

3.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt M2

3.1.1 Thema:

Wandelbare Logistikstrukturen in Minifabriken

3.1.2 Fachgebiet und Arbeitsrichtung:

Materialflusstechnik, Logistik, Materialflussplanung, Materialflussstrategien

3.1.3 Leitung:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Willibald A. Günthner, 14.05.1952
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

3.1.4 Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Michael Wilke

Gliederung des Berichts

3.2	Kenntnisstand bei der letzten Antragsstellung und Ausgangsfragestellung...	300
3.2.1	Ausgangsfragestellung.....	300
3.2.2	Kenntnisstand bei der letzten Antragsstellung	301
3.3	Angewandte Methoden.....	303
3.4	Ergebnisse und ihre Bedeutung	308
3.4.1	Anforderungen an wandelbare Logistikstrukturen und Auswahl geeigneter Lösungsansätze	308
3.4.2	Konzeption autonomer, flexibler, konfigurierbarer Materialflusstechnik.....	312
3.4.3	Konzepte autonomer Gerätesteuernngen.....	317
3.4.4	Berührungslose Datenübertragung	322
3.4.5	Konzeption der Kommunikationsschnittstellen für die Einbindung autonomer Materialflussmittel in Minifabriken	325
3.4.6	Entwicklung autonomer Materialflussteuerungen und Konzeption von Steuerungsstrategien für Minifabriken	327
3.5	Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs und Reaktion der wissenschaftlichen Öffentlichkeit auf die eigenen Arbeiten.....	327
3.6	Offene Fragen	328
3.7	Literatur	329

3.2 Kenntnisstand bei der letzten Antragsstellung und Ausgangsfragestellung

3.2.1 Ausgangsfragestellung

Der Trend zur Produktion individualisierter Güter erfordert einen grundlegenden Neuaufbau der Fabrikstrukturen. Zukünftige Minifabriken müssen in der Lage sein, sich schnell auf die individuellen Kundenwünsche und die Schwankungen des Marktes einstellen zu können. Dies verlangt kurze Reaktionszeiten und eine sehr hohe Flexibilität im Aufbau und in den Abläufen. Mit der Produktion individualisierter Güter reduziert sich die Größe der Fertigungslose. Damit steigert sich die Zahl der abzuwickelnden Produktionsaufträge und so der gesamte materialflusstechnische und steuerungstechnische Aufwand erheblich [26, 30].

Heute geht die Produktion in kleinen Losgrößen noch mit sehr hohen Produktions- und Logistikkosten einher. Automatisierte Lösungen des Materialflusses rechnen sich erst wirtschaftlich bei größeren Serien. Dazu bedeutet in der Regel ein „Mehr“ an Automatisierung heutzutage ein „Weniger“ an Flexibilität und umgekehrt. Dies führt dazu, dass die gegenwärtigen automatischen Materialflusssysteme zu unflexibel sind und ihre Komplexität bei aufwendigen Systemen schwer zu beherrschen ist.

Standardisierte Prozesse, wie sie bei der Serienproduktion vorkommen, lassen sich am einfachsten automatisieren und erfordern zudem eine geringe Flexibilität. Ganz im Gegensatz dazu steht die Produktion von Kleinserien oder Einzelstücken. Sie verlangt eine hohe Flexibilität und ein wandelbares Materialflusssystem. Deshalb kommen heutzutage in dynamischen Produktionsstrukturen meist nur manuelle Fördersysteme, wie z.B. Stapler und Hubwagen zum Einsatz. Dies erfordert jedoch flexible Arbeitszeitmodelle und hohe Personalkosten, um jederzeit schnell und in hoher Qualität die Wünsche des Kunden erfüllen zu können. Deshalb bedarf es für die Verfolgung der Produktion individualisierter Güter neuer automatisierter Ansätze in der innerbetrieblichen Logistik, um die Kostenschere gegenüber der konventionellen Serienfertigung zu verkleinern, wandelbare Materialflusssysteme zu generieren und gleichzeitig eine hohe Verfügbarkeit durch Reduzierung der Komplexität zu gewährleisten.

Das Ziel des Teilprojektes M2 „Wandelbare Logistikstrukturen in Minifabriken“ war deshalb die Konzeption eines wandelbaren Materialflusssystems, das aus autonomen, dezentral gesteuerten Materialflussmitteln besteht. Diese sollen wandelbar sein hinsichtlich Einsatz, Umfang und Automatisierung, um sich schnell an die Anforderungen und Aufgaben der Produktion individualisierter Güter in Minifabriken anpassen zu können.

Die Einordnung des Teilprojekts M2 in den Sonderforschungsbereich 582 ist in Bild 1 dargestellt. Die Teilprojekte M1, M2 und I3 sind die drei Teilprojekte des SFBs, die sich mit den Themen der marktnahen Minifabrik als Ganzes beschäftigen, wie beispielsweise der Planung der Produktionsstätten, der Verbindung der teilweise in anderen Teilprojekten entwickelten Betriebsmittel oder der Auftragseinschleusung.

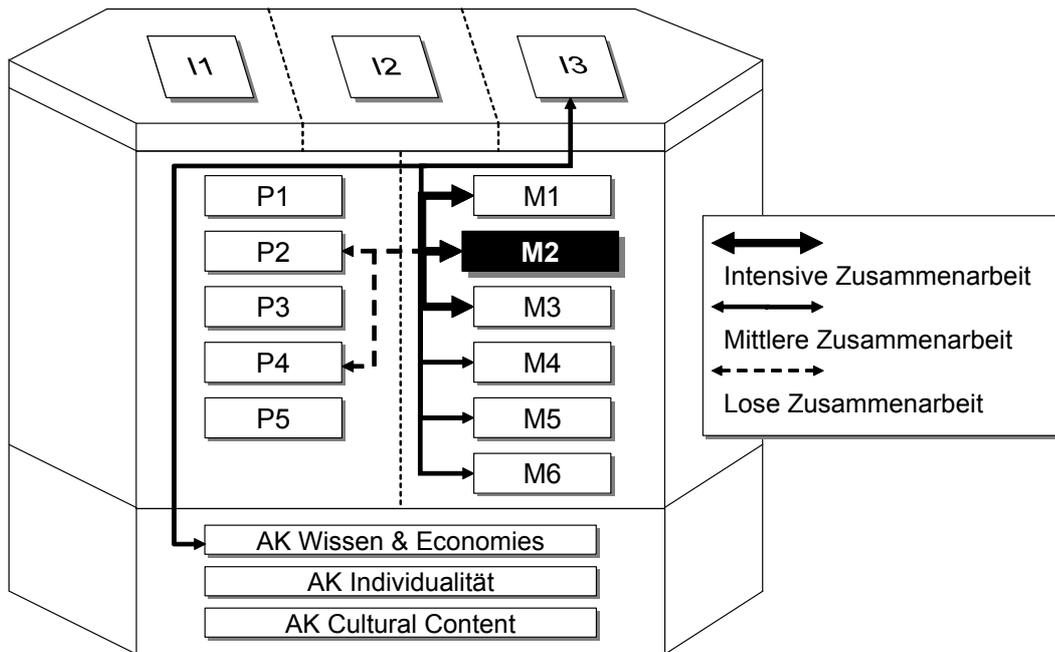


Bild 1: Stellung des Teilprojekts M2 im SFB 582

Mit dem Teilprojekt M1 wurden gemeinsam modulare funktionsorientierte Konzepte für wandlungsfähige, lokale Minifabriken erarbeitet und die daraus resultierenden Anforderungen an die Logistik bestimmt. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten I2, M1 und den anderen M-Projekten im Arbeitskreis Minifabrik der Begriff „Minifabrik“ definiert und detailliert. Mit dem Teilprojekt M3 wurden erste Konzepte für wandelbare Kommunikations- und Materialschnittstellen zwischen Materialflussmodulen und Produktionseinrichtungen erstellt.

3.2.2 Kenntnisstand bei der letzten Antragsstellung

Die Forschungsschwerpunkte im Bereich der Logistik waren zum Zeitpunkt der Antragsstellung in der Thematik der regionalen und internationalen unternehmensübergreifenden Supply Chains, außerbetrieblichen Logistikstrukturen, insbesondere deren Planung und im Logistikdienstleister- bzw. E-Commerce-Bereich zu finden. Die

Sonderforschungsbereiche 559 „Modellierung großer Netze in der Logistik“ [33] und 457 „Hierarchielose regionale Produktionsnetze“ [32] oder BMBF-Forschungsverbände wie „Kooperatives Management wandelbare[r] Produktionsnetze (Logistiknetze)“ [7] untersuchen wandelbare Logistiknetzwerke. Im innerbetrieblichen Bereich wird in den Sonderforschungsbereichen 362 „Fertigen in Feinblech“ an logistikgerechten Fertigungsstrukturen [35] und 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ [40] geforscht. Auch in [10, 18] werden zunehmend Wandlungsfähigkeit und Flexibilität für die gesamte logistische Kette von der Fördertechnik über die Lagertechnik bis hin zu Sortier- und Kommissioniersystemen und der Schnittstelle zur außerbetrieblichen Logistik gefordert. Dabei müssen die Auswirkungen auf die Bereiche Information, Kommunikation und Organisation berücksichtigt werden [39, 41]. Auch in anderen Produktionsbereichen werden ähnliche Ansätze verfolgt. So werden in [42] beispielsweise für moderne Montageanlagen Adaptierbarkeit und eine mobile Gestaltung verlangt. Sie ermöglichen eine flexible Reaktion auf schwankende Bedarfe und die standortübergreifende Verlegung von Anlagen.

Mobile Maschinen und Anlagen mit selbstkonfigurierenden Steuerungssystemen werden erstmals in [3] für flexible, temporäre Fabriken gefordert. Heutige Logistikstrukturen haben zum Teil gravierende Defizite, die sich in mangelnder Beherrschbarkeit von Veränderungen und Wandel und in statischen, langfristig ausgelegten Fabrikstrukturen ohne effiziente und kurzfristige Adaptiermöglichkeit beschreiben lassen. Handlungs- und Forschungsbedarf wird dort im Einzelnen in der logistischen Vernetzung durch internetgestützte Kooperationsplattformen, in einer Planung unter Berücksichtigung standortspezifischer Randbedingungen und im Aufbau temporärer Planungsnetzwerke gesehen.

Das größte Entwicklungspotenzial ist in der Geräte- und Materialflusssteuerung zu sehen [16]. Insbesondere der Einsatz der Feldbustechnologie und der PC-Steuerungen stand zuletzt im Mittelpunkt [5, 17, 22]. Dezentrale Steuerungen mit objektorientierter Programmierung halten bei fast allen Materialflusssystemen Einzug [21, 38]. Innovationen gehen ebenso von einer schnellen Kommunikation bzw. Datenübertragung und einer effizienten Datenverarbeitung aus. Bei ortsveränderlichen Materialflusssystemen finden Infrarot- und Funkübertragung ihren Einsatz wie z.B. bei Staplerleitsystemen, Laserscannern und beleglosem Kommissionieren, aber auch bei der Übertragung von Bussignalen [4, 29]. Automatisierte Systeme und Materialflüsse benötigen meist eine automatische Identifikation der Transportgüter. Hier stehen sich Barcode- und Transpondersysteme gegenüber. Letztere können mehr Informationen speichern und finden

im Zusammenhang mit der Entwicklung dezentraler Strukturen vermehrt Einsatz in der Fertigungs- und Prozesssteuerung als auch im Behälter- und Palettenmanagement [23].

Erste Schritte hin zur Entwicklung und Gestaltung eines wandelbaren Materialflusssystems wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „MATVAR“ gemacht. Hierbei wurden Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld [13, 12] entworfen. Im Zentrum der Betrachtung standen dezentrale Fertigungsstrukturen, die wegen ihrem dynamischen Umfeld leicht an sich ändernden Anforderungen angepasst werden können. Der Lehrstuhl fml übernahm u.a. die Untersuchung, Konzeption, Bewertung und Erprobung flurfreier Materialflusstechnik [11] und deren Schnittstellen zur Fertigung.

Alle genannten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Materialflusstechnik, der Materialflussteuerungen und der einsetzbaren Materialflusstategien sind nicht auf die Problematik einer Produktion individualisierter Güter in kleinen Losgrößen in marktnahen Produktionsstandorten ausgerichtet. Sie sind oftmals nicht unter Berücksichtigung eines ganzheitlichen, wissenschaftlichen Ansatzes entstanden; vielmehr wurden für einzelne Komponenten inselhaftige Lösungsansätze formuliert bzw. unternehmensspezifische Lösungen entwickelt. Die für den innerbetrieblichen Materialfluss zur Verfügung stehende Technik und Steuerung muss für zukünftige Anforderungen zu konfigurierbaren Modulen teilweise neu-, teilweise weiterentwickelt werden. Die vorhandenen Planungswerkzeuge und Steuerungsstrategien erlauben nicht die notwendige Dynamik und Flexibilität.

