

## Technologie für die Logistik des 21. Jahrhunderts

*Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München*

*Dipl.-Ing. Janina Durchholz, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München*

*Dipl.-Ing. Ralf Kraul, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München*

*Dipl.-Ing. Oliver Schneider, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München*

### **Abstract**

Die Logistik des 21. Jahrhunderts muss sich vielfältigen Herausforderungen stellen: die Kunden erwarten immer höhere Leistung zu immer niedrigeren Preisen, der globale Konkurrenzkampf zwischen den Unternehmen nimmt zu und die steigenden Energie- und Rohstoffpreise erzwingen Reaktionen. Durch den Einsatz neuer und innovativer Technologien haben Unternehmen jedoch auch in dieser Situation die Chance, Wettbewerbsvorteile zu erlangen und der Konkurrenz den entscheidenden Schritt voraus zu sein. Die stetige Weiterentwicklung bestehender Logistiktechnologien und Innovationen wie RFID, Internet der Dinge und kognitive technische Systeme bieten die Möglichkeit dazu.

### **1 Was die Logistik bewegt – Herausforderungen zu Beginn des neuen Jahrtausends**

In den letzten Jahren hat sich ein fundamentaler Wandel in der Wahrnehmung der Logistik vollzogen: aus einer Nische hat sie sich zu einer Boombranche entwickelt. Handelte es sich bisher bei Transport und Lagerung von Gütern eher um ein notwendiges Übel, wird nun ihre Bedeutung als Gestaltungselement in der weltweit arbeitsteiligen Wirtschaft anerkannt. Gerade die Intralogistik wird inzwischen als feste Steuergröße zur Erreichung des Unternehmenserfolges angesehen.

Die Logistik des 21. Jahrhunderts und die dafür eingesetzten Technologien werden von Rahmenbedingungen bestimmt, die sich in den letzten Jahren drastisch verändert haben. Die Globalisierung wird durch eine leistungsfähige Logistik erst ermöglicht, während der dadurch gesteigerte Konkurrenzdruck auf produzierende Unternehmen wiederum auf die an die Logistik gestellten Anforderungen zurückwirkt und eine immer höhere Leistung der Logistiksysteme erfordert.

#### **1.1 Kundenorientierung als Treiber**

Ein wichtiger Innovationstreiber für die Logistik ist die starke Kundenorientierung, die viele Unternehmen propagieren. Die digitale Revolution des vergangenen Jahrzehnts hat die Käufermacht noch weiter gesteigert. Dem Kunden bieten sich unzählige Möglichkei-

---

ten, an die gesuchte Ware zu gelangen und diese nach seinen Wünschen zu modifizieren. Den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, ist daher nur noch mit einem Höchstmaß an Flexibilität möglich. Nachfrageprognosen sind angesichts des geänderten Kundenverhaltens nur noch sehr bedingt aussagekräftig, Bestands- und Produktionsplanungen erfolgen mit immer mehr Unbekannten. Das Internet als einerseits bequemer und leistungsfähiger Vertriebskanal für Güter aller Art leistet diesem Trend gleichzeitig Vorschub: kurzlebige Produkttrends werden sowohl durch gezielt gestreute Werbebotschaften seitens der Unternehmen als auch durch den Austausch unter den Internet-Nutzern in Foren und Online-Communities unterstützt.

Zudem eröffnet der Internetzugang heute breiten Bevölkerungsschichten die Möglichkeit eines globalen Handels, wie er einst Großkonzernen unter dem Schlagwort „Global Sourcing“ vorbehalten war. Über Internetauktionshäuser wie eBay oder diverse Online-Shops findet bereits eine neue Form von Globalisierung statt, wenn Privathaushalte bei Anbietern in aller Welt nach Schnäppchen und Raritäten suchen. Da der Kunde nach digitaler Suche und Bestellung schlussendlich aber doch ein greifbares Produkt in Händen halten will, setzt diese Entwicklung eine schnelle und reibungslose Lieferung auch über große Distanzen hinweg voraus.

In Summe führen diese Entwicklungen zu einer Wettbewerbsverschärfung, die den Faktoren Kundenorientierung und Kundenbindung eine gesteigerte Bedeutung zukommen lässt. Wie man diesem Trend begegnen kann, zeigen beispielhaft Produktions- und Vertriebsstrategien der Automobilindustrie. Dort wird dem Käufer durch eine möglichst kurzfristige Einsteuerung von Kundenaufträgen in den Produktionsplan – die so genannte „späte Variantenbildung“ – die Möglichkeit eröffnet, auch kurz vor Produktionsstart noch Änderungswünsche bezüglich Ausstattung und Lackierung seines Neuwagens zu äußern. Das Kalkül der Automobilhersteller ist dabei, den Kunden nach der Bestellung noch zum Kauf von zusätzlichen Extras zu verleiten, basierend auf der Erfahrung, dass beim Kunden zum späteren Zeitpunkt die Hemmschwelle, sich für teurere Ausstattungsvarianten zu entscheiden, sinkt.

Der Trend zur stärkeren Individualisierung von Produkten geht also von zwei Seiten aus: von den Kunden, die individualisierte Produkte nachfragen, und von den Unternehmen, für die sich durch das Angebot individualisierter Produkte die Chance der Differenzierung bietet. Um dieser Entwicklung gerecht werden zu können, müssen sich die Produzenten der Güter jedoch auf neue Rahmenbedingungen einstellen. Individuellere Produkte ziehen eine erhöhte Variantenvielfalt nach sich, die wiederum in einer Atomisierung sowohl der Fertigungslose als auch der Sendungsgrößen mündet. Für die Unternehmen ist es in diesem Umfeld wichtig, Strategien zu entwickeln, die es ihnen nicht nur ermöglichen, auf den beständigen Wandel zu reagieren, sondern ihn auch aktiv zu gestalten, um Vorteile gegenüber den Wettbewerbern erzielen zu können. Besonders die Logistik steht hierbei unter Zugzwang. Sie muss sich diesen geänderten Rahmenbedingungen anpassen. So ist beispielsweise die Produktionslogistik gefordert, eine unterbrechungsfreie Versorgung der Produktion sicherzustellen, obwohl die benötigten Bedarfe und innerbetrieblichen Trans-

porte nicht mehr genau vorauszusehen sind. Entsprechendes gilt auch für andere Logistikbereiche.

## **1.2 Aktuelle Einflüsse: Klimawandel und Ressourcenknappheit**

Vor dem Hintergrund der aktuellen Debatte zum Klimawandel - ausgelöst nicht zuletzt durch den 4. UN-Klimareport aus dem Jahr 2007 - sieht sich auch die Logistik neuen Herausforderungen und Anforderungen ausgesetzt. Einen wichtigen Verursacher des Klimawandels stellen die Treibhausgase dar. Nahezu 60% des Treibhausgasausstoßes gehen dabei auf CO<sub>2</sub>-Emissionen zurück [Lat-07]. Wissenschaftliche Abhandlungen belegen zudem einen direkten Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und langfristigen Temperaturschwankungen.

Die Aussage, dass es in auch vergangenen Jahrtausenden einen Wechsel zwischen wärmeren und kälteren Zyklen gab und daher die aktuelle Klimaerwärmung ebenso natürlich bedingt sei, kann allerdings nicht gelten. Vielmehr stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre in den letzten 50 Jahren auf 376 ppm (parts per million) im Jahr 2003 und damit auf einen Wert, der 25% über dem Maximum der letzten 420.000 Jahre liegt. Als mögliche Konsequenzen einer drastischen Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der damit verbundenen Klimaerwärmung werden schmelzende Polkappen, steigende Meeresspiegel, Hungersnöte aufgrund von Missernten und mangelnder Süßwasserversorgung, eine Verschlechterung der Luftqualität sowie irreversible Schäden für das Ökosystem genannt [Ste-08].

Auch die Logistik ist in der Pflicht, ihre Emissionen zu reduzieren. Eine Stoßrichtung muss dabei mit Sicherheit die ökologische Optimierung bzw. die Reduzierung von außerbetrieblichen Transporten sein. Auch Prozesse der Intralogistik bieten aus ökologischer Sicht Optimierungspotential. Durch eine Verknüpfung unterschiedlicher Maßnahmen zur Prozessoptimierung kann eine Verbesserung der Energieeffizienz und eine Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden. Mehr als 60% des gesamten Stromverbrauchs der europäischen Industrie werden von Elektromotoren verbraucht. Laut VDMA lassen sich 8% des innerbetrieblichen Stromverbrauchs durch neue Motoren, weitere 12% durch geregelte Antriebe einsparen [Pie-08].

Auch bei prozessübergreifenden Rahmenbedingungen wie Gebäudestrukturen, Wärmedämmung oder Beleuchtung sind Handlungsfelder für eine Steigerung der Nachhaltigkeit zu sehen. Für die öffentliche Wahrnehmung der Unternehmen gewinnen solche „grünen“ Initiativen an Bedeutung. Umweltzertifikate wie der Carbon Footprint für Produkte und CO<sub>2</sub>-Benchmarking werden in naher Zukunft zu Wettbewerbsargumenten. In England hat das Handelshaus Tesco bereits für seine Eigenmarken ein Carbon-Label eingeführt, das angibt, wie viel CO<sub>2</sub> während des Entstehungs- und Lebenszykluses der Produkte anfällt. Auch immer mehr deutsche Unternehmen beginnen damit, ihre gesamte Beschaffungskette in Ökobilanzen zu berücksichtigen. So hat der Chemiekonzern BASF Anfang 2008 erstmals eine umfassende CO<sub>2</sub>-Bilanz vorgelegt. Sowohl Emissionen bei der Versorgung mit Rohstoffen und Vorprodukten als auch emissionsmindernde Effekte von BASF-Produkten wie Dämmstoffen fanden dabei Berücksichtigung.

---

Abgesehen vom Imagegewinn geht eine ressourcenschonende Logistik aktuell auch mit immer bedeutenderen Potentialen zur Kosteneinsparungen einher. Für die Rohöl-Leitsorten war im ersten Halbjahr 2008 ein Preisanstieg von weniger als 100 Dollar pro Barrel auf 140 Dollar pro Barrel zu verzeichnen [TEC-08]. Entsprechend kam es auch zu Preiszuwächsen bei den Kraftstoffen. Vor diesem Hintergrund beginnen viele Unternehmen neuerdings, ihre Transportstrategien zu überdenken.

Der Rohölpreis wird zukünftig auch direkten Einfluss auf die Struktur von Distributionsnetzen nehmen. Denn mit dem Ölpreis verschiebt sich das Verhältnis von Transportkosten zu sonstigen Kosten und eine Distributionsstruktur, die durch eine größere Anzahl Lager und entsprechend weniger Transporte charakterisiert ist, kann sich als die günstigere Lösung erweisen.

### **1.3 Erhöhter Konkurrenzdruck zwischen den Unternehmen**

Der Kunde bestimmt den Markt und damit auch die Logistik. Um seine Bedürfnisse und Wünsche möglichst optimal zu erfüllen, wird dem Kunden ein immer differenzierteres Artikelspektrum angeboten. Der Kunde erwartet kurze Lieferzeiten und hohen Lieferservice. Ist die Ware bei einem Händler nicht vorrätig, hat er durch die Vielzahl an Online-shops die Möglichkeit, unmittelbar auf die Konkurrenz auszuweichen. Die sofortige Befriedigung des Kundenwunschs ist daher von einem Wettbewerbsvorteil zu einer Selbstverständlichkeit geworden.

Die Logistik muss in Folge dessen ein wachsendes Sortiment mit häufig sehr geringem Bestand pro Artikel beherrschen und Aufträge bearbeiten, die sich zu einem großen Teil aus sehr kleinen Positionen zusammensetzen. Dadurch werden die logistischen Einheiten kleiner und die Anzahl der Einheiten, die gehandhabt werden müssen, steigt. Zudem wirkt der Preisdruck, der sich durch den erhöhten Konkurrenzdruck verstärkt hat, auch auf die Logistik. Die Logistik steht damit vor der Aufgabe, deutlich erhöhte Anforderungen im besten Fall zu geringeren Kosten zu erbringen.

### **1.4 Handlungsfelder der Technischen Logistik**

Die Anforderungen, mit denen die Unternehmen im 21. Jahrhundert konfrontiert werden, erzwingen Reaktionen. Eine Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Technologien ist sicher der nächstliegende Weg einer Anpassung. Der rasante Fortschritt der Computer- und Elektrotechnik ermöglicht jedoch auch revolutionäre Entwicklungen wie die Virtuelle Planung und Mitarbeiterunterstützung oder die RFID-Technologie. Hierbei stellt nicht nur die technische Integration der neuen Technologien eine Herausforderung dar, sondern auch die Anpassung der Organisationsstrukturen innerhalb der Unternehmen und der gesamten Wertschöpfungskette. Die Realisierung eines Internets der Dinge und der Einsatz autonomer Systeme ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch eine Vision. Die stürmische Entwicklung in anderen Technologiebereichen lässt jedoch erwarten, dass die Realisierung nicht mehr lange auf sich warten lassen wird.

