

# Lagerverwaltung und Bestandsmanagement in dezentral gesteuerten Systemen

## Warehouse and Inventory Management in decentralized Systems

**Michael Mirlach  
Trung Thanh Le  
Matthias Jung  
Thomas Atz  
Willibald A. Günthner**

*fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,  
Technische Universität München*

**D**ie Verwaltung von Lagerbeständen in Unternehmen muss erhebliche Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, -sicherheit und -konsistenz erfüllen. Dies wird heute durch eine zentrale Datenhaltung in Lagerverwaltungssystemen gewährleistet. Auf der anderen Seite ist in vielen Bereichen (z. B. Materialfluss- und Transportsteuerung, Produktionssteuerung) eine Entwicklungstendenz in Richtung dezentraler Steuerungsstrategien zu beobachten, welche eine erhöhte Flexibilität und reduzierte Komplexität versprechen. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts werden im vorliegenden Beitrag Konzepte zur verteilten Gestaltung von Lagerverwaltungssystemen vorgestellt und diskutiert.

*[Schlüsselwörter: Lagerverwaltung, Bestandsverwaltung, verteilte Systeme, RFID, drahtloses Sensor Netzwerk]*

**A** company's inventory management must comply with strong standards concerning data availability, security and consistency. All this can be achieved today with centralized data keeping in a Warehouse Management System. Contrariwise, in other areas (e. g. material flow, transport and production control) a trend towards distributed control strategies can be observed, which promise a greater flexibility and reduced complexity. In a project that was funded by the German Research Foundation (DFG) we present and discuss in this contribution concepts for a decentralized design of inventory management systems.

*[Keywords: Warehouse Management, Inventory Control, Distributed Systems, RFID, Wireless Sensor Network]*

### 1 EINLEITUNG

Fortschrittliche IT-Systeme stellen für produzierende Betriebe, Handelsunternehmen und Logistikdienstleister

das Rückgrat ihrer täglichen Arbeit dar. Von der Verwaltung von Kundenaufträgen über die Steuerung von Produktionsabläufen bis hin zur Versandabwicklung sind Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme, Warehouse Management Systeme (WMS), Warenwirtschaftssysteme (WWS) und Lagerverwaltungssysteme (LVS) in mittleren und größeren Betrieben unverzichtbar. Es handelt sich dabei um hoch komplexe Programmpakete, die mehr oder weniger stark durch automatische Prozessabläufe miteinander verzahnt sind und teilweise sogar für das jeweilige Unternehmen individuell angepasst werden (Customizing, vgl. bspw. [Gre11]).

Gleichzeitig steigen durch ein geändertes Marktumfeld die Anforderungen an die Reaktions- und Wandlungsfähigkeit der Unternehmen: Der internationale Wettbewerb auf globalen Marktplätzen, ausgeprägte Konjunkturschwankungen und kurze Innovationszyklen stellen die Anpassungsfähigkeit der Unternehmen regelmäßig auf die Probe. Die IT-Systeme müssen diese Wandlungsfähigkeit unterstützen. Somit kommen zu den klassischen funktionalen Anforderungen auch Forderungen nach Flexibilität und Skalierbarkeit (in beide Richtungen) hinzu.

Eine gängige Möglichkeit zur Erreichung einer hohen Skalierbarkeit besteht darin, ein System aus vielen einfachen, kostengünstigen und kompatiblen Einheiten aufzubauen, die flexibel miteinander kombiniert werden können. Die einzelnen Einheiten verfügen dabei für sich genommen nur über eine eng begrenzte Funktionalität und eine beschränkte Menge an Informationen, können jedoch relevante Entscheidungen selbstständig und direkt vor Ort treffen. Durch das Zusammenspiel aller Einheiten ergibt sich das gewünschte Systemverhalten. Beispiele hierfür sind Zellulare Transportfahrzeuge (vgl. bspw. [Kir12]) oder auch modulare stationäre Systeme (z. B. Gebhardt Fördertechnik FlexConveyor [Geb11]). Nach diesem Grundsatz konstruierte Anlagen zeichnen sich durch eine

hohe Flexibilität und Skalierbarkeit aus. Sie können nachträglich an wechselnde Anforderungen angepasst und zur Leistungssteigerung um zusätzliche Einheiten ergänzt werden. Die einzelnen Elemente können leicht modifiziert oder ausgetauscht werden, und neue Elemente können hinzugefügt werden, solange sie mit den zu Grunde liegenden Kommunikationsprotokollen kompatibel sind.

Durch diese grundlegend andere Architektur wird eine weitgehende Entkopplung der Systembestandteile erreicht. Die Einzelelemente besitzen durch den beschränkten Funktionsumfang eine vergleichsweise geringe Komplexität. Durch die verteilte Architektur steigt jedoch der Kommunikations- und Abstimmungsaufwand zwischen den einzelnen Systembestandteilen (vgl. [Chi09], S. 62).

Dezentrale Steuerungsansätze wurden bereits erfolgreich zur Steuerung komplexer Vorgänge (bspw. Produktions- [Bus01] und Materialflusssteuerung [Chi10, Geh10]) eingesetzt. Dass eine dezentrale Materialflusssteuerung ohne dedizierten Materialflussrechner bereits heute möglich ist, wurde in verschiedenen Forschungsprojekten gezeigt. In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, in wie weit diese Philosophie auch auf die Lagerverwaltung und das Bestandsmanagement ausgedehnt werden kann, um somit eine durchgängige dezentrale Gestaltung eines gesamten Produktionssystems zu ermöglichen.

Um zu entscheiden, ob und in welcher Form dezentrale Ansätze für die genannte Aufgabenstellung geeignet sind, werden in Abschnitt 3 die Anforderungen, die ein LVS üblicherweise zu erfüllen hat, beschrieben. Abschnitt 4 beschreibt das Zusammenwirken des LVS mit dem physischen Prozess. Im Abschnitt 5 werden dann Konzepte vorgestellt, um ein dezentrales Lagerverwaltungssystem zu implementieren. Zunächst jedoch werden in Kapitel 2 bereits bestehende Ansätze vorgestellt.

## 2 STAND DER TECHNIK

Verschiedene Forschergruppen haben bereits Konzepte zur dezentralen Lagerverwaltung entwickelt. Diese werden vorgestellt und im Anschluss hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte untersucht. Grundsätzlich ist dabei zwischen der dezentralen Datenhaltung bzw. -verarbeitung und der automatischen Erfassung von Lagerbewegungen zu unterscheiden. Letztere ist kein zwingendes Merkmal dezentraler Lagerverwaltungssysteme, jedoch können sich durch die Integration solcher Technologien in dezentrale LVS besondere Vorteile ergeben.

### 2.1 WISHIS – HOCHSCHULE COBURG UND SIEMENS CORPORATE TECHNOLOGY

Ein auf verteilten Sensorknoten basierendes dezentrales Lagerverwaltungssystem wurde von Wieland et al. im Projekt „WISHIS“ an der Fachhochschule Coburg im Auftrag der Siemens Corporate Technology entwickelt [Wie07]. Die Sensorknoten, die an den Regalen angebracht sind (Abbildung 1), kommunizieren in einem Wireless Sensor Network (WSN) miteinander. Das System kommt ohne zentrale Datenbank aus, da die Informationen verteilt auf den Recheneinheiten gespeichert sind.

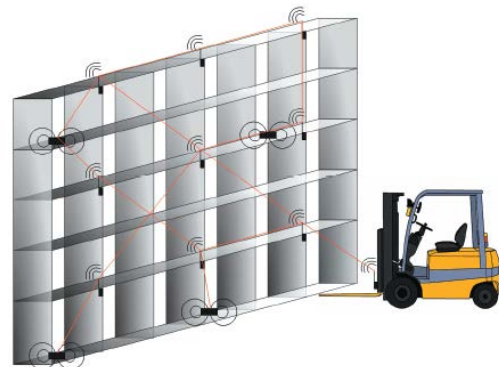


Abbildung 1. Dezentrales Lagerverwaltungssystem WISHIS [Wie07]

Die Artikel im Lager sind durchgängig mit RFID-Transpondern ausgestattet und können berührungslos identifiziert werden. Die Interaktion mit dem System erfolgt über einen mobilen, RFID fähigen Handheld-Computer, mit dem Ein- und Auslagerungen verbucht werden können. Die Recheneinheiten an der Lagerinfrastruktur selbst sind hingegen nicht mit RFID-Lesegeräten ausgestattet und somit auf die korrekte Verbuchung von Bestandsänderungen angewiesen.

### 2.2 DEZENTRALES LAGERVERWALTUNGSSYSTEM – ARKADIUS SCHIER

Ein weiteres dezentrales Lagerverwaltungssystem auf Basis drahtloser Sensornetze wurde von Arkadius Schier am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) konzipiert [Sch08]. In diesem System sind die Sensorknoten an den Ladehilfsmitteln (Europaletten) angebracht. Auf den Sensorknoten der Paletten ist der Status der Lagereinheit (z. B. eingelagert, transportiert, usw.) und eine Liste der Artikel, welche sich auf der Palette befinden, gespeichert.

RFID-Leser an den Transportmitteln (hier: Gabelstapler) und RFID-Transponder an jedem Lagerfach ermöglichen die automatische Erkennung des Lagerplatzes bei der Ein- und Auslagerung durch die Stapler. Die von Schier ebenfalls untersuchte Funkortung der Lagereinheiten mittels Triangulation durch Auswertung der Signalstärke erwies sich hingegen als zu störungsanfällig auf

Grund von Reflexionen und Signaldämpfung, die in einer industriellen Einsatzumgebung auftreten. Für die Funkortung wäre überdies eine erhebliche Anzahl zusätzlicher Ankerknoten an der Lagerinfrastruktur als Referenzpunkte mit bekannter Position erforderlich.

Auch das Konzept von Schier benötigt zur Datenhaltung keine zentrale Datenbank. Zur Suche nach einem bestimmten Artikel wird über eine Basisstation eine Anfrage an das Sensornetzwerk gesendet. Die Anfrage wird über Multi-Hop von einem Sensorknoten zum nächsten weitergeleitet. Diese überprüfen ihre jeweilige Artikelliste und geben die Antwort ebenfalls über Multi-Hop an den Basis-knoten zurück.

Das vorgestellte Konzept ist sehr starr auf die Einsatzbedingungen zugeschnitten und bietet kaum Flexibilität. So sind die Datenstrukturen (z. B. zur Beschreibung von Lagerorten und Artikelnummern) und der Telegrammaufbau fest encodiert und die Artikelliste auf acht unterschiedliche Artikel pro Lagereinheit beschränkt. Dies ist sicherlich auch der begrenzten Leistungsfähigkeit der verwendeten Sensorknoten mit einem 8-Bit Mikrocontroller geschuldet.

Die Informationen über den Aufbau des Lagers (Lagerstammdaten) werden weiterhin zentral in einem Verwaltungsprogramm gespeichert. Eine automatische Suche geeigneter freier Lagerplätze durch das dezentrale LVS ist nicht vorgesehen.

### **2.3 iBIN – WÜRTH INDUSTRIE SERVICE GMBH & CO. KG**

Die Firma Würth Industrie Service hat ein Einsteckmodul vorgestellt, welches an VDA-kompatiblen Behältern angebracht werden kann und diese zu einem „intelligenten Behälter“ („iBin“) aufrüstet [Wür13]. Durch eine im iBin-Modul befindliche Kamera werden die Artikel im Behälter gezählt und per RFID stückgenaue Bestandsinformationen an das Warenwirtschaftssystem übermittelt. Dadurch ist es möglich, Verbräuche zu analysieren und Bestellungen bedarfsgerecht auszulösen. Über die genaue technische Ausgestaltung, insbesondere über die Energieversorgung, die Kommunikationsabläufe und die Bildauswertung, konnten leider keine näheren Informationen gefunden werden.

### **2.4 iNBIN – FRAUNHOFER IML UND FLW TU DORTMUND**

Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) und der Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund haben einen intelligenten Behälter, den sogenannten „inBin“, entwickelt [IML13]. Der quaderförmige Behälter besitzt eine integrierte Recheneinheit und kann über verschiedene Funkprotokolle, wie z. B. 6LoWPAN oder ZigBee, kommunizieren. Sensoren ermöglichen die Erfassung von Messwerten (z. B. Tempe-

ratur). Ein Grafikdisplay dient zur Benutzerinteraktion. Die notwendige Energie wird vollständig per Energy-Harvesting durch Solarzellen aus der Umgebung bezogen. Über ein nicht näher beschriebenes Lokalisierungsverfahren soll auch eine Selbstortung möglich sein: „Invertierte Lichtschranken versetzen den Behälter in die Lage, seine Position genau zu lokalisieren“ [Web12]. Weitergehende Informationen zur tatsächlichen Genauigkeit sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht öffentlich verfügbar.

