

# Intralogistikkomponenten für die Automobilproduktion ohne Band und Takt – erste Prototypen

Intralogistics components for a non-sequential, unsteady automobile production  
- First prototypes

**Matthias Hofmann**

*Institut für Fördertechnik und Logistik  
Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung  
Universität Stuttgart*

**D**ie Prinzipien der Automobilmontage sind seit der Einführung der Fließbandserienfertigung gemäß Henry Ford und Frederick Taylor nahezu unverändert geblieben. Das zugrundeliegende Prinzip besteht nach wie vor aus sequenziell getakteten Arbeitsschritten obgleich sich die herzustellenden Produkte seither gravierend verändert haben. Der gesellschaftliche Stellenwert des Automobils, spezifische Einsatzzwecke und individuelle Ansprüche haben letztlich zu einer starken Ausdifferenzierung von Marktsegmenten geführt, die durch entsprechend breit gefächerte Produktportfolios der Automobilproduzenten bedient werden. Die sukzessive Abkehr von fossilen Brennstoffen bei den Antriebskonzepten wird mittelfristig dazu führen, dass die ohnehin bereits vorhandene Variantenvielfalt der Fahrzeughersteller noch weiter steigen wird und es daher umso mehr neuer Produktions- und Logistikkonzepte bedarf, um künftig variantenreiche Serienprodukte effizienter herstellen zu können.

*[Schlüsselwörter: Automobilproduktion, Fließbandfertigung, Variantenvielfalt, Serienprodukte, Effizienz]*

**S**ince the introduction of assembly lines by Henry Ford and Frederick Taylor, the principles of automobile production have been maintained nearly unchanged. The underlying principle still builds on sequential synchronized production patterns, even though the products have radically changed. Social prestige of automobiles, specific operation purposes and individual requirements have led to highly sophisticated market segments which are accommodated by the automobile industry through huge product ranges. Because of the successive break-away from fossil fuel powered mobility, the variance between models will escalate even more in the near future. To enable a more efficient and economical production with many variants, new principles for production and logistics are needed.

*[Keywords: automobile production, assembly line, product diversity, series product, efficiency]*

## 1 MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG

Vor dem Hintergrund der parallelen Fertigung von PKW-Baureihen mit Hybridantrieb oder gar rein elektrischem Antrieb neben konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen Varianten in einer Montagelinie sowie umfangreicher Ausstattungs- und Individualisierungsoptionen, scheinen die Möglichkeiten zur effizienteren Gestaltung der klassischen Fließbandmontage trotz fortschreitender Automatisierung erschöpft. Infolge dessen rückt die Abkehr von den bekannten Fertigungsprinzipien zunehmend in den Fokus mittel- und langfristiger Unternehmensplanungen. Die Abkehr von der Fließbandfertigung würde jedoch nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Automobilproduktion darstellen, zumal eine Produktion ohne Band und Takt die Entwicklung disruptiver förderlager- und handhabungstechnischer Maschinen erfordert, denn die in den Endmontagelinien der Automobilproduktion anzutreffenden starren Stetigförderer, wie z.B. Elektrohängebahnen oder Schubplattformen, stehen dem Wunsch nach flexiblen, wandelbaren und skalierbaren Montage- und Produktionslogistiksystemen entgegen.

### 1.1 VARIANTENVIELFALT

Die große Spreizung von Arbeitsumfängen bereits innerhalb einer PKW-Baureihe verlangt aus produktionstechnischer Sicht im Grunde nach individuellen, auf die konkrete PKW-Konfiguration angepasste Taktzeiten, was jedoch mit dem gegenwärtigen, streng getakteten, Fließbandförderprinzip unvereinbar ist. In Konsequenz dessen wird über den sogenannten Modellmix ein zur Einhaltung der Taktung erforderlicher Mittelwert der Montagezeitbedarfe gewährleistet. Einen besonders hohen Komplexitätsgrad birgt daher die Eintaktung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Diese unterscheiden sich derart grundlegend

von konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen PKW, dass sich dies zwangsläufig auch in der Abfolge und den Umfängen der Montageprozesse niederschlägt. Die Einhaltung der Taktung kann nur erreicht werden, indem durch vorausgehende und nachfolgende Fahrzeugkonfigurationen mit niedrigerem Montagezeitbedarf der erforderliche Zeitvorsprung für die aufwendigen Hybrid- und Elektrovarianten aktiv generiert wird. Aus der im Zuge einer umfangreichen und dezidierten Datenerhebung im Rahmen des Projekts „FlexProLog - Neuausrichtung der Produktionslogistik für eine bezahlbare Elektromobilität“ durchgeführten Bestandsaufnahme geht hervor, dass in solchen Fertigungslinien nur ein gewisser Prozentsatz des gesamten Produktionsaufkommens Hybrid- oder Elektrofahrzeuge sein können, vgl. [Pop18]. Dabei ist aber nicht nur die kapazitive Grenze, sondern auch die minimale Zeitspanne, innerhalb derer zwei Hybrid- oder Elektromodelle montiert werden können, beachtlich. Diese Restriktionen ergeben sich ausschließlich aus der Taktbindung und der Abläufe in der Materialflussskette. Da es sich hierbei um vertraulich zu behandelnde Daten eines Automobilproduzenten handelt, kann an dieser Stelle keine detailliertere Erörterung erfolgen. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme legen jedoch nahe, dass – gemessen an der Ist-Situation – nicht nur Handlungsbedarf geboten ist, wenn der Ausstoß an Elektrofahrzeugen einhergehend mit einer Expansion des Marktes wachsen muss, sondern auch, wenn zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit die Produktivität gesteigert werden soll. Diese Thematik betrifft aber keineswegs nur Derivate mit alternativen Antrieben, sondern vielmehr alle Fahrzeugkonfigurationen mit insgesamt hohem Sonderausstattungsumfang, aber auch solche mit bestimmten Technikmerkmalen, wie z.B. ein Schiebedach, die aufwändig zu montieren sind. Insofern ist dies Resultat dessen, dass sich die Produkte genau jener Branche, aus der die Prinzipien der Fließbandfertigung hervorgegangen waren, fundamental geändert haben, zielte doch die streng getaktete Linienfertigung auf die Produktion invarianter Fahrzeuge in hoher Stückzahl ab. Dieses Spannungsfeld birgt jedoch nicht nur unternehmensrelevante Aspekte, sondern auch kundenseitige, indem sich die bis dato beschränkte Produktionskapazität und der mit der Eintaktung von Elektro- und Hybridfahrzeugen verbundene Mehraufwand zwangsläufig auf Lieferzeiten und Endkundenpreise niederschlägt und somit auch eng mit der Kundenakzeptanz verknüpft ist.

