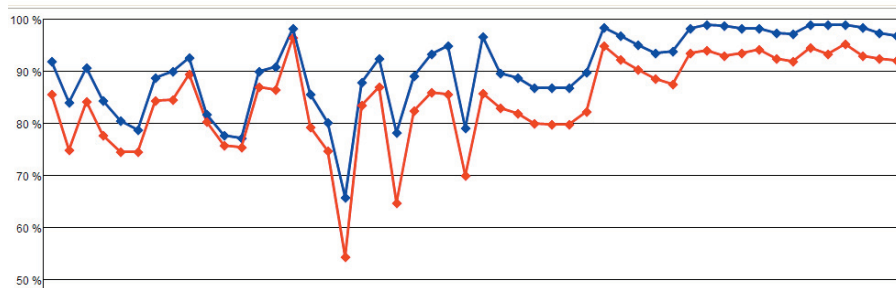


Abbildung 6: Tägliches Dienstleistungsmaß eines Lieferanten

Zum heutigen Tage hat sich das Leistungsniveau der Partner verbessert: die Versorgungsprozesse sind transparenter geworden, zukünftige Konflikte können rechtzeitig erkannt werden, und Dank der Leistungsmaße kann die Arbeit jedes Partners kontinuierlich ausgewertet werden.

## 5 Ausblick

Betrachtet man die Wechselwirkungen zwischen Unternehmen in einem Herstellernetzwerk aus dem Blickpunkt eines Unternehmensnetzwerk-Modells, können Störungen aus Sicht eines gegebenen Unternehmens anhand ihrer Ursachen unterschieden werden: es können nämlich von den Kunden verursachte, interne oder den Lieferanten zuzuschreibende Ereignisse auftreten. Alle möglichen Störungen können entweder eine Änderung der Nachfrage oder eine Änderung des Vorrats bewirken. Im Sinne von [DBL+07] können wir als **Ereignis** jede Änderung von Nachfrage oder Lagerbestand betrachten, die zeitlich oder mengenmäßig bestimmte Grenzen überschreitet. Anhand dieser Definition können wir ein Modell zur Ereignisdynamik von Versorgungsnetzen aufstellen.

Sind zwei Knotenpunkte eines Netzwerkes miteinander verbunden, kommen mit dieser Wechselwirkung auch zwei Strömungen (Materialfluss und Nachfragefluss) zustande. Im Idealfall sind beide Ströme miteinander harmonisiert; sonst muss mit Puffern (zeitweilige Störung) oder gar Verlusten (andauernde Störung) gerechnet werden. Wenn der Materialfluss den Bedarf überholt, ergibt sich zusätzlicher Materialbestand (Puffer), im entge-

gegengesetzten Fall Vorratsschwund (Verlust). Sollte der Nachfragefluss den Materialfluss überholen, ergeben sich Lieferungsrückstände (Puffer), im entgegengesetzten Fall ist ein Verlust an Verkauf zu verbuchen. Will man nun die Verbreitung der Störungen untersuchen, muss man sich auf Material- und Nachfrageströme in Lieferketten konzentrieren, um verschiedene Fortpflanzungsmuster der Ereignisse zu identifizieren.

Sind nun die Struktur des Netzwerkes, die Unsicherheit des Umfeldes, die Merkmale des Materials (z. B. Haltbarkeitsdauer), sowie Nebenbedingungen der Dienstniveaus gegeben, kann dieses einfache Modell als Basis zur Identifizierung der Engpässe und zur Bestimmung der optimalen Puffer (z. B. Sicherheitsvorräte) herangezogen werden. Bei steigender Komplexität des Netzwerkes kann die Anwendung der analytischen Wahrscheinlichkeitsrechnung immer schwieriger werden, was die Rolle der Simulation stärker werden lässt. Die gut fundierte und in der praktischen Entscheidungsfindung verbreitete Fabriksimulation ([MKP+07]) sollte daher zur Netzwerkebene erweitert werden; dies ist das zentrale Ziel unserer zukünftigen Forschung.