Durch die eingebaute Recheneinheit ist der inBin nicht auf ein zentrales Leitsystem angewiesen, sondern kann Entscheidungen selbstständig treffen und Logistik-Prozesse kontrollieren. Als mögliches Einsatzgebiet wird von den Entwicklern die Kommissionierung genannt. Eine detaillierte Prozessbeschreibung, die sinnvolle Einsatzmöglichkeiten der neuen Technik in einem logistischen Prozess aufzeigt, ist uns jedoch nicht bekannt. Der inBin weist aber in vielen Aspekten (Energieversorgung, Kommunikation usw.) wohl durchdachte und hoch entwickelte Lösungsansätze auf und zeigt, was technisch machbar ist.

### **2.5 SMART SHELF**

Verschiedene Firmen und Forschungseinrichtungen, wie z. B. Kathrein [Kat13], RFID-span Technology [RFI09] und andere haben „Smart Shelves“ entwickelt.

Das Smart Shelf dient primär dazu, das Kundenverhalten beim Einkauf im Laden zu analysieren [Dec03], indem es registriert, wenn ein Artikel entnommen oder zurückgelegt wird. Aus diesen Daten können Ladenbesitzer beispielsweise ermitteln, wie lange Kunden einen Artikel durchschnittlich betrachten und mit welchen anderen Artikeln sie sie vergleichen. Diese Informationen können zur Optimierung des Warenangebots und der Produktanordnung herangezogen werden. Des Weiteren können diese Informationen auch verwendet werden, um den Warenbestand in den Smart Shelves zu ermitteln oder um festzustellen, ob ein bestimmter Artikel im vorgesehen Regalfach liegt.

Durch die verteilte Sensorik (meist auf Basis der RFID-Technologie) ist das Smart Shelf in der Lage, die Artikel auf dem Fachboden zu identifizieren und ihre Position lagerplatzgenau zu bestimmen. Dazu müssen die im Smart Shelf gelagerten Artikel jeweils mit einem (passiven) RFID-Transponder bestückt sein. Das Regal ist mit mehreren aneinander gereihten Antennen ausgestattet, die einzeln nacheinander aktiviert werden. Somit kann das System feststellen, im Sendebereich welcher Antenne sich ein Transponder befindet und auf das Regalfach zurückschließen.

Ein abweichendes technisches Konzept verwendet hingegen storeskin [Sto12]. Eine spezielle Sensormatte auf dem Boden des Regalfachs erfasst dabei das Gewicht der enthaltenen Artikel und erlaubt so die Detektion ent-

nommener Güter sowie näherungsweise die Erfassung der vorhandenen Warenmenge.

## 2.6 IDENTPLUS – IDENTPRO GMBH

Die IdentPro GmbH bietet mit dem Produkt identplus eine Lösung zur automatischen Erfassung von Warenbe-

wegungen, die auf der Ortung der Transportmittel beruht [Kil13, Ide13]. Dabei werden dem System bereits bekannte Ladeeinheiten bei der Aufnahme durch einen Gabelstapler ausschließlich anhand der aktuellen Position identifiziert. Beim Abstellen einer Ladeeinheit wird im System deren neue Position vermerkt.

Tabelle 1 Bewertung der Dezentralität der betrachteten Systeme

	WISHIS	Arkadius Schier	iBin	inBin	Smart Shelf	identplus
<b>Dezentrale Bestandsverwaltung / Datenhaltung</b>	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
<b>Automatische Erfassung von Warenbewegungen</b>	Nein	Ja <sup>1</sup>	Teilweise <sup>2</sup>	Ja <sup>3</sup>	Ja	Ja

Tabelle 2 Gegenüberstellung der betrachteten Systeme

	WISHIS	Arkadius Schier	iBin	inBin	Smart Shelf	identplus
<b>Erfassung des Lagerorts einer LE</b>	Manuell (Handheld)	Transponder an jedem Lagerfach	Nein	Selbstlokalisierung der LE	RFID (Transponder an Ware)	Indirekt (Ortung der Transportmittel)
<b>Automatische Erfassung der Artikel in einer LE (Inhalt)</b>	Nein	Nein	Menge (optisch)	Nein		Nein
<b>Verteilte Recheneinheiten</b>	An Lagerinfrastruktur	Am LHM (Palette)	Am LHM (Behälter)	Am LHM (Behälter)	Nein	Zentral und am Transportmittel
<b>Bestandsverwaltung</b>	Dezentral an Lagerinfrastruktur	Dezentral an LE	Zentral (WWS)	Dezentral an LE	Zentral	Zentral
<b>Kommunikation</b>	WSN	WSN	RFID	WSN	Unbekannt	WLAN
<b>Energieversorgung</b>	Batterie	Batterie	Unbekannt	Energy Harvesting (Solar)	Stromnetz	Bordnetz der Transportmittel

<sup>1</sup> Im Konzept vorgesehen, aber in Ermangelung eines RFID-Readers nicht realisiert

<sup>2</sup> Erfassung der Artikelstückzahl im Behälter, nicht aber des Behälterstandorts

<sup>3</sup> Behälterlokalisierung durch ein unbekanntes, infrarot-optisches Verfahren

Die Bestandsdaten, d. h. die Positionen der Ladeeinheiten, werden weiterhin in einer zentralen Datenbank verwaltet. Die Kommunikation mit dem zentralen System erfolgt über ein drahtloses Netzwerk. Die Transportmittel sind mit Sensorik zur Lokalisierung sowie ggf. zur Erfassung der Gabelhubhöhe und des Beladungszustands ausgestattet.

## 2.7 ZUSAMMENFASSUNG

Ein zentrales Thema und wesentliche Gemeinsamkeit aller vorgestellten Entwicklungen ist die Verwendung verteilter Technologien zu Zwecken der Lagerverwaltung. Ein Unterscheidungsmerkmal besteht darin, dass nur bei einem Teil der betrachteten Systeme tatsächlich auch verteilte, frei programmierbare Recheneinheiten vorgesehen sind, die dezentral Aufgaben der Bestandsverwaltung und Datenhaltung übernehmen. Ein anderes oftmals vorhandenes Merkmal ist die Fähigkeit zur automatischen Datenerfassung. Dabei lassen sich Warenbewegungen ohne menschliche Eingaben oder Bestätigungen erkennen und selbsttätig im Bestandsdatenabbild nachführen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 2 zeigt eine detailliertere Auflistung der wesentlichen Merkmale der vorgestellten Lösungen.

Für verschiedene Aspekte der Lagerverwaltung sind unterschiedliche Konzepte zur dezentralen Gestaltung möglich und in Teilen bereits in den zuvor beschriebenen Arbeiten demonstriert worden. Eine systematische Untersuchung der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen und Kombinationsmöglichkeiten fehlt jedoch bisher. Diese Arbeit unternimmt daher den Versuch, diese Forschungslücke zu schließen und einen theoretischen Unterbau für die dezentrale Gestaltung von Lagerverwaltungssystemen zu entwickeln.

## 3 ANFORDERUNGEN AN EIN LAGERVERWALTUNGSSYSTEM

Die ordnungsgemäße Verwaltung von Sachbeständen ist für produzierende Betriebe, Handelsunternehmen und Logistikdienstleister eine absolute Notwendigkeit. Die sichere und effiziente Beherrschung der damit verbundenen Logistik- und Datenverarbeitungsprozesse stellt im heutigen hochdynamischen wirtschaftlichen Umfeld einen erheblichen Wettbewerbsvorteil dar: schlanke Bestände bei zugleich hoher Lieferfähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit können Unternehmen nur erreichen, wenn jederzeit ein zuverlässiger und aktueller Überblick über die vorhandenen Güter besteht.

### 3.1 DEFINITION

Ein Lagerverwaltungssystem (LVS) führt ein digitales Abbild des physischen Lagerbestands. Dazu speichert

es Informationen über eingelagerte Mengen und die zugehörigen Lagerplätze. Lagerinhalte, die gemeinsam verwaltet werden, werden organisatorisch als Lagereinheit (LE) behandelt. Zusätzlich ist das LVS für die Steuerung bestimmter Abläufe im Lager zuständig: Es koordiniert Ein- und Auslagervorgänge, Inventuren usw. entsprechend der zu Grunde liegenden Lagerbetriebsstrategie.

## 3.2 FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN

### 3.2.1 LAGEREINHEITEN VERWALTEN

Eine Lagereinheit (LE) stellt ein logistisches Objekt dar, welches im LVS als logische Einheit abgebildet und geführt wird. Es kann sich dabei um ein einzelnes Stückgut handeln oder um mehrere Teile, die dann meist in bzw. auf einem gemeinsamen Ladehilfsmittel (LHM: Palette, Karton, Kleinladungsträger usw.) zusammengefasst sind.

Je nach Wahl der Systemgrenze kann das LVS auch für die Verwaltung der Inhalte einer Lagereinheit zuständig sein. In diesem Fall werden zu jeder Lagereinheit auch Informationen über die enthaltenen Artikel (identifiziert durch EAN, GTIN oder eine interne Sachnummer) und deren Anzahl (Stückgut) bzw. Menge (Massengut) geführt. Gegebenenfalls müssen für bestimmte Arten von Artikeln zusätzliche Daten (Seriennummer, Chargennummer, Mindesthaltbarkeitsdatum MHD) hinterlegt werden.

Durch Entnahmen (bspw. Kommissionierung) und Zulagerungen kann die Zusammensetzung einer Lagereinheit verändert werden.

### 3.2.2 PROZESSABLÄUFE STEuern

Ein Prozess beschreibt eine geordnete Abfolge von Tätigkeiten mit dem Ziel, ausgehend von einem Ausgangszustand einen angestrebten Zielzustand zu erreichen. Aufgabe der Prozesssteuerung ist es, die Abfolge und die Ausführung dieser Tätigkeiten durch den Einsatz der verfügbaren Ressourcen zu koordinieren. Dadurch ist die Prozesssteuerung maßgeblich für eine effiziente Ressourcennutzung im Unternehmen verantwortlich (vgl. [Gud99], S. 45).

In einem Lagerverwaltungssystem können beispielsweise der Wareneingang, Ein- und Auslagerungen oder auch Inventuren als Prozesse aufgefasst werden. Ein Prozess wird meist durch einen Auftrag (Einlagerauftrag, Kommissionierauftrag, Bestellung, usw.) angestoßen. Als Ressourcen stehen beispielsweise Mitarbeiter, Transportmittel, aber auch Labeldrucker oder Barcodescanner zur Verfügung.

Die Koordination der verschiedenen Ressourcen im Sinne des Prozessablaufs erfolgt über Schnittstellen. Diese können als Bildschirmdialoge auf (stationären oder mobi-

len) Geräten zur Kommunikation mit Mitarbeitern realisiert sein, oder als Datenschnittstellen zu angrenzenden Systemen (Transport- oder Staplerleitsysteme, Materialflussrechner in automatisierten Systemen). Dabei können zur Bearbeitung eines Prozessschrittes auch logische „Unteraufträge“ erzeugt werden, z. B. ein Auslagerauftrag zur Erfüllung einer Bestellung und ein Transportauftrag zur Realisierung der Auslagerung.

Zur Vermeidung von Fehlern werden oft strikte Kontrollmechanismen implementiert. Das LVS gibt dabei den nächsten Prozessschritt oder die nächste Auftragsposition nur bei einer erfolgreichen Bestätigung oder validen Rückmeldung des vorhergehenden Schrittes frei. So kann z. B. einem Staplerfahrer der Zielort eines Transportauftrags erst dann angezeigt werden, wenn er die richtige Ladeinheit aufgenommen und dies durch einen Barcode-Scan bestätigt hat.

Entscheidungen im Prozessablauf werden durch vorgegebene Lagerbetriebsstrategien beeinflusst, z. B. bei der Auswahl eines geeigneten Lagerplatzes oder bei der Festlegung von Bearbeitungsreihenfolgen. Strategien bei der Ein- und Auslagerung können z. B. First-In-First-Out (FIFO), Last-In-First-Out (LIFO), oder First-Expired-First-Out (FEFO) sein (vgl. [Gud99], S. 45).