## 1.2 VOLATILE NACHFRAGE UND ZULIEFERENGÄSSE

Die starke Ausdifferenzierung der Produktportfolios in Verbindung mit baureihenspezifischen Fertigungslinien birgt eine hohe Anfälligkeit für Auslastungsschwankungen einzelner Linien infolge volatiler Nachfrage innerhalb des Produktspektrums eines Herstellers. In besonderem Maß bewahrheitete sich dies nach dem Ausbruch der Finanzkrise 2008 und der dadurch ausgelösten Wirtschaftskrise in Form von massiven Absatzrückgängen in der Automobilbranche. Auch gegenwärtig sieht sich die Branche mit stark volatilen Märkten konfrontiert, die nicht zuletzt auch auf

politische Rahmenbedingungen im Kontext von Luftreinhalungsmaßnahmen in den Innenstädten geschuldet ist. Hieraus resultieren zwangsläufig Auslastungsschwankungen der Werke, da die vorherrschenden Produktionsstrukturen nicht geeignet sind, um auf sprunghafte Nachfragesituationen in einzelnen Marktsegmenten effektiv reagieren zu können.

Dies kommt jedoch nicht nur bei Nachfrageschwankungen, sondern auch z.B. bei Lieferengpässen von Zulieferern zum Tragen, was nicht selten Schließtage einzelner Werke nach sich zieht, da aufgrund der baureihenspezifischen Auslegung der Abläufe, Montage-träger und Betriebsmittel der Endmontagelinien nur selten Produktionskapazitäten innerhalb der einzelnen Werke verlagert werden können. Gleichwohl sei angemerkt, dass dies eine Problemstellung ist, die vorwiegend bei deutschen in Großserie produzierenden Premiumherstellern anzutreffen ist, vgl. Staebelin [SA15]. Gemäß der Erhebung Staebelins unterscheiden sich in dieser Beziehung deutsche Automobilwerke, wo durchschnittlich 1,6 verschiedene Modelle produziert werden, offenbar fundamental von japanischen, wo immerhin durchschnittlich 3,8 verschiedene Modelle in einer Montagelinie produziert werden. Dennoch gibt es auch bei deutschen Herstellern Werke, die eine deutlich überdurchschnittliche Varianz abbilden können. Zu nennen sind hier insbesondere das BMW-Werk in Regensburg, sowie die Porsche-Werke in Zuffenhausen und Leipzig. BMW produziert am Standort Regensburg insgesamt 8 verschiedene Modellreihen auf einem Hauptband. Porsche produziert in Zuffenhausen die Mittelmotorsportwagen Boxster und Cayman, sowie alle Modellvarianten des 911 inklusive der Rennsportfahrzeuge. Aufgrund der starren Taktung bei gleichzeitig stark differierenden Arbeitsumfängen besteht in solchen – aus heutiger Sicht flexiblen – Werken jedoch die Gefahr, dass Flexibilität zu Lasten der Produktivität der Mitarbeiter am Band geht, wenn Fahrzeuge mit im Vergleich zum Höchstmaß deutlich geringeren Montageumfänge gefertigt werden.

Es besteht somit in mehrerlei Hinsicht für die Automobilhersteller des Premiumsegments ein gesteigertes Interesse, eine Neuausrichtung der Produktionsprozesse vorzunehmen, um künftig ein breites und stark ausdifferenziertes Produktspektrum rationeller und effizienter herstellen zu können. Der Vorstand für das Europageschäft von General-Motors hatte bereits 2007 proklamiert: „Wir wollen die Flexibilität zwischen den einzelnen Baureihen erhöhen und als langfristiges Ziel möglichst jedes Auto in jedem Werk bauen können“, vgl. [Göt07]. Aufgrund der in den vergangenen zehn Jahren drastisch gewachsenen Produktpalette sämtlicher deutscher Automobilmarken und der zu erwartenden Fortsetzung dieser Marktentwicklung, wird es schlichtweg nicht mehr möglich sein, wie vielfach heute noch praktiziert, für jedes Modell spezifisch eine Fertigungslinie zu errichten. Angesichts der Investitionskosten von ca. 50 bis 200 Mio. EUR pro Fertigungslinie, vgl. [Ros08], wäre dies letztlich auch

aufgrund des immensen Flächenbedarfs nicht mehr wirtschaftlich darstellbar.

Es sei in diesem Zusammenhang jedoch angemerkt, dass die nunmehr im Kontext der Automobilbranche beschriebenen Problemstellungen von branchenübergreifender Relevanz sind und sich dieselben Spannungsfelder zwischen Produktion, Markt- bzw. Käuferverhalten und Variantenvielfalt über sämtliche Bereiche des Maschinen- und Anlagenbaus hinweg erstrecken und sich lediglich in ihrer Ausprägung unternehmensspezifisch unterscheiden.

