

## 1. Einführung

Neuartige Navigationssteuerungen und Batterietechnik ermöglichen intelligente Transportfahrzeuge, die als Fahrzeugflotte eigenständig den innerbetrieblichen Materialfluss bewerkstelligen.

In Folgenden soll ein Überblick über den Stand der Technik gegeben sowie Möglichkeiten, Vorteile und Anpassungsfähigkeit erläutert werden.

Es wird aufgezeigt, welche Bedingungen und Abläufe man typischerweise beim Kunden vorfindet und wie man Fahrzeuge, Steuerung, Sicherheit und Visualisierung kundenspezifisch umsetzen kann.

### 1.1. Über InSystems

InSystems Automation erstellt am Wissenschaftsstandort Adlershof kundenindividuelle Transportfahrzeuge und programmiert die komplette Software für die Integration in die Produktionssteuerung. InSystems liefert dem Kunden Materialflusslösungen mit Transportrobotern komplett aus einer Hand.



**Bild 1: verschiedene Transportfahrzeuge**

### 1.2. Begriffsklärung

Der normgerechte Fachbegriff „fahrerlose Flurförderzeuge“ wird in der Praxis nur noch selten verwendet.

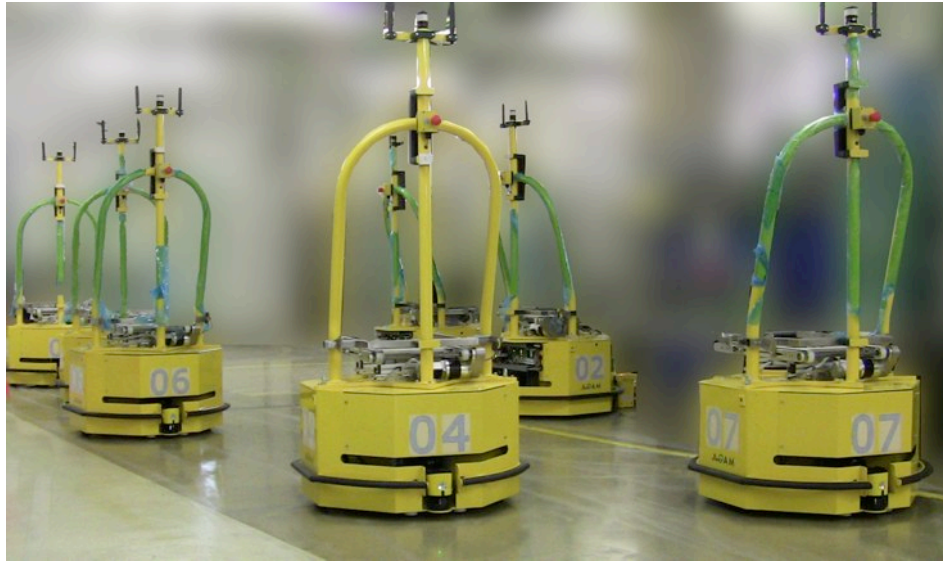
Das liegt auch daran, dass die Normung mit der technischen Entwicklung nicht schrittgehalten hat.

Folgende Abkürzungen und Bezeichnungen werden üblicherweise verwendet:

- FTS = Fahrerloses Transportsystem (deutsch)
- AGV = Automated Guided Vehicle (englisch, USA)
- FTF = Fahrerlose Transport Fahrzeuge (Schweiz)
- Mobile Roboter / Transport Roboter (deutsch/englisch USA)

Der Begriff des Transportroboters beschreibt zwar am treffendsten das technische Potential der autonom agierenden Fahrzeuge, der Begriff „Roboter“ ist aber hinsichtlich sicherheitstechnischer Aspekte nicht ohne Bedenken verwendbar. Auch wenn beim Thema „kollaborierende Roboter“ derzeit sehr stark geforscht wird, muss ein Roboter nach den bestehenden Sicherheitsvorschriften mit einer trennenden Schutzeinrichtung versehen sein. Das ist natürlich bei Transportfahrzeugen, die ausdrücklich auch auf Wegen mit Personenverkehr fahren sollen, nicht möglich.