3.3 Angewandte Methoden

Um Lösungen für die Anforderungen zu erarbeiten, die sich an die innerbetriebliche Logistik in Minifabriken ergeben, wurde eine Vorgehensweise zur Anforderungsanalyse entworfen, die auf Basis der Kombination verschiedener Methodiken versucht, ein möglichst umfassendes und komplettes Anforderungsprofil zu erstellen. Die durchgeführte Anforderungsanalyse stützt sich auf zwei Säulen, einer SFB-internen und einer SFB-externen Anforderungsanalyse.

In der SFB-internen Analyse wurden in den regelmäßigen Treffen der Arbeitskreise – insbesondere AK Minifabrik – Anforderungen an die innerbetriebliche Logistik, die sich aus den anderen Teilprojekten ergeben, ermittelt. Zur Vervollständigung des Anforderungsprofils kamen in der externen Analyse Recherchen bei produzierenden Unternehmen und die Ausarbeitung von Referenzszenarios zum Einsatz. Um ein möglichst

vollständiges Anforderungsprofil zu erhalten, wurden sowohl Primär- und Sekundärquellen als auch Zukunftsanalysen herangezogen.

Mit der Primäranalyse wurde das Ziel verfolgt, ungefilterte Daten aus direkten Quellen über Interviews und Fragenkatalog mit in die Anforderungsanalyse aufzunehmen. Ergänzt durch eine Conjoint-Analyse wurde versucht, den Interviewten nicht nur nach einzelnen Merkmalen, sondern nach Auswirkungen und Korrelationen spezifischer Merkmale untereinander zu befragen und somit das Gesamtsystem dem Befragenden vor Augen zu führen.

Im Gegensatz zur Primäranalyse wurden bei der Sekundäranalyse bereits aufbereitete Daten aus Literatur, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und dem Internet untersucht und zusammengestellt. Die Sekundäranalyse verfolgte überwiegend das Ziel, den Stand der Technik während der Bearbeitungsphase zu dokumentieren und die gefundenen Anforderungen auf die Problemstellung der innerbetrieblichen Logistik in Minifabriken abzuleiten.

Die beschriebenen Methoden der Primär- und Sekundäranalyse zur Datenerhebung dienten der Recherche bereits bestehender und bekannter Problemstellungen und darauf aufbauend der Übertragung auf die Anforderungen an die innerbetriebliche Logistik. Mit Hilfe der Szenariotechnik war es möglich, die Problemstellung aus einem Blickwinkel zu beleuchten, wie es mit den vorher genannten Methoden nicht machbar gewesen wäre. Dabei wurden strukturiert mögliche Zukunftsentwürfe für das Materialflusssystem erarbeitet, aus welchen sich neue Anforderungen ableiten ließen.

Durch Kategorisierung der aus den angewandten Methoden erhaltenen Rohdaten wurde ein umfassendes und abgesichertes Anforderungsprofil an die innerbetriebliche Logistik von Minifabriken ermittelt. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurden Lösungsansätze für die Gestaltung und Konzeption eines Materialflusssystems bestehend aus autonomen dezentral gesteuerten Materialflussmodulen entwickelt.

Die Wandelbarkeit und die Leistungsfähigkeit eines automatisierten Materialflusssystems ergeben sich zum einen aus der Leistungsfähigkeit und der Flexibilität der einzelnen materialflusstechnischen Komponenten (Lastaufnahmemittel, Transportmittel, Lagertechnik usw.) und zum anderen aus dem Zusammenspiel dieser Komponenten. Dieses Zusammenspiel besteht aus physischen Prozessen wie z.B. der Lastübergabe und aus Kommunikationsprozessen zur Steuerung der Vorgänge. Gerade in komplexen automatisierten Systemen gestaltet sich dieses Zusammenspiel sehr schwierig und ist für die Starrheit und Komplexität heutiger automatisierter Materialflusssysteme

verantwortlich. Deshalb wurden die Defizite der Automatisierungslösungen anhand von technischen Umsetzungen und entsprechender Fallstudien aus der Literatur [31, 19] mit dem Fokus auf der Wandelbarkeit der Anlagen analysiert. Dabei zeigte sich, dass die Automatisierungslösungen meist aus einer zentralen Steuerung (SPS, PC, IPC) mit überwiegend dezentral über einen Feldbus angeschlossenen Aktoren und Sensoren oder intelligenten Feldgeräten bestehen. Die Bustechnologie ersetzt hierbei hauptsächlich die frühere klassischen Parallelverdrahtungen der zentralen Automatisierung und erlaubt zusätzlich, Informationen für die Parametrierung und Diagnose zu übertragen. Aber trotz des Einsatzes von Feldbussystemen stellen die verwendeten Automatisierungslösungen meist abgeschlossene Systeme dar und sind nur veränder- und erweiterbar hinsichtlich vorgeplanter Parameter. Die Kommunikation zwischen weiteren Systemen bzw. Systemkomponenten findet über proprietäre Schnittstellen statt.

Bedingt durch die hohen Anforderungen an die Materialflusssysteme nimmt der Aufwand der zu steuernden Aufgaben zu und führt zu komplexen Automatisierungssystemen mit sehr vielen Steuerungsvorgängen und großen zu verarbeitenden Datenmengen. So stellen schon der Betrieb und die Wartung hohe Anforderungen an das Personal, und spätestens bei einem erforderlichen Umbau bzw. einer Erweiterung der Anlage entsteht ein erheblicher Engineeringaufwand, der bis zur Größenordnung einer kompletten Neuplanung des entsprechenden Systems reichen kann. Eine weitere Ursache hierfür ist die getrennte Optimierung von mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Komponenten der Maschinen bzw. der Materialflussmodule. So wird die Software nach softwaretechnischen, objektorientierten Methoden gestaltet, anstatt den mechanischen Aufbau und dessen Funktionalität abzubilden. Gerade beim Umbau eines komplexen automatischen Systems entstehen hier Probleme, da die Systemgrenzen der Mechanikmodule nicht mit den Systemgrenzen der Softwaremodule übereinstimmen. Damit zeigt sich, dass die heutigen Automatisierungslösungen für Materialflusssysteme die Anforderungen an die Wandelbarkeit, als Voraussetzung für den Einsatz in Minifabriken, nicht ausreichend erfüllen.

Einen Lösungsansatz hierfür bietet eine funktionsorientierte Modularisierung des Materialflusssystems auf Basis der verteilten Automatisierung.

Szenariotechnik

Die Szenariotechnik ist eine methodenbasierte Prognostik, mit deren Hilfe eine Technologieabschätzung der innerbetrieblichen Logistik möglich ist. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Methoden zur Datenerhebung kann das Szenariomanagement tief

gehender auf die vorliegende Problematik der innerbetrieblichen Logistik in Minifabriken angewandt werden.

Dabei wurden auf Grundlage von Schlüsselfaktoren drei Szenarios (Worst-Case, Trend, Best-Case) abgeleitet und formuliert. Bei der Erstellung der Schlüsselfaktoren wurde besonderer Wert auf eine möglichst umfassende, dabei aber lösungsneutrale Beschreibung des neuen innerbetrieblichen Logistiksystems gelegt. Aufgrund der Vielzahl an erarbeiteten Schlüsselfaktoren wurden diejenigen Kriterien ermittelt, die einen hohen Einfluss auf andere Kriterien besitzen, aber gleichzeitig auch von diesen stark beeinflusst werden. Diese so genannten kritischen Kriterien eigneten sich besonderes für die Beschreibung von Schlüsselfaktoren für die drei folgenden beschriebenen Szenarios.

Das Szenario „Worst-Case“ grenzt das Spektrum der möglichen Ausprägung der Schlüsselfaktoren nach unten ab. Hier wird das denkbar schlechteste Logistikumfeld für die Produktion individualisierter Produkte beschrieben. Im „Trend“-Szenario werden mögliche Ausprägungen der Entwicklung gemäß eines heute absehbaren Trends berücksichtigt. Das Szenario „Best-Case“ grenzt das Spektrum der möglichen Ausprägungen der Schlüsselfaktoren nach oben hin ab. Es beschreibt die denkbar beste Lage für die Logistik in einem Unternehmen, das individualisierte Produkte absetzen will.

Basierend auf diesen Szenarios wurden Anforderungen an die innerbetriebliche Logistik in Minifabriken generiert. Dabei stand bei der Analyse der Szenarios im Vordergrund, sich nicht auf ein einziges Szenario zu konzentrieren, sondern gültige Anforderungen in möglichst allen Zukunftsprojektionen zu erarbeiten.

Funktionsorientierte Modularisierung auf Basis der verteilten Automatisierung

Für die Konzeption eines automatisierten wandelbaren Materialflusssystems und dessen materialflusstechnischen Komponenten, das den Anforderungen der Produktion individualisierter Güter in Minifabriken genügt, wurde als Gestaltungsmethode eine funktionsorientierte Modularisierung in Verbindung mit einer mechatronischen Betrachtungsweise angewendet. Bei dieser Methode wird das Materialflusssystem aus mechatronischen Modulen aufgebaut, deren Modulgrenzen entsprechend der Funktionalität gezogen und die nach dem Konzept der verteilten Automatisierung automatisiert sind.

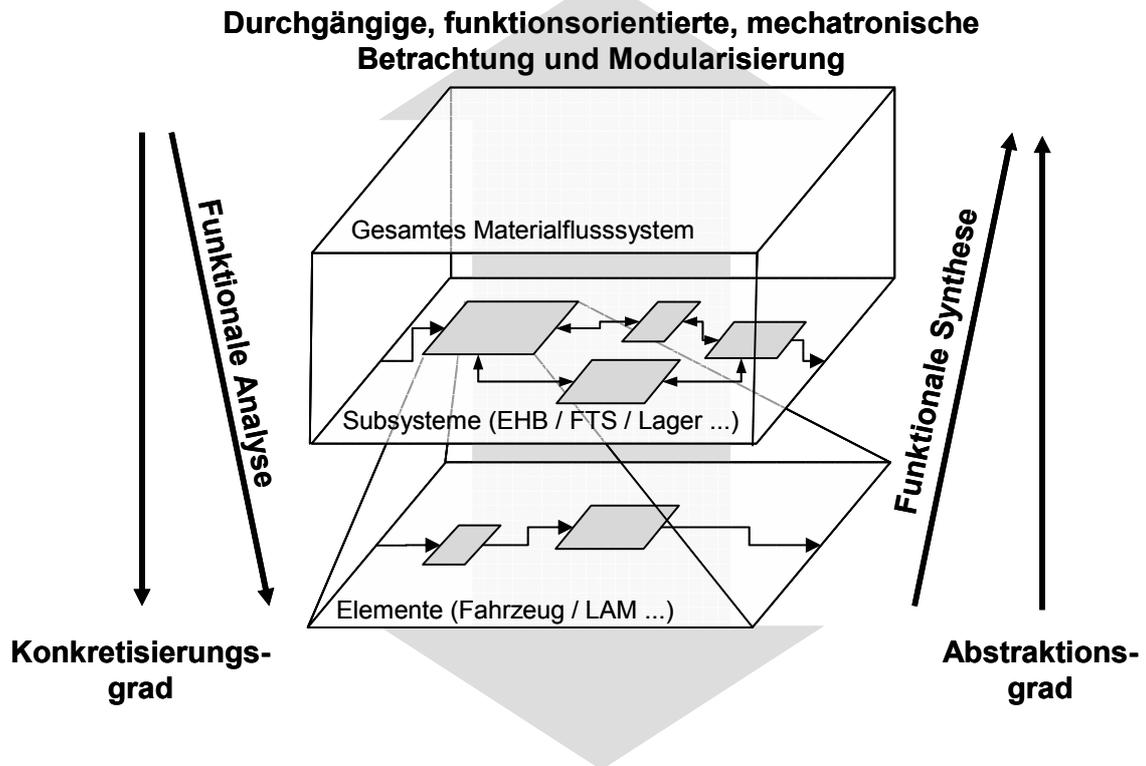


Bild 2: Methodisches Vorgehen bei einer funktionsorientierten Modularisierung

Das Konzept der verteilten Automatisierung, auch verteilte Intelligenz bzw. Distributed Automation genannt, vereint die Vorteile der zentralen und dezentralen Automatisierung miteinander. Alle Teilnehmer stellen autonome mechatronische Module dar, deren gesamte Funktionalität in Form von Mechanik, Elektrik und Steuerung zu einer mechatronischen Funktionseinheit vereinigt wird. Gepflegt und spezifiziert wird dieser offene Standard für die Automatisierungstechnik von der IDA-Organisation (Interface for Distributed Automation) [15]. Weitere Organisationen wie die PROFIBUS Nutzerorganisation bieten ähnliche Konzepte an [28].