## 2 ZIELSTELLUNG UND KONZEPTION

Im Rahmen des Projekts „FlexProLog“ wurden am Institut für Fördertechnik und Logistik neuartige Logistikkonzepte für die flexible und wandelbare Automobilproduktion der Zukunft entwickelt. Neben Systemen der Teilebereitstellung und des Materialflusses, war die konzeptionelle Entwicklung eines innovativen Montage- und Logistik-Groß-FTF, das als Montageträger für die automobilen Endmontage dienen soll, Hauptbestandteil dieses Projekts. Das Projekt „FlexProLog“ hatte somit zur Zielstellung, Produktionslogistiksysteme für eine Fertigung ohne Band und Takt konzeptionell zu erarbeiten und anhand von Simulationen auf deren Eignung und Leistungsfähigkeit für den konkreten Anwendungsfall in der Automobilproduktion hin zu untersuchen.

Indem die starre Taktung und die fest verkettete Abfolge von Bearbeitungsschritten aufgelöst wird, bedarf es zur Umsetzung nicht nur neuartiger Montageträger samt zugehöriger Fördertechnik, sondern auch reaktionsschneller Materialflusssysteme für die Teilebereitstellung, da durch die Aufhebung der getakteten Sequenzierung auch die Perlenkette in der Zuführung der Bauteile aufgelöst wird, vgl. [WP15]. Größere Flexibilität in der Montage bedingt daher geringere Reaktionszeiten in der Teilebereitstellung, so dass die Prinzipien und die zugehörige Hardware der Materialflusssysteme für die Zuführung vormontierter Baugruppen-, Komponenten- und Montage-material einen weiteren – da zwingend zusammen zu betrachtenden – Bestandteil des Projekts darstellte.

Für die Umsetzung des Logistikkonzepts wurde eine Montage- und Logistikplattform konzipiert, die es aufgrund ihrer Funktionalitäten ermöglicht, sämtliche Montageschritte in der Endmontage – beginnend beim Bodenmodul bzw. Fahrgestell – direkt auf dieser Plattform zu vollziehen. Indem die Plattform auf einem großen Fahrerlosen Transportfahrzeug (FTF) mit rundum begehbaren Plattform basiert, wird per se eine Entkopplung der einzelnen Montageträger bewerkstelligt.

Das Montage- und Logistik-FTF besteht primär aus einem omnidirektional frei navigierendem FTF mit integrierter Handhabungstechnik und der umlaufenden Arbeitsplattform. Indem sich die Werker zum Vollziehen der Arbeitsumfänge auf der fahrzeugebundenen Plattform befinden und das Montageobjekt stets in ergonomisch sinnvoller Position angebracht werden kann, fungiert das Montage- und Logistik-FTF nicht nur als Werkstückträger, sondern vielmehr als mobile Montageinsel, da die komplette PKW-Endmontage auf diesem FTF ohne Zuhilfenahme externer Hebe- oder Handhabungseinrichtungen durchgeführt werden kann. Die 3.500 x 6.000 mm große Mobile Montageinsel ersetzt die einschlägigen Werkstückträger und Fördertechniken in Form von Elektrohängebahnen und Schubplattformen. Auf diese Weise besteht zwischen den einzelnen Werkstückträgern keine mechanische Verbindung, vielmehr stellt jeder für sich ein autarkes System dar, wodurch nicht nur die infolge der mechanischen Kopplung einheitliche Fahrgeschwindigkeit – und die daraus resultierende Taktzeit – eliminiert wird, sondern auch eine voneinander unabhängige Pfadwahl ermöglicht wird. Die Verlagerung der Endmontage von klassischer Fördertechnik auf FTF birgt dementsprechend per se eine Aufhebung der starren Taktung und sequenziell unverrückbaren Abfolge des Durchlaufens der einzelnen Stationen. Konkret bedeutet das in der Praxis, dass künftig lediglich die Stationen angefahren bzw. durchlaufen werden, die zur Montage des jeweiligen PKW-Modells tatsächlich erforderlich sind. Gegenwärtige Endmontagelinien umfassen ca. 150 bis 200 Stationen, wobei den Stationen spezifische Montage-tätigkeiten und Einbauten zugeordnet sind. Aufgrund dessen können in Verbindung mit einem breiten Spektrum an verfügbaren Technikmerkmalen innerhalb einer PKW-Baureihe durchaus Stationen existieren, an denen in Abhängigkeit des Modells, der Antriebsvariante und der vom Kunden bestellten Ausstattungen, nur geringfügige bis gar keine Arbeitsschritte anfallen. Einen am Bedarf orientierten Durchlauf der Linie, mit der Möglichkeit, Stationen, an denen keine Arbeitsschritte vollzogen werden, mit dem Werkstückträger nicht zu durchlaufen, lässt die schienengebundene starre Fördertechnik nicht zu. In der Folge durchläuft das Montageobjekt ggf. diverse Bearbeitungsstationen, an denen keine Wertschöpfung vollzogen wird. Der Einsatz layoutflexibler Fördertechnik ermöglicht daher eine Produktion, bei der nicht die Fördertechnik, sondern die fertigungstechnischen Erfordernisse, welche sich aus den Merkmalen des herzustellenden Produktes ergeben, den Weg innerhalb des Montagelayouts vorgeben. Das Effizienzsteigerungspotential das mit dem Einsatz der Montage-FTF verbunden ist, wird jedoch gravierend erweitert, wenn die Möglichkeit des Aus- und Wiedereinschleusens eines teilmontierten PKW aus respektive wieder in den Fertigungsprozess miteinbezogen wird. Indem jeder Werkstückträger für sich ein autonomes System darstellt, birgt dies die technische Voraussetzung, den Produktionsprozess eines einzelnen Montageobjektes zum Zeitpunkt des Auftretens eines Fehlerereignisses an jeder beliebigen