---

## **2 Spitzentechnologien für die Intralogistik von morgen**

Die Logistik des 21. Jahrhunderts steht vor der Aufgabe, sich möglichst gut auf die veränderten Randbedingungen einzustellen. Die Logistiktechnologie muss den Unternehmen die Möglichkeit bieten, dem gesteigerten Konkurrenzdruck nicht nur standhalten zu können. Im Einsatz neuer und innovativer Ideen liegt auch die Chancen Wettbewerbsvorteile zu erlangen und der Konkurrenz den entscheidenden Schritt voraus zu sein. Grundvoraussetzung dafür ist der Einsatz und die Entwicklung leistungsfähiger Lager-, Förder- und Kommissioniertechnik, die in Kombination mit optimal gestalteten Arbeitsplätzen effiziente und robuste Logistiksysteme bildet.

### **2.1 Optimierung auf Komponentenebene**

Der nächstliegende Ansatzpunkt für die Optimierung von Logistiksystemen ist sicherlich die Verbesserung auf der Ebene der Einzelkomponenten. Ein wichtiger Schritt hierbei ist der Einsatz von Antrieben, die durch Frequenzumrichter geregelt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Antrieben erlaubt die Regelung die exakte Vorgabe von Drehzahl- und Drehmomentverläufen. So können Fördergeräte nicht nur höhere Beschleunigungen erreichen, sondern die Geschwindigkeiten können an den aktuellen Bedarf angepasst werden. Neben diesen Vorteilen ist der Einsatz geregelter Antriebe auch ein Schritt hin zu höherer Energieeffizienz: Durch die Regelung kann der Motor stets im Bereich des optimalen Wirkungsgrads betrieben werden. Gerade wenn in Logistiksystemen wie komplexen Lagervorzonnen eine Vielzahl von Antrieben zum Einsatz kommt, lassen sich dadurch beträchtliche Energiemengen einsparen. Möglich wird die flächendeckende/umfassende Verwendung geregelter Antriebe durch die Fortschritte in der Mikrocontrollertechnik und Leistungselektronik. Die notwendigen Frequenzumrichter können heute nicht nur kleiner und kostengünstiger hergestellt werden als noch vor wenigen Jahren, sondern auch mit zusätzlicher Funktionalität z.B. durch einen direkten Anschluss an die Steuerungsnetzwerke ausgestattet werden.

### **2.2 Optimierung auf Geräteebene**

Eine weitere Leistungssteigerung wird möglich, wenn vollständige Geräte betrachtet werden. Bei vielen Geräten der Intralogistik (z.B. Regalbediengeräte, Querverschiebewagen, Roboter, ...) handelt es sich um Systeme, die intermittierende Bewegungen ausführen. Dabei besteht immer die Herausforderung, die beim Abbremsen entstehenden Schwingungen möglichst gering zu halten. Andererseits soll auch das Gewicht minimiert werden, um eine höhere Energieeffizienz beziehungsweise höhere Beschleunigungen erreichen zu können. Dieser Zielkonflikt kann durch zwei innovative Lösungen entschärft werden: eine aktive Schwingungsdämpfung sowie durch Leichtbautechnologien. Bei Regalbediengeräten kann eine Regelung des Antriebs verwendet werden, um die notwendige Beruhigungszeit, die Zeit bis zum Abklingen der Mastschwingung, zu minimieren. Dazu wird die Schwingung durch ein Zusammenspiel von Sensoren, Aktoren und einer entsprechenden Steuerung aktiv gebremst, wodurch sich das Lastaufnahmemittel schneller in Ruhe befindet und die Last sicher abgeben oder aus dem Regal aufnehmen kann. Ein weiterer Weg

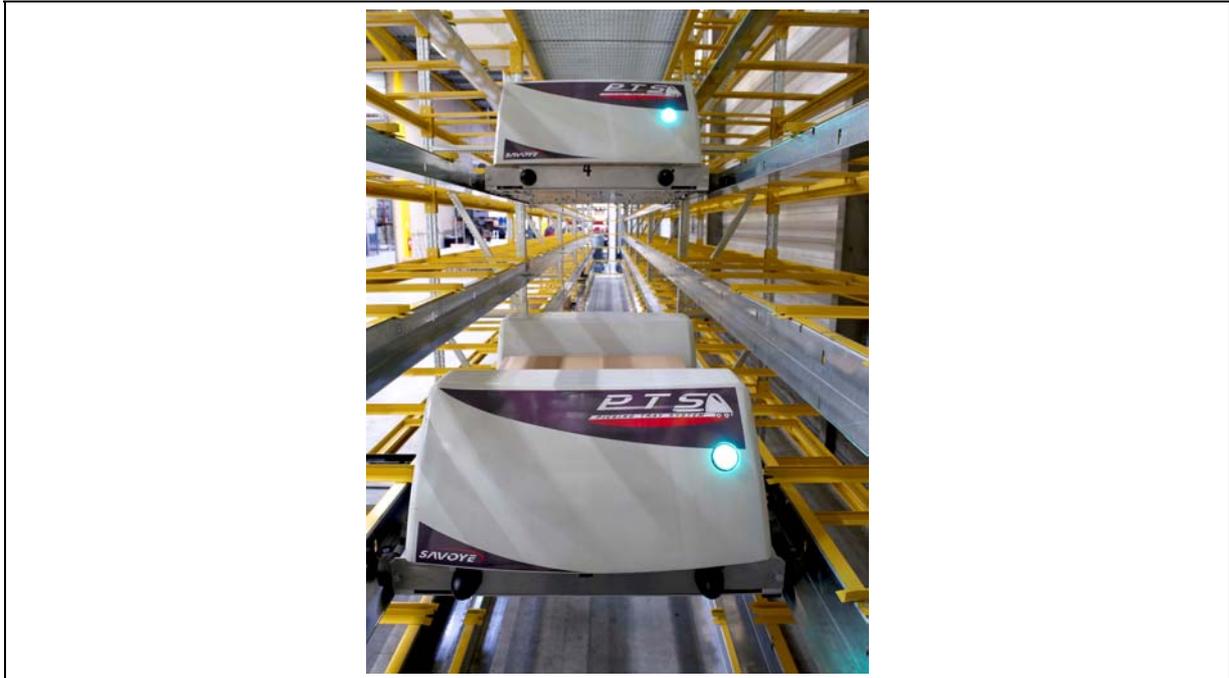
---

zur Begrenzung der Schwingungen besteht darin, die Struktur des Masts steifer zu gestalten. Um einer damit einhergehenden Erhöhung der Masse vorzubeugen, werden Technologien des Leichtbaus auch in die Geräte der Intralogistik Einzug halten. Ein Schritt in diese Richtung ist beispielsweise ein Roboter der Firma Kuka, der bereits mit einem Arm aus Kohlefaserverbundwerkstoff ausgerüstet ist. Zudem finden diese bisher vor allem der Raumfahrt und dem Hochleistungssport vorbehaltenen Werkstoffe mittlerweile auch Einsatz in Lastaufnahmemitteln von Automatischen Kleinteilelagern.



**Abbildung 1: Roboter mit Kohlefaserarm (Bild: Kuka)**

Wirtschaftlichkeit ist vor allem angesichts der steigenden Energiepreise sehr eng mit Energieeffizienz verbunden. Diese Entwicklung verstärkt auch den Trend zur Betrachtung einer Investition anhand aller Kosten, die im Laufe der Lebensdauer auftreten werden. Um diese Kosten trotz Unsicherheiten auf den Energie- und Rohstoffmärkten überschaubar und gering zu halten, sind Systeme, die Energie effizient nutzen, unabdingbar. Leichtbau bietet eine Möglichkeit, Energie einzusparen. Vor allem auch vor dem Hintergrund immer kleinerer logistischer Einheiten muss die bewegte Masse bei Fördermitteln auf ein Optimum reduziert werden. Neben den bereits beschriebenen neuen Materialien können auch gänzlich neue Konzepte zu einer Energieeinsparung führen. Beim automatischen Kleinteilelager PTS Picking Tray System von Savoye werden die Lagereinheiten von kleinen und leichten Shuttles ausgelagert. Im Gegensatz zu Regalbediengeräten müssen dabei nur wesentlich geringere Massen bewegt und beschleunigt werden. Die Energieversorgung der einzelnen Shuttles übernehmen Superkondensatoren, die bei jeder Fahrt im Lift geladen werden. Bisher fanden diese leichten Energiespeicher vor allem in Hybridfahrzeugen Verwendung.



**Abbildung 2: PTS Picking Tray System von Savoye (Bild: Savoye)**

Bei Flurförderzeugen entwickeln sich Systeme zur Energierückgewinnung zum Standard. Die kinetische Energie des Staplers wird dabei beim Bremsen nicht in Form von Wärme vernichtet, sondern zwischengespeichert. Beim Anfahren wird diese Energie genutzt, um den Antrieb zu entlasten und Kraftstoff oder Strom einzusparen. Inzwischen existieren sowohl elektrische als auch hydraulische Konzepte zur Energiespeicherung, die sich für unterschiedliche Betriebsstrategien bzw. Fahrzeugklassen eignen. In der Lagertechnik existieren ähnliche Ideen, so bietet psb intralogistics bereits Energierückspeisemodule für Regalbediengeräte an.

Die bekannten Ansätze für energiesparende Antriebe aus der Automobilindustrie werden auch im Bereich der Intralogistik verfolgt. Elektronische Einspritzsysteme minimieren den Verbrauch bei Staplern mit Verbrennungsmotoren, es existieren Gabelstapler mit sparsamer Hybridtechnik (z.B. Still RX 70) und die Brennstoffzelle hält Einzug bei industriellen Fördermitteln (z.B. Toyota FCHV-F, Linde P250).



**Abbildung 3: Stapler mit Brennstoffzellen-Hybrid-Technologie von Toyota  
(Bild: Toyota)**

### 2.3 Optimierung der Prozesse und Gesamtsysteme

Trotz der vielfältigen Möglichkeiten einer Automatisierung ist die Flexibilität von Menschen nach wie vor in vielen Bereichen unverzichtbar. Um die Effizienz und die Leistung logistischer Systeme zu steigern, wird daher nicht nur an der Technik gefeilt, auch die Mitarbeiter sollen optimal arbeiten können, um die geforderten hohen Durchsätze bei höchster Sicherheit und geringer Belastung zu erreichen. Häufig werden daher diesem Grund werden vermehrt notwendige manuelle Tätigkeiten durch Automatisierung unterstützt. Sind hohe Kommissionierleistungen erforderlich, wurde bisher fast ausschließlich das Prinzip Ware zum Mann eingesetzt. Durch eine Kombination der klassischen „Ware zum Mann“- und „Mann zur Ware“-Prinzipien können die Stärken der Automatisierung mit den Fähigkeiten des Menschen verbunden werden. Beispiele dafür sind das High Performance Picking System HPPS von viastore und das Dynamic Picking System von Witron. Bei diesen Systemen bedienen die Mitarbeiter eine dynamische Bereitstellfront, wodurch eine automatische Bereitstellung mit manueller Kommissionierung kombiniert wird. Da der Mitarbeiter sich an der reduzierten, ergonomisch gestalteten Entnahmefront nur kurze Wege zurücklegen muss, können bis zu 700 Picks pro Stunde und Mitarbeiter erreicht werden.



**Abbildung 4: Witron DPS (Bild: Witron)**

Um bei einer so hohen Leistung Kommissionierfehler zu reduzieren beziehungsweise auszuschließen muss die Informationsbereitstellung für den Kommissionierer bestmöglich gestaltet werden. Systeme wie Pick by light und Pick by voice werden daher weiter optimiert und ausgebaut. Erreicht wird das beispielsweise durch Systeme, bei welchen im Gegensatz zu kleinen Leuchtanzeigen die gesamte Entnahme- und Abgabeposition leuchtet. Automatische Systeme, die mit Lichtrastern arbeiten, können eine unmittelbare Kontrolle des Kommissioniervorgangs durchführen und somit Fehler ohne Verzögerung erkennen und korrigieren. Die Prozesse werden besser aufeinander abgestimmt, eine intelligente Benutzerführung unterstützt intuitives Arbeiten ohne Fehler und eine geräuschkreduzierte Umgebung komplettiert den ergonomischen Arbeitsplatz.