### **3.2.3 ÄNDERUNGEN DES LAGERZUSTANDS VERBUCHEN**

Wird eine Lagereinheit auf einem Lagerplatz physisch eingelagert, so muss diese Änderung im logischen Abbild des Lagers nachvollzogen werden. Diese Änderung der Bestandsdaten erfolgt durch eine Lagerbuchung. Auf diese Art können beispielsweise Ein-, Aus- und Umlagerungsvorgänge realisiert werden. Einige Lagerverwaltungssysteme folgen dabei dem aus der Buchhaltung bekannten Grundsatz „Keine Buchung ohne Beleg“ und verlangen zur Verbuchung einer Lagerbewegung das Vorhandensein eines entsprechenden Ein- oder Auslagerungsauftrages.

Die Abbildung des Lagerorts im Datenbestand ist abhängig vom Typ des Lagers bzw. des Lagerbereichs. Bei Regalen mit festen Lagerplätzen kann der Lagerort durch eine eindeutige Bezeichnung des Regals und eine Zeilen- und Spaltenangabe beschrieben werden. In einem Flächenlager oder einer Paternosterregalanlage müssen dementsprechend andere geeignete Systematiken zum Einsatz kommen. Die Lagerortsinformationen müssen geeignet sein, den Mitarbeitern und ggf. automatisierten Lagereinrichtungen das Auffinden der Waren ohne aufwendige Suche zu ermöglichen.

### **3.2.4 SUCHANFRAGEN BEANTWORTEN**

Um Waren im Lager wiederzufinden oder auch für statistische Auswertungen muss ein LVS die Suche im Datenbestand unterstützen. Dabei kann im einfachsten

Fall der Lagerplatz einer bestimmten Lagereinheit abgefragt werden. Komplexere Suchanfragen können auch alle Lagerplätze, die einen bestimmten Artikel enthalten, liefern. Je nach Einsatzfall können unterschiedlichste Suchkriterien relevant sein.

Ein LVS muss geeignete freie Lagerplätze für eine gegebene LE finden können. Dabei kann es erforderlich sein, Nebenbedingungen zu beachten. Beispielsweise können für die einzulagernden Güter besondere Anforderungen bezüglich Temperatur (z. B. Lebensmittel, Tiefkühlware), Verträglichkeit (Chemikalien) oder Stapelbarkeit gelten. Für die Lagerplätze können weiterhin Einschränkungen bezüglich Gewicht, Abmessungen und Ladehilfsmittel der Lagereinheit bestehen.

Die letztendliche Auswahl eines Lagerplatzes erfolgt dann wiederum durch die Prozesssteuerung entsprechend einer vorgegebenen Einlagerstrategie, wobei auch die Stammdaten der betroffenen Artikel (Umschlagshäufigkeit, Lagerbereichszuordnung, fest zugeordneter Lagerplatz), aktuelle Auftragsdaten (Bestellungen, Materialabrufe) oder die resultierenden Transportdistanzen Berücksichtigung finden können.

### **3.2.5 RECHTEVERWALTUNG**

Bestimmten Einsatzfälle können es erfordern, für die verschiedenen Anwender unterschiedliche Berechtigungen vorzusehen. So kann beispielsweise die Ausführung bestimmter Prozesse bzw. Buchungen, die Verwaltung einzelner Lagerbereiche oder die Änderung grundlegender Daten an entsprechende Berechtigungen des Anwenders geknüpft sein.

## **3.3 NICHTFUNKTIONALE ANFORDERUNGEN**

### **3.3.1 KONSISTENZ**

Auf Grundlage des Datenbestands im LVS werden Geschäftsprozesse gesteuert und geschäftswichtige Entscheidungen getroffen. Somit es wichtig, dass das Lagerabbild im LVS mit der tatsächlichen Situation möglichst genau übereinstimmt und in sich konsistent ist. Fehlerhafte Informationen können zu nicht auffindbaren Lagereinheiten bzw. erheblichen Suchzeiten, falschen Lieferaussagen gegenüber Kunden, falschen Bestellmengen und ähnlichen Problemen führen. Deshalb muss bei den Datenverarbeitungsvorgängen innerhalb des LVS sichergestellt sein, dass keine inkonsistenten Daten erzeugt werden.

Da in einem Unternehmen mehrere Prozesse gleichzeitig ablaufen, muss ein LVS dies unterstützen und parallele Anfragen und Zugriffe durch verschiedene Prozesse oder Personen zulassen. Um die Konsistenz des Datenbestands zu erhalten, sind dabei besondere Vorkehrungen erforderlich (vgl. Transaktionskonzept der Informatik, ACID-Prinzipien [Gra06]; S. 144-154).

Andererseits können auch Bedienfehler (falsche Verbuchung von Warenbewegungen, Zählfehler usw.) zu Inkonsistenzen im Datenbestand führen. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Bedienfehler kann durch die geeignete Gestaltung der Prozessabläufe und Benutzerschnittstellen zur Unterstützung des Mitarbeiters (Pick-by-Light, Pick-by-Voice usw.) sowie durch die Verwendung von automatisierter Datenerfassung reduziert werden. Auch eine durchgängige und einprägsame Logik in der Benennung der Lagerorte kann dabei helfen, Verwechslungen und menschliche Fehler zu vermeiden.

### 3.3.2 VERFÜGBARKEIT

Unternehmen können den normalen Geschäftsbetrieb oftmals nicht aufrecht erhalten oder nur sehr eingeschränkt fortführen, wenn Bestandsinformationen temporär oder permanent nicht verfügbar sind. Das LVS muss deshalb eine hohe Datenverfügbarkeit gewährleisten.

Temporäre Ausfälle können auftreten, wenn durch Hardwaredefekte, Softwarefehler oder Kommunikationsstörungen auf den kompletten Datenbestand oder Teile des Datenbestands zeitweise nicht zugegriffen werden kann. Die Daten sind dabei allerdings weiterhin vorhanden oder können aus Sicherungskopien wiederhergestellt werden.

Von einem permanenten Datenverlust spricht man hingegen, wenn der Datenbestand durch einen Defekt oder Softwarefehler zerstört wird und nicht wiederhergestellt werden kann, weil keine oder nur veraltete Sicherungskopien vorhanden sind. In einem solchen Fall kann der Datenbestand nur mit hohem zeitlichen und personellen Aufwand durch eine Inventur rekonstruiert werden.

### 3.3.3 TRANSPARENZ

Im Folgenden wird Transparenz als die Durchschaubarkeit und Nachvollziehbarkeit der Bestände, Arbeitsabläufe und Prozesse im Lager verstanden. Die Nachvollziehbarkeit von Unternehmensprozessen wird oftmals durch gesetzliche Regelungen gefordert, beispielsweise im Rahmen der Buchführung, der Chargenverfolgung in der Lebensmittelproduktion oder beim Umgang mit Gefahrgut. Unabhängig von bestehenden gesetzlichen Verpflichtungen bietet eine hohe Transparenz auch Vorteile bei der Verfolgung von Prozessabläufen und erleichtert die Klärung von Störungen und Fehlern.

Eine mögliche Maßnahme zur Steigerung der Transparenz ist es, jeden Prozessschritt zu protokollieren. So kann beispielsweise nachvollzogen werden, welche Auslager- oder Kommissionieraufträge zur Erfüllung einer bestimmten Kundenbestellung generiert wurden, und welchen Status diese jeweils aufweisen. Auch über alle Bestandsänderungen sollte Buch geführt werden, um sämtliche Zu- und Abgänge mit entsprechenden Geschäftsvorgängen verknüpfen zu können.

### 3.3.4 ANTWORTZEIT

Die benötigten Daten müssen im normalen Geschäftsbetrieb jederzeit zügig zur Verfügung stehen, um regelmäßig ablaufende Geschäftsprozesse nicht durch die Wartezeit auf das Ergebnis einer Anfrage unnötig zu behindern. Für selten benötigte, komplexere Suchanfragen (z. B. Erstellung von Reports) kann hingegen eine längere, angemessene Wartezeit geduldet werden.

## 4 DAS LVS IM LOGISTIKPROZESS

### 4.1 DATENBESTAND IM LVS

Die Daten, die ein Lagerverwaltungssystem zur Erfüllung seiner Aufgaben benötigt, können unterteilt werden in Stammdaten, Bestandsdaten und Bewegungsdaten. Zur Protokollierung können zusätzlich Historiendaten dienen.

#### 4.1.1 STAMMDATEN

Stammdaten sind nach Hansen und Neumann „zustandsorientierte Daten, die der Identifizierung, Klassifizierung und Charakterisierung von Sachverhalten dienen und die unverändert über einen längeren Zeitraum hinweg zur Verfügung stehen“ [Han09, S.9]. Sie werden oft bereichsübergreifend in verschiedenen Prozessen eines Unternehmens verwendet. Die gemeinsame zentrale Verwaltung dieser Datensätze entbindet die einzelnen Abteilungen von der Pflicht, die Daten eigenständig zu pflegen und aktuell zu halten. Durch den Verzicht auf redundante Datenhaltung erleichtert die Stammdatenverwaltung die Sicherstellung unternehmensweiter Konsistenz.

Für die Lagerverwaltung sind in besonderem Maße die **Materialstammdaten** von Bedeutung. Diese beschreiben das Sortiment der im Unternehmen verwendeten Artikel bzw. Materialien. Eine Materialsorte wird über eine eindeutige, oft unternehmensinterne Sach- oder Materialnummer identifiziert. Für das LVS relevante Materialstammdaten können beispielsweise umfassen: Abmessungen und Gewicht, besondere Lageranforderungen (Tiefkühlware, Gefahrgut), zugewiesene Lagerplätze, Meldebestand usw. Daneben kann durch spezielle Kennzeichen vermerkt werden, wenn ein Gut der Chargenverfolgung unterliegt, oder die einzelnen Bestände durch die Angabe von Seriennummern oder Haltbarkeitsdaten zusätzlich unterschieden werden müssen. Auch semantische Informationen, wie Größe oder Farbvariante eines Kleidungsstücks oder Gewindedurchmesser einer Schraubenart können in den Materialstammdaten vermerkt sein. Für andere Unternehmensbereiche können zu einer Sachnummer weitere benötigte Informationen hinterlegt werden, beispielsweise Lieferanten, Preise oder Wiederbeschaffungszeiten.

Das logische Abbild der in einem Betrieb vorhandenen Lager- bzw. Stellplätze kann ebenfalls als eine Form von Stammdaten aufgefasst werden. Diese Datenart wird im Folgenden als **Lagerstammdaten** bezeichnet. Sie umfassen Informationen über die verschiedenen Lagerbereiche, Lagertypen (Hochregal, Bodenblock, usw.) sowie die Anzahl und Anordnung der Stellplätze. Zusätzlich können weitere Eigenschaften (maximale Traglast, Abmessungen, aber auch Kennzeichen für Kühl-, Tiefkühl- oder Gefahrgutlager usw.) hinterlegt werden.

Die Mitarbeiter- oder Personalstammdaten beinhalten Daten zu den Beschäftigten des Unternehmens. Diese können auch **Berechtigungen** oder Rollen im Kontext des Lagerverwaltungssystems umfassen (vgl. Kapitel 3.2.5).

#### 4.1.2 BESTANDSDATEN

Bestandsdaten sind nach Hansen und Neumann „zustandsorientierte Daten, welche die betriebliche Mengen- und Wertestruktur kennzeichnen. Sie unterliegen durch das Betriebsgeschehen einer systematischen Änderung, welche durch die Verarbeitung von Bewegungsdaten bewirkt wird.“ [Han09, S.9]

Die Informationen über Sachbestände, die von einem LVS verwaltet werden, werden im Folgenden als **Inventardaten** bezeichnet. Diese umfassen die Anzahl und Art der im Verwaltungsbereich des LVS vorhandenen Güter. Die Art der Güter wird meist über die Sachnummer als Referenz auf den entsprechenden Stammdatensatz abgebildet. Die Mengenangabe kann je nach Materialart als Stückzahl, Gewichts- oder Volumenangabe realisiert sein. Für bestimmte Güter kann zusätzlich zur Sachnummer zur eindeutigen Unterscheidung eine Seriennummer, zur Chargenverfolgung eine Chargennummer oder ein Mindesthaltbarkeitsdatum spezifisch hinterlegt werden.

Zusätzlich zu den vorhandenen Gütern und ihren Mengen müssen auch Informationen über den jeweiligen Lagerort verwaltet werden, also eine Positionsangabe für jede Lagereinheit, die den Lagermitarbeitern und ggf. den automatisierten Lagereinrichtungen das Wiederauffinden der Güter ermöglicht. Im Folgenden werden diese Daten als **Lagerortsinformationen** bezeichnet. Das Format dieser Daten ist, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, abhängig von der Art des Lagerbereichs. Auch die Granularität der Positionsangaben kann – abhängig von den betrieblichen Anforderungen – unterschiedlich sein. So kann in manchen Einsatzfällen bereits eine grobe Bereichsangabe zur Unterstützung der Betriebsabläufe ausreichen, während im Großteil der Fälle sicherlich die genaue Angabe des Lagerplatzes erforderlich ist.