Stelle im Layout zu unterbrechen, ohne dass der Fertigungsprozess der anderen in der Montage befindlichen Werkstücke davon beeinträchtigt würde. Können bei einer klassischen Fließbandfertigung etwaig auftretende Fehler im Montageprozess oder der Tausch defekter Teile nicht innerhalb der Taktzeit bewerkstelligt werden, durchläuft der fehlerhafte PKW dennoch den darauffolgenden Produktionsprozess, so dass die betreffenden Fehler erst im Nachgang in Form von Nacharbeit behoben werden können. Liegt das Fehlerereignis – ausgehend von der Station, an der der PKW das Band verlässt – weit zurück, ist die Nachbearbeitung mit immensm Aufwand und Rückbaumaßnahmen verbunden, was sich zwangsläufig in hohen Kosten zur Fehlerbehebung niederschlägt. Fehlerereignisse können dabei höchst unterschiedliche Ausprägungen und Ursachen aufweisen und von Montagefehlern bis hin zu schadhafte und mangelhaften Bauteilen oder gar fehlenden Teilen aufgrund Lieferengpässen eines Zulieferers oder Zwischenfällen in der Materialflussskette des OEM selbst reichen. Je nach Aufbau der Fertigungslinie besteht ggf. an Umsetzern die Möglichkeit, einen teilmontierten PKW auszuschleusen. Oftmals ist dies strukturell bedingt jedoch nicht möglich, so dass in Konsequenz dessen fehlerhafte Fahrzeuge den kompletten Produktionsprozess durchlaufen, ehe erst im Nachgang durch speziell geschultes Personal die Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden können. Ein besonders prägnantes Beispiel ist der Kabelbaum, zu dessen Erstinstallation ca. 3 Stunden benötigt, für den nachträglichen Austausch jedoch 16 Stunden benötigt werden, vgl. [EW06]. Töpfer [Töp07] spricht deshalb von der „Zehnerregel der Fehlerkosten“ nach der die Kosten infolge Fehlerbehebung in Korrelation zum Komplettierungsgrad des Fahrzeuges stehen und um den Faktor 10 ansteigen. In Anbetracht dieser Umstände lässt sich somit durch Reduktion der Nacharbeit eine signifikante Steigerung der Effizienz erzielen. Um dies zu erzielen, gilt es, einerseits die Fälle, in denen Nacharbeit erforderlich wird, zu minimieren, andererseits aber auch, die Zeitaufwendungen für Nacharbeit deutlich zu senken.

Während hinsichtlich der Fehlervermeidung die Prozesssicherheit und Reaktionsgeschwindigkeit der intralogistischen Systeme einen wesentlichen Beitrag leisten kann, bedingt die Verringerung des Nacharbeitenspensums primär die Realisierung des Ausschleusens des Montageobjekts zum Zeitpunkt der Detektion eines Fehlerereignisses, um aufwendige Rückbaumaßnahmen zu vermeiden. Insofern erweist sich gerade diesbezüglich der Einsatz der Mobilien Montageinsel im Vergleich zur getakteten Fließbandmontage, die auf Stetigfördertechnik basiert, als qualitativer Vorteil. Ein Produktionssystem, das sich diese technischen Möglichkeiten zu Nutze macht, ist jedoch nur leistungsfähig und effizient, wenn auch die Materialbereitstellungskette und die Zuführtechniken darauf ausgelegt sind. Aufgrund der im Projekt „FlexProLog“ gewonnenen Simulationsergebnisse, wurden Funktionsprototypen der

Mobilien Montageinsel und des Mobilien Supermarktes gebaut, um diese am Forschungscampus ARENA 2036 der Universität Stuttgart zu erproben.

### 3 PROTOTYP „MOBILE MONTAGEINSEL“

Das Konzept des Montage- und Logistik-FTF stellt, wie bereits eingangs beschrieben, mit seinen Abmessungen von 3.500 x 6.000 mm nicht nur ein Transportmittel dar, sondern fungiert mit seiner integrierten Handhabungstechnik und der Arbeitsplattform als mobile Montageinsel. Dies stellt ein primäres Unterscheidungsmerkmal und eine klare Abgrenzung zum Stand der Technik dar, wenn man Kleinserien- oder Manufakturfertigungen heranzieht, wo bereits heute vielfach FTF als Montageträger in der Endmontage anzutreffen sind. Dabei handelt es sich jedoch meistens um monofunktionale Transportfahrzeuge, so dass eine bloße Adaption der existierenden Beispiele nicht zielführend wäre, da sich die gegenwärtige Situation de facto so darstellt, dass die technischen Möglichkeiten der Montageträger und -hilfsmittel die Grenzen der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, aber auch der Montageabläufe markieren. Nicht zuletzt deswegen stellt die Mobile Montageinsel eine disruptive Technologie dar, da sie Transportmittel, Montageträger, Handhabungstechnik und Arbeitsplattform verbindet. Das FTF lässt sich in 3 Hauptbaugruppen unterteilen, vgl. Abbildung 1.

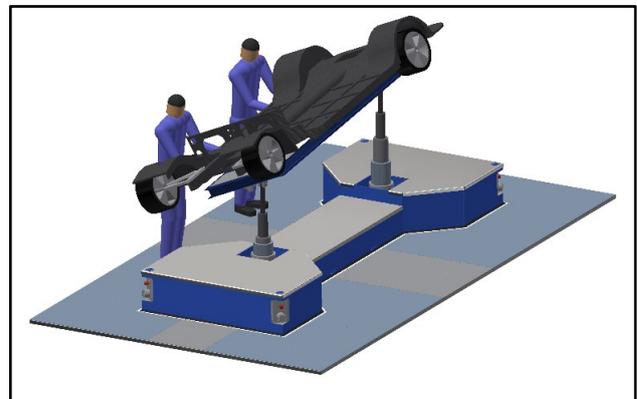


Abbildung 1. Mobile Montageinsel

Das Chassis mit den Fahrtriebseinheiten und Aggregaten bilden den Rumpf des FTF. Die Antriebe sind als kombinierte Fahr- und Lenkeinheiten ausgeführt, deren Schwenkbereich omnidirektionales Fahren, insbesondere Drehen auf der Stelle ermöglicht. Aufgrund der Grundmaße der Montageinsel ist dies essentielle Voraussetzung, um flächensparend manövrieren zu können. Eine weitere Primäranforderung, den Antrieb betreffend, ist die Spreizung des Fahrgeschwindigkeitsbereichs, für eine hohe Variabilität im Sinne der „individuellen Taktzeit“. Mit der Montageinsel im derzeitigen Prototypenstadium lassen sich Fahrgeschwindigkeiten zwischen 0,05 m/s und 1,5 m/s

