

# Sicherheits- und Bedienkonzept für kollaborierende Materialflusssysteme

## Safety and operating concept for collaborative material flow systems

*Matthias Hofmann*

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

**I**n Anbetracht volatiler Märkte, Handelskonflikten und epidemiologischer Ereignisse werden Flexibilität, Wandelbarkeit und losgrößenunabhängige Produktionssysteme zunehmend zu Schlüsselmerkmalen wetterfester Unternehmensstrategien, auf die es die intralogistischen Prozesse auszurichten gilt. Vor dem Hintergrund der Produktion individualisierter, variantenreicher Serienprodukte bis hin zu Losgröße 1 und angesichts steigender Gestehungskosten, rücken automatisierte Systeme, die den Menschen physisch und kognitiv entlasten und dabei in Koexistenz mit ihm arbeiten zunehmend in den Fokus. Um dies zu bewerkstelligen, bedarf es innovativer Sicherheits- und Bedienkonzepte für die sichere und intuitive Mensch-Maschine-Interaktion. Ein am IFT entwickeltes Materialflusssystem namens „Mobiler Supermarkt“ zielt darauf ab, den Mitarbeiter\*innen in Montage und Logistik das benötigte Material in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration nach dem Ware-zum-Mann-Prinzip anzureichen.

*[Schlüsselwörter: Losgröße 1, Mensch-Maschine-Interaktion, Ware-zum-Mann-Prinzip]*

**I**n view of volatile markets, trade wars and epidemiological events, flexibility, convertibility and lot size independent production systems are becoming key elements of weatherproof corporate strategies, on which the intralogistics have to be adjusted. From the backdrop of the production of more individualized and variable standard products up to batch size one and in view of rising production costs automated systems that relieve people physically and cognitively while working in coexistence with them are increasingly coming into focus. This requires innovative safety and operating concepts for the safe man-machine-interaction. One such material flow system called “Mobile Supermarket” was developed at the IFT and is designed to provide the employees in assembly and logistics the needed parts in direct human-machine-collaboration according to the goods-to-man-principle.

*[Keywords: batch size one, man-machinery interaction, goods-to-man principle]*

### 1 MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG

Die Automobilproduzenten, Zulieferer sowie weite Teile des Maschinen- und Anlagenbaus sehen sich derzeit mit Herausforderungen bisher nicht da gewesenen Ausmaßes konfrontiert. Neben einem bereits deutlich spürbaren strukturellen Wandel der Mobilitätsformen haben im Jahr 2020 Handelskonflikte und epidemiologische Ereignisse die Bedürfnisse nach effizienten, losgrößenunabhängigen Fertigungskonzepten erneut verstärkt. Insbesondere für die großen OEM der Automobilbranche lässt das starre Fließbandprinzip ein höheres Maß an Fertigungsflexibilität – und damit einhergehender Ausbringungseffizienz – gemeinhin nicht zu, vgl. [1]. Demgegenüber sind es in kleinen und mittelständischen Betrieben ohne Fließfertigung gerade die manuellen Prozesse in Montage und Logistik, die in Verbindung mit einem kurzen Planungsvorlauf einerseits Flexibilität schaffen, andererseits aber infolge hoher Personalbindung die Gestehungskosten treiben und damit die Gewinnmargen im internationalen Wettbewerb schrumpfen lassen.

#### 1.1 KOSTENFAKTOR MATERIALBEREITSTELLUNG

Die Prozessstufen der Materialbereitstellungskette sind von besonderer Bedeutung, wenn es gilt, die Abläufe in der Produktionslogistik und Montage effizienter zu gestalten. So sind insbesondere die Kommissionierung und Zuführung von Bauteilen und Materialien bis an den Verbauort nach wie vor stark von manuellen Tätigkeiten geprägt und dementsprechend infolge Personalbindung signifikante Kostenfaktoren in sämtlichen Sparten des Maschinen- und Anlagenbaus bzw. auch für das ganze produzierende Gewerbe der Metall- und Elektroindustrie. Vor dem Hintergrund der Produktion individualisierter, variantenreicher Serienprodukte bis hin zu Losgröße 1, kommt dies umso deutlicher zum Tragen. Aufgrund der bei den OEM der Automobilindustrie vorherrschenden Wertschöpfungstiefe erstreckt sich daher zwangsläufig die Problemstellung der Variantenvielfalt nicht nur auf die Fahrzeugproduzenten selbst, sondern auch auf deren Zulieferer, die vielfach kleine und mittelständische Unternehmen der Metall- und Elektroindustrie darstellen, denn letztlich bedingt

eine hohe Varianz an Endprodukten – wie z.B. Fahrzeugmodellen und -spezifikationen – auch eine hohe Bauteil- und Komponentenvarianz. In Konsequenz dessen werden die innerbetrieblichen Logistikprozesse branchenübergreifend zunehmend komplexer und umfangreicher. Bereits hieraus resultiert ein dringender Bedarf zur Rationalisierung der produktionslogistischen Prozesse in all jenen Betrieben, wo aus einem großen Teilespektrum bedarfsgerecht die Bereitstellungssequenz für kleine Produktionslosgrößen gebildet werden muss, vgl. [1].