Ein FTS besteht aus einer Flotte aus 1 bis n automatisch navigierenden, fahrerlosen Fahrzeugen, welche über eine meist zentrale Auftragsverwaltung mit den Maschinen und dem Lager kommunizieren. Die Auftragsverwaltung und Kommunikation sind primäre Bestandteile des FTS.



**Bild 2: Fahrzeugflotte während der Inbetriebnahme**

## 2. Vorteile FTS vs. stationärer Fördertechnik

Eine optimale innerbetriebliche Materialversorgung ist die Voraussetzung für effiziente Maschinenauslastung, aber viele bestehende Produktionsanlagen sind nicht für eine automatische Materialversorgung ausgelegt. Auch eine Vernetzung durch stationäre Fördertechnik ist oft aus Gründen des Platzbedarfs, des Aufwandes oder fehlender Anpassungsfähigkeit nicht möglich. Genau für diese Anforderungen sind frei navigierende Transportfahrzeuge eine flexible und skalierbare Materialflusslösung, da die personensicheren Fahrzeuge die Verkehrswege der Menschen nutzen dürfen.

- Skalierbar (Beispiel: Kunde mit wachsenden Transportmengen)  
Eine Fahrzeugflotte kann mit der Anzahl der Transporte mitwachsen. Das ist besonders interessant für Start-ups, die mit kleiner Transportkapazität und Investition beginnen. Entwickelt sich das Geschäft, können weitere Fahrzeuge hinzugefügt werden, die dazu einfach nur im System angemeldet werden müssen.
- Wandelbar (Anpassung an Änderungen der Umgebung)  
Bei Änderungen auf der Produktionsfläche, wie zusätzliche Maschinen, Arbeitsplätze oder Stellflächen für Paletten oder Container, lässt sich ein autonomes Transportsystem leicht an geänderte Wege und Aufgaben anpassen
- Redundanz (weniger Totalausfälle, weil sich die Transportaufgaben auf mehrere Fahrzeuge verteilen)  
Fällt in einem stationären Fördersystem nur eine Komponente aus, so kommt es häufig zum Stau oder Stillstand des gesamten Materialflusssystems. Ist dagegen ein Fahrzeug defekt, übernehmen die anderen Fahrzeuge die Transportaufträge.

## 3. Die Technologie - technische Entwicklung der FTS bis jetzt

### 3.1. Navigation

Die ersten fahrerlosen Flurförderzeuge wurden durch Induktionsschleifen im Fußboden geleitet, eine Technologie, die auch heute noch verwendet wird. Der Nachteil ist die sehr geringe Flexibilität bei

Veränderungen des Produktionslayouts und die hohen Kosten bei der Installation durch die Bodenarbeiten. Da die Fahrzeuge immer exakt die gleichen Wege benutzen, treten deutliche Abnutzungsspuren auf dem Boden auf.



**Bild 3: Abnutzungsspuren bei Fahrzeugen mit fester Spurführung**

Die Entwicklung einer Navigation durch Lasertriangulation über Reflektionsmarken an den Wänden hat zwar die Flexibilität geringfügig erhöht, es bleiben aber die Zusatzkosten für die Reflektoren und deren Montage. Bei diesem Verfahren besteht immer die Gefahr der Abdeckung von Reflektoren.

Die Navigation über Laserscanner und intelligente Fahrzeugsteuerungen ermöglicht eine hohe Flexibilität und kommt ohne bauliche Maßnahmen aus.

Damit sich die Fahrzeuge in ihrer Umgebung zurechtfinden, wird bei der Installation des Transportsystems einmalig mit einem Fahrzeug eine 2D Umgebungskarte gescannt. Diese Karte kann danach auf einem PC bearbeitet werden. Es werden die Zielpunkte eingezeichnet, Lade- und Parkstationen festgelegt. Weiterhin können auch Bereiche definiert werden,