erzielen. Der Rumpf des Fahrzeugs ist von der umlaufenden Arbeits- und Stehplattform umgeben. Über dem Rumpf befindet sich angehängt an die Hubeinrichtung der vollvariable Ladungsträger, der die Fahrzeugaufnahme darstellt. Der Aufbau des Chassis ähnelt in der äußeren Form der eines Knochens. Die jeweiligen Enden stellen die „Radkästen“ mit den jeweils zwei darin verbauten Schwenkantrieben dar. Der zwischen den Radkästen befindliche Steg stellt die „Taille“ dar, in die die Hubvorrichtung des Ladungsträgers integriert ist.

Ziel war es, so viel wie möglich Technikraum in die Radkästen zu legen, um die Bauhöhe der „Taille“ niedrig zu halten, damit in der unteren Grundposition des Ladungsträgers das Dach des darauf befindlichen PKW für den Monteur noch ergonomisch zu erreichen ist. Diese Restriktion schlägt daher auch zwangsläufig auf die Bauhöhe der Radkästen und damit den verfügbaren Bauraum der Antriebe durch. Da der Durchmesser von Rädern mit Polyurethanbandage mit der Tragfähigkeit korreliert, galt es daher, die auf die Fahrtriebe wirkende Eigenlast des FTF niedrig zu halten. Aus diesem Grund wurde für die Arbeitsplattform eine Ausführung gewählt, die vom Chassis des FTF hinsichtlich des Eigengewichts entkoppelt ist und somit ohne mechanisch tragende Verbindung zum Chassis auskommt.

Das Hubkonzept ist dergestalt, dass über zwei Teleskop-Hydraulikzylinder der Ladungsträger in Relation zur Grundposition, 500 mm über der Arbeitsplattform, um max. 1.500 mm angehoben werden kann. Über differentielles Ausfahren der Hubzylinder kann daher ein Nicken um die Querachse der Fahrzeugaufnahme erzielt werden, während das Schwenken um die Längsachse über zwei separate Hydraulikzylinder erfolgt. Hinsichtlich der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Montageinsel stellt jedoch die Fahrzeugaufnahme, die als Werkstückträger fungiert, die Primärkomponente dar. Erst die vollautomatische Verstellung der Fahrzeugaufnahme gewährleistet eine modellübergreifende Anpassungsfähigkeit und Verwendbarkeit innerhalb des kompletten Produktspektrums eines PKW-Herstellers. Dies ist zentraler Bestandteil und Grundvoraussetzung, will man künftig grundlegend verschiedene PKW-Modelle, die Bauart und die Abmessungen betreffend, in einer Fabrik mit ein und derselben förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschine in Gestalt der Mobilen Montageinsel produzieren. Denkt man an renommierte und bereits eingeführte PKW-Produzenten, würde sich durch diese innovative Montageinsel erstmals die Möglichkeit eröffnen, die Fertigung von Derivaten mit Hybrid-, Elektro- oder Gasantrieb (z.B. Audi, Mercedes-Benz) in einer Montagelinie zu bündeln, um auf diese Weise zwar baureihenübergreifend, aber das Antriebskonzept betreffend ähnliche PKW zusammen in einer Linie zu montieren. Da aufgrund der mittelfristig zu erwartenden Absatzvolumina konventionell angetriebener PKW unweigerlich die Austaktung auf deren Bedürfnisse ausgerichtet

sein wird, könnte durch die gebündelte Herstellung der alternativ angetriebenen Derivate in einer Linie deren Herstellung signifikant wirtschaftlicher gestaltet werden. Dass dies jedoch einen vollautomatisch, ohne Rüstzeit, anpassungsfähigen Werkstückträger/Fahrzeugträger voraussetzt, zeigt ein Blick auf das Portfolio alternativ angetriebener Modelle der Audi AG. Die Bandbreite reicht hier vom Kleinwagen A3 bis hin zum SUV Q7. Eine intelligente Pfadwahl innerhalb des Layouts, die sich nach der Konfiguration des PKW und nicht der Fördertechnik richtet, ist hierfür jedoch unabdingbare Voraussetzung. Um diesen Anforderungen zu genügen, verfügt das FTF über eine freie, nicht spurgebundene, Navigation auf Basis von Laserscannern und einer Indoornavigation mit Ultra-Wideband-Technologie. Auf diese Weise verfügt das FTF über die Voraussetzungen, innerhalb eines veränderlichen Layouts Absolutkoordinaten anzufahren, ohne Zuhilfenahme von fest in der baulichen Struktur eingelassenen Fixpunkten wie Magnetmarken oder RFID-Tags. Da sich über Ultra-Wideband auch mit kostengünstiger Hardware eine Lokalisierung von Ladungsträgern realisieren lässt und zudem eine Möglichkeit der Datenübertragung eröffnet, könnte dies eine Technologie zur Umsetzung eines dezentralen Steuerungskonzeptes darstellen, bei dem sämtliche förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschinen, Materialfluss- und Kommissioniersysteme, Bearbeitungsmaschinen aber auch Ladungsträger miteinander vernetzt sind. Die Montageinsel respektive das Werkstück stellt dabei den Ausgangspunkt des Materialabrufs dar, worauf hin ein Cyber-physisches System von diesem Abruf ausgehend die Zuführung in Echtzeit über eines der infrage kommenden Bereitstellungssysteme steuert.