Die Automobilproduzenten des Premiumsegments nehmen diesbezüglich sicherlich gegenwärtig noch eine Ausnahmestellung ein. Der gesellschaftliche Stellenwert des Automobils und das hohe Identifikationspotential für die Kunden führt hier zu einer wesentlich höheren Preisakzeptanz und damit einhergehenden Gewinnmargen, als dies bei anderen Investitions- und Konsumgütern der Fall ist, wo zudem aufgrund der globalisierten Märkte ein größerer Preiswettbewerb bei konkurrierenden Produkten besteht. Für Zulieferbetriebe wiegt der Zwang zur Rationalisierung indessen ungleich höher, als dies bei den etablierten OEM der Automobilbranche der Fall ist, die in der Wertschöpfungskette oben stehen und ihrerseits Aufwendungen bislang durchaus erfolgreich an den Endkunden durch Anpassung des Preisniveaus weitergeben konnten. Insofern besteht für Unternehmen der Metall- und Elektroindustrie, sowohl im direkten Endkundengeschäft (B2C), als auch beim Firmenkundengeschäft (B2B) aufgrund globaler Konkurrenz ein erhöhter Innovationsdruck, sowohl produkt- als auch produktionsseitig. Hochqualifizierte Mitarbeiter\*innen aus der Fertigung von Kommissioniertätigkeiten zu entbinden, damit diese lediglich originäre, wertschöpfende Arbeitsvorgänge vollziehen, birgt somit vor dem Hintergrund des immensen Lohnkostengefälles im internationalen Vergleich ein hohes Kosteneffizienzsteigerungspotential. Die Automatisierung des innerbetrieblichen Materialflusses mittels statischer Lagersysteme und Förderstrecken scheidet jedoch insbesondere überall dort aus, wo Layoutflexibilität gefordert ist. Vollautomatisierte Lösungen erweisen sich indessen auch gerade dort als nur bedingt respektive nicht anwendbar, wenn ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in der Handhabung von Teilen gefordert ist. Hier ist der Mensch mit seinen empfindlichen Sinnen, kognitiven Fähigkeiten und seiner Bewegungsgeschicklichkeit bis dato der Automatisierung stets dort überlegen, wo ein schnelles, situatives Erfassungs- und Anpassungsvermögen gefordert ist. Ansätze zur Effizienzsteigerung könnten daher in der Fragmentierung von Arbeitsprozessen mit teilautomatisierten Lösungen liegen, bei der autonom agierende Roboter und Menschen in Koexistenz agieren und aktiv kollaborieren. Das am IFT entwickelte Materialbereitstellungskonzept namens „Mobiler Supermarkt“ zielt daher darauf ab, mittels einer automatisierten Bereitstellung nach dem Ware-zum-Mann-Prinzip, insbesondere an Montagearbeitsläizen, manuelle Umschlag- und Kommissioniervor-

gänge zu reduzieren und durch die Mobilität der kleinskaligen Komponenten ein hohes Maß an Strukturflexibilität zu schaffen. Der „Mobile Supermarkt“ stellt dabei nur eine Komponente des am IFT entwickelten Konzeptes, vgl. Abbildung 1, für eine flexible und wandelbare Automobilproduktion dar, vgl. [1], [2] und [3].

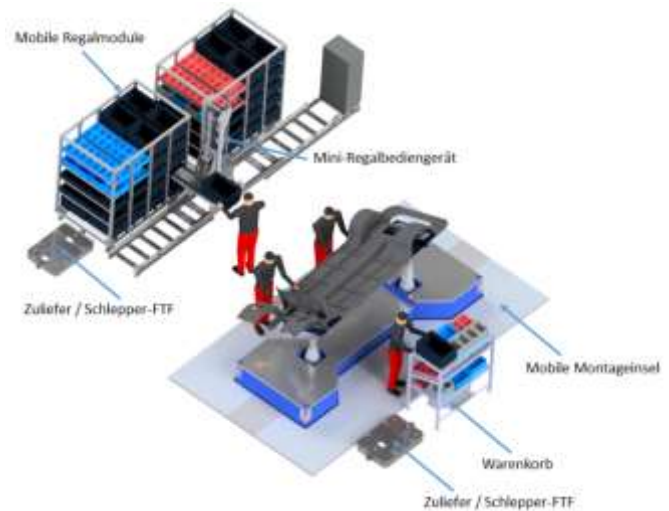


Abbildung 1. Materialzuführung zu einer mobilen Montageinsel mittels mobiler und semimobiler Komponenten [1], [2].