- in die Fahrzeuge nie fahren dürfen, z.B. vor Fluchttüren,
- die nur als Einbahnstraße befahren werden dürfen, z.B. weil der Weg zu schmal für zwei entgegenkommende Fahrzeuge wäre.
- in denen sich immer nur ein Fahrzeug zeitgleich befinden darf (One-AGV Area), z.B. an Stellen mit viel Personenverkehr oder automatischen Brandschutztüren

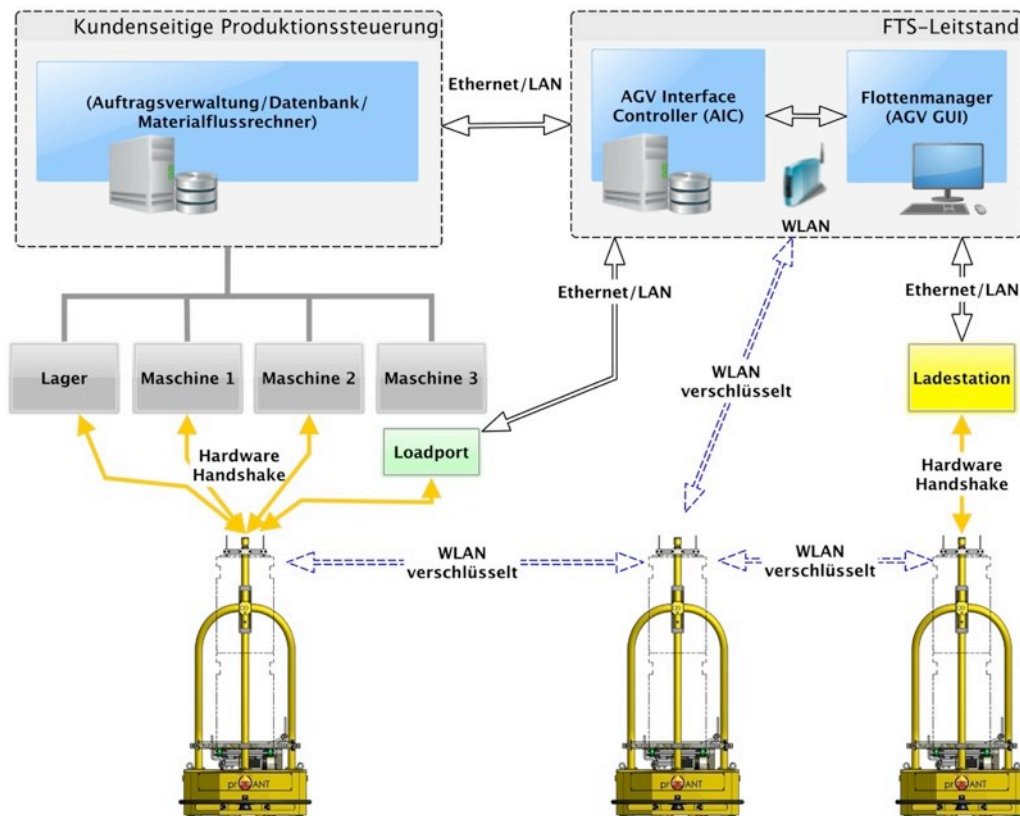


**Bild 4: GUI Navigationskarte**

Diese Umgebungskarte mit allen Definitionen wird an alle Fahrzeuge übertragen.

Erhält ein Fahrzeug seinen Transportauftrag von A nach B, dann berechnet es selbsttätig die optimale Route dorthin. Dazu kommuniziert es auch mit den anderen Fahrzeugen, um diesen rechtzeitig aus dem Weg zu fahren. Befindet sich im berechneten Weg ein unerwartetes Hindernis, z. B. eine im Weg abgestellte Palette, die das Fahrzeug nicht umfahren kann, so berechnet es eine Alternativroute. Sollte es keinen möglichen Weg zum Ziel geben, gibt das Fahrzeug erst dann eine Meldung an die Leitsoftware, dass ein Transportauftrag nicht ausgeführt werden kann. Je nach Festlegung in der Software kann dann das Material automatisch nach einem Time-out zurück in das Lager gebracht werden oder ein Eingreifen durch einen Bediener fordern.