Um ein wandelbares Materialflusssystem zu gestalten, wird es aus mechatronischen Modulen aufgebaut. Ein Modul kann dabei je nach Granulierung ein Subsystem z.B. ein Lagerbereich oder ein Elektrohängebahnsystem (EHB) etc. sein. Subsysteme bestehen aus Elementen wie z.B. Fahrzeugen und diese wiederum aus Basiselementen wie Antrieb, Fahrwerk etc. Die Anzahl der Hierarchiestufen ist dabei variabel, solange die betrachteten Module immer eigenständige Funktionseinheiten mit klaren, eindeutigen Schnittstellen darstellen. Über eine mechatronische Schnittstelle lassen sich die Module zu Subsystemen und Systemen zusammenschalten. Dabei vereinigen sich die Funktionalitäten,

Leistungsfähigkeiten und Schnittstellen der Module in einem größeren Modul. Verschmelzen bei diesem Prozess die Systemgrenzen der Basismodule, so stellt das neue Modul die kleinste eigenständige Funktionseinheit dar:

Basierend auf dieser Methode der Modularisierung, bei der das Materialflusssystem mit Hilfe einer funktionsorientierten Betrachtung in autonome mechatronische Module gegliedert wird (Bild 2), wurde ein Fahrzeugsteuerungskonzept auf Geräteebene für wandelbare dezentral gesteuerte EHB-Systeme entwickelt.

3.4 Ergebnisse und ihre Bedeutung

3.4.1 Anforderungen an wandelbare Logistikstrukturen und Auswahl geeigneter Lösungsansätze

Die Ergebnisse der Arbeitspakete „Anforderungen an technische Logistikstrukturen für Minifabriken“, „Entwicklung eines Logistik-Referenzszenarios für die Produktion eines Service Roboters“ und „Systematische Bewertung vorhandener Ansätze“ aus der Analysephase stellen sich folgendermaßen dar.

Bevor die Anforderungen an die technischen Logistikstrukturen in Minifabriken und darauf aufbauend ein geeignetes Bewertungsverfahren erarbeitet werden konnten, musste zuerst zur Abgrenzung des Untersuchungsfeldes der Begriff „Minifabrik“ in Bezug auf innerbetriebliche Logistik definiert werden. Diese Definition wurde in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten I2, M1 und den anderen M-Projekten im Arbeitskreis Minifabrik erarbeitet.

Nachfolgend sind die erarbeiteten Merkmale einer Minifabrik aufgeführt, die besonders für die Logistik von großer Bedeutung sind:

- Vernetzung:

Die Minifabriken sind miteinander vernetzt und bilden ein dynamisches, wandelbares Netzwerk, in dem nur bedingt vorplanbare Material- und Informationsflüsse in Form von Produktionseinrichtungen, Teilen, Prozess- und Entwicklungswissen stattfinden.

- Potenzial und angebotenes Produktspektrum der Minifabrik:

Das Potenzial der Minifabrik wird zu Beginn nur bedingt festgelegt und ist ständig erweiterbar. Für das Produktspektrum bedeutet dies, dass die Produktion auf eine

bestimmte Produktgruppe (z.B. Hochdruckreiniger) ausgelegt wird und ohne großen Aufwand auf neue, vergleichbare Produkte angepasst werden kann.

- Produktion:

Je nach produziertem Produktspektrum ist in einer Minifabrik die Fertigungstiefe unterschiedlich. Eine Minifabrik wird nicht alle Teile selbst fertigen, sondern einen gewissen Anteil von Extern beziehen. Dabei können andere Minifabriken, andere Unternehmen oder sogar der Kunde als Bauteillieferant dienen. Die kundenindividuellen Teile können nicht vorproduziert und auf Lager gehalten werden, da sie erst nach Erfassung des Kundenwunsches hergestellt werden können. Auftragsneutrale Bauteile werden in auftragsneutralen Produktionsbereichen nach konventionellen Verfahren und Strategien hergestellt oder zugekauft (z.B. Schrauben).

Für die Logistik der Minifabrik bedeuten diese Merkmale, dass sie auf ein bestimmtes Potenzial/Produktspektrum ausgelegt wird, sich aber schnell und einfach an Änderungen und Erweiterungen anpassen lassen muss. Dabei müssen neben individuellen, u. U. nicht wiederholbaren Transportaufträgen, mit der Losgröße 1 auch Transportvorgänge für Kleinst- und Kleinserien abgewickelt werden können.

Aufbauend auf den oben erwähnten Merkmalen einer Minifabrik und deren Bedeutung für die Logistik wurde in den ersten drei Arbeitspaketen ein spezielles Anforderungsprofil mit zugehörigem Bewertungsverfahren für die Wandelbarkeit eines Materialflusssystem entwickelt. Da die erarbeiteten Daten weder in der Primär- noch in der Sekundäranalyse eine Differenzierung hinsichtlich des in der Antragsstellung genannten branchen-, standort- und produktspezifischen Profils ergaben, wurde ein allgemeingültiges Anforderungsprofil und Bewertungsverfahren für die innerbetriebliche Logistik in Minifabriken erarbeitet.

Das Materialflusssystem einer Minifabrik wird entsprechend dem angebotenen Produktspektrum und dem anfänglichen Produktionsumfeld ausgelegt. Daraus ergibt sich das Potenzial des Materialflusssystem. Dieses Potenzial entsteht aus der Fördergutflexibilität, der Layoutflexibilität und der Durchsatzflexibilität der materialflusstechnischen Komponenten und lässt sich als operative Wandelbarkeit bezeichnen. Dabei definieren sich die Flexibilitätskriterien wie folgend [43, 46]:

- Fördergutflexibilität:

Das System muss in der Lage sein, unterschiedlichste Produkte, unabhängig von deren Abmessung und Gewicht, transportieren zu können.

- Layoutflexibilität:
Jeder Ort in der Fabrik muss bedient werden können, bzw. das Materialflusssystem muss sich schnell auf veränderte Materialflüsse einstellen können.
- Durchsatzflexibilität:
Durchsatzflexible Materialflusssysteme müssen sich den Leistungsänderungen der Produktion durch geeignete Maßnahmen anpassen können. Exemplarisch für solche Maßnahmen sollen an dieser Stelle die Erhöhung der Fördermittel, die Auswahl alternativer Wegstrecken und die Variation der Anzahl der zu befördernden Güter pro Fördermittel genannt werden, um eine Durchsatzflexibilität zu gewährleisten.

Mit der operativen Wandelbarkeit werden Schwankungen im laufenden Betrieb, wie z.B. Auftragsmengenschwankungen und geringfügige Änderungen innerhalb des vorgegebenen Produktspektrums in kurz- und mittelfristiger Hinsicht gehandhabt.

Um zu gewährleisten, dass ein Materialflusssystem in der Lage ist, auf jedes ungeplante Ereignis bzw. Aufgabe reagieren zu können, müssten diese drei Anforderungen aber zu 100 Prozent erfüllt sein. Ein mit einer Serienproduktion vergleichbarer wirtschaftlicher Betrieb wäre unter diesen Gesichtspunkten nicht zu realisieren.

Damit jedoch ein Materialflusssystem so gestaltet werden kann, dass eine Reaktion auf ungeplante Ereignisse und trotzdem noch ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist, müssen zusätzlich folgende Eigenschaften erfüllt werden:

- Erweiterungsfähigkeit:
Eine Erweiterung des Produktionsbereiches erfordert von Materialflusssystemen, dass sowohl neue Hallenbereiche als auch zusätzliche Übergabepplätze innerhalb bestehender Bereiche bedient werden können. Es wird dabei die Möglichkeit verstanden, ein bestehendes Materialflusssystem durch Hinzufügen von systemeigenen Bauteilen und Fahrzeugen zu erweitern.
- Integrationsfähigkeit:
Sie beschreibt nicht nur die Fähigkeit, Materialflusssysteme auf steuerungstechnischer Seite in Leit- oder PPS-Systeme zu integrieren, sondern auch die Fähigkeit, technische und steuerungstechnische Verbindungen mit anderen Materialflusssystemen eingehen zu können. In Ergänzung zur Erweiterungsfähigkeit bezieht sich die Integrationsfähigkeit deshalb auf das Hinzufügen von verschiedenartigen Materialflusssystemen. Diese Integration soll unabhängig vom Materialflusssystem und Hersteller möglich sein. Um die Integrationsfähigkeit zu gewährleisten, ist es notwendig, dass die einzelnen

Systeme über offene, standardisierte mechanische, elektrische und steuerungstechnische Schnittstellen, auch als standardisierte mechatronische Schnittstelle bezeichnet, verfügen. In wandelbaren Materialflusssystemen zählt die Integrationsfähigkeit als Ausschlusskriterium und muss auf jeden Fall erfüllt sein.

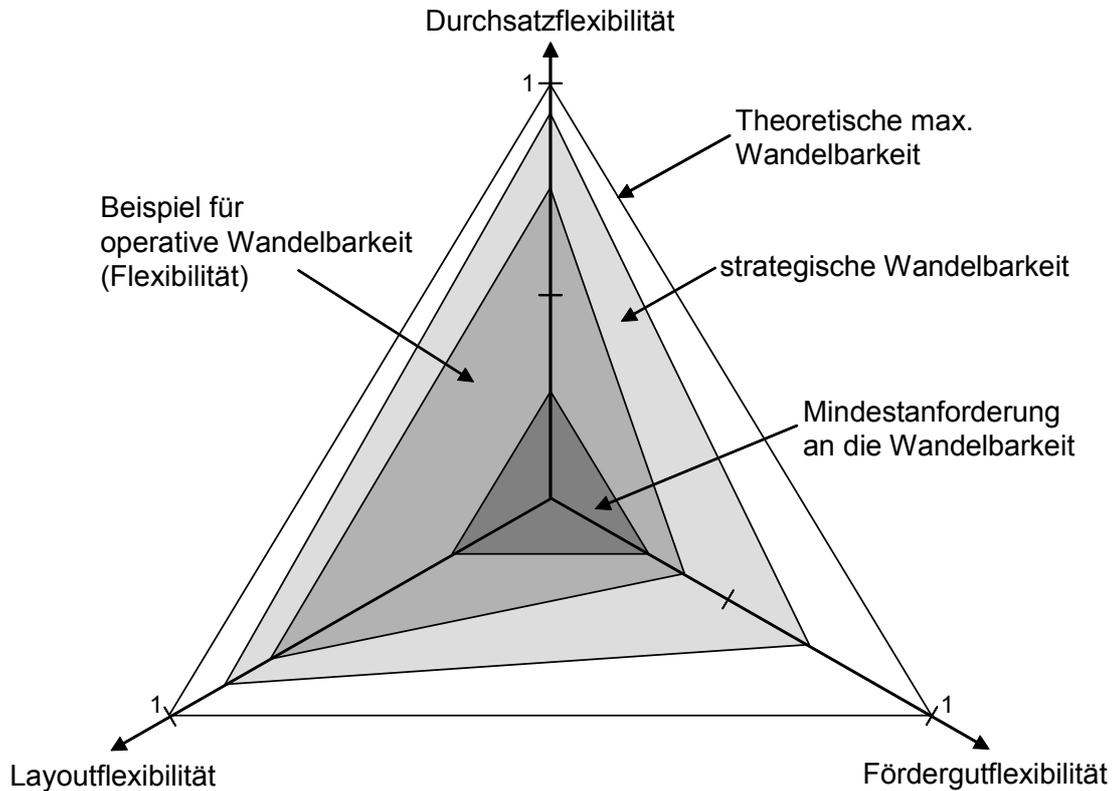


Bild 3: Beurteilung der Wandelbarkeit eines Materialflusssystems (Beispiel)

Mit den Eigenschaften Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit besitzt das Materialflusssystem in einer Minifabrik nun die Fähigkeit, auf vorab nicht geplante Änderungen zu reagieren. Diese Art der Reaktionsfähigkeit wird als strategische Wandelbarkeit bezeichnet. Dabei werden Reaktionen auf Änderungen mit eher mittel- und langfristigem Charakter wie z.B. der Umstieg auf ein neues, völlig verschiedenartiges Produktspektrum beschrieben. Die strategische Wandelbarkeit macht sich dabei in der Erhöhung der Wandelbarkeitskriterien Fördergutflexibilität, Layoutflexibilität und Durchsatzflexibilität bemerkbar (Bild 3). Anhand dieser Kriterien ist es möglich, über die Fläche des sich ergebenden Dreieckes die Wandelbarkeit (operativ und strategisch) eines Materialflusssystems quantitativ zu bewerten und somit eine Basis für den Vergleich verschiedener Varianten zu liefern [49]. Eine Gewichtung hinsichtlich gewünschter Anforderungen (z.B. Layoutflexibilität) erreicht man mit der Verwendung eines Formfaktors.