Auch die Fahrer von Flurförderzeugen werden bei ihrer Arbeit immer umfassender durch Assistenzsysteme unterstützt, die für größere Sicherheit sorgen. Die Technik greift bei Kurvenfahrten ein, beschränkt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Hubhöhe und legt selbständig die Parkbremse ein. Inzwischen halten Assistenzsysteme aus dem Automobilbereich Einzug bei den Förderzeugen. Antriebsschlupfregelungen helfen bei Milch auf dem Boden von Lagerhallen genauso wie auf schneebedeckter Straße.

Die Leistung allein wird in Zukunft nicht mehr das ausschließliche Beurteilungskriterium für Logistiksysteme sein. Die Robustheit eines Systems gegenüber unvorhergesehenen Bedingungen durch neue Sortimente oder schwankende Nachfrage wird gerade unter den geänderten Rahmenbedingungen, denen sich Industrie und Handel stellen müssen, oft die größere Herausforderung darstellen. Einen Weg dorthin weist die Modularisierung von Fördertechnik, wodurch eine flexible Automatisierung ermöglicht wird. Lager mit Shuttle-Technik wie das Picking Tray System PTS von Savoye oder Siemens Multishuttle stellen skalierbare Systeme dar, bei denen die erreichte Leistung je Gasse durch die Anzahl der eingesetzten Shuttles bestimmt werden kann. Durch den modularen Aufbau dieser Systeme können Wartungsarbeiten etc. im laufenden Betrieb vorgenommen und dadurch die Stillstandszeiten minimiert werden. Ein Shuttle bildet dabei ein Fördertechnikmodul, das klar umgrenzte Aufgaben erfüllen kann. Dazu gehört die Erfüllung von Ein- und Auslageraufträgen ebenso wie der Transport der Ware bis in die Lagervorzone. Wird in der benötigten Auftragsreihenfolge ausgelagert, übernehmen die Fahrzeuge gleichzeitig auch

die Funktion des Sortierens. Durch den Einsatz von Trays, auf welchen beliebige Gebinde, auch unterschiedlicher Artikel, transportiert werden können, ist das Lager weitgehend unabhängig vom Sortiment. Derartige modulare Lagersysteme bilden die Basis, um in Zukunft hochflexible und reaktionsschnelle Prozesse für eine leistungsfähige Logistik sicherzustellen.

### **3 Virtuelle Welten für die Logistik**

Der Einsatz von digitalen Hilfsmitteln nimmt auch in der Logistik stetig zu. Die statische Planung von Anlagen mit 2D- oder 3D-CAD-Systemen ist seit langem üblich und der Einsatz der Ablaufsimulation ist bereits etabliert. Immer mehr wird nun auch die Technologie der Virtual und Augmented Reality zur Logistikplanung, aber auch zur Unterstützung des operativen Personals eingesetzt.

#### **3.1 Virtual und Augmented Reality**

Die Virtual Reality (VR) bezeichnet eine den menschlichen Sinnen vorgetäuschte, künstlich erzeugte Umgebung, die es ermöglicht, dreidimensionale rechnerbasierte Modelle realitätsnah zu erleben, wobei wesentliche Charakteristika die Interaktions- und Echtzeitfähigkeit sind. VR kann mit den drei Dimensionen des Raums und der Dimension der Zeit als eine 4D-Simulation der „realen Welt“ beschrieben werden [ONG-04]. Maßgebliche technische Komponenten eines VR-Systems sind die Visualisierungseinheit, das Positionserfassungs- oder Trackingsystem und die Interaktionsgeräte. Neben den meist unhandlichen Datenbrillen kommen stereoskopische Projektionssysteme als Visualisierungseinheit zum Einsatz. Das Trackingsystem dient zur Anpassung der Perspektive an den Betrachterstandpunkt. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind das elektromagnetische, das Ultraschall- und das optische Tracking, das die beste Qualität aufweist [BUR-94]. Die Steuerung von virtuellen Objekten erfolgt über 3D-Interaktionsgeräte, wie z. B. Datenhandschuhe oder Fly-Sticks. Die Software fügt alle Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammen, stellt anwendungsspezifische Funktionalitäten zur Verfügung und ermöglicht echtzeitnahes Arbeiten [BOR-94].

Im Gegensatz zur VR wird bei der Augmented Reality (AR) nicht die gesamte Umwelt des Benutzers virtuell gestaltet, sondern die reale Umwelt um virtuelle Informationen ergänzt. Aus diesem Grund wird auch von Erweiterter Realität gesprochen. Nach [AZU-97] ist die AR dadurch gekennzeichnet, dass der Benutzer in Echtzeit mit dem System interagieren kann und die virtuellen Objekte zur richtigen Zeit am richtigen Ort angezeigt werden. AR-Systeme können technologisch auf verschiedene Weisen umgesetzt werden, aber sie enthalten immer die gleichen Grundkomponenten. Wie bei VR werden ein Trackingsystem, eine Visualisierungseinheit und ein Interaktionssystem benötigt. Das Trackingsystem dient zur Erfassung der Positionen von Benutzer und Objekten sowie der Blickrichtung des Benutzers. In einem Datenhaltungssystem sind die virtuellen Informationen hinterlegt und ein Szenengenerator platziert mit Hilfe der Positionsdaten die virtuellen Objekte lagerichtig in der Umgebung. Das Visualisierungsmedium, ein einfacher Monitor oder eine

Datenbrille, zeigt das Bild aus realer und virtueller Welt an. Dies kann ein einfacher Monitor, aber auch eine Datenbrille sein.

### *3.1.1 Unterstützung des Planungsprozesses mit Augmented Reality*

Die reale Umgebung mit der bestehenden Fördertechnik, Lagereinrichtung, Gebäudestruktur, den Umwelteinflüssen wie Licht und Lärm etc. stellt die grundlegenden Randbedingungen für die Planung. AR bietet die Möglichkeit, am Rechner konstruierte oder geplante Anlagen aufwandsarm in diese reale Welt zu integrieren ([GÜN-06], [SRE-05]). Hierdurch lassen sich Vorabbilder oder Videosequenzen zukünftiger Anlagen erstellen. Diese können verwendet werden, um beispielsweise Störkanten mit realen Einrichtungsgegenständen zu identifizieren. Der Planungsprozess wird dadurch verstärkt abgesichert, so dass kostspielige Umplanungen während der Umsetzungsphase entfallen. Zur Anwendung müssen an relevanten Punkten in der realen Fertigungsumgebung Referenzgeometrien, z.B. in Form von 2D-Papiermarkierungen, angebracht werden. Soll zum Beispiel überprüft werden, ob mit einer bestehenden Fördertechnik neue oder abgeänderte Bauteile befördert werden können, sind zunächst Markierungen an der Fördertechnik und an möglichen Störkanten zu platzieren. Mit einer kalibrierten Digitalkamera werden anschließend Fotos von den kritischen Stellen aufgenommen. Die Software übernimmt die Zuweisung von virtuellen Objekten zu den Markierungen. Das Planungswerkzeug integriert das neue Bauteil lagerichtig in die bestehende Fördertechnik (siehe Abbildung 5). Dieses virtuelle Objekt lässt sich dann mit Ebenen schneiden, die den Markierungen an den Störkanten zugewiesen wurden. So kann erkannt werden, ob Kollisionen auftreten. Der Vorteil der Technologie liegt darin, dass über das Foto der aktuelle Zustand der realen Fertigungsumgebung einbezogen wird. Obwohl der Trend immer mehr dazu geht, Fertigungsanlagen komplett in 3D-CAD zu generieren, ist die Aktualität der Daten oft nicht gewährleistet. Mit AR kann dagegen die reale Fertigungsumgebung mit der virtuellen Planung kombiniert und somit ein vollständiges Bild der zukünftigen Anlage auf Basis aktueller Rahmenbedingungen erstellt werden.

---

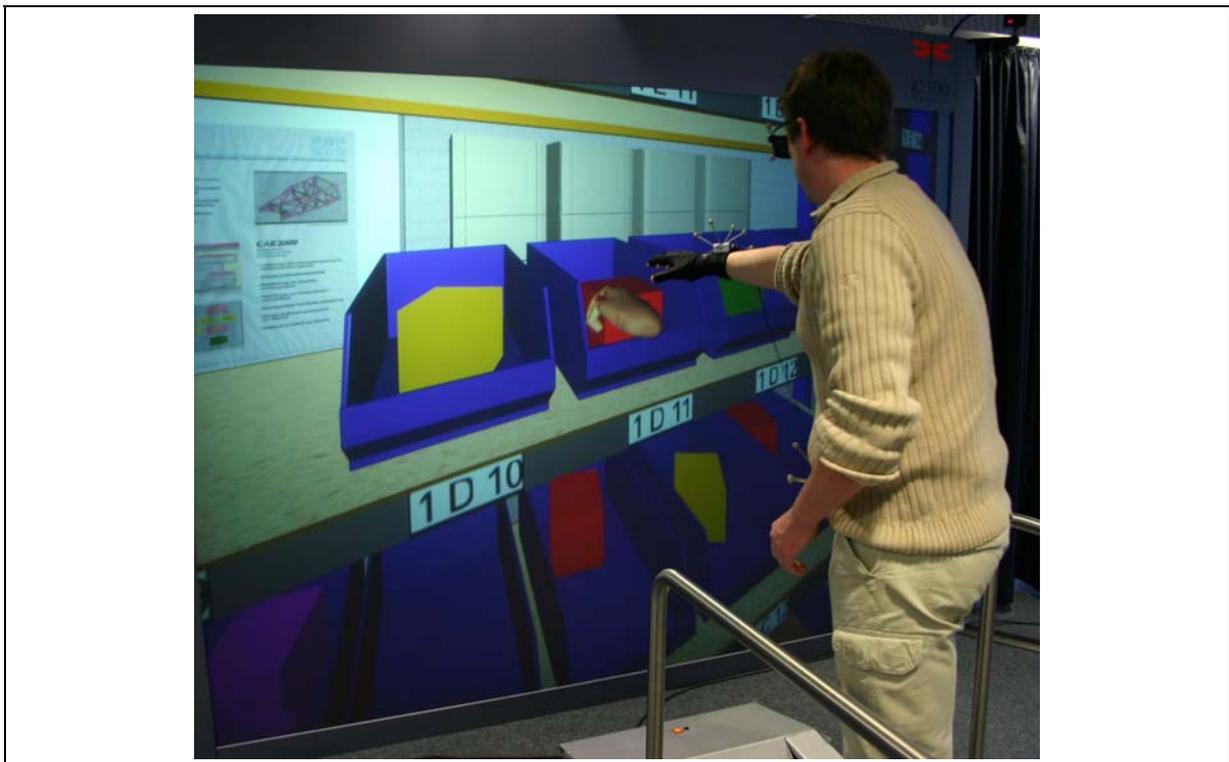


**Abbildung 5: AR-Planung (Bild: metaio)**

### 3.1.2 Menschintegrierte Simulation von Kommissioniersystemen

Der Einsatz der VR in der Planung wird dadurch erleichtert, dass Entwicklungen von Produkten sowie Produktions- und Logistikanlagen zunehmend mittels CAD-Werkzeugen erfolgen. Dementsprechend stehen der Logistik bereits frühzeitig 3D-Geometrien zur Verfügung, die zu einer intuitive Planung und einer realitätsnahe 3D-Visualisierung in der VR vom Planer zur Absicherung von Layoutplanungen genutzt werden können. Mit der Anbindung verschiedener Interaktionsgeräte, angefangen bei Datenhandschuhen bis hin zu zweidimensionalen Bewegungsplattformen, wird der Mensch zukünftig immer tiefer in die virtuelle Welt eintauchen und deren Bestandteil werden. Am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) ist dazu eine Versuchsumgebung zur Simulation von Kommissioniersystemen im VR-Labor aufgebaut worden. Die Visualisierung erfolgt über eine 3m x 2m große Powerwall mit stereoskopischer Darstellung. Der Benutzer bewegt sich auf einem Laufband durch die virtuelle Umgebung, wobei er mit Kopfbewegungen seine Gehrichtung ändern kann. Mit einer Geste kann er sich eine virtuelle Papierliste anzeigen lassen und mit einem Datenhandschuh greift er die entsprechenden virtuellen Artikel aus dem Lagermodell (siehe Abbildung 6). Die Position des Datenhandschuhs und des Benutzers, sowie die Blickrichtung werden über ein Infrarottrackingsystem erfasst. Ein Softwaretool misst die Leistung des Kommissionierers in der virtuellen Welt, so dass bereits vor der Umsetzung des realen Lagers Aussagen über Durchsätze getroffen werden können. In ersten Versuchsreihen wurde die virtuelle Kommissionierung mit dem realen Kommissionierszenario verglichen [WUL-08]. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse der realen und der virtuellen Systeme hinsichtlich der mittleren Kommissionierzeit gut übereinstimmen, wobei die virtuellen Zeiten um einen relativ konstanten Wert höher sind. Um dieses Delta zu minimieren müssen v. a. die Interaktionsgeräte weiter verbessert werden.