#### 4.1.3 BEWEGUNGSDATEN

Bewegungsdaten sind nach Hansen und Neumann „abwicklungsorientierte Daten, die immer wieder neu durch die betrieblichen Leistungsprozesse entstehen und

[...] eine Veränderung von Bestandsdaten“ [Han09, S.9].

Im Kontext der Lagerverwaltung fallen hierunter vor allem **Auftragsdaten**, die zur Abwicklung der Geschäftsprozesse dienen. Dabei können externe und interne Auftragsdaten unterschieden werden.

**Externe Auftragsdaten** im Sinne der Lagerverwaltung sind Aufträge, die außerhalb des eigentlichen Lagerbetriebs, also in anderen Abteilungen des Unternehmens oder durch Geschäftsbeziehungen mit Kunden oder Lieferanten, entstehen und Prozessabläufe im Lager anstoßen. Beispiele hierfür sind Kundenbestellungen, Daten über erwartete Lieferungen (Lieferavise) oder Nachschubaufträge für die Produktion. Externe Aufträge stoßen Prozesse im Lager an, die durch das Lagerverwaltungssystem koordiniert werden (Kapitel 3.2.2).

Als **interne Auftragsdaten** werden solche Aufträge bezeichnet, die im Zuge der lagerinternen Prozessabläufe generiert werden, beispielsweise Kommissionier-, Ein- oder Auslageraufträge usw. Diese dienen der Koordination der tatsächlichen Arbeitsabläufe im Lager.

#### 4.1.4 HISTORIENDATEN

In den Historien- oder Archivdaten können alle Datenbestände gesammelt werden, die für das operative Geschäft nicht mehr benötigt werden, die jedoch zu Dokumentationszwecken oder für Analysen weiterhin zur Verfügung stehen sollen. Beispiele hierfür sind abgeschlossene Aufträge oder auch Bestandsverläufe. Kennzeichnend ist, dass archivierte Daten nicht mehr verändert werden können.

#### 4.2 PROZESSABLÄUFE

Die Daten des Lagerverwaltungssystems dienen als Eingangsgrößen zur Steuerung logistischer Prozesse. Durch den Prozessablauf werden neue Daten generiert bzw. Änderungen an bestehenden Daten bewirkt. Im Folgenden wird beispielhaft ein möglicher Prozessablauf vom **Wareneingang** bis zum Versand gezeigt und Datenzugriffe, die in Bezug auf das LVS relevant sind, dargestellt. Der Buchstabe „L“ in Tabelle 3 steht für einen Leszugriff, mit „S“ wird ein schreibender Zugriff, also eine Veränderung eines bestehenden oder die Erzeugung eines neuen Datensatzes bezeichnet. Berechtigungsdaten werden zu Beginn jedes Teilprozesses geprüft, und Log- bzw. Historiendaten können in jedem Prozessschritt generiert werden. Diese Datenarten werden im folgenden nicht explizit dargestellt.

Sobald eine Lieferung am Wareneingang ankommt, wird diese anhand der Liefernummer auf dem Lieferschein identifiziert und geprüft. Zur Prüfung müssen Informationen über die erwarteten Lieferungen abgefragt werden, die beispielsweise die Einkaufsabteilung des Un-



ternehmens zur Verfügung stellt. Diese Daten stellen im Kontext des LVS somit externe Auftragsdaten dar. Bei erfolgter Annahme der Lieferung kann ein Wareneingangsvermerk erstellt werden, der als Bestätigung für den Einkauf dient. Da dieser Vorgang die eigentliche Aufgabe der Lagerverwaltung nicht direkt betrifft, wird im Weiteren auf die Darstellung von Rückbestätigungen an benachbarte Systeme verzichtet.

Nach der Warenannahme wird die Ware ggf. aus- und in geeignete Ladehilfsmittel umgepackt und es folgt die **Vereinnahmung**. Dabei wird die Ware zu Lagereinheiten (LE) zusammengefasst und logisch im System verbucht. Jede erzeugte Lagereinheit wird mit einem Label

gekennzeichnet, das neben Text in Klarschrift auch maschinenlesbare Identifikationsmerkmale (Barcode o.ä.) enthält. Zur Unterstützung dieses Vorgangs können Informationen aus den Materialstammdaten abgefragt werden, die beispielsweise Packhinweise oder andere für diesen Arbeitsschritt benötigte Angaben enthalten. Je nach Gestaltung des Prozesses können an dieser Stelle auch Auftragsdaten abgefragt werden, um zu entscheiden, was mit der angelieferten Ware geschehen soll. Auf diese Weise können Materialien, die sofort zur Produktionsversorgung benötigt werden, ohne vorherige Einlagerung direkt zum Ziel geschickt werden. Im Folgenden gehen wir davon aus, dass die erzeugte LE eingelagert werden soll. Zunächst wird ein geeigneter, freier **Lagerplatz gesucht**.

Tabelle 3 Datenzugriffe bei einem Musterprozess (L: lesend, S: schreibend)

	Auftragsdaten				Stammdaten		Bestandsdaten		Messwerte
	externe		interne		Materialstammdaten	Lagerstammdaten	Inventardaten	Lagerortsinformationen	
	Lieferankündigung	Versandauftrag	Einlagerauftrag	Auslagerauftrag					
<b>Wareneingang</b>									
— Warenannahme									
— Lieferung identifizieren und prüfen	L								
<b>Vereinnahmung</b>									
— LE erzeugen / Zugang verbuchen					L		S		
<b>Lagerplatz suchen</b>									
— Geeignete freie Lagerplätze suchen					L	L		L	
— Lagerplatz auswählen und reservieren								S	
<b>Einlagern</b>									
— Einlagerauftrag erstellen			S						
— Einlagerung verbuchen			L					S	
<b>Lagern</b>									
— Lagerbedingungen überwachen					L	L	L	L	L
— Bestandsmengen überwachen					L		L		
<b>Warenausgang</b>									
<b>Waren suchen</b>									
— Geeignete Lagereinheiten suchen		L					L	L	
— LE auswählen und reservieren							S		
<b>Auslagern</b>									
— Auslagerauftrag erstellen			S						
— Auslagerung verbuchen			L					S	
<b>Versand</b>									
— Warenausgang verbuchen							S		

Zur Berücksichtigung besonderer Lageranforderungen (Kühlware, Gefahrgut, usw.) oder fest zugewiesener Lagerbereiche werden Informationen über die in der LE befindlichen Güter benötigt, die in den Materialstammdaten enthalten sind. Um zu entscheiden, ob ein Lagerplatz geeignet ist, sind die Eigenschaften des Lagerplatzes (Tragfähigkeit, Abmessungen, usw.) aus den Lagerstammdaten zu prüfen und mit den Anforderungen der LE zu vergleichen. Aus den Lagerortsinformationen kann abgeleitet werden, welche der in Frage kommenden Lagerplätze noch frei bzw. belegt sind.

Aus den geeigneten freien Lagerplätzen wird dann entsprechend der Lagerbetriebsstrategie einer ausgewählt und reserviert, um zu verhindern, dass der Lagerplatz anderweitig vergeben wird. Dabei erfolgt ein schreibender Zugriff auf die Lagerortsinformationen.

Anschließend wird zur Realisierung der **Einlagerung** ein Transportauftrag erstellt. Die einzelnen Arbeitsschritte des Transportvorgangs werden durch die Identifikation der Ladeinheit und des Lagerfachs kontrolliert. Nach Abschluss der Einlagerung wird die LE durch die Aktualisierung der Lagerortsinformationen auf den neuen Lagerort gebucht.

Während der Lagerzeit können die **Lagerbedingungen überwacht** werden. Sensoren erfassen dabei die Umgebungsbedingungen im Lager (bspw. Temperatur in einem Tiefkühlager) und überprüfen die Einhaltung von vorgegebenen Grenzwerten. Üblicherweise werden die Umgebungsbedingungen in einem Lagerbereich unabhängig von den tatsächlich eingelagerten Gütern eingestellt und nicht dynamisch an den Lagerinhalt angepasst.

Daneben findet oft eine **Überwachung der Bestandsmengen** statt. Wird durch Auslagerungen ein bestimmter Meldebestand einer Sachnummer unterschritten, wird der Einkauf benachrichtigt, so dass rechtzeitig eine Nachbestellung erfolgen kann. Für diese Überwachung ist lesender Zugriff auf die Inventardaten und auf die Materialstammdaten, wo die Meldebestände hinterlegt sind, erforderlich.

Der Warenausgangsprozess wird durch einen externen Auftrag, z. B. einen Versandauftrag oder Nachschubauftrag, angestoßen. Zunächst müssen die geforderten Waren im Lager **gesucht** werden (lesender Zugriff auf Inventardaten). Ist der gesuchte Artikel mehrfach im Lager vorhanden, muss entsprechend der Lagerbetriebsstrategie eine Auswahl getroffen werden. Dabei kann neben artikelbezogenen Regeln (First-In-First-Out, First-Expired-First-Out) auch beispielsweise der Transportaufwand (Nähe zu einem freien Transportmittel o.ä.) berücksichtigt werden. Die gewählte LE wird reserviert und ein Auslagerauftrag generiert.

Nach erfolgter **Auslagerung** wird die Lagerbewegung durch die Aktualisierung der Lagerortsinformationen verbucht. Bei Übergabe an den **Versand** werden die Waren bestandsmäßig aus dem Lager ausgebucht und die entsprechenden Inventardaten gelöscht.

## 5 DEZENTRALE KONZEPTE FÜR DIE LAGERVERWALTUNG

Nachdem in Kapitel 3 die Anforderungen an ein LVS dargestellt und in Kapitel 4 die Interaktion mit dem physischen Lagerprozess gezeigt wurden, sollen nun verschiedene dezentrale Ausgestaltungsmöglichkeiten für einzelne Teilaspekte eines Lagerverwaltungssystems untersucht werden. Diese Untersuchung gliedert sich in Konzepte für verteilte Recheneinheiten, verteilte Datenhaltung und verteilte Sensorik zur automatischen Erfassung von Lagerbewegungen.

### 5.1 VERTEILTE RECHENEINHEITEN

Recheneinheiten können vorgegebene Programme abarbeiten und dadurch aktiv Prozesse steuern und Entscheidungen treffen. Ein klassisches Lagerverwaltungssystem läuft typisch auf einem leistungsfähigen Server. Für verteilte Anwendungen eignen sich diese jedoch aufgrund der Abmessungen, des Energiebedarfs und der Kosten nicht. In diesem Kapitel werden deshalb verschiedene Klassen kleiner Rechensysteme und ihre Anwendungsmöglichkeiten in einem dezentralen LVS untersucht.

Tabelle 4 zeigt typische Leistungsdaten der untersuchten Rechnerklassen. Die Angaben sind als grobe Anhaltswerte zu verstehen, denn auch innerhalb der einzelnen Klassen besteht eine große Bandbreite an Angeboten.

Durch das gespeicherte Programm kann eine Recheneinheit Prozesse autonom steuern. Dazu koordiniert die Recheneinheit direkt über Aktoren oder indirekt über Kommunikationsmittel bzw. Benutzerschnittstellen die Mitarbeiter und Ressourcen. Über Sensoren erfasste Messwerte und Benutzerinteraktionen können im Programm der Recheneinheit berücksichtigt werden und so den Prozessablauf beeinflussen. Alle genannten Rechnerklassen sind frei programmierbar. Während Server, Tablet-PCs und Single Board Computer über umfangreiche Betriebssysteme verfügen, die die Programmierung durch die vorgefertigte Unterstützung (API) für zahlreiche, häufig benötigte Vorgänge erleichtern, besitzen Sensorknoten höchstens sehr eingeschränkte Betriebssysteme. Die leistungsschwache Hardware von Sensorknoten, die meist auf einem Mikrocontroller basiert, ist nicht für umfangreiche Berechnungen ausgelegt, sondern speziell für den Aufbau vermaschter Kommunikationsnetze (Wireless Sensor Network, WSN) bei geringem Energiebedarf entwickelt.