Aufbauend auf das beschriebene Anforderungsprofil wurde ein Referenzszenario für ein wandelbares Materialflusssystem entworfen, das als Grundlage für weiterführende Konzeptentwicklungen dient (Bild 4). Das Referenzszenario beinhaltet schon wesentliche Ergebnisse des Arbeitspaktes 4 „Konzeption autonomer, flexibler, konfigurierbarer Materialflusstechnik“. Es wurde auf der Basis der Produktion eines Hochdruckreinigers der Firma Kärcher GmbH, die als Projektpartner im SFB 582 zur Verfügung steht, aufgebaut. Auf eine genaue Beschreibung des im Referenzszenario umgesetzten Materialflusssystems wird in Kap. 3.4.2 detailliert eingegangen.

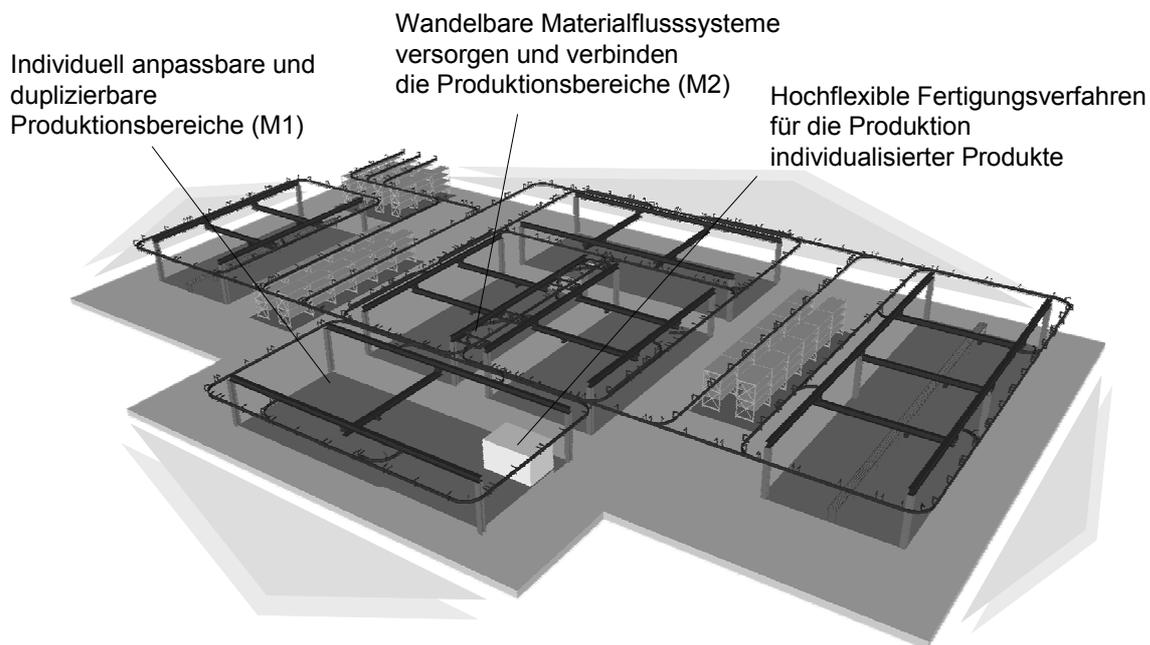


Bild 4: Referenzszenario für ein wandelbares Materialflusssystem

3.4.2 Konzeption autonomer, flexibler, konfigurierbarer Materialflusstechnik

Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes wurden direkt in die Erstellung des Referenzszenarios für ein wandelbares Materialflusssystem umgesetzt (siehe Kap. 3.4.1). Dabei wurden in einem ersten Schritt bereits bestehende Materialflusssysteme hinsichtlich der Wandelbarkeit auf ihre Eignung in einer Minifabrik untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass insbesondere eine Kombination aus Hängekran und Elektrohängebahn (EHB)

für den Einsatz in Minifabriken geeignet ist (Bild 5). Eine Vorauswahl weiterer geeigneter Materialflussmittel ist in Bild 5 grau hinterlegt dargestellt.

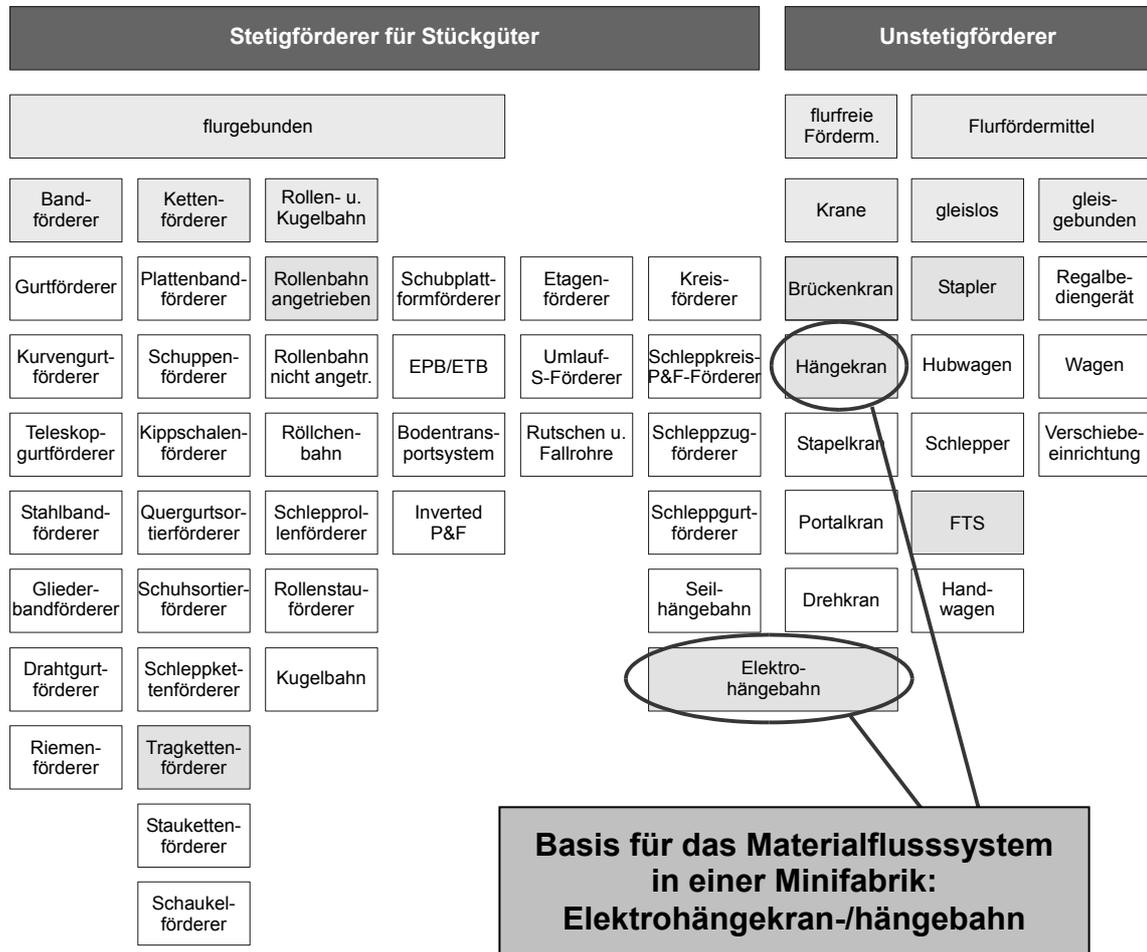


Bild 5: Fördermittelübersicht: Eingrenzung und Vorauswahl geeigneter Materialflussmittel [48]

Die einzelnen Produktionsbereiche, in denen die Fertigungsmaschinen stehen, werden von einem Hängekran von oben bedient. So ist jeder Ort im Produktionsfeld erreichbar und damit die Layoutflexibilität gewährleistet. Zusätzlich findet kein Flächenverbrauch durch Transportwege statt, da sich der Materialfluss im Überflurbereich abspielt. Die Kranfelder sind von EHB-Schienen umgeben. So lassen sich neue Bereiche erschließen und beliebig miteinander verbinden. Dabei fahren die EHB-Fahrzeuge mit ihrer Last auf die Kranbrücken auf und können so individuell jeden Punkt im Produktionsbereich bedienen.

Im Rahmen des Produktspektrums, für das das System ausgelegt wurde, ist das System fördergutflexibel. Bei einem Wechsel des Produktspektrums muss aber bei Bedarf durch geeignete Maßnahmen und neue Konzeptionen eine höhere Fördergutflexibilität

gewährleistet werden. Die Lastaufnahmemittel und die Tragfähigkeit der Kranbrücken sind hauptsächlich für die Fördergutflexibilität verantwortlich. Deshalb müssen zum einen die Lastaufnahmemittel austauschbar gestaltet sein. Dies lässt sich mit einem funktionsorientierten modularen Aufbau erreichen. Aus wirtschaftlichen und aus sicherheitstechnischen Gründen ist es zu empfehlen, Standardtransporthilfsmittel einzusetzen. Zum anderen ließe sich durch das Zusammenkoppeln zweier Einträgerkranbrücken die Tragkraft erhöhen. Damit muss kein stärkerer Kran für seltene Transportaufträge mit großen Lasten bereitgehalten werden, der den Bedienbereich des Kranfeldes verkleinern und einen Kostenfaktor darstellen würde. Stattdessen benötigt man nur eine entsprechende Zweitträgerkranbrücke, die auf einer Stichbahn bereitsteht und im Bedarfsfall auf die zusammengekoppelten Einträgerkranbrücken auffahren kann.

Die Durchsatzflexibilität ist im EHB-Bereich durch das Hinzufügen weiterer Fahrzeuge sehr gut gewährleistet. Ebenso erlaubt der variable Aufbau die Wahl alternativer und kürzerer Routen (vgl. Kap 3.4.3). Im Kranfeld ist aber die Durchsatzflexibilität eingeschränkt. Um den Durchsatz zu steigern, bietet sich die Möglichkeit, in das Kranfeld eine weitere Kranbrücke einzubauen. Zwar bringt ein zusätzlicher Kran noch keine Durchsatzsteigerung mit sich, da er seriell geschaltet ist. Aber durch geschicktes Auftragmanagement und Anordnung der Fertigungseinrichtungen im Produktionsfeld ließe sich durch Hinzufügen weiterer Kranbrücken eine Steigerung des Durchsatzes erreichen. Eine weitere Möglichkeit zur Durchsatzsteigerung besteht in der Verwendung von Multiple-Load-Lastaufnahmemitteln, d.h. man kann mehr als ein Fördergut auf einmal transportieren. Ebenso lassen sich durchsatzkritische Bereiche direkt von dem EHB-System versorgen.

Die Erweiterungs- und Integrationsfähigkeit erlaubt den Modulen des Elektrohängekran/-hängebahnsystems, mit weiteren Materialflusssystemen wie FTS, Stapler, Stetigförderer zusammenzuarbeiten. Diese benutzen die Gänge unterhalb der EHB und können ihre Ladung direkt oder an Überplätzen an die Produktionseinrichtungen bzw. andere Materialflusssysteme abgeben.

Die Übergabepunkte stellen einen wichtigen Bestandteil des Materialflusssystem dar, da sie quasi die Schnittstellen zu anderen Materialflusssystemen bzw. Produktionseinrichtungen darstellen und somit für Integrationsfähigkeit des Systems verantwortlich sind. Basierend auf den Anforderungen an die Wandelbarkeit müssen Übergabepunkte folgende Eigenschaften besitzen (Bild 6):

Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none">- funktionsorientiert modularisiert- leicht verschiebbar- universell einsetzbar- manuelle und automatische Bedienung- leicht und schnell umrüstbar- Variabilität der Positioniersysteme- Bedienung von oben und den Seiten- muss den geforderten Kapazitäten entsprechen- direkter Datenaustausch zwischen allen Materialflusssystemen und der Übergabestation muss gewährleistet werden- Kommunikation auf Basis von Simple Object Access Protocol (SOAP) und Extensible Markup Language (XML)- Identifikation des Fördergutes

Bild 6: Eigenschaften eines Übergabeplatzes

Ausgehend von der aufgeführten Anforderungsliste wurden zwei grundsätzliche Konzeptionen für einen passiven und einen aktiven Übergabeplatz entwickelt. Ein passiver Übergabeplatz dient zur passiven Behälteraufnahme. Er zeichnet sich durch den einfachen Aufbau mit damit verbundener kostengünstiger Herstellung und seine Mobilität aus.