Insbesondere der Interaktionsmechanismus zur Objektmanipulation mit dem Datenhandschuh führte zu sehr hohen Greifzeiten und bietet Optimierungspotenzial. Die Probanden bewerteten diese Art der Planungsunterstützung durchweg positiv und sehen darin die Möglichkeit Planungen von Kommissioniersystemen wesentlich kostengünstiger zu gestalten. Darüber hinaus kann das VR-Kommissioniersystem zur Mitarbeiterschulung herangezogen werden, um Anlaufprozesse in einem neuen Lager zu verbessern. Dabei ist es wichtig die VR in den Planungsprozess zu integrieren und mit anderen Werkzeugen, z. B. der Ablaufsimulation oder CAD-Systemen, zu koppeln. Die Daten sollen bidirektional austauschbar sein, so dass beispielsweise ein Simulationsmodell im VR-System läuft, dort manipuliert wird und die Änderungen ins Simulationstool übernommen werden.



**Abbildung 6: Menschintegrierte Simulation eines Kommissioniersystems**

### 3.1.3 Unterstützung des operativen Personals in der Kommissionierung

Die Kommissionierung als einer der wichtigsten logistischen Prozesse hat direkte Auswirkungen auf die Lieferqualität und das Kunden-Lieferantenverhältnis. Aufgrund der Vielfalt des Artikelspektrums ist der Mensch mit seiner Flexibilität und seinen motorischen Fähigkeiten auch zukünftig nicht durch Automaten zu ersetzen. Um Fehler zu vermeiden, muss er optimal mit Informationen versorgt werden. Der Einsatz einer Datenbrille ermöglicht es, dem Kommissionierer die benötigten Daten kontextbezogen bereitzustellen (siehe Abbildung 7). Dazu werden die für die Auftragsabwicklung erforderlichen Daten direkt in sein Gesichtsfeld projiziert. Dadurch kann er beide Arme für seine eigentliche Tätigkeit frei verwenden, ohne von einem mobilen Datenterminal oder von Papierlisten behindert zu werden. Suchzeiten entfallen und Fehler lassen sich reduzieren. Durch den Einsatz eines Trackingsystems können die virtuellen Daten positionsbezogen eingeblendet wer-

den. Pfeile unterstützen zum Beispiel den Weg durch das Lager zum entsprechenden Entnahmeplatz, der ebenfalls durch eine virtuelle Markierung hervorgehoben wird.

Mehreren Untersuchungen zeigen bereits Potenziale dieser Technologie. Es konnten Zeiteinsparungen festgestellt werden, die auf die Parallelisierung von Informationsaufnahme und Nebentätigkeiten sowie die Minimierung von Totzeiten zurückzuführen sind. Allerdings traten bei den Benutzern teilweise Orientierungsprobleme, Gleichgewichtsstörungen oder Kopfschmerzen durch die Datenbrillen auf [KAM-06].

Der Lehrstuhl fml prägt den Ausdruck Pick-by-Vision für die AR-unterstützte Kommissionierung. Dabei liegt der Schwerpunkt der Forschung nicht nur auf der Entwicklung eines funktionsfähigen AR-System, sondern auch auf Untersuchungen zur Einbettung dieses Systems in reale Kommissionierumgebungen. Dazu werden mögliche Kommissioniersysteme mit ihren Randbedingungen (Lagereinrichtung, Auftragsstruktur, Sortiment etc.), aber auch ergonomische Aspekte betrachtet. Bei ersten Evaluierungen bewerteten die Probanden ihre Motivation und die kognitive Belastung mit Pick-by-Vision deutlich besser als mit einer Papierliste oder einem Pick-by-Voice-System [REI-07]. Anhand der wichtigen logistischen Kennzahlen Kommissionierzeit und Fehlerquote schnitt die intuitiv zu bedienende Kommissionierliste besser ab. Grund dafür war in erster Linie, dass die Sprachsteuerung als Interaktionsgerät nicht optimal konfiguriert war. Beim Vergleich von Pick-by-Vision mit einer Papierliste zeigt sich weiter, dass einige Probanden viel schneller als mit der Liste arbeiteten, andere aber entscheidend länger brauchten. Als Indiz für eine steile Lernkurve ist der deutliche Rückgang der Zeit vom ersten auf den zweiten zu kommissionierenden Auftrag zu bewerten.



**Abbildung 7: Pick-by-Vision – Kommissionierung mit einer Datenbrille**

### 3.2 Ausblick

Der flächendeckende Einsatz der modernen digitalen Werkzeuge birgt große Potenziale, ist jedoch noch mit Problemen verbunden. Der Einsatz von AR- und VR-Anwendungen in der Praxis scheitert oft noch an nicht ausgereifter Hardware, z. B. ergonomischen Daten-

brillen oder weitläufigen, robusten Trackingsystemen. Techniken aus dem Bereich VR halten mehr Einzug in das alltägliche Leben. Mobile Multimediaanwendungen werden immer wichtiger. Bei der Spielekonsole Nintendo Wii™ wird zur Positionserfassung des Controllers Infrarottracking verwendet und mit Eye of Judgement™ von Sony wurde 2007 das erste AR-Computerspiel auf den Markt gebracht. Somit erobern VR-Techniken den Massenmarkt und eine Weiterentwicklung wird vorangetrieben. Dies kommt industriellen Anwendungen zugute. Ein nicht zu unterschätzender Aspekt ist auch, dass die Jugend von heute mit diesen Technologien aufwächst und die heute oft zu spürende Skepsis dem Einsatz der Technologien gegenüber dadurch schwinden wird.

#### **4 RFID – Treiber für die Zukunft**

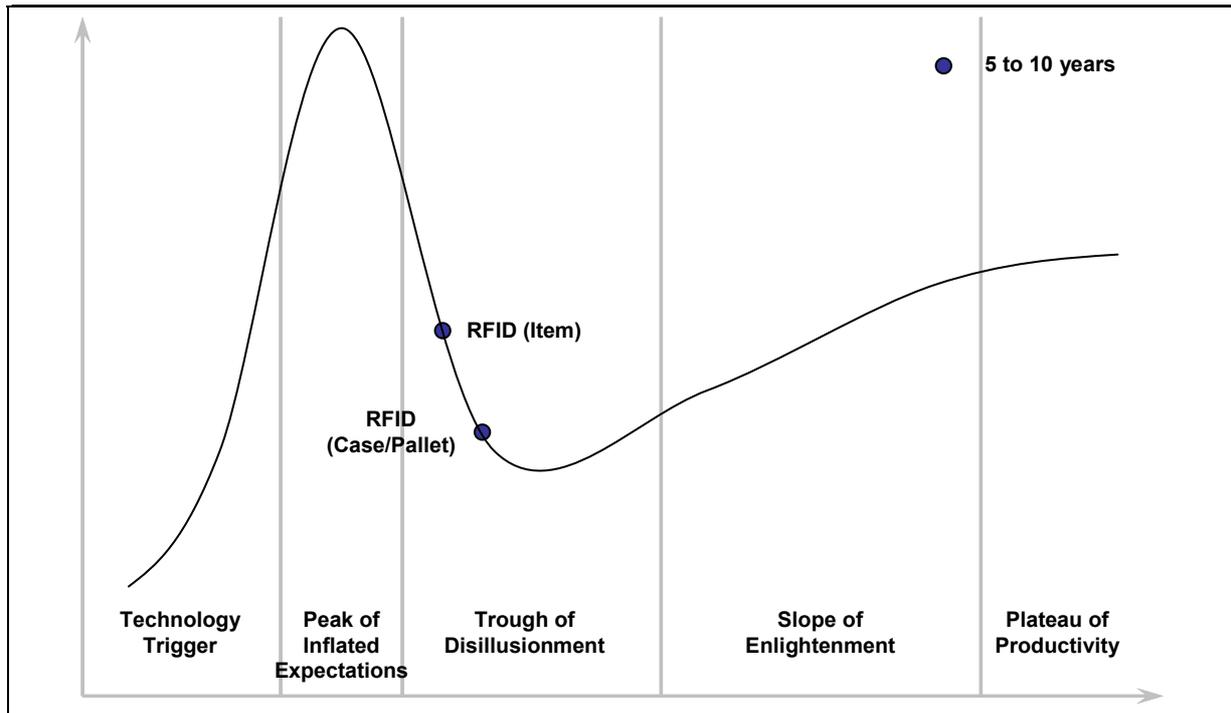
Die Technologie der Radio-Frequenz-Identifikation (RFID) zur automatischen Identifikation von Gütern stellt durch seine vielfältigen Vorteile wie berührungsloses Lesen und Schreiben von Daten, Pulkfähigkeit, hohe Erfassungsgeschwindigkeit und Robustheit sicherlich die wichtigste Entwicklung in der Identifikationstechnologie dar.

Nach einer aktuellen Umfrage der technischen Fachhochschule Berlin planen 43% der befragten Unternehmen, RFID innerhalb der nächsten drei Jahre einzuführen [RFI-08]. DB Research prognostiziert ein jährliches Wachstum des RFID-Marktes von 57% und damit von 1,5 Mrd. € auf 22 Mrd. € zwischen 2004 und 2010 [DBR-06]. Der Einsatz von RFID in Logistik bietet vor allem in den Bereichen der Rückverfolgbarkeit von Objekten, der Produktionssteuerung, des Bestandsmanagements, der Prozesstransparenz und der Prozesskosten sowie des Inventuraufwandes und Schwundes große Potentiale [Sei-08].

##### **4.1 RFID – Status Quo**

In den letzten Jahren ist neben den Pilotanwendungen eine starke Zunahme konkreter Anwendungsfälle zu verzeichnen. So wichen 2006 die im Zuge des RFID-Hype der Vorjahre anzutreffenden überzogenen Erwartungen (siehe auch Abbildung 8), auch geschürt durch einseitigen Optimismus oder mangelndes Sachverständnis, einer realistischen Einschätzung möglicher Einsatzpotenziale [RFI-08]. Auffällig ist, dass mit Ausnahme weniger Branchen wie dem Einzelhandel die Pulkerfassung erst in einigen Jahren als realisierbar angesehen wird [Sei-08]. Während der Handel aktuell vornehmlich die Kennzeichnung auf Palettenebene fokussiert, wird in der Textil- und Investitionsgüterindustrie die Produktebene bevorzugt.

---



**Abbildung 8: Lage der RFID im Hype Cycle for Emerging Technologies nach Gartner, 2007**

Wichtig für den Einsatz der RFID-Technologie sind die Fortschritte im Bereich der Standardisierung sowohl in der weiteren Definition der Luftschnittstelle als auch der Speicherarchitektur. Mit der Entwicklung des Electronic Product Code (EPC) und des EPCglobal-Netzwerks wurde die Voraussetzung für die standardisierte, weltweit eindeutige Identifizierung von Objekten geschaffen. Objektbezogene Informationen können über das Internet in Echtzeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette abgerufen werden.

Nach einer internen Studie des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München 2006 waren Anwendung im Bereich High Frequency (HF; 13,56 MHz) mit 40% im leichten Übergewicht zu UHF mit etwa 30%. Im Vergleich zu den Vorjahren zeichnet sich jedoch ein deutlicher Trend zu UHF ab. Das liegt nicht nur an den enormen Verbesserungen der Transponder hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit Flüssigkeiten und Metall, sondern auch an der größeren Reichweite und der höheren Datenrate, die insbesondere für die Automatisierung entscheidend sind. Weiterhin werden mit Ausnahme konkreter Anwendungen bspw. in der Luftfahrtindustrie hauptsächlich statische Informationen wie der EPC auf den Transpondern hinterlegt [Sei-08]. Die Möglichkeit, Daten auf dem Transponder zu hinterlegen und aktiv zu verändern, wird also heute noch kaum genutzt.

#### 4.2 RFID – Eine Technologie erobert die Logistik

RFID zieht sich in unterschiedlichen Ausprägungen durch zahlreiche Branchen. Die häufigsten logistischen Anwendungen sind im Warenein- und -ausgang, für das Lagermanagement und im innerbetrieblichen Ablauf für die Materialflusssteuerung anzutreffen.