## 1.2 SPANNUNGSFELD ZWISCHEN EFFIZIENTER UND ZUGLEICH SICHERER MENSCH-MASCHINE-KOLLABORATION

Der Betrieb von Maschinen und Anlagen unterliegt länderspezifischen Bestimmungen. Für die Länder der Europäischen Union bildet die Maschinenrichtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates 2006/42/EG [4] den rechtlichen Rahmen für nationale Vorschriften, wenn es gilt, die Sicherheit von Personen und Arbeitnehmern im Betrieb von Maschinen und deren Umgang zu gewährleisten. Für den Betrieb von mobilen und ortsfesten Maschinen besteht somit bereits im rechtlichen Sinne ein Spannungsfeld im Kontext des Schutzes und der Wahrung der menschlichen Unversehrtheit. Nationale und internationale Normen, wie z.B. die DIN EN ISO 12100 [5], sind daher direkter Ausfluss der durch die Europäische Union und des Europäischen Rates verabschiedeten Gesetzgebung. So gibt die DIN EN ISO 12100 Leitsätze und Methoden für die Konstruktion von sicheren Maschinen vor und beschreibt Verfahren zur Ermittlung von Gefahrenstellen sowie der Beurteilung von Risiken und Gefährdungspotentialen für alle einen Lebenszyklus einer Maschine umfassenden Betriebsphasen. Gelingt es nicht, durch eine inhärent sichere Konstruktion die Sicherheit des Bedienpersonals bzw. der sich in der Umgebung befindlichen Personen während der Arbeitsprozesse zu gewährleisten, sind geeignete Schutzmaßnahmen vorzusehen und Vorkehrungen zu treffen. Diesbezüglich ist insbesondere die Einhaltung von Sicherheitsabständen, wie sie u.a. DIN EN 349

[6] und DIN EN ISO 13857 [7] vorsehen, während des Betriebs von Maschinen zu nennen. Hierfür kommen in der Anwendungspraxis vielfach physisch trennende Schutzeinrichtungen gemäß DIN EN ISO 14120 [8] oder berührungslos wirkende unter Verwendung optoelektronischer Schutzsysteme gemäß DIN EN ISO 13855 [9] zum Einsatz. Bereits daran lässt sich unzweifelhaft erkennen, dass eine direkte Mensch-Maschine-Kollaboration mit Maschinen, die aufgrund ihrer Arbeitsweise ein erhebliches Gefährdungspotential bergen, komplexen technischen und normativen Anforderungen unterliegt. Dies betrifft insbesondere kollaborative Arbeitsprozesse bei denen Bewegungen einer Maschine gleichzeitig zu manuellen Tätigkeiten erfolgen und keine sequenzielle Abfolge mit entsprechenden Pausen- bzw. Stillstandzeiten der Maschine besteht. Insofern besteht zunächst insbesondere für solche Anwendungen ein Zielkonflikt hinsichtlich der Maschinen- und Prozesseffizienz, bei denen sich Personen für die Kollaboration im Bewegungsbereich einer Maschine bzw. in unmittelbarer Nähe dazu aufhalten sollen. Klassische Prinzipien der Absicherung mittels trennender Schutzeinrichtungen scheiden hier bereits per se aus. Gleichwohl ist ein Sicherheitskonzept, welches statische Schutzzonen mittels optoelektronischer Sicherheitseinrichtungen beinhaltet, ebenso wenig zielführend und stünde dem Ziel einer Kollaboration diametral entgegen. Vielmehr bedarf es adaptiver Lösungen, um zu gewährleisten, dass der Mensch in seiner Tätigkeit weder gehindert noch gefährdet wird, andererseits aber auch Stillstandzeiten der Maschine infolge der Verletzung von Sicherheitsabständen und einer damit einhergehenden Nothalt-Funktion vermieden werden.