Der aktive Übergabeplatz besteht aus einem Drehtisch auf dem sich ein Rollenförderer für die Längsaufnahme und ein kreuzender Tragkettenförderer für die Queraufnahme von Transporthilfsmitteln befinden (Bild 7). Dies bietet die Möglichkeit, Behälter quer und längs an unterschiedliche Positionen auf und abzugeben, sogar falls nötig mit Änderung der Ausrichtung. Er bietet Puffermöglichkeiten und eine gleichzeitige Auf- und Abgabe von Lasten. Dabei kann er sowohl von flurgebundenen, flurfreien, Stetig- und Unstetigförderern bedient werden (FTS, EHB, Brückenkran, Rollenbahn, Stapler, Manuell,...). Der aktive Übergabeplatz kann Behältergrößen bis zu 1200x600 mm aufnehmen. Für die Aufnahme von größeren Behältertypen (z.B. Gitterbox, Europalette) ist eine Aufnahmevorrichtung integriert, die eine passive Übergabe gewährleistet. Dieser Aufbau erfüllt sehr gut die Anforderungen an die Wandelbarkeit.

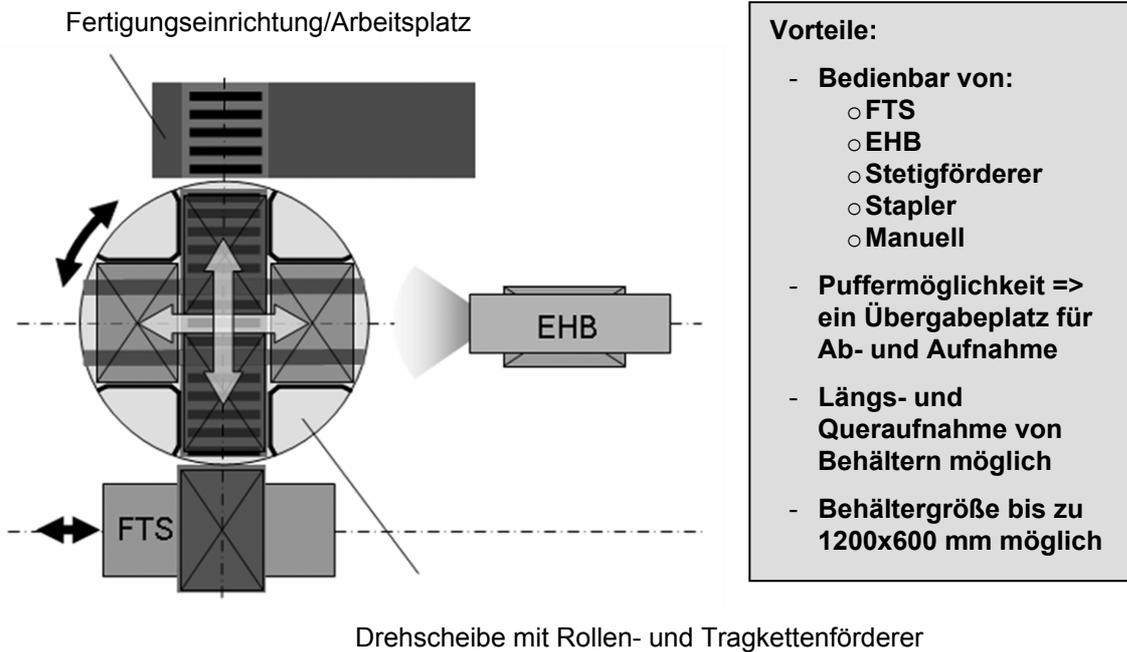


Bild 7: Konzept für einen aktiven, wandelbaren Übergabepplatz

Die angestrebten kurzen Durchlaufzeiten der kundenindividuellen Aufträge und die damit verbundene Reduzierung von Beständen erfordern dynamische, wandelbare Lagersysteme, die über eine innere und äußere Mobilität verfügen. Dabei kommt den fertigungsnahen, temporären Pufferlagern eine besondere Bedeutung zu. Ein Konzept, das diese Anforderung erfüllt, sind Verschiebebodenregallager sowohl für Großladungsträger (z.B. Gitterboxen) als auch für Kleinladungsträger. Die einzelnen Behälter werden dabei über ein Überflurssystem (z.B. Brückenkran) direkt ohne Hilfe von Bedienelementen in das Lager eingelagert. Durch die Möglichkeit der Verschiebung der einzelnen Ebenen ist es möglich, die Behälter in jeder Ebene auf jedem gewünschten Platz abzulegen. Da jeder Aufnahmeplatz mit verschiedenen Aufnahmeadaptoren ausgestattet werden kann, ist das Lagern unterschiedlicher KLT-Behältergrößen (Kleinladungsträger) möglich. Bedingt durch eine kompakte Containerbauweise kann man nicht nur das Verschiebebodenregallager innerhalb der Minifabrik z.B. mit einem Brückenkran oder Stapler verschieben, sondern auch über die Straße mit anderen Minifabriken austauschen.

In den nächsten Arbeitpaketen wurden Konzepte für die Integrations- und Erweiterungsfähigkeit auf der steuerungstechnischen Ebene entworfen, die es ermöglichen, die in diesem Abschnitt beschriebenen materialflusstechnischen Module schnell in ein Gesamtmaterialeflusssystem zu integrieren.

3.4.3 Konzepte autonomer Gerätesteuernngen

Aufbauend auf die in den ersten Arbeitspaketen zusammengestellten Anforderungen an die Wandelbarkeit und unter Berücksichtigung der Methode der funktionsorientierten Modularisierung und dem Konzept der verteilten Automatisierung, wurde ein Fahrzeugsteuerungskonzept für ein Elektrohängebahn/-Hängekransystem entwickelt und prototypenhaft umgesetzt.

Gerade von dem Automatisierungskonzept der Materialflussmodule hängt es ab, ob ein Materialflusssystem wandelbar und wirtschaftlich sein kann und ob der Zielkonflikt zwischen hoher Produktivität durch Automatisierung und der damit verbundenen sinkenden Flexibilität aufgelöst werden kann. Einen Lösungsansatz bietet das Konzept der verteilten Automatisierung an, das die Vorteile einer zentralen Automatisierung (eine Datenbasis und ein Steuerungsprogramm => Keine Redundanz) mit denen einer dezentralen Automatisierung (geringer Komplexität, Modularisierung möglich) verknüpft. Bei diesem Konzept besteht ein System aus autonomen mechatronischen Funktionseinheiten, die über eine mechatronische Schnittstelle miteinander gekoppelt werden können. Die Kommunikation zwischen den Modulen findet auf einer durchgängigen, systemunabhängigen Verbindungsschicht auf Basis von Ethernet, XML und SOAP statt (siehe Kap. 3.4.5). Dieser Aufbau bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Da die Systemgrenzen von Mechanik, Elektrik und Steuerung identisch sind, lassen sich die Module unabhängig von einander testen, in Betrieb nehmen und austauschen. Somit verkürzen sich die Inbetriebnahmezeiten, da Parallel- und Teilinbetriebnahmen bzw. Vorabtests beim OEM möglich sind. Außerdem erhöht sich die Verfügbarkeit des Gesamtsystems, da die Applikationen vor Ort im Gerät autark ablaufen und Steuerungsfehler sich eindeutig dem ausgefallenen Modul zu ordnen lassen (Vermeidung von redundanten Steuerungsvorgängen). Diese Vorteile ermöglichen eine Realisierung der beiden Wandelbarkeitskriterien Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit auf Seiten der Automatisierungsebene.

Wendet man dieses beschriebene Konzept auf eine Elektrohängebahn/-Hängekrananlage an, die aus autonomen, intelligenten, dezentral gesteuerten Fahrzeugen besteht, ergibt sich der folgende Aufbau (Bild 8).

Ein Fahrzeug (Katze) besteht aus mehreren Basiselementen, wie z.B. dem Antrieb, dem Hubwerk und der Wegerfassung. Diese Basiselemente sind autonome Funktionseinheiten mit mechatronischen Systemgrenzen und bilden zusammenschaltet wiederum ein autonomes Element wie z.B. ein Fahrzeug einer EHB. Die Eigenschaften, Fähigkeiten und

Schnittstellen des Elementes entstehen aus der Synthese der Eigenschaften, Fähigkeiten und Schnittstellen der Basiselemente. Sollten sich bei dieser Synthese die Systemgrenzen der Basiselemente miteinander vermischen, stellt das neu entstandene Element wiederum das kleinste Basiselement dar.

Basiselemente des Elements „Fahrzeug“ (Bsp.: Katze einer EHB)	Basiselemente der Fahrbahn (Bsp.: Elektrohängebahn/Hängekrananlage)	
	Passive Basiselemente	Aktive Basiselemente
<ul style="list-style-type: none"> - Fahrwerk (Antrieb, Bremsen, Räder, Fahrgestell, Energiezuführung) - Lastaufnahmemittel - Hubwerk - Sicherheitseinrichtungen (Kollisionsschutz, Lastabsturz) - Kommunikationsmodul - Wegmesssystem ... 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrschienen (Kurven/Geraden) - Befestigungen - Tragwerk 	<ul style="list-style-type: none"> - Verzweigungen: <ul style="list-style-type: none"> o Weichen o Drehscheiben o Kranbrücken o Kreuzungen - Vertikale Umsetzeinrichtungen (Etagenförderer, Hub-/ Senkstationen)

Bild 8: Beispiel für die Modularisierung einer EHB-Anlage

Die Fahrbahn bildet wie ein Fahrzeug ein autonomes mechatronisches Element im Materialflusssystem und hat die Aufgabe, den Fahrzeugen die Wege zu den verschiedenen Orten des Materialflusssystem zur Verfügung zu stellen.

Eine Fahrbahn lässt sich in passive und aktive Wegelemente klassifizieren. Aktive Elemente unterscheiden sich von den passiven, indem sie Bewegungen bzw. Veränderungen des Fahrweges vornehmen können. Somit müssen bei passiven Elementen nur die mechanischen (Traglast, Geometrie usw.) und elektrischen Schnittstellen (Stromversorgung usw.) des Elementes beschrieben werden. Bei den aktiven Elementen hingegen kommt die Beschreibung der steuerungstechnischen Schnittstelle hinzu, da in diesen Elementen Steuerungsvorgänge stattfinden.

Entsprechend des Konzeptes der verteilten Automatisierung müssen der Aufbau und die Funktionalitäten der Fahrbahn steuerungstechnisch hinterlegt werden. Dies geschieht, indem die aktiven Elemente (Verzweigungen) als globale Wegpunkte betrachtet werden, die über passive Elemente miteinander verbunden sind und so den gesamten Fahrweg darstellen. Trägt man nun die globalen Wegpunkte in die Zeilen und Spalten einer Matrix

ein und füllt deren Eigenschaftsfelder mit den Daten der passiven Wegelemente, erhält man das steuerungstechnische Abbild des Fahrbahnnetzes (Waypointmatrix; Bild 10).

Aufbauend auf den Wandelbarkeitsanforderungen und unter Berücksichtigung des Konzeptes der verteilten Automatisierung wurde für den SFB 582 folgendes Fahrzeugsteuerungskonzept für ein wandelbares Materialflusssystem in Minifabriken entwickelt, das anhand des folgenden Analogiebeispielles veranschaulicht werden soll.