Im Warenein- und -ausgang übernimmt die RFID-Technologie beispielsweise automatisch die Buchung von Warenbewegungen. Der Anwendungsfokus liegt hierbei auf der reinen Identifikation der Ware. Im Bodlager hingegen wird RFID zur Positionsbestimmung von

Flurförderzeugen verwendet. Mit Hilfe von Datenträgern im Hallenboden und einem Lesegerät am Unterboden des Fahrzeugs kann der Stapler verfolgt werden. Ist dieser darüber hinaus mit entsprechender Hardware ausgerüstet, können mit Transpondern versehene Paletten oder Behälter vom Stapler identifiziert und in Kombination mit Höhensensoren für den Gabelhub mit dem Lagerplatz in Verbindung gebracht werden.

Speziell in der Logistik existieren zahlreiche weitere Anwendungen der RFID-Technologie, die deren Potenzial nutzen. Genannt seien an dieser Stelle RFID-gestützte Konzepte für die Materialflusssteuerung, wie sie beispielsweise in der Fahrzeugindustrie Verwendung finden.

#### **4.3 Wo Licht ist, ist auch Schatten**

Zwar konnte die RFID-Technologie in den letzten Jahren deutliche Fortschritte weg von einzelnen Pilotinstallationen hin zu erfolgreich angewandten Lösungen machen. Dennoch gilt es noch einige Problemstellungen auf dem Weg zu einer durchgängigen Nutzung von RFID zu lösen.

Zwischen den genannten Potenzialen und den tatsächlichen Implementierungsfällen klafft eine deutliche Lücke. Neben der mitunter bislang mangelhaften technologischen Standardisierung sind hierfür insbesondere technische Unsicherheiten sowie mangelnde monetäre Bewertbarkeit von Aufwand und Nutzen verantwortlich. Es fehlen geeignete Instrumente, die auch die indirekten Bereiche wie den Kundennutzen oder die höhere Datentransparenz, mit in die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einbeziehen [Sei-08].

Durch die rasant steigende Anzahl von IT-Anbietern, Beratern und Standardisierungsgremien ergeben sich, bedingt durch einseitig optimistische oder widersprüchliche Einschätzungen, Verunsicherung und Zurückhaltung bei potentiellen Interessenten. So bescheinigten bei einer Umfrage 2006 unter 1200 Unternehmen über 60% der RFID-Technologie eine hohe strategische Bedeutung, jedoch wenden nur 3% RFID an [Voj-06]. Zur Verunsicherung hat auch die fehlende Standardisierung in der Vergangenheit beigetragen. Neben einer Gleichverteilung zwischen unternehmensinternen und etablierten Übertragungsstandards sind dadurch viele unternehmenseigene Softwarelösungen entstanden [Sei-08]. Weitere Schwierigkeiten ergeben sich bei der Implementierung durch das hohe entstehende Datenaufkommen, Zeitverzögerungen durch aufwändige Genehmigungsprozesse, speziell hinsichtlich der Datensicherheit, oder technische Probleme. Auch die Unsicherheit bezüglich der Reaktion der Mitarbeiter sowie die mangelnde Bereitschaft, bestehende Prozesse hinsichtlich eines RFID-Einsatzes zu reorganisieren, wirken sich erschwerend auf eine Implementierung aus.

#### **4.4 Trends und Herausforderungen für die Zukunft**

Bereits 2004 zeigte eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) eine weitere Zunahme von RFID als AutoID-Technologie [Hom-04]. Der Trend geht dabei vermehrt in Richtung UHF.

Die bisherigen Anwendungsszenarien von RFID in der Logistik werden auch die Zukunft prägend [Sei-08]. Doch auch Endkundenkonzepte werden stärker in den Fokus rücken.

---

Diese reichen von der Kundenbindung durch gesteigerte Lieferbereitschaft auf Grund von Prozessverbesserungen bis zu Einkaufsführern im Bereich des Einzelhandels. In der Bauindustrie wird sich die Eignung von RFID im Bereich der Baulogistik, Fertigungs- und Lebenslaufdokumentation oder Diebstahlsicherung dagegen erst beweisen müssen.

Im Bereich der Transponderentwicklung stand in der Vergangenheit der Einsatz in Umgebungen mit Metall und Flüssigkeiten im Fokus. Ein Thema für die Zukunft stellt die Entwicklung von Polymerchips dar. Eine Grenze ist hierbei jedoch die realisierbare Frequenz im Druckverfahren, die erst im HF-Bereich (13,56 MHz) liegt. Neben reinen read-only-Transpondern ist die Beschreibung der Datenträger mit relevanten Daten im Kommen [Hom-04]. Eine Rolle spielt in diesem Zusammenhang auch die Entwicklung der Speicherkapazitäten und Speichersegmentierung in den nächsten Jahren. Generell lassen sich zwei Tendenzen beobachten. Während auf der einen Seite weiter die Kosten der Transponder im Vordergrund stehen, ist auch eine Zunahme der Anwendung intelligenter Tags mit Sensorik, die auch für die Thematik der Selbststeuerung von Bedeutung sind, zu beobachten [Hom-04].

Auch in Zukunft stehen im Kontext mit der Leistungsfähigkeit von RFID die Verbesserung der Übertragungsgeschwindigkeit, wie sie bereits bei der Einführung der zweiten Generation des EPC umgesetzt wurde, die Weiterentwicklung der Protokolle und Antikollisionsverfahren sowie die durchgängige Standardisierung im Mittelpunkt der Entwicklung. Ein wichtiger Schritt ist dabei auch die Einführung der zweiten Generation des EPC im HF-Bereich und der weitere Ausbau des EPCglobal-Netzwerks in Richtung Internet der Dinge. Besonders das Thema Datenschutz und Zugriffsberechtigung sind nicht nur im Einzelhandel, sondern auch im Hinblick auf den durchgängigen Einsatz von RFID in der Wertschöpfungskette ein zentrales Thema. Hierzu zählt auch die Fälschungssicherheit der Daten, die gerade auch im Zuge des Verbraucherschutzes neues Gewicht bekommen hat. Meldungen, wie über die kürzlich gehackten, millionenfach verbreiteten Mifare-Chips, zeigen, wie sensibel und bedeutungsvoll die Thematik ist [Noh-08].

Eine große Herausforderung stellt auch der Einsatz von RFID in offenen Systemen, insbesondere im Supply Chain Management beispielsweise in der Automobilindustrie, dar. Die meisten Unternehmen legten bisher im Bezug auf die gemeinsame Nutzung von Daten in der Wertschöpfungskette große Zurückhaltung an den Tag. Erst in den letzten Jahren hat hier ein Bewusstseinswandel eingesetzt, vor allem wegen der starken Ausreizung innerbetrieblicher Optimierungspotenziale. Zukünftige Lösungen müssen deshalb nicht nur spezifische Anwendungen wie Sicherheitsbedenken berücksichtigen, sondern auch Lösungsmöglichkeiten bieten, um die Datenflut in Echtzeit zu bewältigen, verschiedene Frequenz-, Transpondertypen und Insellösungen zu integrieren und die Frage nach den erforderlichen Daten zu beantworten. Mit den gleichen Fragen beschäftigt sich auch der Einsatz von RFID im Kampf gegen die Produktpiraterie.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID müssen Methoden entwickelt werden, die auch den Nutzen in indirekten Bereichen berücksichtigen. Erste Ansätze hierzu sind bereits im Rahmen einer Studie des International Performance Research Institute erarbei-

tet worden [Sei-08]. Das Gleiche gilt für die Darstellung von Prozessen unter Berücksichtigung von RFID, sowie des Material- und Informationsflusses.

Um den RFID-Markt für potenzielle Anwender attraktiver zu gestalten, muss die Integrationsfähigkeit verschiedener Lösungen gewährleistet sein. Ziel muss es sein, die verschiedenen Insellösungen und IT-Systeme der Unternehmen, soweit möglich, zu standardisieren bzw. über standardisierte Schnittstellen als kompatible Aufsetzlösung zu gestalten [Log-05].

Weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf besteht in der Anwendung von RFID zur Steuerung des Materialflusses durch intelligente Objekte. Das Internet der Dinge des folgenden Kapitels beschäftigt sich explizit mit dieser Thematik.

## **5 Internet der Dinge – Die Vision wird Realität**

Die rasante Entwicklung in der Informationstechnik in den letzten Jahren führte zu kleinen, preisgünstigen und trotzdem äußerst leistungsfähigen Rechnern. Schon 1991 ersann ein Mitarbeiter der Fa. Xerox in einem Aufsatz über *'Den Computer für das 21. Jahrhundert'* die Vision einer von vielen kleinen Computern durchsetzten Welt, die den Menschen unmerklich unterstützen sollten. Diese Vision der allgegenwärtig verteilten, aber unsichtbaren Rechner wurde unter dem Schlagwort "Ubiquitous Computing" bekannt. Der Weg vom Smart Label zum sogenannten Smart Object, welches neben der Fähigkeit zur Datenspeicherung auch Rechenkapazität bereit hält ist inzwischen nicht mehr weit. Schon heute sind bis zu 70 Steuergeräte als Embedded Systems in Automobilen verbaut. Diese kleinen und vielseitigen Rechner werden bald auch in anderen Produkten des täglichen Lebens Einzug finden. Der Trend geht zu noch intelligenteren und stärker vernetzten Steuerungseinheiten.

Diese Entwicklung wird inzwischen auch in der innerbetrieblichen Logistik mit Hochdruck voran getrieben. Experten fordern schon seit geraumer Zeit ein Umdenken: Weg von durchgeplanten, vorherbestimmten Systemen, hin zu einem „Internet der Dinge“. Die Konzepte für den sich selbst steuernden Materialfluss, einem Netzwerk von gleichberechtigten Einheiten, die keine übergeordnete Koordination mehr brauchen, beginnen Gestalt anzunehmen. Eine neue Systemarchitektur nach dem Vorbild des Internets hätte gegenüber herkömmlichen Steuerungsansätzen viele Vorteile und stellt einen Ausweg aus der Komplexitätsfalle dar, in welche die Intralogistik in den letzten Jahren geraten ist.

Der hohe Automatisierungsgrad führte zu großen, stark vernetzten Materialflusssystemen, die von leistungsfähigen Rechnern zentral gesteuert werden. Vor allem die Steuerungsebene hat bereits heute einen Komplexitätsgrad erreicht, der mit herkömmlichen Systemarchitekturen nur schwer zu beherrschen ist.

Mit Fördertechniksystemen wie dem MultiShuttle, entwickelt von der Siemens Dematic AG in Zusammenarbeit mit dem Dortmunder Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, oder dem Servus-System der Servus Robotics GmbH mit Sitz im österreichischen Dornbirn haben bereits erste dezentrale Systeme mit verteilter Intelligenz Einzug

---

in industrielle Anwendungen gefunden. Beim MultiShuttle handelt es sich um ein schienegebundenes Lagerbediensystem. Das Systemkonzept basiert auf autonomen, schienegeführten Fahrzeugen zum Behältertransport, die innerhalb und außerhalb des Lagersystems verkehren. Das System verfügt über Fahrschienen, die in jeder Ebene des Lagers und in der Vorzone installiert sind. Transportaufträge erhalten die Fahrzeuge über W-LAN.

Das Servus-System besteht aus beliebig vielen Transportrobotern, die ebenfalls auf Schienen fahren. Das Einsatzspektrum des Systems reicht von der intelligenten Materialverteilung bis zum gezielten Transport von Materialien und Werkstücken. Durch einen modularen Aufbau ist das Servus-System einfach skalierbar und kann somit leicht an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden. Diese Systeme stellen derzeit noch Insellösungen für spezielle Anwendungsfälle dar. Gegenstand der aktuellen Forschung ist nun, die gesamte Intralogistik so zu gestalten, dass sich unterschiedlichste Teilsysteme von der Rollenbahn bis zum Staplerleitsystem selbstständig miteinander vernetzen. Es soll ein robustes Gesamtsystem entstehen, das nach einem einheitlichen Steuerungskonzept gestaltet ist, standardisierte Schnittstellen bietet und so für Entwickler und Betreiber noch handhabbar bleibt.

### **5.1 Das Internet als Vorbild**

Das Internet als weltumspannendes Netzwerk, das täglich viele Milliarden Transporteinheiten in Form von Datenpaketen transportiert, soll hierbei als Vorbild dienen. Seit seinen Anfängen in den 70er Jahren hat sich das Internet vor allem auch durch den WWW-Boom der 90er Jahre zu einer globalen Infrastruktur entwickelt, die immer noch rasant wächst. Die eingesetzten Kommunikationsprotokolle und -technologien wurden, abgesehen von Leistungssteigerungen und Funktionserweiterungen, über die gesamte Lebensdauer des Internets kaum verändert. Obwohl oder gerade weil dieses "Netzwerk aus Netzwerken" gänzlich auf zentrale Instanzen verzichtet, ist es hochgradig robust und skalierbar.