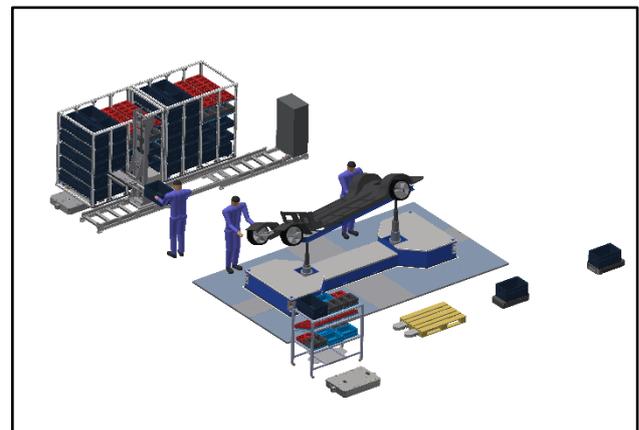


Abbildung 2. Materialzuführung zur Mobilen Montageinsel

#### 4 PROTOTYP „MOBILER SUPERMARKT“

Das Teilebereitstellungskonzept des „Mobilen Supermarktes“ besteht aus drei Einzelkomponenten, die auch unabhängig voneinander betrieben werden können, erst jedoch im Verbund eine Art mobiles Automatisches Kleinteilelager bilden, siehe Abbildung 3.

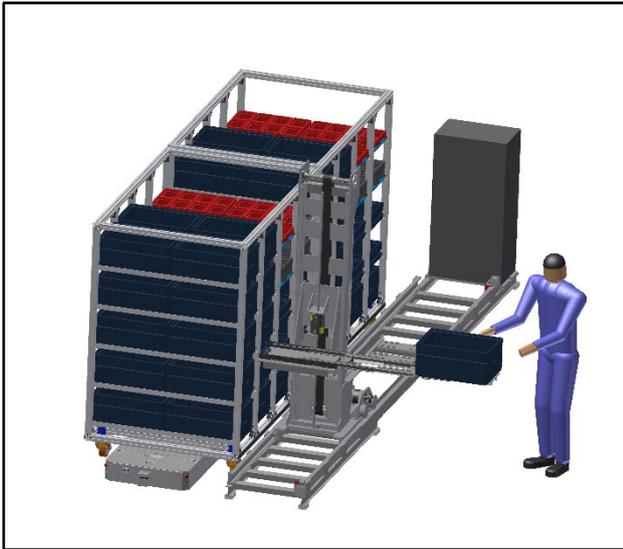


Abbildung 3. Mobiler Supermarkt

So umfasst der Mobile Supermarkt ein kompaktes FTF, welches mobile Regalmodule transportiert, sowie eine nicht-ortsgebundene Kommissioniereinheit zum Handling und der Ein- und Auslagerung von Kleinladungsträgern (KLT) aus mobilen Regalmodulen. Das Kompakt-FTF stellt eine Eigenkonzeption und -konstruktion des IFT dar. Indem das FTF die Regalmodule, deren Nutzlastkapazität 1.200 kg beträgt, für den Transport nicht anhebt, sondern lediglich schleppt, konnte einerseits eine äußerst kompakte und kostengünstige, andererseits eine unspezifische Konstruktion ausgeführt werden. Unspezifisch dahingehend, als dass das FTF nicht speziell nur für den Regaltransport konzipiert ist, sondern in dessen Grundkonfiguration auch zum Transport von Warenkörben, Sonderladungsträgern und Kleinladungsträgern eingesetzt werden kann. Darüber hinaus ist das Kompakt-FTF nach dem Baukastenprinzip „Trägerfahrzeug mit Anbaugerät“ für weitere Anwendungsszenarien geeignet, wodurch die Typenvielfalt der eingesetzten FTF reduziert werden kann.

Bei der Kommissioniereinheit handelt es sich um ein quasistationäres Mini-Regalbediengerät, das sowohl in einer der Montage vorgelagerten Kommissionierzone zur Bestückung der Regalmodule, aber auch direkt am Verbaort eingesetzt werden kann. Am Verbaort kommt dieses System vorzugsweise dann zum Einsatz, wenn an einer Montagestation Teile in hoher Varianz und Verbaquote montiert werden, ein Beispiel hierfür sind u.a. Außenspiegel oder Lenkräder. Die mobilen Regale werden dann mit einem Portfolio aller Varianten des Bauteils bestückt, so dass die Sequenzierung der Teile erst direkt am Verbaort hergestellt wird und nicht schon in den vorgelagerten Logistik-Supermärkten. In diesem Anwendungsszenario übergibt das Mini-Regalbediengerät in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration dem Werker das für den anstehenden Arbeitsschritt erforderliche Material nach dem Ware-