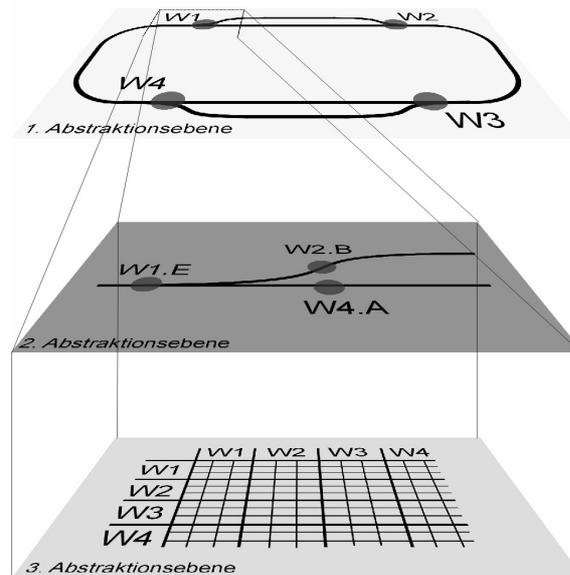


Bild 9: Vorgehensweise zur Erstellung der Waypointmatrix

Das Straßennetz mit den Autofahrern stellt ein wandelbares Materialflusssystem dar. Jeder Autofahrer kann jeden Ort erreichen und dabei die unterschiedlichsten Dinge transportieren, und das unabhängig von den anderen Autofahrern. Möchte ein Autofahrer von München nach Berlin fahren, plant er seine Route mit einer Straßenkarte und orientiert sich unterwegs an den Ortsschildern bzw. Wegweisern. Dabei spielt es für ihn im Gegensatz zu einem automatisierten System keine Rolle, ob er an zwei oder mehreren Abzweigungen vorbeikommt oder sogar eine Umleitung fahren muss. Dadurch erweist sich der Autofahrer durch seine Wandelbarkeit gegenüber einem starren Automatisierungssystem überlegen. In dem entwickelten Fahrzeugsteuerungskonzept wird gezeigt, wie man das Verhalten eines Autofahrers auf ein automatisiertes Materialflusssystem (Bsp. EHB) übertragen und so die gleiche Wandelbarkeit erzielen kann (Bild 9). Dazu wird jeder Verzweigung ein globaler Waypoint zugewiesen (1. Abstraktionsschritt). In einem zweiten Abstraktionsschritt betrachtet man das System

mechatronisch. Da eine Weiche drei mechanische Ein- bzw. Ausgänge besitzt, muss also jedem Ein-/Ausgang ein lokaler Waypoint zugeordnet werden. Diese Waypoints sind einfache Transponder, die an der Schiene befestigt sind und über eine eindeutige Kennung verfügen. Die Transponder stellen gewissermaßen die informationstechnische Abbildung der realen Verzweigungen dar. Man kann sie mit Wegweisern an einer Kreuzung vergleichen. Des Weiteren wird für die Wegplanung noch eine Art Straßenkarte benötigt. Darum werden in einem dritten Abstraktionsschritt die Waypoints mit ihren Verbindungen und den Eigenschaften dieser Verbindungen in eine Matrix eingetragen. Zu den Eigenschaften gehören z.B. die Länge, die Kapazität, die Durchfahrtsrichtung, usw.

Die Waypointmatrix stellt einen gemeinsamen Datenpool dar, auf den sowohl die Fahrzeuge, wie auch die Weichenmodule zugreifen. Sie spiegelt das Layout, die Eigenschaften und den aktuellen Zustand des Materialflusssystems wider. Die Informationen in der Matrix sind mit der Datensprache XML kodiert (vgl. Kap 3.4.5). So lässt sich die Matrix jederzeit für neue Funktionen und Teilnehmer erweitern und verändern, ohne dass in die Programmierung der bestehenden Teilnehmer eingegriffen werden muss.

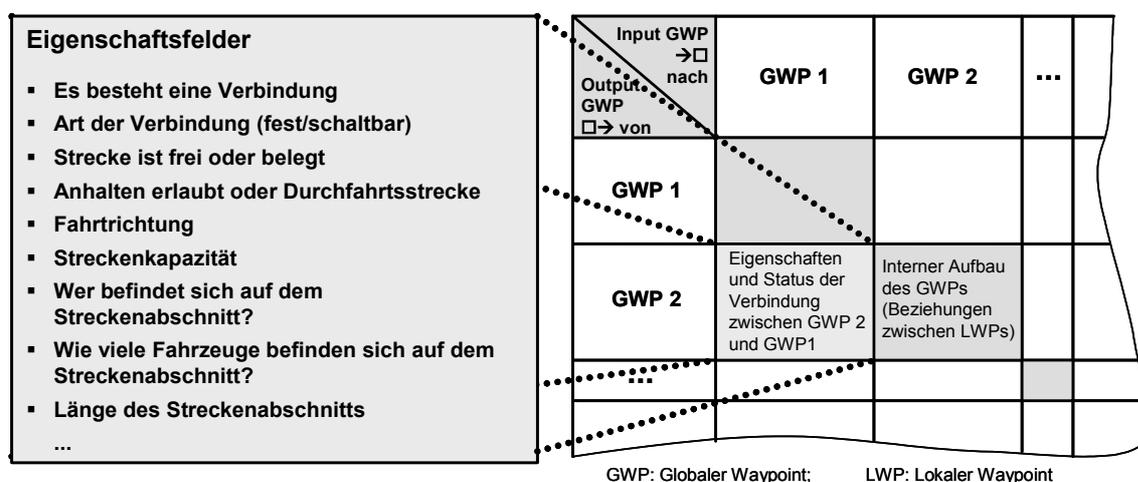


Bild 10: Aufbau der Waypointmatrix

Im Detail läuft die Wegplanung folgendermaßen ab. Bekommt nun ein Fahrzeug den Auftrag von W1 nach W3 zu fahren, liest es sich die zentral abgelegte Waypointmatrix aus und plant selbstständig seinen Weg. Die geplante Route wird in die Matrix eingetragen, und die Waypointmatrix zurück auf einen zentralen Server geschrieben. Danach ist das nächste Fahrzeug an der Reihe, sich die Matrix auszulesen und seinen Weg zu planen. Ebenso lesen die Weichenmodule die Matrix aus und erfahren so, wie sie sich zu stellen haben.

Zu den Vorteilen dieses Steuerungskonzeptes gehört es, dass es layoutflexibel ist, da jede physische Veränderung des Schienenverlaufes schnell und einfach an einem Ort, der Waypointmatrix, steuerungstechnisch hinterlegt wird. Dafür müssen die Steuerungsprogramme der Fahrzeuge nicht umprogrammiert werden, wie es sonst bei dezentral gesteuerten Fahrzeugen nötig wäre.

Auch bietet das Konzept eine hohe Durchsatzflexibilität. Es können jederzeit Fahrzeuge hinzugefügt oder entfernt werden, ohne dass in die Software der anderen Fahrzeuge eingegriffen werden muss. Dazu lassen sich die Schienen bidirektional befahren, was erlaubt, den kürzesten direkten Weg zu nehmen. Ein Fahrzeug reserviert nur die Fahrtrichtung und muss nicht unbedingt die ganze Strecke für sich sperren. So können nachfolgende Fahrzeuge die Teilstrecken in gleicher Fahrtrichtung mitbenutzen.

„Intelligente“ und „dumme“ Fahrzeuge können nebeneinander in dem gleichen System operieren, da sie unabhängig von einander sind. Möchte z.B. ein Fahrzeug eine bestimmte Strecke befahren und diese somit für andere Fahrzeuge sperren, wird dies in der Waypointmatrix in dem Eigenschaftsfeld des entsprechenden Streckenabschnittes vermerkt. Das Fahrzeug muss also nicht jedes weitere Fahrzeug direkt über seine Absichten informieren, sondern kann dies für alle über die Waypointmatrix erledigen und damit auch unbekannte Teilnehmer erreichen.

Die Wegplanung kann dezentral auf dem Fahrzeug bzw. für alle zentral über einen Wegplaneragenten realisiert werden. Dieser Wegplaneragent lässt sich mit einem Verkehrsleitsystem auf Autobahnen vergleichen. Er analysiert parallel zu den Fahrzeugen die Waypointmatrix und das reale Geschehen in der Anlage. Bemerkte er Staubildungen, kann er eingreifen, indem er die Waypointmatrix umschreibt, um so z.B. die Streckenkapazität bestimmter Abschnitte zu verändern. Das Konzept bietet den Vorteil, dass man mit dem Hinzufügen eines neuen Moduls (Wegplaneragent) sein Materialflusssystem verbessern kann, ohne in bestehende Programme eingreifen zu müssen.

Dieses Steuerungskonzept für die Fahrzeugsteuerungen ist erweiterungs- und integrationsfähig und erfüllt damit wichtige Anforderungen für ein wandelbares automatisiertes Materialflusssystem. Es ist sowohl für Elektrohängekran-/Hängebahnsysteme wie auch für fahrerlose Transportsysteme anwendbar. Durch die strikte Modularisierung und den klar gezogenen Systemgrenzen mit ihren standardisierten mechatronischen Schnittstellen werden außerdem redundante Steuerungsvorgänge bzw. Datenhaltung vermieden [44].

Für die Verifizierung des Fahrzeugsteuerungskonzeptes wurden materialflusstechnische Simulationen mit Hilfe eines selbst entwickelten Simulationsprogramms an Beispielszenarios durchgeführt, die die Ergebnisse hinsichtlich Wandelbarkeit bestätigen [47]. Das entwickelte Simulationsprogramm erlaubt es, die Wegplanung auf Basis der Waypointmatrix für verschiedene Szenarios zu untersuchen. Zusätzlich wird das Steuerungskonzept prototypenhaft an der lehrstuhleigenen Elektrohängebahn/Hängekran-Versuchsanlage umgesetzt.

3.4.4 Berührungslose Datenübertragung

Je einfacher der Aufbau autonomer Gerätesteuern und die Verbindung einzelner Steuerungskomponenten sind, umso flexibler lässt sich ein Materialflusssystem gestalten. Gerade für mobile Materialflussteilnehmer eignen sich berührungslose Datenübertragungssysteme, die keine aufwändigen Kabelzuführungen oder Schleifleitungen erfordern. Dies bringt erhebliche Vorteile für Verbindungen zwischen mobilen Teilnehmern, zwischen mobilen und ortsfesten Teilnehmern, aber auch für die Verbindungen zwischen ortsfesten Steuerungskomponenten.

Die Industrie bietet viele verschiedene Systeme für die drahtlose Datenübertragung an. Dabei unterscheidet man zwischen optischen Datenübertragungsverfahren (Infrarot, Laser) und funkbasierten Verfahren. Die optischen Verfahren wurden innerhalb dieses Arbeitspaketes nicht weiter betrachtet, da sie eine direkte Sichtverbindung zwischen den Teilnehmern erfordern und dies eine zu starke Einschränkung hinsichtlich der Layoutflexibilität darstellt.

Bild 11 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Funktechnologien im industriellen Bereich. Auf diese Funktechnologien lassen sich die gängigen Feldbussysteme mehr oder weniger gut abbilden. Für eine genauere Untersuchung sei hierbei auf das BMBF-Verbundprojekt „Drahtlose Feldbusse im Produktionsumfeld“ verwiesen [25], das einen guten Überblick über die Funkssysteme im Produktionsumfeld bietet.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes „Konzeption der Kommunikationsschnittstellen für die Einbindung autonomer Materialflusssysteme in Minifabriken“ haben zusätzlich gezeigt, dass eine Kommunikation auf Basis von Ethernet und SOAP die beste Lösung für das Materialflusssystem in Minifabriken darstellt. Aus diesem Grunde wurden nur noch Bluetooth und Wireless LAN für den Einsatz in Minifabriken untersucht.

Folgende Vorteile machen die Bluetooth-Technologie [2] interessant für einen Einsatz in wandelbaren Materialflusssystemen. Bluetooth Geräte sind in der Lage,

Kommunikationspartner selbständig zu finden (Inquiry) und die bereitgestellten Geräteinformationen, Dienste und Leistungsmerkmale zu erfragen (Service Discovery Protocol). Dies ermöglicht einen systemunabhängigen Kommunikationsaufbau zwischen neuen und unbekanntem Partnern (Materialflussmodulen). Zusätzlich kann Bluetooth die Ethernet-Protokolle übertragen. Allerdings liegt die max. Netto-Bitrate nur bei 444kBit/s (symmetrische Datenübertragung). Dies schränkt die Möglichkeiten der zu übertragenden Daten verglichen mit WLAN erheblich ein. Ein Nachteil besteht in der geringen Reichweite von 10m. Damit wäre es denkbar, den Datenaustausch zwischen Transportfahrzeugen und Übergabepunkten beim Lastspiel zu realisieren, aber eine durchgängige Kommunikation im gesamten Produktionsumfeld wäre nur bedingt möglich. Ein weiterer Nachteil besteht in der Störanfälligkeit des Systems, so kann schon ein Bluetooth-Handy, das versucht, sich ins Bluetooth-Netz einzuloggen, die Kommunikation stören.

WirelessLAN-Komponenten verfügen zwar nicht über die ausgeprägten Adhoc-Networking-Fähigkeiten wie Bluetoothgeräte, trotzdem kann man mit minimalem Konfigurationsaufwand WLANs aufbauen. Für WLAN spricht des Weiteren die wesentlich höhere Leistungsfähigkeit (Übertragungsraten bis 54 Mbit/s) bei nur etwas höheren Komponentenkosten. Grundsätzlich lässt sich der Aufbau und die Leistungsfähigkeit eines WLANs mit dem eines verkabelten Ethernetes vergleichen.