## 2 KONZEPT „MOBILER SUPERMARKT“

Speziell ausgerichtet auf die Anforderung, Bauteile mit hoher Verbauprate und Varianz ohne aufwändige Vorsequenzierung am Montageplatz bereitzustellen, wurde am IFT eine Art kleinskaliges ortsbewegliches Automatisches Kleinteilelager (AKL) entwickelt. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Anwendungsszenario eines AKL in einer Lager- und Kommissionierzone – im automobilen Umfeld auch Logistik-Supermarkt genannt – soll das hier in Rede stehende direkt am Verbauplatz in der Fertigung eingesetzt werden können. Insofern stellt das am IFT entwickelte Teilebereitstellungssystem quasi einen mobilen Supermarkt dar. Während ein klassischer Logistik-Supermarkt einen der Produktion – ggf. auch räumlich weit entfernten – vorgelagerten Bereich darstellt, in dem die Sequenzierung der Bauteile und des Montagematerialbedarfs vollzogen wird, zielt der „Mobile Supermarkt“ darauf ab, die Sequenz erst am Verbauplatz herzustellen, um dadurch der Anforderung nach Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Materialversorgung Rechnung zu tragen. Dies kommt nicht nur in Manufaktur- und Werkstattfertigungen zum Tragen, sondern vielmehr auch in der variantenreichen Se-

rienproduktion mit Fließprinzip, wenn sich infolge unkalulierbarer Ereignisse die Durchlaufsequenz der Werkstücke ändert. In dem Fall erfährt das Produktionsprogramm und die Perlenkette der Materialbereitstellung für den in der Vorausschau geplanten Abruf eine Unterbrechung auf die es agil zu reagieren gilt. In einer flexiblen und wandelbaren Produktionsumgebung kommt dies umso mehr zum Tragen, indem keine strikte Zeit- und Ortsbindung von Montageumfängen besteht, so dass statt einer stations- vielmehr eine objektspezifische Belieferung zu erfolgen hat, die sich am tatsächlichen Echtzeitbedarf des Werkstücks zu orientieren hat und daher per se keiner statischen Plansequenz folgen kann.

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, vgl. [1], [2] und [3]. 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, vgl. Abbildung 2.



Abbildung 2. Prototyp des Mobilen Supermarktes [1], [2].

Bei der Kommissioniereinheit handelt es sich um ein semimobiles Mini-Regalbediengerät, das sowohl in einer der Montage vorgelagerten Kommissionierzone zur Bestückung der Regalmodule, aber auch direkt am Verbauplatz eingesetzt werden kann. In diesem Anwendungsszenario soll das Mini-Regalbediengerät in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration dem Werker das für den anstehenden Arbeitsschritt erforderliche Material nach dem Ware-zum-Mann-Prinzip überreichen. 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. Dies macht es erforderlich, nicht nur sämtliche Technik onboard zu verbauen und die Konstruktion freitragend ohne Verankerung zur Bausubstanz auszuführen, sondern insbesondere eine

Sicherheitsarchitektur zu konzipieren, die ebenso mobil ist und eine produktive Kollaboration mit den Mitarbeiter\*innen ermöglicht. Eine Absicherung mittels trennender Schutzeinrichtungen im Sinne einer klassischen Automatisierung hinter Zäunen scheidet demnach bereits aufgrund der fundamentalen Anforderungen aus.

### 3 SICHERHEITS- UND INTERAKTIONSKONZEPT FÜR DEN MOBILEN SUPERMARKT

Das System des Mobilen Supermarktes zeichnet sich nicht nur durch seine Reaktionsgeschwindigkeit im Sinne des logistischen Kontextes 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 überreicht wird. Dies erfordert jedoch Formen der Interaktion zwischen Mensch und Maschine, da es sich um eine Form der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) handelt. 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. Um eine flüssige und produktive Kollaboration zu gewährleisten, besteht zwangsläufig ein kausaler Zusammenhang zwischen Sicherheit und Bedienung und ist daher zwingend miteinander verknüpft zu betrachten. Bereits die Nutzlast von 60 kg in Verbindung mit einer maximalen Verfahrgeschwindigkeit der Achsen von 2 m/s lassen erkennen, dass das von dem Mini-RBG ausgehende Gefährdungspotential ungleich kritischer einzustufen ist, als jenes, das von bisher bekannten Kollaborationsrobotern ausgeht, vgl. [1].