zum-Mann-Prinzip. Primäres Ziel bei der Konstruktion des Mini-RBG war daher, eine nicht-ortsfeste Anlage zu schaffen, für deren Betrieb lediglich eine Stromversorgung als Infrastruktur vorhanden sein muss. Sämtliche Technik ist daher onboard verbaut und die Konstruktion freitragend, so dass das Mini-RBG ohne Eingriffe in die Bodenstruktur der Fabrik- oder Lagerbereiche mittels eines Staplers oder Handgabelhubwagens umgezogen werden kann, womit der Forderung nach Layoutflexibilität Rechnung getragen wird. Universalität, sowie eine kompakte Ausführung stellten weitere Hauptanforderungen dar. Das Mini-RBG ist eine komplette Eigenkonstruktion des IFT, vom komplexen doppeltief ausfahrenden Teleskoptisch bis hin zu den Umlenk- und Antriebsrollen der Hülltriebe. Nur so konnte letztlich ermöglicht werden, dass doppeltief (1.200 mm) ein- und ausgelagert werden kann, die benötigte Gassenbreite des Mini-RBG jedoch lediglich ca. 660 mm beträgt. Die Universalität dieses Betriebsmittels ist dahingehend gewährleistet, dass die Ein-/ Auslagerungseinheit unabhängig von den Spezifikationen der Kleinteilebehälter und Tablare mit Grundmaß 600 x 400 bzw. 400 x 300 mm eingesetzt werden kann und zu deren Handhabung keine spezifischen Greifertaschen benötigt werden. Das Mini-Regalbediengerät besteht aus den Hauptbaugruppen Grundrahmen mit Schiene, Fahrwerk, Hubgerüst, Hubtisch und der darauf befindlichen Teleskopiereinheit.

Um die Anforderungen nach einer Nutzlast von 60 kg (entspricht 2 KLT 400 x 300 mit max. zulässiger Beladung) mit hoher Umschlagleistung und der freitragenden Konstruktion, die ohne Bodenverankerung auskommt, zu realisieren, musste besonderes Augenmerk auf die Schwerpunktage des Regalbediengerätes gelegt werden. Insofern wurden alle Achsen mit gewichtssparenden formschlüssigen Hülltrieben ausgeführt und die Antriebe zentral positioniert. Die Anlage verfügt über eine Schienenlänge von 5.000 mm und ist damit derzeit für die gleichzeitige Be- und Entladung von zwei der fahrbaren Regalmodule mit je 40 KLT Plätzen mit Grundmaß 600 x 400 mm ausgelegt. Durch die Ausführung des Horizontalantriebs mit endlosem Zahnriemen in Omega-Anordnung und fahrzeuggebundenem Antrieb ist die Schienenlänge jedoch beliebig variierbar und für eine größere Anzahl Regalmodule erweiterbar. Auf der Horizontalachse wird in der jetzigen Konfiguration eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von 2 m/s erreicht, während die Vertikalachse mit 1 m/s betrieben wird. Die maximale Ein-/Auslagerungshöhe beträgt derzeit 1.800 mm, während die minimal erreichbare Fachbodenhöhe bei 320 mm über Bodenniveau liegt. Durch die hohe Dynamik der Achsbewegungen können selbst bei maximalen Fahrwegen in der Konstellation mit zwei doppeltiefen Regalmodulen 4 Behälter in nur 90 Sekunden bereitgestellt werden. Je nach Anwendungsszenario kann dies an einer ortsfesten Übergabestelle erfolgen, oder in einer Kollaboration zwischen Mensch und Maschine, bei der die Übergabeposition durch den Werker intuitiv vorgegeben wird. Die Bemessung der Performance mit 90 s entspricht den

Anforderungen, die sich bei der Versorgung einer klassischen Fließbandmontage ergeben. Zur Bewertung der Durchsatzleistung für die Gesamtkonzeption einer flexiblen und wandelbaren Produktion, sowie der einzelnen Hardwarebestandteile, wurde der Vergleich mit einer variantenreichen getakteten Fließbandfertigung aus dem Premiumsegment herangezogen, vgl [Pop18].

Das Erfüllen der Leistungsanforderungen bei einer etwaigen Implementierung der förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschinen in eine getaktete Fließbandfertigung stellte ein wesentliches Kriterium für die Bewertung der im Zuge des Projekts „FlexProLog“ entwickelten Konzepte dar. Die Leistungsfähigkeit der neuartigen Teilebereitstellungskonzepte wurde anhand von Simulationen, basierend auf realen Materialflussdaten eines Oberklassefahrzeuges untersucht, so dass die Ergebnisse als belastbar angesehen werden können. Die in der Simulation ermittelten Durchsatzkennwerte insbesondere aber auch die Flexibilität Störfälle bzw. kurzfristige Änderungen im Produktionsablauf bewältigen zu können, war letztlich maßgebend dafür, ob das Konzept – wie im Falle des Mini-RBG bis hin zum Bau eines Prototyps – weiterverfolgt wurde. Die Konzeption des Mobilien Supermarktes zielt daher auf die Bereitstellung von Bauteilen und Montagmaterial bedarfsgerecht in Echtzeit, sprich „Just-In-Realtime“, ab, was im Kontext eines sich kurzfristig ändernden Produktionsprogramms eine notwendige Bedingung für die Realisierung einer flexiblen Produktion darstellt. Bereitstellungskonzepte, die mehrere Tage Vorlauf benötigen, um die Sequenzierung im Vorfeld herzustellen, sind dann hinfällig, da sich die Sequenz des Materialabrufes nicht nur durch Ausschleusvorgänge kurzfristig ändern kann, sondern auch infolge Priorisierung und Kapazitätsverlagerung innerhalb des Produktportfolios.

Das System des Mobilien Supermarktes zeichnet sich jedoch nicht nur durch seine Reaktionsgeschwindigkeit aus, sondern auch dadurch, dass durch dessen Einsatz manuelle Kommissionier- und Umschlagprozesse reduziert werden, indem dem Mitarbeiter stets das für den anstehenden Arbeitsschritt benötigte Material zielgerichtet angebracht wird. Dadurch wird einerseits die Reduktion potentieller Fehlerquellen erzielt, gleichzeitig aber auch eine Entlastung der Montagemitarbeiter ermöglicht. Insofern muss für die Anwendung am Verbauort eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine bestehen, da dieses Szenario eine Form der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) darstellt. Um den Anforderungen an ein möglichst offenes Anlagenlayout, hoher Umschlagleistung, gleichzeitig aber auch der Gewährleistung der Personensicherheit, gerecht zu werden, bedarf es in weiten Teilen einer über den Stand der Technik hinausgehenden Anlagensteuerung sowie zugehöriger Sicherheits- und Bedienkonzeptionen. Zur Gewährleistung der Maschinensicherheit einerseits, andererseits aber auch der intuitiven Bedienung, ohne die Performance zu beeinträchtigen, sieht das Sicherheits-

konzept des Mini-Regalbediengerätes den Einsatz eines sicheren Kamerasystems in Verbindung mit ortsauflösenden Sicherheitsschaltmatten vor.