Ein wichtiger Aspekt für die Konzeption einer Funkanbindung der Materialflussmodule ist die weltweite Standardisierung der Funktechnologie, da Minifabriken in einem weltweiten Verbund operieren und untereinander Produktionseinrichtungen und Materialflussmodule austauschen. Dafür ist eine problemlose Integrierung der eingesetzten Technologie die Voraussetzung. WLAN nach IEEE 802.11 erfüllt diese Anforderung (Bild 12).

Funk- standard	Frequenz/ Band	Reich- weite	Max. Bitrate (brutto)	Übertragbare Feldbusprotokolle (ggf. mit Einschränkungen)	Bemerkungen
DECT	1,9 GHz	50m in/ 300m out	1152 kbit/s	CAN, Interbus	Deterministisch
DPRS	1,9 GHz	50m in/ 300m out	3456 kbit/s	CAN	Basiert auf DECT-Standard; deterministisch
WLAN (IEEE 802.11)	2,4/5,8 GHz ISM	50m in/ 300m out	bis 2/11/54 Mbit/s	auf Ethernet aufbauende Protokolle; PROFIBUS	Sehr schnell; Unbegrenzte Anzahl von Teilnehmern (8 pro Access Point)
Hiperlan	5,8 GHz ISM	35m in/ 80m out	6 bis 54 Mbit/s		Sehr schnell
ISM	433/868 MHz / 2,4 GHz	200/1000/ 1500m	100 bis 500 kbit/s	Interbus; PROFIBUS	
Bluetooth	2,4 GHz ISM	10/100m	1 Mbit/s	CAN; TCP/IP; UDP	Piconet mit max. 8 Knoten
HomeRF	2,4 GHz ISM	50m	1,6 Mbit/s; 10 Mbit/s		Kombiniertes Protokoll aus DECT und IEEE 802.11-; 127 Teilnehmer pro Netzwerk

Bild 11: Eigenschaften ausgewählter Funktechnologien für den Einsatz im industriellen Produktionsumfeld [25, 1, 8]

Anforderungen an eine drahtlose Kommunikation für wandelbare Materialflusssysteme	Wird von WLAN erfüllt
- Offener und erweiterbarer Datenaustausch	++
- System- und Herstellerunabhängigkeit	++
- Weltweit einsetzbar (Frequenzfreigabe)	++
- Sicherheit und Zuverlässigkeit	+
- Niedrige Kosten	++
- Kein Systemsprung zwischen drahtloser und drahtgebundener Datenübertragung	++
- Echtzeitfähigkeit	+
- Erfüllung der Wandelbarkeitskriterien (Layoutflexibilität, Durchsatzflexibilität, Fördergutflexibilität, Erweiterungsfähigkeit, Integrationsfähigkeit)	++

Bild 12: Anforderungen an eine drahtlose Kommunikation für wandelbare Materialflusssysteme

3.4.5 Konzeption der Kommunikationsschnittstellen für die Einbindung autonomer Materialflusssysteme in Minifabriken

Damit in einem wandelbaren modularisierten Materialflusssystem für Minifabriken materialflusstechnische Module verschiedener Hersteller ohne großen Engineeringaufwand miteinander gekoppelt, ausgetauscht bzw. neu eingebunden werden können, müssen die Module über eine einheitliche, kompatible und leistungsfähige Schnittstelle verfügen. Dazu muss die Schnittstelle so definiert sein, dass sie auch den Anforderungen zukünftiger neuer Materialfluss- und Produktionsmodule entspricht, ohne dass eine explizite Vorplanung stattfindet. Es muss sowohl eine horizontale Kommunikation zwischen den Modulen als auch eine vertikale Kommunikation zu übergeordneten PPS und ERP-Systemen möglich sein. Um dies zu erreichen, ist eine durchgängige, systemunabhängige Kommunikation von der Peripherie über die Steuerung und Sicherheitstechnik bis hin zum Management die Voraussetzung [6].

Wie sowohl die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket „Berührungslose Datenübertragung“ (vgl. Kap 3.4.4) zeigen, als auch Untersuchungen in zahlreichen anderen Forschungsbereichen ergeben haben, stellt Ethernet verbunden mit der Wireless LAN Technologie (IEEE 802.11) die beste Lösung als Übertragungsmedium für wandelbare Materialflusssysteme dar [9].

Für eine flexible, firmenunabhängige Kommunikation ist aber neben dem Einsatz von Ethernet die Gestaltung der Anwendungsschicht (Schicht 7, ISO/OSI-Referenzmodell) von entscheidender Bedeutung. Für die Realisierung verteilter Anwendungen werden im IT-Sektor so genannte Remote Procedure Calls (RPC) eingesetzt. Über diese RPC können Funktionen auf anderen Rechnern innerhalb eines Client-Server-Modells aufgerufen werden. RPC-Verfahren wie zum Beispiel CORBA (Common Object Request Broker Architecture), DCOM (Distributed Component Object Model) und JAVA RMI (Remote Method Invocation) werden schon seit vielen Jahren für verteilte Anwendungen eingesetzt. Sie sind aber teilweise von einem bestimmten Betriebssystem oder einer Technologie abhängig und sind deshalb aufgrund proprietärer Kommunikationsmechanismen als Kommunikationslösung für wandelbare Materialflusssysteme nur bedingt geeignet.

Eine wesentliche bessere Lösung stellen drei neue RPC-Verfahren: XML-RPC, SOAP [37] FactoryXML [24] dar. Alle drei Verfahren benutzen HTTP (Hypertext Transfer Protocol) bzw. TCP/IP als Transportprotokoll und XML (Extensible Markup Language) als Datensprache und arbeiten nach einem Client-Server-Modell. Der Client teilt über ein Request dem Server mit, welche Funktionen (WebServices) zu starten sind. Dabei werden

gleichzeitig die erforderlichen Parameter in einem XML-Dokument eingebettet mit übertragen. Das Ergebnis wird ebenfalls in XML kodiert vom Server als Response zurückgesendet.

Das Simple Object Access Protocol (SOAP) stellt eine Weiterentwicklung von XML-RPC dar. SOAP [37] ist eine Protokollspezifikation, die vom World Wide Web Consortium (W3C) veröffentlicht und an der unter anderem Hersteller wie Microsoft (.NET-Technologie) und IBM beteiligt sind.

FactoryXML [24] ist ebenfalls ein auf XML basierendes Kommunikationsprotokoll zum Datenaustausch zwischen Automatisierungskomponenten und PC- bzw. Internetsoftwareanwendungen. Es funktioniert nach den gleichen Mechanismen wie SOAP kommt aber mehr aus dem Automatisierungsbereich und hat seinen Schwerpunkt auf der vertikalen Integration. Zusätzlich lässt sich FactoryXML schon auf Low-Level-Protokollen wie UDP, im Gegensatz zu SOAP, das HTTP als Transportprotokoll benötigt, aufsetzen. Für SOAP spricht allerdings seine wesentlich stärkere Verbreitung und die Spezifizierung durch das W3-Consortium. Alle drei Protokollspezifikationen verwenden zum Kodieren der Informationen die Datensprache XML.

Die Datensprache XML (Extensible Markup Language), die aus dem IT-Bereich stammt, ermöglicht einen offenen und beliebig erweiterbaren Datenaustausch. Neben der eigentlichen Information werden gleichzeitig auch die Datenbezeichnung und das Datenformat übermittelt. Somit kann jeder Teilnehmer, der z.B. etwas mit dem Begriff „Auftragsnummer“ anfangen kann, diese Information auch verwerten, da die Information über das Datenformat und damit die Kodierung mitgeliefert wird. Aber auch der Mensch kann XML-kodierte Daten unter zur Hilfenahme eines Web-Browsers einfach und optisch aufgearbeitet lesen. Dadurch schafft man die Voraussetzungen, dass automatisierte Maschinen in einem wandelbaren Materialflusssystem miteinander kommunizieren können und dazu in einer Sprache, die auch der Mensch verstehen kann. Eine gemeinsame Kommunikationssprache zwischen Mensch und Maschine vereinfacht auch die Realisierung von unterschiedlichen Automatisierungsgraden innerhalb einer Anlage.

Abschließend zeigt es sich, dass eine Kommunikation auf Basis von Ethernet, XML und SOAP einen sehr guten Lösungsansatz für vertikale Kommunikation zwischen den Gerätesteuern eines wandelbaren Materialflusssystems und auch für die horizontale Kommunikation zur Anbindung an PPS und ERP-Systeme darstellt [6]. Mit diesem Kommunikationskonzept ist es möglich, die informationstechnische Ebene einer mechatronischen Schnittstelle so zu gestalten, dass die geforderten Anforderungen an die Wandelbarkeit erfüllt werden.

Mit XML und SOAP lassen sich nicht nur Steuerungsinformationen und Auftragsdaten übertragen, sondern XML eignet sich auch sehr gut, um Module und Geräte hinsichtlich Geometrie, Funktionalität und Leistungsfähigkeit zu beschreiben. Somit lässt sich in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten M1, M3-M6 und die XML-Technologie durchgängig von der Planung über die Logistik bis hin zur Produktion in Minifabriken einsetzen.

3.4.6 Entwicklung autonomer Materialflusssteuerungen und Konzeption von Steuerungsstrategien für Minifabriken

Dem Teilprojekt M2 wurde bei der Begutachtung nur eine Mitarbeiterstelle von zwei beantragten Stellen genehmigt und die Empfehlung ausgesprochen, das Arbeitsprogramm zu kürzen. Aus diesem Grund wurden die beiden Arbeitspakete „Entwicklung autonomer Materialflusssteuerungen“ und „Konzeption von Steuerungsstrategien für Minifabriken“ noch nicht in der ersten Antragsperiode bearbeitet und statt dessen auf die beantragte zweite Antragsperiode verschoben.

3.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs und Reaktion der wissenschaftlichen Öffentlichkeit auf die eigenen Arbeiten

Ähnliche Ansätze zur Gestaltung eines wandelbaren bzw. wandlungsfähigen Materialflusssystems werden im SIF-Projekt „Das wandlungsfähige Transportsystem“, Universität Magdeburg verfolgt. Bei diesem Projekt liegt der Fokus auf der Entwicklung dezentral gesteuerter plug-and-play-fähiger Transportmodule aus dem Bereich flurgebundener Stetigförderer [20]. Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden dagegen nicht nur Transportmodule untersucht, sondern auch die Schnittstellen zu weiteren Logistikbereichen wie Lager und Übergabepplätze und zur Produktionsplanung und Steuerung (zweite Antragsphase). Damit wurden die wandelbaren Logistikprozesse in einer Minifabrik ganzheitlich betrachtet, und dementsprechend wurde die Technik der Materialflussmodule gestaltet.

Im innerbetrieblichen Bereich wird im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ geforscht. Hier liegt das Ziel auf der Erarbeitung von Modellen, Methoden und Verfahren zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit in produzierenden Unternehmen. Fokus der Arbeiten ist dabei die Wandlungsfähigkeit des Produktionsprozesses in der variantenreichen Serienproduktion [34].

Moderne flexible Produktions- und Logistikorganisationen stellen im Zeitalter wachsender Globalisierung und Individualisierung hohe Ansprüche an die Kommunikation in der Fabrikautomatisierung. Durch intelligentes Verknüpfen einzelner Ebenen der Produktion zur vertikalen Integration sowie der unterschiedlichen Komponenten in einer Ebene zur horizontalen Integration entsteht eine durchgängige Kommunikation, mit der diese Anforderungen erfüllt werden können. Als Lösungsansatz wird in der Forschung und Industrie ebenfalls wie in Teilprojekt M2 eine Kommunikation auf Basis von Ethernet mit TCP/IP und XML (Extensible Markup Language) angesehen [27].

In Fachgesprächen und Diskussionen mit der wissenschaftlichen Öffentlichkeit und der Industrie zeigten sich sehr positive Reaktionen auf die Vision des Teilprojektes M2. Denn die Konzepte und Lösungen für ein wandelbares Materialflusssystem, das aus autonomen, dezentral gesteuerten Materialflussmitteln besteht, eignen sich nicht nur für Minifabriken, sondern lassen sich auf weitere industrielle Anwendungsfälle ausweiten. Im Vordergrund steht hier zum einen die Verkürzung der Inbetriebnahmenzeiten von Materialflusssystemen. Und zum anderen die Möglichkeit durch intelligente Automatisierungs- und Modularisierungskonzepte eine höhere Flexibilität und geringere Komplexität in modernen Materialflusssystemen zu erhalten.