#### 3.1 SENSORKONZEPT

Zur Erfüllung der aus der Gefährdungsanalyse resultierenden Anforderungen hinsichtlich der Personensicherheit werden ortsbewegliche optoelektronische Schutzeinrichtungen in Form von zwei Sicherheitslaserscannern eingesetzt, welche direkt am Mini-RBG verbaut sind, um die Mobilität der Maschine uneingeschränkt zu wahren. Durch die Überwachung definierter Schutzfelder wird durch die Laserscanner primär sichergestellt, dass sich während der Fahrbewegung der Horizontal- und Vertikalachse keine Menschen im Aktionsbereich der Achsen aufhalten. Die räumliche Ausdehnung der Schutzfelder bemisst sich gemäß DIN EN ISO 13855 [9] vorwiegend anhand der Annäherungsgeschwindigkeit der Menschen in der Umgebung der Maschine sowie der Nachlaufzeit, welche diejenige Zeitspanne angibt, nach der sich ab dem Auslösen eines Nothalt-Befehls alle Achsen im Stillstand befinden. Dementsprechend korreliert die Bemessung der Schutzfelder insbesondere mit den Achsgeschwindigkeiten, den bewegten Massen, den höchstzulässigen Beschleunigungen sowie dem steuerungsseitigen Ansprechverhalten der Steuerungskomponenten infolge Latenz. In Abhängigkeit der Betriebs- und Fahrzustände kann daher eine differenzierte Betrachtung erfolgen, welche letztlich zwingend erforderlich ist, um eine Kollaboration für die Materialübergabe zu realisieren. Dementsprechend ist zwischen Fahrbewegungen, die der Be- und Entladung der Regale dienen und dem eigentlichen Übergabeprozess zu differenzieren. Für eine Ein- oder Auslagerung von KLT in bzw. aus den Regalmodulen, müssen alle drei Achsen aktiv sein. Während dieser Prozesse besteht das höchste Gefährdungspotential, weil insbesondere infolge des Risikos von Quetschen und Abscheren im Bereich des Schienenbetts und dem Spalt zwischen Hubmast des Mini-RBG und den Regalen schwerwiegende irreversible Verletzungen hervorgerufen werden können. Der Vorgang der Materialübergabe an den Werker ist hingegen dergestalt, dass zunächst die zur Übergabe bestimmte x- und y-Koordinaten angefahren werden. In dieser Phase ist das primäre Schutzfeld noch aktiv. Im nächsten Schritt kann dann das Schutzfeld verringert werden, was über ein aktives Umschalten der Zonen-Einstellung der Laserscanner erfolgt. Für das finale Anreichen des KLT wird lediglich die z-Achse (Teleskopisch) zu der den Regalen abgewandten Seite verfahren. Da das hierdurch resultierende Gefährdungspotential als geringfügig einzustufen ist, indem keine Quetsch- und Scherstellen existieren, so dass lediglich die Gefahr des Stoßens verbleibt, kann letztlich das Schutzfeld deutlich verkleinert werden und sich der Werker in Richtung Übergabeposition begeben. Stehen alle Achsen still, wird den Mitarbeiter\*innen akustisch und / oder visuell signalisiert, dass die Materialentnahme vom Teleskopsicht des RBG erfolgen kann. In dieser Phase ist kein Schutzfeld, sondern lediglich ein Warnfeld der Laserscanner aktiv. Das Betreten und Verlassen dieses Warnfeldes ist aktiver Bestandteil für die Detektion der Beendigung der Materialübergabe. Das Verlassen des Warnfeldes stellt den Trigger für die anschließende Umschaltung der Zonenkonfiguration an den Laserscannern auf Schutzfeld dar, so dass ein automatischer Anlauf des Mini-RBG für den nachfolgenden Fahrauftrag erfolgen kann. Um Fehlinterpretationen hinsichtlich des unbeabsichtigten Betretens und Verlassens des Warnfeldes ausschließen zu können, wird zusätzlich an der Übergabeposition eine eng begrenzte Quittier-Zone definiert, die von beiden Laserscannern redundant überwacht wird.

Um unnötige Laufwege zu sparen, soll die Übergabeposition möglichst variabel in Abhängigkeit der Position, wo die Mitarbeiter\*innen das Material benötigen, erfolgen. Für die hierfür erforderliche Positionsdetektion werden Messdaten der Laserscanner herangezogen und ausgewertet, vgl. Abbildung 3. Die Person, die das Material benötigt, kann somit intuitiv die Stelle für den Übergabevorgang beeinflussen.

Um unnötige Laufwege zu sparen, soll die Übergabeposition möglichst variabel in Abhängigkeit der Position, wo die Mitarbeiter\*innen das Material benötigen, erfolgen. Für die hierfür erforderliche Positionsdetektion werden Messdaten der Laserscanner herangezogen und ausgewertet, vgl. Abbildung 3. Die Person, die das Material benötigt, kann somit intuitiv die Stelle für den Übergabevorgang beeinflussen.



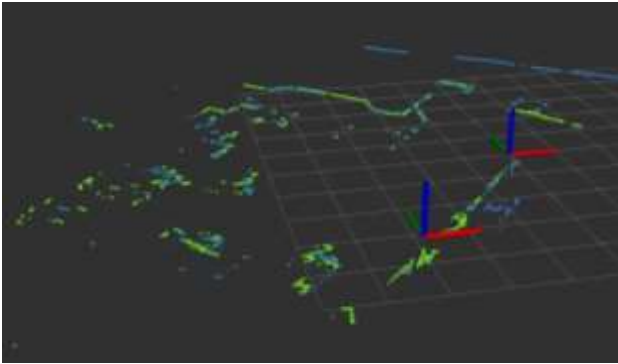


Abbildung 3. Visualisierung der Messdaten der Laserscanner. Umrisse sind in blau (Scanner 1) und grün (Scanner 2) dargestellt, vgl. Abbildung 4, und werden in einer max. Entfernung von 25 Metern detektiert.