Tabelle 4 Typische Leistungsdaten der untersuchten Rechnerklassen

	Rechnerklassen			
	Server	Tablet-PC	SBC	Sensorknoten
<b>Prozessor</b>	4x 2GHz	2x 2GHz	1x 1GHz	1x 10MHz
<b>Arbeitsspeicher</b>	16 GB	2 GB	1 GB	1 KB
<b>Speicher</b>	> 1 TB	64 GB	32 GB	1 KB
<b>Benutzerschnittstelle</b>	Terminal	Touchscreen	-	-
<b>Kommunikation</b>	LAN	WLAN, Mobilfunk	(W)LAN	WSN
<b>Preis</b>	5.000 €	€500	€100	€10

Tabelle 5 Mögliche Anbringungsorte für verteilte Recheneinheiten

	Rechnerklassen			
	Server	Tablet-PC	SBC	Sensorknoten
<b>zentral</b>	X			
<b>am Lagerbereich</b>	X	X	X	X
<b>am Lagerplatz</b>		X	X	X
<b>am Ladehilfsmittel (Palette, Behälter, Gitterbox)</b>			X	X
<b>an der Ware</b>				X
<b>am Transportfahrzeug</b>		X	X	X

Während bei Servern als permanenter Datenspeicher vornehmlich Festplatten eingesetzt werden, verwenden Tablet-PCs und Single Board Computer mikroelektronische Flash-Speicherbausteine. Zusätzlich ist oft eine Erweiterungsmöglichkeit durch den Einschub von Speicherkarten vorgesehen. Bei Sensorknoten beschränkt sich der im Auslieferungszustand verfügbare permanente Speicher meist auf den EEPROM-Bereich des Mikrocontrollers. Die Anbindung von zusätzlichen Speicherbausteinen oder Speicherkarten ist möglich, jedoch mit einigem Aufwand durch Hardware- und Softwareentwicklung verbunden.

Zur Benutzerinteraktion kann eine Benutzerschnittstelle vorgesehen werden. So kann ein Mitarbeiter direkt vor Ort Daten einsehen oder verändern und somit im Prozessablauf unterstützt werden (bspw. Licht- oder Tonsig-

nal zur besseren Auffindbarkeit der gesuchten Lagereinheit). Tablet-PCs verfügen bereits über ein Grafikdisplay und Eingabemöglichkeiten, und auch für Single-Board-Computer sind Displays, Touchscreens oder herkömmliche Eingabegeräte wie Tastatur und Maus erhältlich. Bei Sensorknoten hingegen ist aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit meist nur die Anbindung von Leuchtanzeigen, einfachen LCD-Textdisplays und Tastern möglich.

Über spezielle Schnittstellen können Sensoren angebunden und lokale Umgebungsbedingungen erfasst werden. Solche Messwerte können in einem Lager für verschiedene Güter relevant sein (Temperatur, Lichteinfall, Vibration, Feuchtigkeit bei empfindlichen Gütern, Diebstahlschutz) und auch für die Lagerinfrastruktur Vorteile bieten (Brandmelder, Anfahr- / Kollisionserkennung,

Überladungskennung, Stabilitätsüberwachung). Für Sensorknoten und Single-Board-Computer sind zahlreiche Sensoren erhältlich, wohingegen für die Anbindung an ein Tablet in der Regel Speziallösungen erforderlich sind. In den bekannten Tablet-PCs ist jedoch standardmäßig eine Kamera verbaut, die zur Erfassung von Barcodes verwendet werden kann.

Als besonders kritisch ist bei verteilten Systemen die Energieversorgung anzusehen. Diese kann entweder durch Verkabelung, durch Energiespeicher (z. B. Batterie) oder durch „Energy Harvesting“ aus der Umgebung (z. B. Solarzelle) erfolgen. Die Verkabelung erfordert je nach Anzahl der Recheneinheiten einen hohen Installationsaufwand. Energiespeicher haben eine begrenzte Kapazität und müssen regelmäßig ausgetauscht werden, was zu einem hohen Wartungsaufwand führt. Energy Harvesting bietet bei verteilten Systemen den Vorteil eines geringen Wartungsaufwands, jedoch ist die verfügbare Leistung vergleichsweise gering. Als Voraussetzung für den Einsatz von Energy Harvesting muss regelmäßig eine ausreichende Menge verwertbarer Energie in der Umgebung zur Verfügung stehen. Energiequellen sind bei den bekannten Verfahren Beleuchtungsstärke (Solarzelle), Temperaturschwankungen oder Temperaturdifferenzen (Thermoelement), Vibrationen (Piezo- oder Induktivgenerator) oder starke elektromagnetische Wechselfelder (Vgl. z. B. [Wan11]). Da beim Lagern in vielen Fällen gleichbleibende Umgebungsbedingungen angestrebt werden, und die Ausleuchtung großer Volumina mit EM-Feldern in der benötigten Stärke nicht zweckmäßig ist, stellt die Verwendung der Fotovoltaik die bevorzugte Lösung dar.

Meist (aber nicht zwangsläufig) benötigt eine dezentrale Recheneinheit eine Kommunikationsverbindung zum Datenaustausch mit angrenzenden Systemen. Diese kann entweder über eine Verkabelung (mit entsprechend hohem Installationsaufwand und geringer Flexibilität) oder drahtlos realisiert werden. Drahtlose Kommunikation kann wiederum in Infrastrukturnetzwerke und Peer-To-Peer-Netze unterschieden werden. Bei Infrastrukturnetzwerken muss eine Funkabdeckung durch spezielle Zugangspunkte, die eine begrenzte Reichweite aufweisen, sichergestellt sein. Beim Peer-To-Peer-Netz (z. B. WLAN nach IEEE 802.11 im sog. Ad-hoc-Modus) können zwei oder mehrere Einheiten, die sich in gegenseitiger Funkreichweite befinden, direkt miteinander kommunizieren. Eine Erweiterung dieses Prinzips stellt das Mesh-Routing dar. Dabei können auch Einheiten, die sich nicht in gegenseitiger Funkreichweite befinden, Daten austauschen. Die Datenpakete werden dann durch andere Netzteilnehmer weitergeleitet (Multi-Hop). Die meisten drahtlosen Sensornetzwerke (Wireless Sensor Network, WSN) basieren auf diesem Prinzip (z. B. ZigBee [Saf06], 6LoWPAN [Ma08]). Auch die bekannte WLAN-Technik wurde mit der Teilspezifikation IEEE 802.11s um eine Unterstützung für vermaschte Netze erweitert [Hie08].

In Tabelle 5 sind mögliche Anbringungsorte für verteilte Recheneinheiten dargestellt. Die Funktionen, die die Anbringung einer Recheneinheit an den genannten Stellen im Lager ermöglicht, werden im Folgenden diskutiert.

Ein zentraler Server eignet sich für die Implementierung einer **zentralen Lagerverwaltung**. Ausgereifte Datenbanktechnologien und Backup-Verfahren sorgen für eine hohe innere Konsistenz und Sicherheit der Daten. Die Verfügbarkeit des LVS für den Lagerbetrieb ist weitgehend abhängig von der Funktion des Servers und von der Kommunikationsverbindung zum Server, da die Prozesse im Lager auf die zentral gehaltenen Daten und die Prozesssteuerung durch das LVS angewiesen sind. Die Verwendung der anderen Rechnerklassen für eine zentrale Lagerverwaltung ist – zumindest für größere Läger – nicht zweckmäßig, da das hohe Daten- und Anfrageaufkommen erhebliche Leistungsanforderungen an die Recheneinheit und ihre Speicherkapazität stellt.

In einem dezentralen Lagerverwaltungssystem kann eine **Recheneinheit pro Lagerbereich** vorgesehen werden. Die Unterteilung der Bereiche kann dabei entsprechend der Funktionsbereiche oder der Lagerform in verschiedenen Granularitätsstufen erfolgen. Ein Bereich kann beispielsweise den kompletten Funktionsbereich „Wareneingang“, oder auch nur den Bereich eines Ladetors umfassen. Je nach Granularität könnte ein gesamtes Regallager, oder jede einzelne Regalgasse als eigener Bereich definiert werden. Die Arbeitslast wird dabei auf mehrere Rechner verteilt, so dass auch die leistungsschwächeren, günstigeren Rechnerklassen geeignet sind. Die Recheneinheiten können die Verwaltung des Inventars im jeweiligen Lagerbereich übernehmen. Sollten einzelne Recheneinheiten oder Kommunikationsverbindungen ausfallen, ist eine Nutzung der verbliebenen Lagerbereiche bzw. Funktionen weiterhin möglich. Bestimmte Funktionen, wie die bereichsübergreifende Suche nach Artikeln oder freien Lagerplätzen, können in diesem Fall jedoch falsche oder unvollständige Ergebnisse liefern. Es ist für den jeweiligen Einsatzfall zu prüfen, in wie weit unter solchen Umständen eine Fortführung des Geschäftsbetriebs bzw. bestimmter Prozesse möglich ist.

Für die Mitarbeiter ist es möglich, Benutzerinteraktionen direkt vor Ort ohne separate Geräte (z. B. Mobiles Datenterminal, MDT) durchzuführen. Neben der Verwaltung der Lagerinhalte und der Benutzerinteraktion können die verteilten Rechner auch zur Erfassung und Auswertung von Messwerten dienen und eignen sich zur Anbindung von Auto-ID-Technologien wie Barcode- oder RFID-Lesegeräten.

Ein weiteres Vorteil, der sich durch die separate Verwaltung jedes Lagerbereichs ergibt, besteht darin, dass nur die lokale Lagerverwaltung Informationen über den Aufbau des einzelnen Lagerbereichs (Lagerstammdaten) benötigt. Ebenso können nachträglich weitere, auch an-

dersartige Lagerbereiche ohne Unterbrechung des Betriebs der bestehenden Systeme hinzugefügt werden. Voraussetzung ist jedoch ein einheitliches, bereichsübergreifendes Verständnis von Materialstammdaten, IDs der Lagereinheiten und Lageranforderungen.

Eine noch feinere Granularität wird bei der Verwendung einer **Recheneinheit pro Lagerplatz** erzielt. Bei einer großen Anzahl an Lagerplätzen bringt dies jedoch hohe Hardwarekosten und einen erheblichen Installations- und Wartungsaufwand mit sich. Ebenso wächst die Komplexität der Kommunikation und die Auslastung der Kommunikationskanäle, was zu Kommunikationsfehlern oder langen Übermittlungszeiten führen kann. Der Einbau einer intelligenten Recheneinheit in jedes einzelne Lagerfach unterstützt jedoch besonders die Prozessführung (vgl. Pick-by-Light zur Kommissionierunterstützung) und Prozessüberwachung durch die einfache Anbindung von Anzeige-, Sensor- und Identifikationstechnik.

Die Anbringung einer **Recheneinheit an jedem Lagereinheit**, und damit an jeder Lagereinheit, stellt große Herausforderungen an die Integration in das LHM. Insbesondere der geschützte Einbau, die Energieversorgung und die in diesem Fall zwangsläufig drahtlose Kommunikationsanbindung sind zu berücksichtigen. Mögliche Funktionen, die durch dieses Konzept realisiert werden können, sind die Verbuchung von Entnahmen und Zulagerungen direkt vor Ort, sowie die Verwendung der Recheneinheit zur autonomen Prozess- und Transportsteuerung durch die Lagereinheit selbst. Der Investitions- und Wartungsaufwand wächst mit der Anzahl der Behälter. Auch Tauschkonzepte für Behälter über Unternehmensgrenzen hinweg, wie bei der Europoolpalette, sind schwieriger zu realisieren.

Eine eigene **Recheneinheit an jeder Ware** lässt sich wirtschaftlich höchstens durch die Verwendung sehr günstiger Sensorknoten realisieren. Vorteile können sich ergeben, wenn die Recheneinheit bei sehr hochwertigen Gütern auch zur Produktionssteuerung verwendet wird.

Da die folgenden Konzepte weitgehend technologieunabhängig sind, werden die zum Einsatz kommenden, physischen Komponenten eines Lagerverwaltungssystems durch einen ungerichteten Graphen, der aus Knoten und Kanten besteht, modelliert. Ein Knoten repräsentiert dabei eine Recheneinheit, die Kanten entsprechen den Kommunikationsverbindungen zwischen den Knoten. Auf diese Weise kann ein zentrales LVS (ein Knoten, keine Kanten) ebenso modelliert werden, wie ein dezentrales LVS (mehrere Knoten und Kanten).

## 5.2 DEZENTRALE DATENHALTUNG

Die Datenhaltung ist verantwortlich für die persistente Speicherung von Informationen auf Datenträgern. Für die verschiedenen Datenarten, die in einem Lagerverwaltungssystem auftreten, können jeweils unterschiedliche

zentrale oder dezentrale Konzepte zur Datenhaltung gewählt werden (siehe Tabelle 6). Im Folgenden ist unter Datenhaltung die Speicherung der maßgeblichen primären Instanz eines Datensatzes zu verstehen. Das bloße Vorhandensein einer Kopie eines Datensatzes oder eines Identifizierungsmerkmals, das auf einen Datensatz (bspw. in einer zentralen Datenbank) verweist, ist nicht ausreichend.