### 3.2. Kommunikation



**Bild 5: Schema Kommunikation**

Die Fahrzeuge kommunizieren über verschlüsseltes WLAN untereinander und mit dem FTS Leitstand. Wenn die Fahrzeuge an Maschinen, Loadports oder Ladestationen andocken, dann führen sie zunächst ein hardwaretechnisches Handshake aus, mit dem sichergestellt wird, dass die Fahrzeuge wirklich korrekt positioniert stehen. Danach kommunizieren die Fahrzeuge direkt mit den Komponenten für den Übergabe- und Ladevorgang.

### 3.3. Batterietechnik

In der Batterietechnik hat es in den letzten 20 Jahren eine erhebliche Entwicklung gegeben. Besonders sichtbar ist das ja auch im Consumer Bereich, wo immer kleinere Akkumulatoren immer leistungsstärkere Geräte ermöglicht haben.

In Fahrzeugen wie Gabelstaplern, Ameisen und anderen Flurförderfahrzeugen wurden früher Blei-Säure Akkus eingesetzt, bei denen beim Laden auch Wasserstoff entsteht. Der Ladevorgang dauert sehr lange und der Umgang mit der ätzenden Flüssigkeit ist bei Wartung nicht unproblematisch.

Die jetzt eingesetzten Lithium Akkus LiFeYPO gehören zu den Trockenbatterien und haben erhebliche Vorteile:

Lithium-Eisenphosphat ist ungiftig. Die LiFeYPO<sub>4</sub> Zellen sind hochstromfähig, zyklenfest und kaum selbstentladend. Im Gegensatz zu herkömmlichen Li-Ionen-Zellen scheidet sich bei Überladung kein metallisches Lithium ab und es wird kein Sauerstoff freigesetzt.

LiFeYPO<sub>4</sub> Batterien ermöglichen kurze Ladezeiten, je nach Ladestrom kann die Batterie in wenigen Minuten vollständig geladen werden, allerdings sind möglichst geringe Ladeströme besser für die Haltbarkeit der Batterie. Ein ständiges Nachladen schadet ihr dagegen nicht, bei diesen Batterien gibt es keinen Memoryeffekt (wie NiCd oder NiMH Akkus). Die längste Lebensdauer wird erreicht, wenn die Batterie immer im Bereich von 70-30% ihres Ladezustands verwendet wird. LiFeYPO<sub>4</sub> Akkus geben bis kurz vor ihrer Tiefenentladung fast ihre vollständige Nennspannung ab, dann jedoch bricht die Spannung schlagartig zusammen.

Die einzelnen Batteriezellen werden zu einem Block verbunden und mit einer Batteriemanagement-Steuerung in Temperatur und Ladungszustand überwacht.

### **3.4. Personensicherheit**

Bevor es optische Personenerkennungen gab, waren die Fahrzeuge mit ausladenden Sicherheitsschaltleisten, sogenannten Bumpern, ausgestattet, die bei Betätigung das Fahrzeug in Not-Halt versetzten. Gemäß der Norm EN 1525<sup>1</sup> darf die Kraft, die durch das Fahrzeug nach dem Stoppen mittels Bumper zum Beispiel auf ein Bein wirkt, 400 N nicht überschreiten. Daraus lässt sich leicht erkennen, dass mit dieser Technik gerade bei größeren Fahrzeugen und Lasten und dem daraus resultierenden Bremsweg nur eine relativ geringe Geschwindigkeit erlaubt ist.

Bei einer Absicherung durch Laserscanner mit geschwindigkeitsabhängigen Warn- und Schutzfeldern überwacht das Fahrzeug den Bereich weit voraus in Fahrtrichtung und über seine Fahrzeugbreite hinaus. Je schneller das Fahrzeug verfährt, desto größer sind die Felder geschaltet. Die Größe der Felder kann im Laserscanner parametrisiert werden und wird unter Berücksichtigung des Bremsweges (Gewicht, Geschwindigkeit, Untergrund, Sicherheitszuschläge) bei der Inbetriebnahme berechnet und durch Bremstests validiert.