Die Intralogistik der Zukunft wird ebenso wie das Internet dezentral und hierarchielos sein. Behälter und Pakete werden autonom und steuern sich selbst zum Ziel – ganz so wie die Datenpakete im Internet. Intelligente Förderstrecken und Fahrzeuge agieren dabei wie Netzwerkrouter und sind Dienstleister für ankommende Transporteinheiten. Alle Akteure reagieren auf ihre Umgebung und können sich so an schwankende Auftragslasten oder sogar Ausfälle automatisch anpassen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung 2006 ins Leben gerufene Verbundprojekt "Internet der Dinge" [BMBF] schafft die Grundlage, um diese Ideen in die Tat umzusetzen. Dabei soll eine Entwicklung aufgegriffen werden, die zahlreiche Antriebs- und Steuerungshersteller bereits seit einiger Zeit voran treiben. Immer mehr Intelligenz wandert von der SPS, die früher noch ganze Anlagenbereiche steuerte, auf die Feldebene eines Materialflusssystems. So besitzen viele Frequenzumrichter, Elektroantriebe oder Auto-ID-Lesegeräte programmierbare Microcontroller, auf denen eigener Code installiert werden kann. Kleine und kostengünstige Embedded PCs bieten die Möglich-

keit Steuerungslogik direkt an den Ort des Geschehens zu verlagern. Viele dieser Komponenten verfügen bereits über Ethernet-Schnittstellen, so dass einer Kommunikation via TCP/IP nichts im Wege steht.

So wird es erstmals möglich, das bisherige Baukastenmodell von der Elektrik und Mechanik auch auf die Steuerungstechnik zu erweitern. Diese mechatronische Gestaltung kann zur Entwicklung autonomer Funktionseinheiten verwendet werden.

Durch die technologischen Fortschritte im Bereich RFID lässt sich aber nicht nur die Steuerungssoftware und damit die Entscheidungskompetenz dezentralisieren, sondern auch die Datenhaltung. Klassisch wird RFID nur zur Identifikation einzelner Transporteinheiten verwendet. Alle übrigen Informationen werden aus zentralen Datenbanken abgerufen. Doch die Speicherkapazitäten heute erhältlicher RFID-Tags erlauben bereits einen ersten Schritt vom Data-On-Network- hin zum Data-On-Chip-Prinzip. Dabei werden alle zu einer Transporteinheit gehörenden Daten, neben der eindeutigen Identifikationsnummer also auch Informationen über das Transportziel oder den Inhalt und die geometrische Form des Behälters, direkt auf dem mitgeführten RFID-Tag hinterlegt. Diese direkte Kopplung des Informations- und Warenflusses verringert die Kommunikation im System und die Datenredundanz. Durch den Einsatz intelligenter Transporteinheiten rücken dezentral gesteuerte, innerbetriebliche Materialflüsse immer näher an die Funktionsweise des Internets heran.

Aufgaben wie die Wegberechnung, die Wegreservierung, die Stauvermeidung und das Schalten von Wegelementen (zum Beispiel Weichen) werden im Internet der Dinge dezentral und selbstständig von den Materialflussmodulen übernommen. Ein übergeordnetes Leitsystem ist damit nicht mehr erforderlich.

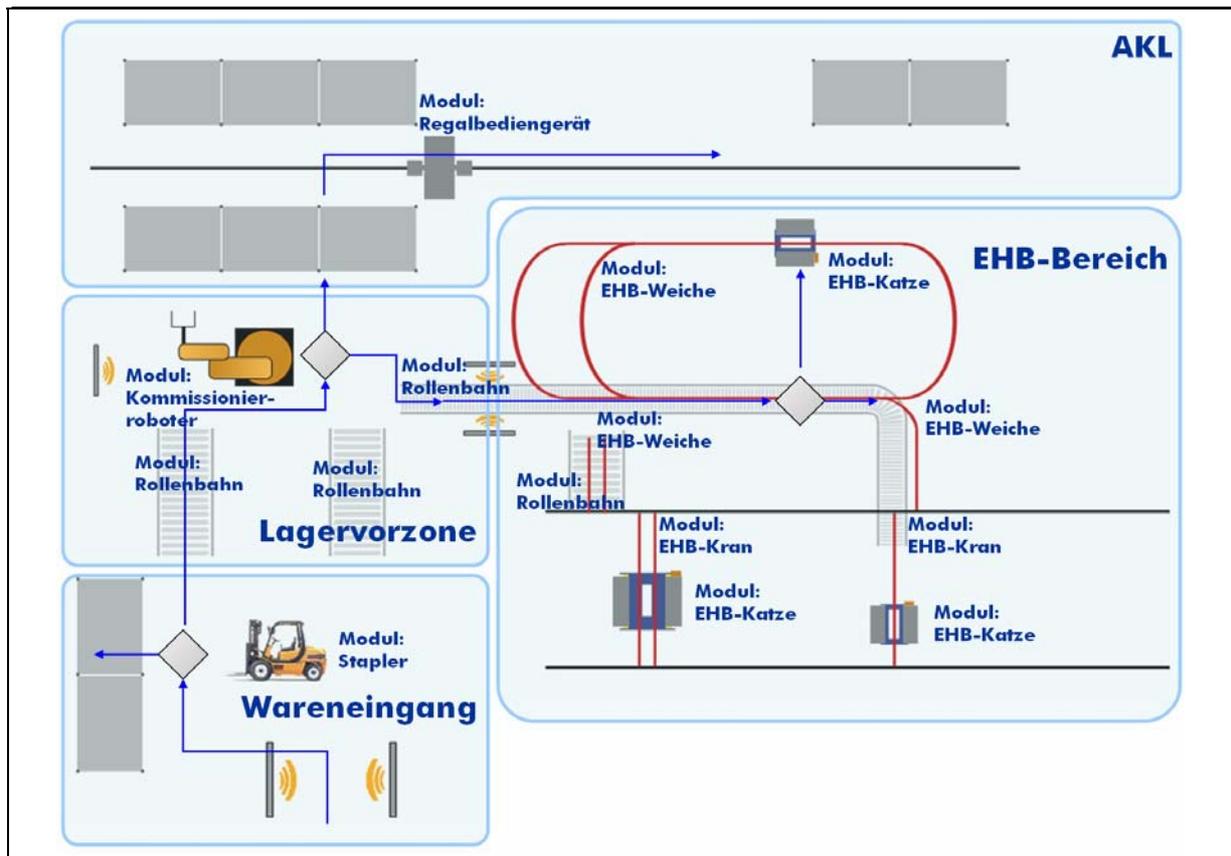
### ***Die Modularisierung im Internet der Dinge***

Ein Grundlage, um diese Ideen in die Praxis umzusetzen, sind Vorgehensweisen zur Modularisierung eines Materialflusssysteme.

In der Konstruktionslehre werden bei der Modularisierung von Produkten Lösungsalternativen abgeleitet, indem die zu erfüllenden Funktionen analysiert werden [VDI-2221]. Analog dazu kann in der Logistik auf die Grundfunktionen Fördern, Verzweigen / Zusammenführen, Lagern und Handhaben zurück gegriffen werden. Man kann in diesem Zusammenhang also auch von einer „funktionsorientierten Modularisierung“ sprechen.

In Abbildung 9 ist eine beispielhafte Modularisierung und der Weg der Transporteinheiten durch den Materialfluss in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml zu sehen. Die Module sind eigenständige Funktionsträger wie z.B. Rollenbahnen oder EHB-Katzen.

---



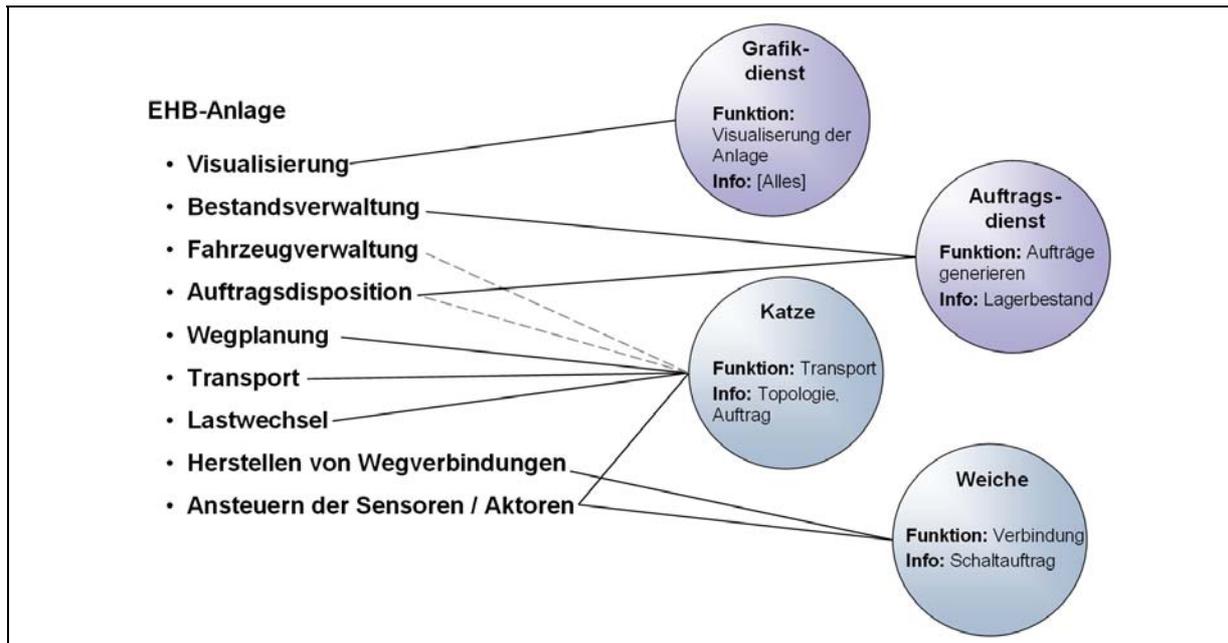
**Abbildung 9: Materialflusslayout in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml**

Da im "Internet der Dinge" jedes Modul seine eigenen Tätigkeiten selbst steuert und überwacht, sind die Systemgrenzen der Software ebenso zu ziehen, wie bei der Mechanik. Dies führt zu einer grundsätzlich anderen Softwarearchitektur als bisher. Hier werden nicht mehr die horizontalen Steuerungsebenen (wie z.B. Bereichssteuerung, Subsystemsteuerung) betrachtet, sondern einzelne Module gegeneinander abgegrenzt. Aufgaben, welche bisher durch den Materialflussrechner übernommen wurden, werden nun auf die einzelnen Module aufgeteilt.

Die Module verfügen dann über ausreichend Intelligenz, um ihre Aufgabe selbständig oder kooperativ zu erfüllen. Dem System muss nur noch mitgeteilt werden, was es zu tun hat – die verschiedenen Einheiten bestimmen dann im organischen Zusammenspiel, wie der erteilte Auftrag erfüllt wird. Die Module werden damit zu leicht austauschbaren mechatronischen Einheiten, welche selbständig auf Störungen reagieren und so ein robustes Gesamtsystem erzeugen [Wil-06].

Übergreifende Abläufe wie die Koordination mehrerer Module, die Auftragsdisposition oder die Systemoptimierung entstehen entweder durch Verhandlungsstrategien der Module untereinander oder werden durch Softwaredienste unterstützt.

In Abbildung 10 ist beispielhaft die Funktionszuordnung zu den Modulen für einen Elektrohängebahnbereich abgebildet.