Ferner setzt aber auch die Bereitstellung des Materials nach dem Prinzip „Just-in-Real-Time“ ein neuartiges, dezentrales Materialflusssteuerungskonzept voraus, bei dem sich die Bereitstellung des Materials am Echtzeitbedarf der Montageobjekte orientiert und nicht einem mit mehrtägigem Vorlauf festgelegtem Produktionsprogramm folgt. Dem Prinzip des offenen Layouts mit intelligenter Pfadwahl der Montageträger folgend, muss das Material zum Montageobjekt geliefert werden, vgl. Abbildung 2. Dies stellt eine völlig konträre Situation zur Fließfertigung dar, bei der das Montageobjekt durchläuft, wo das Material bereits für das festgelegte Produktionsprogramm vorsequenziert bereitgestellt ist.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Zeitraum zwischen 2014 und 2017 konnten am IFT mithilfe von Fördermitteln des Landes Baden-Württemberg nicht nur Konzepte für die wandlungsfähige und flexible Automobilproduktion der Zukunft erarbeitet werden, sondern vielmehr auch einige für deren Umsetzung erforderliche Primärkomponenten als Prototypen umgesetzt werden. Hierzu zählt u.a. eine mobile Montageinsel auf Basis eines FTF, dessen Einsatz in der automobilen Endmontage dazu befähigt, ohne Taktbindung zu fertigen. Neben der Realisierung einer „individuellen Taktzeit“ in Abhängigkeit der konkreten PKW-Konfiguration, kann durch die mechanische Entkopplung der einzelnen Werkstückträger darüber hinaus ein Ausschleusen teilmontierter PKW aus der Montage bewerkstelligt werden. Nacharbeitskosten können dadurch signifikant gesenkt werden, indem die Behebung von Fehlern zum Zeitpunkt des Fehlerereignisses und des damit verknüpften Fertigungszustandes eingeleitet werden kann. Eine Endmontage, deren Fördertechnik auf der Mobilien Montageinsel basiert, bietet zudem die Möglichkeit, die Anlage entsprechend der Auftragslage zu skalieren, was mit der klassischen starren Fördertechnik nicht gegeben ist. Gerade für neue, aufstrebende Unternehmen die in den Markt der Elektromobilität einsteigen, ist dies ein evidenter Investitionsvorteil, da die Anlagen mit der Auftragslage wachsen können, denn im Bedarfsfall können mehr oder weniger der Montageinseln eingesetzt werden. Vor allem die Nachfrage von Modellen mit alternativen Antriebskonzepten, die nicht zuletzt auch in kausalem Zusammenhang zu politischen Rahmenbedingungen steht, wird das Spannungsfeld zwischen auf Massenfertigung invarianter Produkte ausgelegten PKW-Fließfertigung und der faktischen Variantenvielfalt weiter verstärken und mittelfristig einen Paradigmenwechsel, hin zu einer flexiblen und wandelbaren Produktion beschleunigen. Die Automobilwirtschaft steht hier vor vielfältigen Herausforderungen,

die Logistik darf daher nicht Schranke, sondern muss Wegbereiter für effiziente Prozesse sein. Die am IFT entwickelten neuartigen förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschinen können hierzu einen Beitrag leisten und werden derzeit für die sukzessive Weiterentwicklung der ersten Prototypen am Forschungscampus ARENA 2036 an der Universität Stuttgart erprobt.



## 6 FÖRDERHINWEIS

Das logistische Gesamtkonzept für eine Automobilproduktion ohne Band und Takt entstand im Rahmen des Projekts „FlexProLog“. Die Weiterentwicklung des Systems „Mobiler Supermarkt“ sowie dessen Umsetzung als Prototyp erfolgte durch das Projekt „LeitFlexPro“. Beide Projekte wurden durch das Ministerium für Wirtschaft und Finanzen des Landes Baden-Württemberg gefördert. Der Bau des Prototyps der „Mobilen Montageinsel“ wurde durch Fördermittel des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg realisiert.

## LITERATUR

- [EW06] Endres, E.; Wehner, T.: Störungen zwischenbetrieblicher Kooperation – Eine Fallstudie zum Grenzstellenmanagement in der Automobilindustrie. In: Management von Netzwerkorganisationen: Beiträge aus der Managementforschung, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Göt07] Götz, A.: Zukunftsstandort Deutschland. In: Automobilproduktion, Ausgabe 2 2007
- [WP15] Wehking, K.-H.; Popp, J.: Automobilproduktionslogistik – heute, morgen und übermorgen. 32. Logistik-Kongress der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
- [Pop18] Popp, J.: Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band. Dissertation Universität Stuttgart, 2018
- [Ros08] Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Dissertation Universität Stuttgart, 2008
- [SA15] Staebelin, T.; Aoki, K.: Planning and scheduling in the automotive industry: A comparison of industrial practice at German and Japanese makers. In: International Journal of Production Economics 162, 2015
- [Töp07] Töpfer, A.(Hrsg.): Six Sigma: Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität. Springer Verlag, Berlin, 2007

---

**Dipl.-Ing. Matthias Hofmann**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Adresse: Universität Stuttgart  
Institut für Fördertechnik und Logistik  
Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

Telefon: +49 711 685-83792, Fax: +49 711 685-83769  
E-Mail: matthias.hofmann@ift.uni-stuttgart.de