Um eine im Sinne dieser Bedienfunktion sichere Differenzierung zwischen Menschen und Gegenständen zu erzielen, was alleinig auf Basis der Laserscanner technisch nicht möglich ist, werden zusätzlich 3D-Kameras eingesetzt. Insofern ist an der Stelle zwischen sicherheitsrelevanten Funktionen und solchen, die für die Bedienung maßgebend sind, zu unterscheiden. Das Kamerasystem ist daher lediglich ein Element zur Umsetzung der Bedienungs-funktionalitäten und wäre nicht geeignet, einen Laserscanner als zertifizierte Personenschutzeinrichtung zu ersetzen. In Abhängigkeit der Art des Materialabrufes können ggf. weitere Bedienelemente, wie z.B. Tablet, Smartwatch oder Kommissionier-wearables, nötig sein. Dies hängt vorwiegend von der gewünschten Materialflussarchitektur und somit der Frage ab, ob eine automatisierte, zentral organisierte, oder dezentral gesteuerte Bereitstellung erfolgt. Der Grad der Dezentralisierung korreliert unweigerlich mit der Anzahl und Ausprägung von Kommunikations- und Interaktions-schnittstellen. Optional in der Sicherheitsarchitektur des Mobilten Supermarktes vorgesehene ortsauflösende Sicherheitsschaltmatten sind geeignet, Sicherheitsfunktionen abzubilden und gleichzeitig aber auch als Bedienschnittstellen zu fungieren. Werden die Schaltmatten im Korridor für die Materialübergabe platziert, kann eine stärker differenzierte Abstufung der Schutzfeldumschaltungen an den Laserscannern erfolgen. Über das Betreten der Schaltmatten erfolgt dann eine Positionserkennung, so dass den Laserscannern dann lediglich die Überwachung hinsichtlich dynamischer Annäherung von Personen in Richtung des Gefahrenbereichs obliegt. Gleichzeitig sind die Schaltmatten auch als taktile Bedienelemente nutzbar, indem sich per Fußkontakt Softwarefunktionen des Betriebsablaufs respektive des Materialabrufes auslösen lassen.

Während die Möglichkeiten des Eingriffs der Benutzer\*innen für die Bedienung der Abläufe entscheidend ist, kommt der zielgerichteten Information von Seiten der Maschine an die Personen in der Umgebung eine ebenso große Bedeutung zu. Dies ist vor allem dahingehend zu sehen, dass im Sinne einer effizienten Kollaboration, Missverständnisse und gefahrbringende Situationen präventiv zu vermeiden sind. Nicht zuletzt deshalb, weil diese zu einem

unbeabsichtigten Nothalt und damit Stillstandzeit führen. Eine autonom agierende Maschine kann mitunter Unbehagen bei Personen hervorrufen, wenn das Betriebsverhalten nicht vorhersehbar ist. Dieses Unbehagen kann letztlich eine Schranke für die sichere und produktive Kollaboration darstellen. Insofern zielt das vorliegende Konzept für die sichere Mensch-Maschine-Interaktion auch darauf ab, dass die Maschine die Benutzer\*innen sowie die in der Umgebung befindlichen Personen über die bevorstehenden Aktionen und Betriebszustände informiert, ohne dabei zu erschrecken. Dies soll in Anlehnung an die menschliche Artikulation zielgerichtet mittels optischer und / oder akustischer Information und Ansprache der Personen erfolgen und beruht auf dem Prinzip der Verlässlichkeit durch Eindeutigkeit der Situation. Dies betrifft jedoch nicht nur die regulären Betriebsabläufe, wie z.B. die Signalisierung für die anstehende Materialübergabe, sondern auch Vorgänge der Problembewegung. Hier sind z.B. Situationen zu nennen, in denen sich Personen oder Gegenstände im Schutzfeld befinden und damit der Betrieb der Maschine blockiert ist. Durch situativ und bedarfsorientiert an die umgebenden Personen adressierte Kommunikation können diese z.B. darüber informiert werden, aus dem Schutzfeld zu treten respektive die das Schutzfeld verletzenden Gegenstände zu entfernen.