Es ist anzumerken, dass nach der verwendeten Definition das Vorhandensein einer aktiven Recheneinheit keine Voraussetzung für eine lokale Datenhaltung ist. Die Daten können ebenso auf einem passiven RFID-Transponder oder sogar auf einfachen Datenträgern wie Disketten oder USB-Sticks vorliegen. Vorausgesetzt wird jedoch die Wiederbeschreibbarkeit des Datenträgers.

Bei der verteilten Datenhaltung ist das Brewers CAP-Theorem zu beachten. Dieses besagt, dass Konsistenz (Consistency), Verfügbarkeit (Availability) und Partitionstoleranz (Partition Tolerance) nicht gleichzeitig erreicht werden können [Bre12]. Im Kontext der verteilten Lagerverwaltung bedeutet dies beispielsweise, dass bei Ausfall einer Kommunikationsverbindung zu einem selbst verwalteten Lagerbereich (Partition) Informationen über die dort vorhandenen Bestände entweder nicht mehr verfügbar sind, oder mit Kopien, die möglicherweise nicht aktuell und somit inkonsistent sind, weitergearbeitet werden kann.

**Externe Auftragsdaten** (Bestellungen, Lieferankündigungen usw.) entstehen außerhalb des Zuständigkeitsbereichs des LVS und lösen Prozesse im Lager aus. Zur Steuerung dieser Prozessabläufe werden die Auftragsdaten, z. B. die Positionen einer Bestellung oder die Lieferadresse, benötigt. Eine Speicherung des Auftrags direkt an den betroffenen Lagereinheiten ist denkbar. Bei einer eingehenden Lieferung (Wareneingang) müssten diese Daten allerdings bereits bei der Ankunft vorhanden sein, also durch den Lieferanten aufgebracht werden. Bei einer Bestellung bzw. einem Versandauftrag müssten hingegen zunächst die betroffenen Lagereinheiten ermittelt und die Auftragsdaten an diese übermittelt werden. Im weiteren Verlauf können die Daten auf der LE dann zur Steuerung und Überwachung der nachfolgenden Prozesse dienen. So könnte beispielsweise beim Versand die Lieferadresse direkt aus der LE ausgelesen werden. Bezieht sich eine Bestellung auf mehrere Lagereinheiten, so führt dies zwangsläufig zu Redundanzen, da an jeder betroffenen LE die Auftragsdaten gespeichert würden. In den meisten Fällen dürfte der zentralen Speicherung der Auftragsdaten der Vorzug zu geben sein.

**Interne Auftragsdaten**, wie Ein- und Auslager-, Transport- und Kommissionieraufträge, dienen zur Erfüllung externer Aufträge oder werden zur Realisierung lagerinterner Vorgänge (z. B. Umlagerungen zur Lagerorganisation, Nachschubaufträge) erzeugt. Einlageraufträge

Tabelle 6 Mögliche Speicherorte für LVS-Daten

	Auftragsdaten		Stammdaten		Bestandsdaten		Historien- / Logdaten
	externe	interne	Materialstammdaten	Lagerstammdaten	Inventardaten	Lagerortsinformationen	
<b>zentral</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>am Lagerbereich</b>			X	X	X	X	X
<b>am Lagerplatz</b>			X	X	X	X	X
<b>am Ladehilfsmittel (Palette, Behälter, Gitterbox)</b>	X	X	X		X	X	X
<b>an der Ware</b>			X		X	X	X

können nach der Vereinnahmung direkt auf die Lagereinheiten geschrieben werden, um so das Transportziel an die Transportmittel zu kommunizieren. Ein Auslagerauftrag hingegen müsste zunächst an eine eingelagerte Einheit übermittelt werden. Die Information über den Abholort muss dem Transportmittel auf eine andere Weise übermittelt werden. Das Transportmittel muss diese Informationen ohnehin verwalten um seinen Zielort zu kennen, daher ist es sinnvoll auch den kompletten Auftrag auf dem Transportmittel selbst zu speichern. Auf eine zentrale Instanz zur Verwaltung aller (noch nicht vergebenen) Transportaufträge kann verzichtet werden, wenn stattdessen die Information über alle Aufträge zwischen allen Transportmitteln synchronisiert wird.

Die Speicherung der lagerrelevanten **Materialstammdaten** an der Ware selbst hat den Vorteil, dass – die richtige Datenerfassungstechnologie vorausgesetzt – die Wareninformation auch in Abwesenheit einer zentralen Instanz ausgelesen werden kann.

So können spezielle Anforderungen an die Lagerbedingung usw. dezentral geprüft werden. Wenn gleiche Materialien mehrfach in verschiedenen Lagereinheiten im Lager vorhanden sind, so müssen auch die entsprechenden Materialstammdaten mehrfach an den entsprechenden Lagereinheiten, Lagerplätzen bzw. Lagerbereichen vorhanden sein (Redundanz). Für den seltenen Fall einer Änderung an diesen Materialstammdaten ist zur Vermeidung von Inkonsistenzen sicherzustellen, dass jeder Knoten über den aktuellen Stammdatensatz verfügt – allerdings erst dann, wenn er wirklich verwendet werden soll. Es genügt daher vor der Nutzung des Stammdatensatzes zu prüfen, ob dieser noch aktuell ist. Daneben besteht – wie auch bei zentraler Datenhaltung – die Gefahr von Inkonsistenzen durch fehlerhafte mehrfache Anlage von Stammdatensätzen zum gleichen Material.

**Lagerstammdaten** beschreiben den Aufbau und die Eigenschaften des Lagers, wie z. B. die Lagerplatzdimensionen und die Traglast, und können somit intuitiv entsprechend der physischen Lageraufteilung partitioniert werden. Sie ändern sich selten, d. h. hauptsächlich infolge physischer Veränderungen an der Lagerinfrastruktur. Die Lagerstammdaten werden hauptsächlich bei der Suche nach geeigneten Lagerplätzen verwendet, also üblicherweise nicht unmittelbar für den operativen Einsatz im Lager.

Die Gesamtanzahl und / oder der Wert von Artikeln innerhalb eines Lagers wird durch die **Inventardaten** beschrieben. Eine verteilte Datenspeicherung ist für die Inventur mit Unsicherheit verbunden, da die Daten über das gesamte Lager von verschiedenen und evtl. weit entfernt gelegenen Stellen aggregiert werden müssen. Dabei können Fehler auftreten, weil z. B. die Kommunikation durch andere Funksignale und Interferenzen an Gebäudewänden gestört oder einzelne Knoten oder Teile des Netzes ausgefallen sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Fehler ist größer je mehr Knoten für die Kommunikation benötigt werden. Eine Inventur kann nur erfolgreich abgeschlossen werden, wenn die beschriebenen Fehler entweder vermieden oder zumindest entdeckt und behoben werden können. In jedem Fall muss die Liste aller Knoten, die Lagerbereiche verwalten, bekannt sein oder bestimmt werden können. Das Kommunikationsprotokoll muss zudem die Fehlerfreiheit der Antwort jedes Knotens garantieren oder fehlerhafte bzw. ausbleibende Antworten bemerken.

**Historien- / Logdaten** dienen dazu Prozesse im Nachhinein nachvollziehen zu können. Sie können zur Prozessanalyse und Verbesserung der Prozessabläufe eingesetzt werden. Um Prozessabläufe im Nachhinein nachvollziehen zu können, ist es vorteilhaft eine möglichst durchgängige Prozesskette zu haben – evtl. sogar über

mehrere Prozesse oder sogar über die Unternehmensgrenzen hinaus. Dies schließt u. a. ein, dass die Daten nicht nur an einer Art von logistischen Einheit angebracht sind, wie z. B. nur an Lagerbereichen, sondern an verschiedenen wie z. B. Transportfahrzeugen, Ladehilfsmittel und Lagerbereichen. Durch diese Art der Datenverteilung können allerdings Daten verloren gehen. Dies schränkt die Nachvollziehbarkeit der Prozesse ein. Gleichzeitig können dadurch Sicherheitslücken entstehen. Denn während der Zugang zu den Daten im zentralen System durch einen abgeschlossenen Serverraum eingeschränkt ist, hat im dezentralen System potenziell jeder Zugriff auf die Daten solange er Zutritt zum Lager hat. Die dezentrale Speicherung ermöglicht also viel mehr Angriffsfläche als eine Zentrale – dies gilt besonders dann, wenn die Historien- / Logdaten z. B. an logistischen Einheiten, wie Ladehilfsmittel angebracht sind, die das Unternehmen verlassen. Denn dann hat praktisch jeder Zugriff auf diese Daten, wenn er in der Nähe dieser logistischen Einheiten ist.

### 5.3 MÖGLICHKEITEN DER DATENERFASSUNG BEI DEZENTRALER LAGERVERWALTUNG

Zur Manipulation der in Kapitel 5.2 genannten Daten sind Datenerfassungsgeräte notwendig. Einsatzmöglichkeiten sowie Vor- und Nachteile der Datenerfassungsgeräte, wie z. B. RFID-Reader oder Sensorknoten, werden in diesem Abschnitt beschrieben. Wenn nachfolgend von RFID-Antenne gesprochen wird, dann ist eine Antenne-Reader-Kombination für den UHF Frequenzbereich gemeint, außer es wird explizit auf die Unterscheidung eingegangen. Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, ist der Einsatz von Datenerfassungsgeräten im Lager hauptsächlich vom Prozess abhängig. Der Prozess bestimmt, wann das Einlesen von Daten notwendig ist, um – basierend auf den eingelesenen Daten – nachgelagerte Prozesse zu steuern. Eine Untersuchung der Methoden zur Datenerfassung erfolgt hier daher bzgl. des gemeinsamen Einsatzes mit einem dezentralen LVS in den Prozessen der Intralogistik.

Eine Möglichkeit der automatischen Datenerfassung sind **aktive bzw. semi-aktive RFID-UHF Transponder (Tags) zusammen mit einer oder mehreren stationären Antennen**. Aktive Transponder zeichnen sich durch einen großen, typischerweise wiederbeschreibbaren Speicher von bis zu mehreren Mbytes und eine hohe Lesereichweite aus. Generell ist zum Auslesen von RFID-Transpondern kein Sichtkontakt notwendig, dadurch kann die sogenannte Pulkerfassung ermöglicht werden – also die gleichzeitige Erfassung mehrerer Transponder mittels eines einzigen Lesevorgangs. Die Pulkerfassung hilft z. B. beim Wareneingang Zeit einzusparen. Der Nutzen einer Pulkerfassung ist proportional zur Menge der auszulesenden Tags. Aufgrund des hohen Preises können die aktiven Transponder jedoch nur an wenige (in der Regel hochpreisige) Produkte angebracht werden. Aktive und semi-aktive Transponder können mit externer Sensorik, wie z. B. Temperatursensoren ausgestattet werden. Diese

Temperatursensoren können während des Transports den Temperaturverlauf aufzeichnen. Diese Informationen können z. B. in der Qualitätssicherung ausgewertet werden. Aktive Transponder können aber auch zur Überwachung der angemessenen Lagerbedingungen eingesetzt werden. Falls die gemessenen Werte einen Toleranzbereich überschreiten geben die Transponder über angeschlossene Sensoren einen entsprechenden Alarm an die Lagerumgebung aus.

Diese Fähigkeiten werden erst durch eine eigene Energieversorgung ermöglicht, entweder in Form einer Batterie oder durch den Anschluss an das Stromnetz. Bei semi-aktiven Transpondern wird die zusätzliche Stromversorgung nur für die Aufrechterhaltung von nicht-flüchtigen Speichern und den Betrieb der Sensoren verwendet. Aktive RFID-UHF Transponder nutzen die zusätzliche Stromversorgung auch zur Datenübertragung und können dadurch Reichweiten bis zu 100 m erzielen. Ein Auslesen der Tags erfolgt durch einen handelsüblichen UHF-RFID-Reader. Bei Einsatz mehrerer RFID-Reader erfolgt die Erfassung der Tags ohnehin an verschiedenen Orten. Es ist daher empfehlenswert Datenspeicherung und Lesebereiche der Reader bei dezentraler Lagerverwaltung deckungsgleich zu handhaben, um Material und Information am selben Ort zur Verfügung zu haben.