**Abbildung 10: Zuordnung von Funktionen zu Fördertechnikmodulen und Softwarediensten**

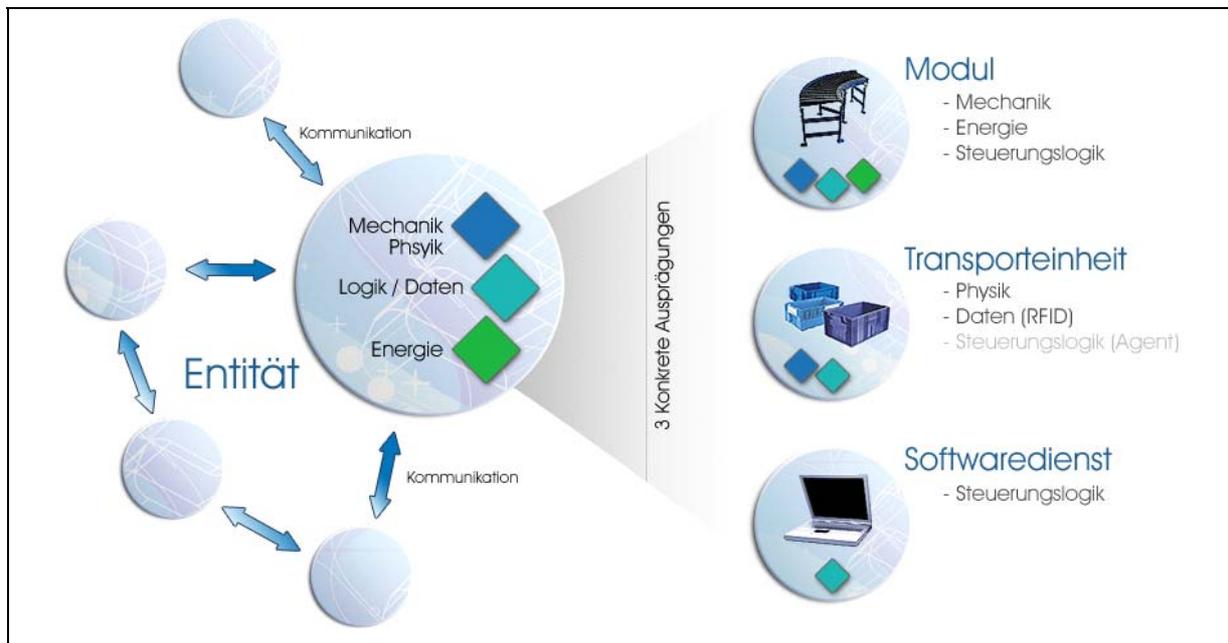
## 5.2 Die Bausteine des Internet der Dinge

Um diese Aufteilung der Materialflusssteuerung technisch zu realisieren, wird auf die bewährte Technologie der Multiagentensysteme aus der Informatik zurückgegriffen. Multiagentensysteme bestehen aus autonomen, kooperierenden Softwareprogrammen, den Agenten, die innerhalb verschiedener Verhaltensmuster auf die Lösung einer Aufgabe hinarbeiten. Jedes Materialflussmodul wird dabei von einem oder mehreren Agenten unterstützt, die eine bestimmte Aufgabe, wie z.B. Auftragsverwaltung oder Wegplanung, innerhalb des Logistiksystems übernehmen. Die Strukturierung der einzelnen Materialflussmodule als autonome Agenten mit standardisierten Kommunikationsschnittstellen erlaubt es, solche Agenten in fast beliebiger Kombination mit anderen Agenten oder Softwareprogrammen kooperieren zu lassen. Die offene und modular ausgerichtete Architektur des Multiagentensystems bietet das Potenzial für eine erhebliche Verringerung des Engineering- und Inbetriebnahmeaufwands, da einzelne Module unabhängig vom Gesamtsystem programmiert und getestet werden können. Durch diese schrittweise Inbetriebnahme können Fehlerquellen frühzeitig erkannt und behoben oder in eine Umplanung einbezogen werden.

In Anlehnung an bereits vorhandene Arbeiten im Bereich der Multiagentensysteme wird die nicht weiter zerlegbare Funktionseinheit im Internet der Dinge als „Entität“ bezeichnet. Je nach technischer Ausprägung einer Entität wird, wie bereits erwähnt, zwischen *Modulen*, *Transporteinheiten* und *Diensten* unterschieden. Dabei werden die mechanische, die energetische und die steuerungstechnische Schicht betrachtet.

Module verfügen über alle drei Schichten, die, soweit technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll, an einem Ort realisiert werden sollten. Transporteinheiten besitzen lediglich eine mechanische und eine steuerungstechnische Schicht, die in diesem Fall z.B. aus einem an der Transporteinheit mitgeführten RFID-Transponder und/oder einem Agenten, der dieser

zugeordnet ist, besteht. Dienste sind reine Softwareprogramme und besitzen somit keine mechanische und energetische Schicht. Praktisch jedes Materialflusssystem kann somit aus diesen drei Typen von Entitäten aufgebaut werden.

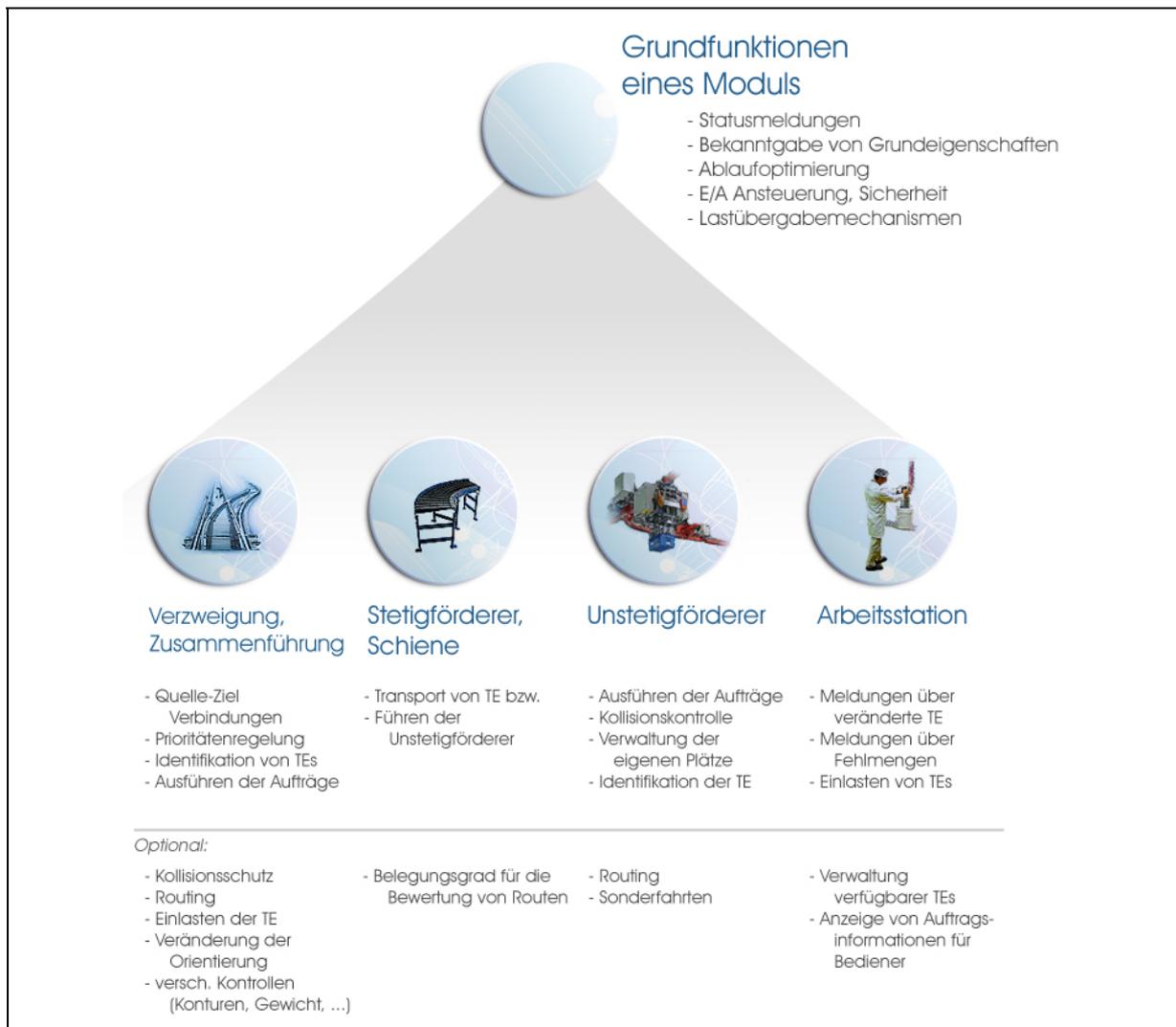


**Abbildung 11: Die Grundeinheiten des Internet der Dinge sind kooperierende Entitäten. Eine Entität kann ein (Fördertechnik-)Modul, eine Transporteinheit oder ein Softwaredienst sein**

### 5.3 Funktionen im Internet der Dinge

Betrachtet man die Funktionen, welche zukünftig von den einzelnen Einheiten ausgeführt werden sollen, so stellt man fest, dass sich diese in Grund- und Spezialfunktionen aufteilen lassen. Grundfunktionen müssen von allen Entitäten erbracht werden - dazu gehören in erster Linie die Kommunikation in einer allen Entitäten verständlichen Sprache oder die Bekanntgabe der eigenen Fähigkeiten.

Spezialfunktionen lassen sich meist auf eine ganze Klasse von Entitäten beziehen – so müssen beispielsweise Zusammenführungselemente Kollisionen zwischen Transporteinheiten vermeiden, während Unstetigförderer eine Wegplanung durchführen (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12: Grund- und Spezialfunktionen von Fördertechnikmodulen**

Diese stufenweise Spezialisierung von Entitäten erlaubt den Einsatz von Methoden der Objektorientierung für die Softwareentwicklung. Über Vererbungsmechanismen werden neue Steuerungsprogramme von bereits implementierter und getesteter Logik abgeleitet. Wurde beispielsweise die Software für einen einfachen Rollenförderer erstellt, dann enthält diese bereits Mechanismen zur Synchronisation mit angrenzenden Modulen. Wird nun eine Strecke mit Pufferfunktion benötigt, wird das vorhandene Programm nur um Methoden für die Überwachung und Verwaltung der Pufferplätze erweitert werden, ohne das restliche Programm zu verändern.

Auf diese Weise gestaltet sich das Engineering einer Anlage genau so wie die Erstellung heutiger Simulationsmodelle. Vorgefertigte Programmbausteine stellen bereits die wichtigsten Funktionen der Fördertechnikmodule bereit und müssen nur noch an Spezialanforderungen angepasst werden. Komplexe Systeme werden per „Plug & Convey“ erstellt, indem Module miteinander gekoppelt werden. Die Programmierung einer zentralen Instanz ist nicht mehr notwendig, was sowohl bei der Neuplanung als auch vor Allem beim Umbau einer Anlage große Vorteile bringt.

Eine funktionsorientierte Modularisierung, der Einsatz neuester Technologien und eine strukturierte Vorgehensweise bei der Programmierung rücken die Vision vom sich selbst steuernden Materialfluss in greifbare Nähe. So wie das Internet unseren täglichen Umgang miteinander und mit der Welt revolutioniert hat, so wird auch das Internet der Dinge einen entscheidenden Wandel in die Logistik bringen. Diese neue Denkweise in der Logistik ist für die Zukunftsfähigkeit dieser Branche nicht nur absolut erforderlich, sondern sie beginnt bereits, konkrete Gestalt anzunehmen.

## **6 Intelligente Logistiksysteme – autonom und lernfähig**

Zukünftig muss eine wettbewerbsfähige Logistik dazu in der Lage sein, trotz des schwer zu prognostizierenden Kundenverhaltens individualisierte Produkte oder Services in der geforderten Zeit kostengünstig und ressourcenschonend bereitzustellen. Doch wie können Logistiksysteme umgestaltet werden, um diese Herausforderungen zu bewältigen? Flexibilität und dynamische Anpassbarkeit innerbetrieblicher Vorgänge wie z.B. die Kommissionierung, Transporte oder die Verpackung der Ware, stellen die Hauptanforderungen dar. Dieser Forderung nach Wandelbarkeit müssen auch automatisierte Teilsysteme in der Prozesskette gerecht werden.

Um den Spagat zwischen Automatisierung und Flexibilität zu bewältigen, müssen technische Geräte in Zukunft mit Eigenschaften ausgestattet werden, die heute noch dem Menschen vorenthalten sind und ihm erlauben, sich an fast jede beliebige Situation in kürzester Zeit anzupassen. Zusammenfassend lassen sich diese Eigenschaften mit dem Begriff „Kognition“ benennen. Statt nur ein im Voraus eingegebenes Programm ablaufen zu lassen und auf bekannte Ereignisse mit vorgegebenen Aktionen zu reagieren, werden bewegliche und unbewegliche Maschinen kognitiv und fällen „bewusst“ Entscheidungen. Kognitive Systeme haben vier grundlegende Eigenschaften: sie können ihre Umwelt wahrnehmen, sie stellen in Abhängigkeit ihrer Situation Überlegungen an, sammeln Erfahrungen und lernen aus diesen und sind letztendlich dazu in der Lage, komplexe Planungsaufgaben zu übernehmen. Dadurch können sie Veränderungen in der Umwelt sowie ihren eigenen Einfluss auf die Umgebung voraussehen und ihre Aufgaben und Aktionen für einen längeren Zeitraum planen.