### 3.2 INTERAKTION AUF MASCHINENEBENE

Ein in den Betriebsabläufen des Mobilten Supermarktes besonders sensibler Vorgang, der ein gesteigertes Maß an Kommunikation und Interaktion erfordert – sowohl die Mensch-zu-Maschine-Kommunikation als auch die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation betreffend – ist der An- und Abtransport der mobilen Regalmodule per FTF. Während des Betriebs des Mini-RBG umspannen die Schutzfeldbereiche der Laserscanner auch die regalseitigen Zugänge zum Gefahrenbereich. Um die Regale verfahren zu können, müssen folglich diese Schutzfeldbereiche partiell deaktiviert werden. Gleichwohl ist die Personensicherheit auch während dieser Vorgänge uneingeschränkt zu gewährleisten, so dass es einer flexiblen Zugangsabsicherung, die über eine intelligente Verknüpfung der Sicherheitsfunktionen des Transport-FTF und denen des Mini-RBG realisiert wird, bedarf. Hierbei handelt es sich um eine Form von „shared-safety“, indem in der Phase des An- und Abtransports eines der beiden Regalmodule die Vorfeldüberwachung des FTF gleichzeitig auch dafür verantwortlich ist, sicherzustellen, dass sich keine Person in den daran angrenzenden Gefahrenbereich des Mini-RBG begibt, vgl. Abbildung 4. Bestünde diese Absicherung nicht, müsste der Betrieb des RBG unterbrochen werden. Es gilt dabei, nicht nur formelle und normative Anforderungen hinsichtlich der Personensicherheit zu erfüllen, da sich die Grenzen der Maschine flexibel ändern, sondern auch die Sicherheits- und Maschinensteuerungen mehrerer Betriebsmittel zu verknüpfen.

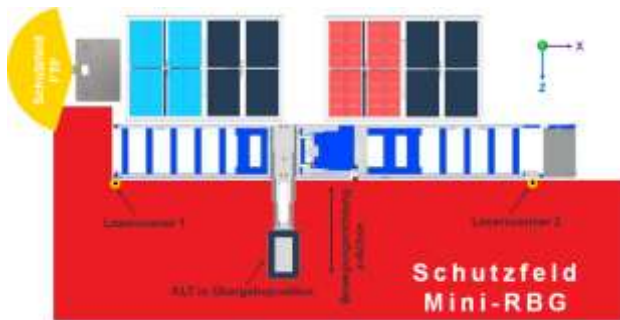


Abbildung 4. Flexible Zugangsabsicherung für den An- und Abtransport von Regalmodulen per FTF am Mini-RBG.

Für die Umsetzung einer derartigen Sicherheitsarchitektur bedarf es unter anderem der Etablierung von dezentralen Steuerungsstrukturen sowie einer leistungsfähigen und redundant sicheren drahtlosen Signalübertragung.

Dies stellt insbesondere dann eine unabdingbare Voraussetzung dar, wenn in einer Produktion nach dem Konzept des IFT Bearbeitungsstationen bedarfsorientiert flexibel miteinander verknüpft werden sollen, um letztlich in einem stets temporären Verbund ein sogenanntes Workflowsegment, vgl. Abbildung 5, zu bilden. Diese Workflowsegmente bilden in produktionslogistischer, aber auch in steuerungstechnischer, Hinsicht eine dezentrale Organisationseinheit und werden immer dann aus modularen Arbeitsstationen gebildet, wenn Bearbeitungsschritte hinsichtlich der Montageabfolge und des Materialbedarfs in einem engen Zusammenhang stehen.

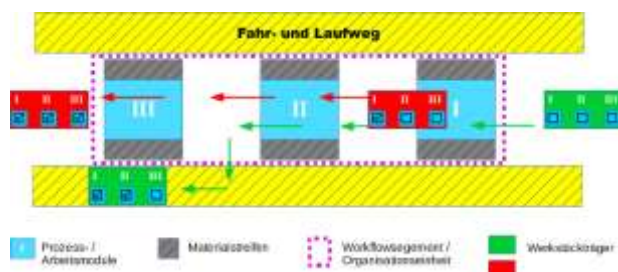


Abbildung 5. Struktur eines Workflowsegmentes mit 3 Prozessmodulen.