Der Einsatz von **RFID-Gates und passiven Tags** ist eine weitere Möglichkeit der Datenerfassung. Zusätzliche Sensorik kann aufgrund des Fehlens einer stabilen und ausreichend starken Energieversorgung an die passiven Tags nicht angeschlossen werden. Die Sendereichweite der Transponder ist abhängig vom Frequenzband und Umgebungsbedingungen. Im Frequenzband LF (120-150 kHz) und HF (13,56 MHz) können Reichweiten von wenigen Zentimetern bis zu einem Meter erreicht werden. Transponder, die im UHF- (865-868 MHz; Europäischer Raum) oder Mikrowellenbereich (2,4-5,8 GHz) arbeiten, erreichen eine Reichweite von mehreren Metern. Die Datenauslesung unterscheidet sich je nach Frequenz: Bei LF- und HF-Transpondern induziert die Antenne eine Spannung über ein magnetisches Feld in die Transponder, der den Transponder dadurch mit Energie versorgt. Zur Informationsübertragung verändert der Transponder dieses Feld durch Lastmodulation. Der Antenne kann das sich ändernde magnetische Feld detektieren und entsprechend interpretieren. In höherfrequenten Bereichen, UHF und Mikrowelle, erfolgt dies über das sogenannte Backscatter-Verfahren. Hierbei sendet der Reader elektromagnetische Wellen, die von der Dipol-Antenne des Transponders reflektiert werden. Im Vergleich zu niederfrequenten Tags ist die Datenübertragung bei UHF schneller. Bei passiven Systemen sind daher leistungsstärkere Antennen als bei aktiven Systemen notwendig. Zu beachten ist, dass LF-Transponder die einzigen hier erwähnten nicht pulkfähigen Transponder sind.

Unabhängig vom Frequenzband oder weiteren Attributen sind passive Transponder im Vergleich zu aktiven Transpondern erheblich günstiger. Dadurch können sie sowohl auf vielen Produkten zur Pulkerfassung oder Identifikation, als auch auf Lagerplätzen zur Identifizierung angebracht werden. Durch RFID-Gates abgetrennte Lagerbereiche sollten bei Einsatz eines dezentralen Lagerverwaltungssystems ebenfalls als Basiseinheiten für die Lagerverwaltung dienen. Zum einen stehen dadurch Material und Information am selben Ort zur Verfügung, zum anderen kann die Zuordnung zu einem Lagerbereich und die Speicherung auf der richtigen dezentralen Einheit ohne Auswertung von Zusatzinformation stattfinden.

Bei der Variante mit **mobilen RFID-Antennen am Transportfahrzeug / mobilen RFID-Handheld haben die passiven Transponder** die gleichen Eigenschaften wie im oben geschilderten Fall: geringe Reichweite sowie Speicherkapazität; keine eigene Stromversorgung; usw. Der Unterschied liegt in der Mobilität der Antenne. Diese kann z. B. an einem Handheld, Tablet oder an einen Transportfahrzeug, wie z. B. einen Stapler angebracht sein. Diese mobilen Geräte ermöglichen eine ortsungebundene Identifizierung von Waren und Lagerplätzen. Für die korrekte und systematische Zuordnung der Ware zu einer dezentralen Einheit des Lagerverwaltungssystems sind jedoch noch weitere Zusatzinformationen, z. B. eine Positionsinformation des Transportmittels notwendig.

Auch ist das Auslesen von RFID-Transpondern nicht immer zuverlässig, aufgrund von Reflexion und Absorption der elektromagnetischen Strahlen durch die Umgebung. Dadurch können Leselöcher oder Überreichweiten, bzw. True- und False-Positive-Reads entstehen.

Single Board Computer, Sensorknoten, Mikrocontroller und weitere **mobile Kleinstrechner** sind in der Lage über Funktechnologien miteinander zu kommunizieren. Da sie einen Prozessor haben, können sie auch eine gewisse Verwaltungsfunktion übernehmen. Solche Kleinstrechner eignen sich ebenfalls für die automatische Datenerfassung: ein am Flurförderzeug angebrachter Sensorknoten kann z. B. einen anderen Sensorknoten, der in einem Lagerfach bzw. einer Palette angebracht ist, bei Annäherung automatisch kontaktieren und dort abgelegte Daten abfragen. Ein ähnlicher Funktionsumfang wie bei aktiven RFID-Tags kann so realisiert werden. Es gelten allerdings aufgrund des vergleichsweise hohen Preises und der für mobile Kleinstrechner notwendigen Energieversorgung auch ähnliche Einschränkungen wie bei aktiven RFID-Tags.

Oftmals verfügen mobile Kleinstrechner über zusätzliche Anschlüsse für Sensoren oder Ausgabegeräte, wie z. B. Temperatursensoren, LEDs, Funkmodule usw. die zur Verbesserung logistischer Abläufe beitragen können. LEDs können beispielsweise in der Kommissionierung eingesetzt werden, um den Kommissionierer auf die zu

kommissionierenden Waren aufmerksam zu machen. Synergieeffekte können sich also ergeben, wenn die für das dezentrale LVS benötigten Knoten zusätzlich für andere Aufgaben im Lager eingesetzt werden können (Funktionsintegration).

Abgesehen von der vollautomatischen Datenerfassung gibt es noch weitere, teils manuelle Methoden der Datenerfassung im Warenlager. Der **Barcode** ist in der Industrie sehr verbreitet und eine sogenannte optische Identifikationsmethode. Sie besteht aus Barcode und einen Barcode-Scanner [GS114]. Der Barcode ist meist ein papierbasierter Informationsträger auf dem die Information in bestimmter Form codiert wird. Diese Form bestimmt die Menge der möglichen gespeicherten Information. In aufsteigender Reihenfolge ihres potenziellen Informationsgehalts gibt es Strichcode, Stapelcode, Matrixcode, 3D-Code usw. [Mar11, S. 496ff]. Im Gegensatz zu RFID ist der Barcode nicht wiederbeschreibbar. Zudem ist der Barcode besonders anfällig gegenüber Verschmutzung. Des Weiteren muss immer eine Sichtverbindung zwischen Barcode-Scanner und Barcode bestehen. In Kombination mit einem dezentralen LVS verhält sich der Barcode ansonsten wie ein passiver RFID-Transponder, der von einem mobilen Lesegerät erfasst wird.

Grundsätzlich eignen sich alle beschriebenen Datenerfassungsformen für den Einsatz mit einem zentralen wie dezentralen LVS. Die Fähigkeiten der Technologien sind vom LVS weitgehend unabhängig. Eine wesentlicher Unterschied besteht lediglich in der Art der Anbindung dieser Geräte an das LVS. Anders als in einem zentralen LVS besteht für die verwendeten Geräte in einem dezentralen LVS in der Regel kein zentraler Ansprechpartner – es wird daher eine angepasste Middleware benötigt, die die Anbindung an das dezentrale LVS umsetzt.

#### 5.4 DEZENTRALE PROZESSABLÄUFE

In einem dezentral verwalteten Lager werden Entscheidungen und Daten nicht mehr an einer einzigen Stelle gefällt bzw. gespeichert. Dies bedeutet eine Änderung der informationstechnischen Abläufe und kann zu einer Änderung der physischen Prozessdurchführung im Lager führen. Davon sind besonders folgende Prozesse betroffen: Suche (Lagerplatz oder Ware), Ein- und Auslagerung und Inventur.

Für die Beschreibung eines Beispiels ablaufs wird angenommen, dass verschiedene Lagertypen, wie z. B. Hochregallager, Blocklager, im Lager existieren. Des Weiteren können diese verschiedenen Lagertypen in mehrere Lagerbereiche unterteilt werden. Dabei ist jeder Knoten, der für einen Lagerbereich zuständig ist (**Lagerbereichsknoten**) über ein Kommunikationsnetz mit den anderen Knoten verbunden. Weitere Knoten zur Benutzerinteraktion wie z. B. PCs, Tablets (im folgenden unter dem Oberbegriff **I/O Knoten** zusammengefasst), sind ebenfalls Teil des Netzwerkes und können mit allen Kno-



ten in diesem Netzwerk kommunizieren. Nachfolgend wird ein generischer Prozessablauf in diesem Beispiellager erläutert, der die oben angesprochenen, geänderten informationstechnischen Verarbeitungsschritte und die damit verbundenen Konsequenzen für das Lagermanagement veranschaulicht.

Zur Kommunikation innerhalb des Netzes müssen die Adressen der aktiven Netzwerkteilnehmer bekannt sein. Eine Liste aller aktiven Knoten wird von einem Verzeichnisdienst verwaltet. Er ist darüber hinaus für die Aktualisierung der Adressverzeichnisliste und Verwaltung der Aufträge verantwortlich.

Falls eine Ware zur Einlagerung ankommt, wird die Ware identifiziert und die Wareninformationen, wie z. B. Produktart, die Abmessungen, das Gewicht in einem Einlagerungsauftrag gespeichert. Die noch nicht bearbeiteten Einlagerungsaufträge können von den Mitarbeitern über I/O Knoten angefordert werden und auf diesen Gerät angezeigt werden. Danach kann der Benutzer aus einem der angezeigten Aufträge auswählen. Durch das Auswählen eines Auftrages verändert sich dessen Status von „noch offen“ auf „in Bearbeitung“. Diese Statusänderung wird vom Verzeichnisdienst auf allen anderen I/O Knoten synchronisiert, um eine Bearbeitung eines Auftrages durch zwei Benutzer zu verhindern.

Hat ein Mitarbeiter einen Auftrag, in diesem Fall einen **Einlagerungsauftrag**, ausgewählt, wird die Anfrage zur Einlagerung samt aller vorher gespeicherten Wareninformationen an alle aktiven Lagerbereichsknoten versendet. Diese kontrollieren, ob sie die betreffende Ware aufnehmen können. Z. B. wird überprüft, ob genügend Platz vorhanden ist, ob die Produktart zur Einlagerung in das Lager freigegeben ist und ob die Ware für das Lager die erforderlichen maximalen Abmessungen nicht überschreitet, usw. Die Überprüfung schließt mit dem Versand einer Zu- oder Absage an den anfragenden I/O Knoten für die Einlagerung ab. Bei einer Zusage werden zusätzlich Ortsinformationen über den geeigneten Lagerplatz an den anfragenden Rechner gesendet. Die Knoten, die eine Zusage zu einer möglichen Einlagerung versenden, akzeptieren danach für eine begrenzte Zeit keine weiteren Anfragen, um mögliche Konflikte bei Lagerplatzreservierung zu vermeiden. Dieser Anfragestopp wird jedoch spätestens mit dem Erhalt der Antwort vom anfragenden Knoten wieder aufgehoben. Erreichen die gesendeten Nachrichten den anfragenden I/O Knoten, wird dieser aus der Menge aller möglichen Zusagen eine auswählen. Das Ergebnis der Auswahl wird an die Absender der Zusagen zurückgesendet. Derjenige Lagerbereichsknoten, der für die Einlagerung ausgewählt wurde, reserviert den entsprechenden Lagerplatz vor neuen Einlagerungsanfragen. Anschließend meldet dieser Knoten die Reservierungsbestätigung an den anfragenden I/O Knoten zurück. Mit Erhalt dieser Bestätigung aktualisiert der I/O Knoten den Einlagerort

im Einlagerungsauftrag und zeigt das Ergebnis dem Benutzer an.

Daraufhin wird die Ware an den entsprechenden Lagerort transportiert und eingelagert. Die Einlagerung wird mit einer **Einlagerungsbestätigung** an den Lagerbereichsknoten abgeschlossen. Der Lagerbereichsknoten aktualisiert daraufhin seine Bestandsliste mit den eingelagerten Waren und hebt die Reservierung für den Lagerplatz auf.

Um eine eingelagerte **Ware zu suchen** werden auf einem I/O Knoten die gesuchten Warenattribute eingegeben und anschließend an alle Knoten versendet, die beim Verzeichnisdienst erfragt wurden. Ist die Suchanfrage bei den Knoten angekommen, suchen sie nach Waren, die mit den Attributen übereinstimmen. Eine Auflistung der Suchergebnisse wird an den I/O Knoten gesendet, der die Suchanfrage gestartet hat. Die Suchergebnisse der verschiedenen Lagerbereichsknoten werden am I/O Knoten zusammengeführt, sortiert und dem Benutzer angezeigt. Dieser Prozessablauf funktioniert analog für die Inventur. Es wird nur nicht nach einer bestimmten Ware bzw. einem Warenattribut gesucht, sondern nach allen im Lager eingelagerten Waren.