Ein weiterer positiver Aspekt des Teilprojektes M2 im speziellen und des SFBs im Allgemeinen ist der durchgängige Einsatz von XML von der Fabrikplanung über die Prozessplanung zur Materialflussteuerung und Produktion und hinunter bis auf die Geräteebene. So wird im Rahmen des SFBs ein Beitrag geleistet, eine einheitliche und durchgängige Kommunikation von der Peripherie über die Steuerung und Sicherheitstechnik bis hin zum Management zu realisieren.

3.6 Offene Fragen

Die Anforderungen der Produktion individualisierter Güter an das Materialflusssystem und der wandelbare Aufbau einer Minifabrik erfordern spezielle Materialflusstrategien für die Abwicklung der innerbetrieblichen Logistikaufgaben. Diese Materialflusstrategien müssen auch die Fähigkeiten intelligenter dezentral gesteuerter Materialflussmodule berücksichtigen. Deshalb muss untersucht werden, welche Materialflusstrategien sich für eine Produktion individualisierter Güter eignen bzw. wie sie adaptiert werden können.

In dieser Antragsphase sind Lösungen auf der Geräteebene für die Gestaltung, die Steuerung und die Kommunikation von autonomen dezentral gesteuerten Materialflussmodulen erarbeitet worden, die die ermittelten Anforderungen an die

Wandelbarkeit eines Materialflusssystemes erfüllen. In der zweiten Phase muss gezeigt werden, wie sich die dezentral gesteuerten Module zur einer ganzheitlichen Materialflussteuerung integrieren lassen und dabei nach zu entwickelnden Materialflusstategien für die Produktion individualisierter Güter arbeiten.

Als Ergebnis des Arbeitspaketes „Berührungslose Datenübertragung“ erwies sich, dass WLAN die beste momentan auf dem Markt erhältliche technische Lösung für eine drahtlose Kommunikation zwischen mobilen Materialflussmodulen darstellt. Allerdings ist noch genauer zu verifizieren, inwieweit WLAN die Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen für ein industrielles Umfeld erfüllt. Besonderes Augenmerk liegt hier auf den Sicherheitsanforderungen für einen flurfreien automatisierten Materialtransport über Personen. Hierfür sei aber auf andere Forschungsprojekte und sich in Bearbeitung befindende Spezifikationen verschiedener Entwickler- und Anwenderorganisationen verwiesen [36, 14, 28].

Der Verbund aus Minifabriken bildet ein dynamisches, wandlungsfähiges Netzwerk, in dem nur schwer vorplanbare Material- und Informationsflüsse in Form von Produktionseinrichtungen, Teilen, Prozess- und Entwicklungswissen stattfinden. Der Aufbau und die Steuerung eines derartigen wandlungsfähigen Netzwerkes zwischen Minifabriken, externen Unternehmen (Standardteilelieferanten) und dem Endkunden lässt sich mit den heutigen Supply Chain Lösungen nur bedingt realisieren. Schon ohne die weitreichenden Anforderungen der Produktion individualisierter Güter sind heutige Supply Chain Konzepte nur mit großem Aufwand technisch umzusetzen. Darum sollen in der nächsten Antragsphase in einem weiteren Teilprojekt Lösungen und Konzepte für die externe Logistik in einem wandlungsfähigen Netzwerk aus Minifabriken erarbeitet werden.

3.7 Literatur

- [1] *Beikirch, H.*: Prozessnahe drahtlose Kommunikation – Probleme und Lösungsweg; Tagungsband / SPS IPC Drives Nürnberg 2001, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg, S.262-269, 2001.
- [2] *Bluetooth Special Interest Group*: Bluetooth Specification 1.1, www.bluetooth.org (Stand 10/2003), 2003.
- [3] *BMBF (Hrsg.)*: 4. Bekanntmachung von Förderrichtlinien im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Berlin 05.09.00, S. 5.
- [4] *Bode, W.*: Drahtlose Datenübertragung, Stand der Technik und Trends. In: F+H Fördern und Heben 49 (1999) Nr. 1-2, S. 25-28; 3, S.124-128.
- [5] *Brand, E.*: Sinnvoll kombinieren: Bussystem und Fördertechnik. In: F+H Fördern und Heben 47 (1997) 9, S. 630-631.

- [6] *Buchwitz, M.*: Auf neuen Wegen zu Standards für verteilte Intelligenz, Tagungsband / SPS IPC Drives Nürnberg 2001, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg, S.93-98, 2001.
- [7] *Danglmaier, W.*: Vision Logistik: Logistik wandelbarer Produktionsnetze. Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, 1997.
- [8] *Fuchs, M.*: Kabellose Datenübertragung in der Automatisierung: Neue Möglichkeiten der Bluetooth Wireless Technology; SPS-Magazin, Ausgabe 8; TeDo-Verlag, Marburg, 2002.
- [9] *Furrer, F.*: Ethernet-TCP/IP für die Industrieautomation; Grundlagen und Praxis; 2.Auflage, Hüthig Verlag Heidelberg, 2000.
- [10] *Gollos, M.*: Produktionssysteme und Materialfluß schnell und kostengünstig an kurze Produktlebenszyklen anpassen. In: Logistik im Unternehmen 13 (1999), Nr. 10, S. 52-53.
- [11] *Günthner, W. A.*: Verbundforschungsprojekt MATVAR – Wege zum wandelbaren Materialflusnetz. In: Hebezeuge und Fördermittel. Berlin 40 (2000) 5, S. 267-270.
- [12] *Günthner, W. A.; Allgayer, F.*: Dynamische Produktionsstrukturen durch flexible Materialflußsysteme. In: Logistik im Unternehmen 11 (1997) Nr. 10, S. 28-30.
- [13] *Günthner, W. A.; Reinhart, G. (Hrsg.)*: Abschlussbericht MATVAR – Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2000.
- [14] *Günthner, W. A.; Schubert, I.*: Konzepte zum sicheren Betrieb von automatisierten Krananlagen im personenzugänglichen Umfeld, 10. Internationale Kranfachtagung 2002, IFSL Magdeburg, Tagungsberichte Nr.: 16, S. 15–30.
- [15] *Ida-Group*: White Paper 1.1, www.ida-group.org (Stand 10/2003), November 2002.
- [16] *Jörihsen, U.*: Kein Produkt von der Stange. In: F+H Fördern und Heben 49 (1999) Nr. 3, S. 159-160.
- [17] *Jünemann, R.*: Neue Steuerungen für die kostengünstige Automatisierung von Lagern und Materialfluß-Systemen. In: Marktbild Lager 1998, S. 13-15.
- [18] *Karl, A.*: Wandlungsfähige Materialflußtechnik. In: F+H Fördern und Heben 48 (1998) Nr. 4, S. 270-273.
- [19] *Mehldau, M.*: Beitrag zur Teilautomatisierung des Materialflusses als Instrument logistischer Systemgestaltung. In: Baumgarten, H.; Gösta, B.I: Schriftenreihe der Bundesvereinigung Logistik (BVL): Band 25. Huss-Verlag, München 1991.
- [20] *Messerschmidt, R.; Lorentz, K.*: Verteiltes Steuerungskonzept für plug-and-play-fähige Transportmodule, A&D Newsletter 9/2002, publish-industry Verlag GmbH, München (2002) S. 36-39.

- [21] *Mönch, G. u.a.*: Objektorientierte Modellierung des Materialflusses für eine flexible Produktion. In: Logistik im Unternehmen 13 (1999) 10, S. 44-47.
- [22] *N., N.*: Das Für und Wider von Standardlösungen. 6. VDI-FML-Jahrestagung „Informationstechnologie für den Materialfluß“. In: Logistik im Unternehmen 12 (1998) Nr. 9, S. 49-50.
- [23] *N., N.*: Marktübersicht: Transpondersysteme für den Materialfluß. In: Logistik im Unternehmen 12 (1998) 9, S. 74-77.
- [24] *N., N.*: FactoryXML-Spezifikation, Langner Communications AG, www.factoryxml.org (Stand 10/2003), 2002.
- [25] *PFT (Projekträger)*: Abschlussbericht Drahtlose Feldbusse im Produktionsumfeld; BMBF-Projekt im Rahmen von Produktion 2000, Projekträger für Produktion und Fertigungstechnologien (PFT), Karlsruhe, 2000.
- [26] *Piller, F.*: Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter, Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.
- [27] *Pritschow, G.*: Durchgängige Kommunikation – Meilenstein und Herausforderung für die Steuerungstechnik, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 93 (2003) H.5 S. 350.
- [28] *PROFIBUS Nutzerorganisation*: PROFInet-Systembeschreibung, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe, November 2002.
- [29] *Schwarz, D.; Brendel, W.*: Integration von Funkstrecken in Feldbussystemen (CAN). In: Günthner, Reinhart (Hrsg.): Abschlussbericht MATVAR - Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2000.
- [30] *Schenk, M.; Seelmann-Eggebert, R.*: Die Kundenwunschfabrik – Anforderungen und Lösungsansätze, TU Chemnitz: Fachtagung Vernetzt planen und produzieren, Chemnitz, Tagungsband, 12. Oktober 2000.
- [31] *Scheid, W.-M.*: Kommt die durchgängige Automatisierung?, Zeitschrift F+H Fördern und Heben 52 (2003) Nr.11, Vereinte Fachverlage GmbH, Mainz, S.696-700, 2003.
- [32] *SFB 457*: Hierarchielose regionale Produktionsnetze, <http://www.tu-chemnitz.de/sfb457>, Technische Universität Chemnitz.
- [33] *SFB 559*: Modellierung großer Netze in der Logistik, <http://www.sfb559.uni-dortmund.de>, Universität Dortmund.
- [34] *SFB 467*: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion, <http://www.sfb467.uni-stuttgart.de>, Universität Stuttgart.
- [35] *SFB 362*: Fertigen in Feinblech, Teilprojekt B7: Institut für Fabrikanlagen, Universität Hannover.
- [36] *VDI/VDE Richtlinie 2185*: "Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik" (Entwurf), 2002.

- [37] *W3-Consortium*: Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.2 <http://www.w3.org/TR/SOAP>, W3C-Note 7.Mai 2003, W3-Consortium, 2003.
- [38] *Wache, I.; Dömeland, U.*: Low-Cost-Steuerung: Ein neuer Ansatz. In: F+H Fördern und Heben 47 (1997) 6, S. 409-412.
- [39] *Wesselowski, R.*: CeMAT 98: Schaltstelle für die Innovation. In: F+H Fördern und Heben 48 (1998) Nr. 3, S. 110-111.
- [40] *Westkämper, E.; Wiendahl, H.-P.; Balve, P.*: Dezentralisierung und Autonomie in der Produktion. Eine systematische Betrachtung der Klassifizierungsmerkmale. ZWF 93 (1998) 9, S. 407-410.
- [41] *Wiendahl, H.-P.*: Analyse und Neuordnung der Fabrik: Leitfaden zum Erfolg. Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag 1991.
- [42] *Wiendahl, H.-P.*: Hochautomatisierung wird in Frage gestellt. In: Industrie Anzeiger (2000) 30/31, S. 32-33.

Eigene Veröffentlichungen zum Teilprojekt

- [43] *Günthner, W. A.; Heinecker, M.; Wilke, M.*: Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen, Industrie Management 18 (2002) 5, GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, 2002.
- [44] *Günthner, W. A.; Wilke M.*: Anforderungen an automatisierte Materialflusssysteme für wandelbare Logistikstrukturen, Tagungsband Wissenschaftssymposium Logistik der BVL 2002, Huss-Verlag GmbH, München, ISBN-Nr. 3-931724-61-1, S. 335-345, 2002.*
- [45] *Günthner, W. A.*: „Erfolgsfaktoren in der Hochleistungswelt Logistik“ Tagungsband Mensch und Technik in der Logistik / 11. Deutscher Materialfluss-Kongress, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, Düsseldorf: VDI Verl. 2002 (VDI-Berichte; 1663), S.11, 2002.*
- [46] *Günthner, W. A.; Wilke, M.*: Mass Customization requires changeable material flow systems, Interdisciplinary World Congress on Mass Customization and Personalization (MCPC2003), Oct. 2003.**
- [47] *Günthner, W. A.; Wilke, M.*: Materialflusstechnologie - Anforderungen und Konzepte für wandelbare Materialflusssysteme, 21. Dortmunder Gespräche, September 2003.*
- [48] *Handrich, W.*: Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktionsstrukturen, Herbert Utz Verlag, München, 2001.
- [49] *Zäh, M.; Ulrich, C.; Wagner, W.; Wilke, M.*: Reaktionsszenario Minifabrik; wt Werkstattstechnik online Jahrgang 93 (2003) H.9; S. 646-650.

* Kongressbeitrag

** Begutachtete Publikation