Ein Workflowsegment stellt daher flächenmäßig ein ganzzahliges Vielfaches eines einzelnen Prozess-/Arbeitsmoduls dar, wobei ein Arbeitsmodul exakt einem Einheits-Flächenelement des im Produktionslayout definierten Flächenrasters entspricht. Trotz der Verknüpfung sind die in dem Segment enthaltenen Prozessmodule aber insoweit voneinander unabhängig, als dass das Werkstück auch zwischen den Stationen des Workflowsegments ausgeschleust werden kann. Über die hierfür vorgesehenen Ein- und Ausfahrten der Workflowsegmente erfolgt letztlich auch die prozessmodul- und werkstückspezifische Materialversorgung. Vor dem Hintergrund betrachtet, dass eine flexible und wandelbare Produktion, im Gegensatz zu einer starren Fließbandfertigung, die Möglichkeit eröffnet, die Durchlaufreihenfolge der Werkstücke kurzfristig – auch während des Fertigungsprozesses – zu ändern, bedingt dies zunächst

eine umfassende Kommunikation und Interaktion zwischen den Werkstückträgern und den Workflowsegmenten, um darauf basierend den übergeordneten Materialabruf für das einzelne Segment zu koordinieren. Darüber hinaus ist innerhalb der Segmente zwischen den einzelnen Arbeitsmodulen und deren Komponenten gleichermaßen Kommunikation und Interaktion der beteiligten Komponenten erforderlich, um Maschineprozesse und Sicherheitsfunktionen von zunächst eigenständigen Komponenten im Verbund zu orchestrieren.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Seit 2014 konnten am IFT mithilfe von Fördermitteln des Landes Baden-Württemberg nicht nur Konzepte für eine wandlungsfähige und flexible Produktion für die effiziente Fertigung von Gütern mit kleiner Stückzahl bis hin zu Losgröße 1 entwickelt werden, sondern vielmehr auch einige für deren Umsetzung erforderliche Primärkomponenten als Prototypen umgesetzt werden. Hierzu zählt u.a. eine Art kleinskaliges ortsbewegliches Automatisches Kleinteilelager (AKL), welches aufgrund seiner Ortsbeweglichkeit als Mobiler Supermarkt bezeichnet wird. Dieses System zeichnet sich nicht nur im Sinne der Materialbereitstellung durch das hohe Reaktions- und Anpassungsvermögen an sich ändernde Produktionsprozesse und -abläufe aus, indem die Sequenzierung der Bauteile erst an der Senke erfolgt, sondern auch durch die Materialübergabe mit direkter Mensch-Maschine-Interaktion. So können durch das automatisierte Ware-zum-Mann-Prinzip manuelle Umschlag- und Kommissioniervorgänge reduziert werden, insbesondere in der Montage selbst, wo sich bisweilen das Montagepersonal das benötigte Material selbst aus Regalsystemen picken muss. Dies sind Aspekte die sich gerade auch für kleine und mittlere Unternehmen, die ggf. gar nicht in Fließ- sondern in Manufaktur- oder Werkstattfertigung produzieren, direkt in einer Steigerung der Effizienz niederschlagen können. Um die für eine sichere Mensch-Maschine-Kollaboration relevanten Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Personensicherheit im industriellen Umfeld zu gewährleisten, wurde ein innovatives Sicherheits- und Steuerungskonzept entwickelt, welches die bedarfsorientierte Verknüpfung von ganzen Maschinen oder Teilfunktionalitäten vorsieht. Am IFT sind derzeit mehrere Forschungsprojekte in Bearbeitung, welche sich der Umsetzung dieser Ziele widmen. Die daraus hervorgehenden Ergebnisse werden an Prototypen in einem realen Versuchsumfeld am Forschungscampus ARENA2036 validiert.

## LITERATUR

- [1] Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. et al. (2020): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Hofmann, M. (2019). Material flow systems and intralogistics components for a non-sequential, flexibly timed automobile production – First prototypes. XXIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON "MATERIAL HANDLING, CONSTRUCTIONS AND LOGISTICS", Vienna, Austria 2019. ISBN 978-86-6060-020-4
- [3] Hofmann, M. (2018). Intralogistikkomponenten für die Automobilproduktion ohne Band und Takt – erste Prototypen. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2018. (urn:nbn:de:0009-14-47616)
- [4] European Parliament and European Council (2006). DIRECTIVE 2006/42/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 May 2006 on machinery
- [5] DIN German Institute for Standardization e.V. (2011). DIN EN ISO 12100: 2011-03, Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010); German version EN ISO 12100:2010
- [6] DIN German Institute for Standardization e.V. (2008). DIN EN 349: 2008-09, Safety of machinery – Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body; German version EN 349:1993+A1:2008
- [7] DIN German Institute for Standardization e.V. (2008). DIN EN ISO 13857: 2008-06, Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs (ISO 13857:2008); German version EN ISO 13857:2008
- [8] DIN German Institute for Standardization e.V. (2016). DIN EN ISO 14120: 2016-05, Safety of machinery – Guards – General requirements for the design and construction of fixed and movable guards (ISO 14120:2015); German version EN ISO 14120:2015
- [9] DIN German Institute for Standardization e.V. (2010). DIN EN ISO 13855: 2010-10, Safety of machinery – Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body (ISO 13855:2010); German version EN ISO 13855:2010

---

**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