## 6 Zusammenfassung

Zur Lösung der Aufgabe der Modellierung und Unterhaltung von komplexen Unternehmensnetzen haben wir einen hierarchischen Rahmen vorgeschlagen. Für die dritte Hierarchieebene (die der Zusammenarbeit) haben wir auch einen Mechanismus vorgestellt, welcher die Teilnehmer zur Teilung und zum Gebrauch unverzerrter Information verleitet. Hierbei ist es unumgänglich, die Unsicherheit der ausgetauschten Pläne der Partner zahlenmäßig auszudrücken, zumal eine wirksame Zusammenarbeit erst dann möglich wird, wenn alle Teilnehmer die Verantwortung für die Qualität ihrer Pläne selbst tragen, und auch dementsprechend handeln. Für einen Schritt in Richtung motivationskompatibler Mechanismen – wo die Zusammenarbeit zwischen autonomen Teilnehmern eine emergente, aber gleichzeitig auch garantierte Eigenschaft des Systems ist – schlugen wir eine neue Methode zur Vermessung der Dienstleistungen vor, und deuteten auch ihre praktische Anwendung an. Zwar würde die volle Erschließung unserer Logistischen Plattform (LP) auch die Einführung neuartiger geschäftlichen Vorgänge benötigen, haben die vorgeschlagenen Protokolle zum Informationsaustausch, und auch die Dienstleistungsmaße bereits eine Verringerung der Komplexität und der Nervosität des Systems, sowie eine Verbesserung der Dienstleistungen der Hauptpartner bewirkt. Anhand der angesammelten historischen Aufzeichnungen versuchen wir nun eine Simulation aufzubauen, die bei der Bewertung der Wirkungen einer Änderung gegenwärtiger Geschäftsvorgänge hilfreich sein wird.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen der Forschungsprojekte FP6 Projekt AC/DC Kz. 031520, COLL-PLEXITY Kz. 01278 und Hungarian Scientific Research Fund (OTKA) „Production structures as Complex Adaptive Systems“.

## **Literatur**

- [MKV+07] Monostori L.; Kis T.; Váncza J.; Kádár B.; Erdős G.: Real-Time, Cooperative Enterprises for Customized Mass Production. 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, 23-24 July 2007, Toronto, Canada, S. 1067-1076.
- [DBL+07] Dangelmaier, W.; Brüggemann, D., Laroque, Ch., Rust, T.: Real-Time-Event-Handling by Automatic Identification, Classification and Evaluated Reaction. IFAC Workshop on Manufacturing Modelling, Management and Control, 14-16 November 2007, Budapest, Hungary, S. 49-54.
- [LG99] Lovász L.; Gács P.: Complexity of Algorithms. Lecture Notes, Boston University, Yale University, 1999.
- [PP01] Papoulis, A.; Pillai, S. U.: Probability, Random Variables and Stochastic Processes. McGraw-Hill, 2001.
- [Shan48] Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication, in: Bell System Tech. J., 21 (1948), S. 623-656.
- [STH07] Scholz-Reiter, B.; Tervo, J. T.; Hinrichs, U.: Entropy as a Measurement for the Quality of Demand Forecasting. In: Cunha, P. F.; Maropoulos, P. G.: Digital Enterprise Technology, S. 433-440, Springer, 2007.
- [Bara02] Barabási A.-L.: Linked: The New Science of Networks. Perseus, Cambridge, 2002.
- [Newm03] Newman, M. E. J.: The Structure and Function of Complex Networks, in: SIAM Review, 45 (2003) H. 2, S. 167-256.
- [Holl92] Holland, J. H.: Complex Adaptive Systems, in: Daedalus, 121 (1992) H. 1, S. 17-30.
- [CsM08] Csáji B. Cs.; Monostori L.: Complexity Model for Networks of Collaborating Enterprises. 17th IFAC World Congress, 6-11 July 2008, Seoul, Korea, akzeptierter Beitrag.
- [CsMK06] Csáji B. Cs.; Monostori L.; Kádár B.: Reinforcement Learning in a Distributed Market-Based Production Control System, in: Advanced Engineering Informatics, 20 (2006), S. 279-288.
- [Wien06] Wiendahl, H-H.: Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld – Teil 1: Anforderungen, in: Wt Werkstattstechnik, 96 (2006) H. 4, S. 183-189.
- [HS96] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics – Foundations of Manufacturing Management. Irwin, 1996.

- [SAP03] SAP AG: mySAP SCM Supply Chain Planning – SAP Funktionen im Detail. White Paper, 2003.
- [VEM08] Váncza J.; Egri P.; Monostori L.: A Coordination Mechanism for Rolling Horizon Planning in Supply Networks, Annals of the CIRP, (2008), akzeptierter Beitrag.
- [VEK07] Váncza J.; Egri P.; Karnok D.: Planning in Concert: A Logistics Platform for Production Networks. 4th Int. CIRP Conference in Digital Enterprise Technology, 19-21 September 2007, Bath, United Kingdom, S. 461-470.
- [MKP+07] Monostori L.; Kádár B.; Pfeiffer A.; Karnok D.: Solution Approaches to Real-Time Control of Customized Mass Production, in: Annals of the CIRP, 56 (2007) H. 1, S. 431-434.