Anregungen und Ideen für die Umsetzung lernfähiger Maschinen stammen oftmals aus Bereichen der Psychologie und Neurologie. Dort werden die Mechanismen, nach denen Menschen Informationen aufnehmen, verarbeiten und zu neuen Informationen kombinieren, bereits seit langem eingehend untersucht.

Im technischen Bereich wird vor allem die Nachbildung des menschlichen Gehirns als Software angestrebt. IBM versuchte in seinem „Blue Brain Project“ nachzuweisen, dass ein Gehirn mit sämtlichen biologischen Prozessen in einem Computermodell umgesetzt werden kann – auch wenn die Rechenleistung heutiger Computer bei weitem nicht ausreicht, um ein komplettes menschliches Gehirn abzubilden.

---

Erkenntnisse solcher Forschungsprojekte zur „maschinellen Intelligenz“ können in Zukunft auch in die Entwicklung von Maschinen und Anlagen eingehen. Dadurch entstehen lernfähige Systeme, welche den großen Vorteil bieten, dass sie ihre eigenen Möglichkeiten im Laufe der Zeit selbstständig erweitern und optimieren. Darüber hinaus ist eine derartige Technologie im direkten Umgang mit Menschen auch in der Lage, sich an individuelle Bedürfnisse oder Möglichkeiten anzupassen, um Arbeitsvorgänge zu erleichtern oder zu beschleunigen, ohne den Menschen zu ersetzen. Für derartige Ansätze hat sich der Begriff der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) etabliert. So könnte sich beispielsweise ein Kommissionier- oder Montageplatz selbstständig an die Körpergröße des Mitarbeiters anpassen, indem verschiedene Fächer so verschoben werden, dass ein optimales Arbeiten möglich ist. Betritt nach einem Schichtwechsel ein neuer Mitarbeiter den Arbeitsplatz, könnte ein solches System den Bediener erkennen und sich dementsprechend einstellen.

Bereits heute befinden sich technische Geräte im Einsatz, die selbsttätig ihre jeweilige Aufgabe scheinbar ohne menschliches Zutun erledigen. Zu erwähnen sind hier zum Beispiel Fahrerlose Transportsysteme oder automatisierte Stapler, die ein Warenlager selbstständig befahren und angeforderte Artikel kommissionieren. Tatsächlich liegen diesen Systemen aber stets in Form von Steuerungen und Software vom Menschen vorgegebene Abläufe zugrunde.

Ein Blick in die Natur zeigt, dass es gar nicht notwendig ist, jeden Schritt in vorhinein zu planen. Beispielsweise entstehen die komplexen Verhaltensmuster von Insektenstaaten nicht aus der Intelligenz eines einzelnen Individuums, sondern aus dem Zusammenspiel nach relativ einfachen Regeln. So finden Ameisen den Weg zwischen Futterstelle und Nest durch eine Pheromonspur, die von den Arbeiterinnen gelegt wird und der wiederum andere Ameisen folgen. Die Pheromone verflüchtigen sich mit der Zeit, so dass nur auf einer viel frequentierten Strecke eine Häufung dieses Geruchsstoffs auftritt. Führt eine Route nicht zum Ziel, oder dauert die Rückkehr zu lange, dann werden auf dieser Strecke auch wenige Pheromone ausgebracht. Auf diese Weise ergibt sich zwangsläufig die kürzeste Route zum Ziel [BEC-92].

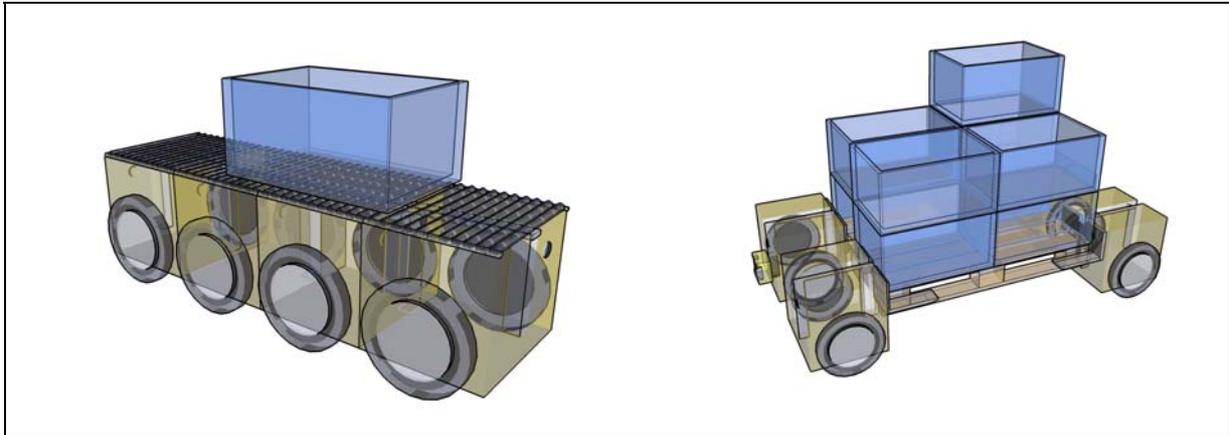
Die Erkenntnisse aus der Erforschung dieser Schwarmintelligenz haben bereits Einzug in die Programmierung von Logistiksoftware gefunden. Spezielle Routingalgorithmen zur Tourenplanung ahmen das Verhalten der Ameisen nach und erreichen so, ohne die Verwendung komplexer Formeln, bereits praxistaugliche Lösungen.

Auch Vogelschwärme organisieren sich selbst, ohne dass ein Vogel die Rolle des Anführers übernehmen muss. Schon 1986 erkannte Craig Reynolds, dass bereits drei Regeln ausreichen, um das Schwarmverhalten von Vögeln nachzubilden. Es wird vermutet, dass mit zunehmender Komplexität eines Kollektivs sogar die Intelligenz eines Individuums abnehmen darf [DEL-97].

Analog zu diesen Vorbildern aus der Natur könnten in der Intralogistik kleinskalige autonome Fahrzeuge kooperativ verschiedenste Aufgaben im Materialfluss vom Paletten- und Behältertransport bis hin zur Kommissionierung übernehmen. Ohne eine starre Struktur

---

oder festgelegte Prozessketten können sich diese „ $\mu$ -Carrier“ je nach Bedarf vernetzen, sich zu Kooperationsverbänden zusammenschließen oder solche Verbände wieder auflösen, ohne dass ein manueller Eingriff nötig ist. Das System könnte sich so auf veränderte Betriebsbedingungen vollautomatisch einstellen, indem es beispielsweise auf Stauungen oder auf Veränderungen in der Auftragslast oder in der Systemstruktur durch Hinzufügen oder Entfernen von Fahrzeugen reagiert.



**Abbildung 13: Kleinskalige autonome Fördereinheiten gestalten den Materialfluss von morgen**

Die Nutzbarmachung der Potentiale von kooperativen Systemen bestehend aus autonomen, vielseitig einsetzbaren Standardmodulen mit kognitiven Eigenschaften in der Logistik bietet die Möglichkeit, den weiterhin wachsenden Anforderungen angemessen mit hochflexiblen, leistungsfähigen und zugleich äußerst zuverlässigen logistischen Prozessen begegnen zu können.

## 7 Literaturverzeichnis

[Lat-07] Latif, M.: *Bringen wir das Klima aus dem Takt? Hintergründe und Prognosen*. Frankfurt am Main, S. Fischer Verlag GmbH, 2007, S. 61

[Jou-99] Jouzel, J.; Petit, J.R. et al.: *Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica (Nature 399)*. 3. Juni 1999, S. 429-436

[Ste-08] Stern, N.: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008

[Pie-08] Pieringer, M.: *Gefragt sind vor allem "grüne" Innovationen*. Kommentar in: *Logistik inside* Ausgabe 6/2008, S.54

[TEC-08] Tecson – *Weltmarktpreise für Rohöl*. <http://www.tecson.de/prohoel.htm>. Aufruf am 07.07.2008

[AZU-97]:  
Azuma, R. T.: *A survey of Augmented Reality*. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8/1997, S. 355-385.

[BOR-94]:  
Bormann, S.: *Virtuelle Realität – Genese und Evaluation*. Addison-Wesley, Bonn, 1994.

[BUR-94]:

Burdea, G.; Coiffet, P.: *Virtual Reality Technology*. John Wiley & Sons, New York, 1994.

[GÜN-06]:

Günthner, W. A.; Reske, M.; Wulz, J.: *Virtuelle Kollision spart Werkumbau in Automobilproduktion*. Berlin, Springer, 2006

[KAM-06]:

Kampmeier J.; Cucera A.; Fritzsche L.; Brau H.; Duthweiler M.; Lang G. K.: *Eignung monokularer Augmented Reality – Technologien in der Automobilproduktion*. In: 104. Tagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft "Augenheilkunde in der alternden Gesellschaft - Herausforderung und Chance". 21.-24.09.2006, Berlin.

[ONG-04]:

Ong, S. K.; Nee, A. Y. C.: *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*. Springer Verlag, 2004.

[REI-07]:

Reif, R.; Walch, D.; Wulz, J.: *Einsatz von Virtual und Augmented Reality: Studie zur menschenorientierten Simulation und Prozessunterstützung im logistischen Umfeld*. Studie aus dem Bayerischen Forschungsverbund *Supra-adaptive Logistiksysteme (ForLog)*, August 2007

[SRE-05]:

Schreiber, Werner; Doil, Fabian: *Augmented Reality – eine Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Fabrik*. In Schenk, Michael (Hrsg.): *Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme.*, 2005. fehlt noch was

[WUL-08]:

Wulz, J. R.: *Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität*. Dissertation an der TU München, 2008.

[BMBF-06]:

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt "Internet der Dinge" wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut.

[Wil-06:]

Wilke, M.: *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*, Diss., TU München; Herbert Utz Verlag München, ISBN 3-8316-0591-2, 2006

[Gün-06]:

Günthner, W.A.; Heinecker, M.; Wilke, M.: *Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen*, Internetplattform *Logistics.de*, Erscheinungsdatum 19.05.2006

[VDI-2221]:

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*; VDI Verlag Düsseldorf 1993

[SAIL-06]:

SAIL System-Architektur für die IntraLogistik, Arbeitskreis „Innovation und Standardisierung“ des Forum IntraLogistik VDMA, Frankfurt am Main / Stand: 18. Mai 2006

[Del-97]:

Jordi Delgado, Richard V. Sole, *Collective-induced computation*, *Physical Review E*, 55:2338-2344, 1997

[Bec-92]:

R. Beckers, J.L. Deneubourg, S.Goss, *Trails and u-turns in the selection of the shortest path by the ant *Iasius niger**. *Journal of theoretical biology*, 159:397-415, 1992

---

---

[Sei-08]:

Seiter, Dr. M.; Urban, U.; Rosentritt, C.: *Wirtschaftlicher Einsatz von RFID - Ergebnisse einer empirischen Studie in Deutschland*. Research Paper Nr. 15, IPRI gGmbH, Stuttgart, 2008

[RFI-08]:

N. N.: *Operativer Einsatz steigt*. In: *RFID im Blick*, 02/2008, Seite 12

[Hom-04]:

ten Hompel, M.; Lange, V.: *RFID 2004 – Logistiktrends für Industrie und Handel*. Dortmund: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, 2004

[Str-05]:

Straube, F.; Dangelmaier, W.; Günthner, W. A.; Pfohl, H.-Chr.: *Trends und Strategien in der Logistik – Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010*. Hamburg: Bundesvereinigung Logistik e.V., Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, 2005

[Log-05]:

N. N.: *Völlig Staubfrei*. *Logistik Heute*, S. 32, Ausgabe 4/2005

[DBR-06]:

N. N.: *RFID-Funkchips – Zukunftstechnologie in aller Munde*. Deutsche Bank Research, 24.01.2006, Internet: [www.dbresearch.de](http://www.dbresearch.de)

[Voj-06]:

Vojdani, N.; Spitznagel, J.; Resch, S.: *Konzeption einer systematischen Identifikation und Bewertung von RFID-Einsatzpotenzialen*, *ZWF Jhg.* 101, 2006

[Noh-08]:

Nohl, K.; Krissler, J.; Plötz, H.: *Chiptease - Verschlüsselung eines führenden Bezahlkartensystems geknackt*. c't 8/08, Seite 80

---