Die erhaltenen Suchergebnisse können z. B. für eine Wareneinstellung einer Kundenbestellung genutzt werden. Dazu sendet der I/O Knoten eine **Auslagerungsanfrage** für Waren mit den gesuchten Attributen an alle Lagerbereichsknoten. Diese überprüfen, ob in ihrem Zuständigkeitsbereich eine Auslagerung möglich ist und senden eine entsprechende Antwort an den I/O Knoten zurück. Ähnlich wie bei dem vorher vorgestellten Prozessablauf für den Einlagerungsauftrag, akzeptieren diejenigen Lagerbereichsknoten, die eine Zusage erteilt haben, für eine begrenzte Zeit keine konkurrierenden Anfragen. Der I/O Knoten trifft, basierend auf allen an ihn gesendeten Antworten, eine Auswahl und sendet das Ergebnis seiner Auswahl – entweder eine Zu- oder Absage – an die Lagerbereichsknoten zurück. Falls ein Lagerbereichsknoten eine Zusage erhält, reserviert er die Ware für die Auslagerung. Dies wird dem I/O Knoten als Bestätigung zugesendet, der daraufhin den Auslagerungsauftrag mit der konkreten Instanz der auszulagernden Ware und dem Platz der Auslagerung aktualisiert. Das Ergebnis der Aktualisierung wird dem Benutzer am Bildschirm angezeigt.

Die **Annahme eines Auslagerungsauftrages** erfolgt auf die gleiche Weise, wie sie für den Einlagerungsauftrag beschrieben wurde. Falls die Ware ausgelagert wurde, erfolgt die Bestätigung durch den Mitarbeiter. Dazu sendet er über den I/O Knoten die Auslagerungsbestätigung an den verantwortlichen Lagerbereichsknoten. Dieser aktualisiert daraufhin seine Bestandsliste. Der I/O Knoten setzt den Status des Auslagerungsauftrages auf „abgeschlossen“ und sendet diesen aktualisierten Status an den Verzeichnisdienst. Ist diese Nachricht über den abgeschlosse-

nen Auftrag am Verzeichnisdienst angekommen, so aktualisiert er die Auftragsliste auf allen anderen I/O Knoten entsprechend seiner Auftragsliste.

Der Implementierungsaufwand eines verteilten Systems ist aufgrund des hohen Grades an Kommunikation zwischen den einzelnen Netzwerkteilnehmern höher als bei zentralen Systemen. Dies gilt besonders bei Anfrageoperation, die über Broadcast versendet und deren Rückantworten später verarbeitet werden. Ebenso ist die Synchronisation von Daten wie Stamm- oder Auftragsdaten ein Grund für die erhöhte Komplexität. Zudem erschweren Störungen wie Latenz, Jitter oder Rauschen die Kommunikation im Netz. Dies kann zu einer Verzögerung oder Ausbleiben von Rückantworten führen. Die Ursachen dieser Störungen sind Interferenzen mit der Umgebung, Nachrichtenkollisionen und zu geringe Bandbreite. Wird die Kommunikation über ein drahtloses Netzwerk abgewickelt, ergeben sich physikalisch bedingt zusätzliche Einschränkungen. Da sich alle Kommunikationsteilnehmer das Medium für die Datenübertragung teilen und externe Störungen im selben Frequenzband mit größerer Wahrscheinlichkeit auftreten, sind die Schwankungen in Latenz, Bandbreite und Verfügbarkeit größer als bei kabel-basierter Kommunikation.

Bei der Kommunikation auftretende Probleme können zumindest momentan entweder nur sehr schwierig oder gar nicht behoben werden. Da nicht festgestellt werden kann, ob eine Rückantwort aufgrund einer Störung nicht ankommt oder wegen eines Ausfalls des Knotens nicht gesendet wurde, muss bei der Implementierung eines dezentralen LVS ein robustes Kommunikationsmodell, das auftretende Fehler kompensieren oder mindestens entdecken kann, zumindest für diejenigen Prozesse zum Einsatz kommen, die von einer hohen Datenverfügbarkeit ausgehen. (z. B. Inventur oder Erstellung eines Nachbestellungsauftrages).

Es ist allerdings anzumerken, dass drahtlose Kommunikation in der ein oder anderen Form auch bei zentralen Lagerverwaltungssystemen zum Einsatz kommen kann, etwa, wenn per WLAN Aufträge an mobile Recheneinheiten auf Gabelstaplern oder an Kommissionierer übermittelt werden.

## 6 FAZIT

Die Lagerverwaltung ist in besonderem Maße auf eine hohe Datenverfügbarkeit und -konsistenz angewiesen. Daher werden aktuell ausnahmslos zentrale Lagerverwaltungssysteme eingesetzt, die auf Basis bewährter Technologien Konsistenz und Verfügbarkeit gewährleisten. Allgemein gibt es für ein LVS eine Reihe funktionaler und nichtfunktionaler Anforderungen, die ebenfalls als Maßstab für dezentrale LVS gelten müssen. Die untersuchten Konzepte zur dezentralen Datenhaltung erlauben mit Einschränkungen einen ähnlichen Funktionsumfang wie ihre zentral organisierten Pendanten. So kann ein dezentrales Lagerverwaltungssystem bezüglich der funktionalen Anforderungen aus Kapitel 3.2 zumindest im Optimalfall, d. h. wenn die Kommunikation zwischen den Knoten immer fehlerfrei funktioniert und die Daten auf den Knoten immer konsistent sind, das gleiche Funktionsniveau erreichen. Zur Gewährleistung von Konsistenz und Verfügbarkeit in dezentralen Systemen sind jedoch umfangreiche Maßnahmen, wie z. B. eine regelmäßige Synchronisierung von Informationen zwischen dezentralen Einheiten und redundante Speicherung von Datensätzen in unterschiedlichen Knoten notwendig, um einen Ausfall einzelner Knoten ohne Datenverlust kompensieren zu können und gleichzeitig einen korrekten Betrieb zu gewährleisten. Dies resultiert jedoch in einem größeren Kommunikationsaufwand zwischen den Knoten und erhöht die Latenz bei der Übertragung. Können die Recheneinheiten, die für das dezentrale Lagerverwaltungssystem zum Einsatz kommen, noch für andere Zwecke verwendet werden, so können Synergieeffekte durch die Funktionsintegration für die Nutzung eines dezentralen Ansatzes sprechen.

Die Umsetzung und Evaluierung eines konkreten Konzeptes für ein dezentrales LVS ist Gegenstand aktueller Forschung. Für welche konkreten Anwendungsfälle sich der Ansatz eignet wird derzeit am Lehrstuhl fml der TU München untersucht.

Hinweis: Der vorliegende Aufsatz ist im Rahmen des Projektes „Dezentrale Lagerverwaltung für wandlungsfähige logistische Systeme“ entstanden. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) förderte dieses Projekt unter dem Geschäftszeichen GU-427/13-1.

## LITERATUR

- [Bre12] Brewer, E.: *CAP twelve years later: How the "rules" have change*. Computer; Volume:45 , Issue: 2 ; 2012; S. 23-29
- [Bus01] Bussmann, S.; Schild, K.: *An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems*. In Proc. of the 8th IEEE Int. Conf. on Emergent Technologies and Factory Automation

(ETFA 2001). Antibes Juan-les-pins, 2001

- [Chi09] Chisu, R.: *Kommunikations- und Steuerungsstrategien für das Internet der Dinge*. Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [Chi10] Chisu, R.; Kuzmany, F.; Günthner, W.A.: *Realisierung einer agentenbasierten Steuerung für Elektrohängebahnsysteme*. In: Günthner, W. A.; ten

- Hompel, M., *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 263-274
- [Dec10] Decker, C.; Kubach, U.; Beigl, M.: *K Revealing the Retail Black Box by Interaction* 23rd Int. Conf. on Distributed Computing Systems Workshops, 2003
- [Geb11] Gebhardt Fördertechnik GmbH: *Es lebe die Autonomie*. In: *Materialfluss*, S. 33, Mai 2011
- [Geh10] Gehlich, D.; Luft, A.; Libert, S.: *Ein dezentral gesteuertes Kommissionierlager*. In: Günthner, W. A.; ten Hompel, M., *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 295-311
- [Gra06] Gray, J.: *The Transaction Concept: Virtues and Limitations*. Proceedings of the 7th International Conference on Very Large Databases. Cupertino CA; 2006; S. 144–154
- [Gre11] Greiner, E.: *SAP-Materialwirtschaft – Customizing*. SAP Press, 2011
- [GS114] GS1 Standard International Logistic Label; [http://www.gs1uk.org/what-we-do/PublicDocuments/Standard\\_International\\_Logistics\\_Label\\_\(STILL\).pdf](http://www.gs1uk.org/what-we-do/PublicDocuments/Standard_International_Logistics_Label_(STILL).pdf); aufgerufen am 21.01.2014
- [Gud99] Gudehus, T.: *Logistik*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1999
- [Han09] Hansen, H. R.; Neumann, G.: *Wirtschaftsinformatik 1 – Grundlagen und Anwendungen*. Lucius & Lucius, Stuttgart, 2009
- [Ide13] IdentPro GmbH: *identplus – Automatisches 3D-Tracking von Waren und Behältern mit Staplern*. Produktbeschreibung 2013
- [Hie08] Hiertz, G.R.; Yunpeng Zang; Max, S.; Junge, T.: *IEEE 802.11s: WLAN Mesh Standardization and High Performance Extensions*. Network, IEEE (Volume:22 , Issue: 3 ); 2008; 12 - 19
- [IML13] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik: *inBin – Der intelligente Behälter*. <http://www.iml.fraunhofer.de/de/theme>
- te/automation\_eingebettete\_systeme/Produkte/IntelligenterBehaelter.html, aufgerufen am 25.10.2013
- [Kat13] Kathrein-Sachsen GmbH: *Neue KRAI RFID UHF SmartShelfAntenne*. <http://www.kathreinfoid.de/de/node/104>, aufgerufen am 27.11.2013
- [Kit13] Kilz, S.: *Alles unter Kontrolle – Warenverfolgung per 3D-Tracking*. In: *IT&Production* 5/2013, S. 68-69
- [Kir12] Kirks, T.; Stenzel, J.; Kamagaew, A.; ten Hompel, M.: *Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme*. Logistics Journal: Proceedings, 2012
- [Ma08] Ma, X.; Luo, W.: *The analysis of 6LowPAN technology*. Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on (Volume:1 ); 2008; S.963-966
- [Mar11] Martin, H.: *Transport- und Lagerlogistik, Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden: 2009
- [RFI09] RFIDSpan Technology: *RFIDSpan Technology Introduces iReader-980 to Revolutionize Item-Level Tracking and SmartShelf Design*. Pressemitteilung 28.12.2009, <http://www.rfidspan.com/newsevents.html>, aufgerufen am 27.11.2013
- [Saf06] Safaric, S.; Malaric, K.: *ZigBee wireless standard; Multimedia Signal Processing and Communications*. 48th International Symposium ELMAR-2006; 07-09 June 2006, Zadar, Croatia; S. 259-262
- [Sch08] Schier, A.: *Drahtlose Sensornetzwerke in der Logistik: Einsatz drahtloser Sensornetzwerke zur dezentralen Lagerhaltung*. VDM Verlag Dr. Müller, 2008
- [Sto12] storeskin GmbH: *Intelligentes Regal war gestern – storeskin ist die Zukunft*. Pressemitteilung, <http://www.storeskin.net/wp-content/uploads/2012/12/PRstoreskin122012.pdf>, aufgerufen am 27.11.2013

- [Wan11] Wan, Z.G.; Tan, Y.K.; Yuen, C.: *Review on Energy Harvesting and Energy Management for Sustainable Wireless Sensor Networks*. Communication Technology (ICCT), 2011 IEEE 13th International Conference on; 2011; S. 362-367
- [Web12] Weber, R.: *Fraunhofer-Forscher zeigen den Behälter für alle Fälle*. In: MM Logistik – Das Portal für Logistikentscheider, Vogel Business Media, 2012
- [Wie07] Wieland, T.; Fenne, M.; Scholz, Ch.: *Drahtlose Sensornetze im industriellen Einsatz*. Projektblatt, Hochschule Coburg, 2007
- [Wür13] Würth Industrie Service GmbH & Co. KG: *iBin – Bestände im Blick*. Pressemitteilung. Bad Mergentheim, 13.02.2013

---

**Dipl.-Ing. Michael Mirlach**, Research Assistant at the Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

**Dipl.-Ing. Trung Thanh Le**, Research Assistant at the Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

**Dipl.-Inf. Matthias Jung**, Research Assistant at the Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

**Dipl.-Ing. Thomas Atz**, Research Assistant at the Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willbald A. Günthner**, Professor at the Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Address: Chair Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, Germany, Phone: +49 089 289-15921, Fax: +49 089 289-15922, E-Mail: kontakt@fml.mw.tum.de