Erkennt der Scanner ein Hindernis oder einen Menschen innerhalb des Warnfeldes, so reduziert das Fahrzeug seine Geschwindigkeit. Tritt eine Person in das Schutzfeld, führt das zum sofortigen Not-Halt. Nach Ablauf der Wiederanlaufverzögerung von einigen Sekunden, geht das Fahrzeug wieder in Automatikbetrieb, schaltet auf das kleinste Schutzfeld und versucht das Hindernis langsam zu umfahren. Die Fahrzeuge überwachen die Umgebung auch über die Sicherheitszonen hinaus und ändern ihre Fahrtrichtung bereits sehr vorausschauend, um Not-Halts zu vermeiden.

Dieses Verhalten der Fahrzeuge auf den Verkehrswegen ist für die Mitarbeiter kurz nach der Installation eines autonomen Systems zum Teil zunächst ungewohnt, da sie versucht sind, zuerst auszuweichen. Aus unserer Erfahrung kommen die Mitarbeiter aber nach einer Einweisung sehr schnell mit ihren neuen „Kollegen“ auf ihren Verkehrswegen klar.

## **4. Konfiguration eines FTS in der Praxis**

Die technische Herausforderung bei Applikation der autonomen Transportsysteme entsteht durch die vielfältigen Gegebenheiten bei den Kunden. Nicht nur die Fahrzeuge müssen individuell gestaltet werden, denn Lasten, Übergabehöhen und vorhandene Fördertechnik sind nie gleich, teilweise nicht einmal innerhalb eines Unternehmens. Auch die Kommunikation der Fahrzeuge mit den Produktionsmaschinen sowie des Flottenleitsystems mit der vorhandenen Produktionssteuerung, muss passgenau integriert

werden. Nur so können aus dem Materialbedarf Transportaufträge erzeugt, der Produktionsablauf abgebildet und alle Sicherheitsanforderungen eingehalten werden.

Daher beginnt ein Projekt mit autonomen Transportfahrzeugen in der Regel mit der Erstellung eines Pflichtenheftes. Dafür müssen in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden alle Umgebungsbedingungen erfasst und die Anforderungen an das System ermittelt werden.

#### **4.1. Kapazitätsbetrachtung**

Folgende Bedingungen bestimmen, wie groß die Fahrzeugflotte sein muss, um eine ausreichende Verfügbarkeit für die durchschnittliche Produktionsauslastung aber auch die Abdeckung von Produktionsspitzen zu erreichen:

- Produktionsmengen und –geschwindigkeit, Art des Transportgutes
- Produktionsumgebung: Länge der Transportwege, Anzahl Transporte je Stunde je Weg
- Mögliche maximale Geschwindigkeit: Abhängig von den Gangbreiten, Häufigkeit querenden Personenverkehrs
- Ladestationen: Wege, Verhältnis Ladezeit zu Transportzeit
- Auftragsverwaltung: Anteil von Leerfahrten

Diese umfangreiche Betrachtung muss sowohl für die durchschnittliche Produktivität erfolgen, wie auch für zu erwartende Produktionsspitzen bis 100 % Produktivität.

Das Ergebnis ist die Anzahl der benötigten Fahrzeuge und Ladestationen für beide Produktionsauslastungen, aus der die Empfehlung für die Größe der Flotte abzuleiten ist.

Der Kapazitätsbetrachtung ist die Basis für die weitere Projektierung des Transportsystems und daher von größter Wichtigkeit. Sie erfordert ein genaues Verständnis der Produktionsabläufe auf Seiten des Planers und wird in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden erarbeitet.

#### **4.2. Energiemanagement**

Wurde durch die Kapazitätsbetrachtung die erforderliche Anzahl der Ladestationen ermittelt, so ist die Lage im Layout festzulegen. Wie unter Batterietechnik beschrieben, können die Fahrzeuge ohne negative Auswirkung auf die Kapazität und Haltbarkeit der Batterie, ja sogar für eine bessere Haltbarkeit, im laufenden Betrieb ständig nachgeladen werden. Hier handelt es sich um mögliche kurze Ladezeiten von ca. 40-60 s, wenn das FAHRZEUG an den Übergabestationen steht. Wir bezeichnen das als Opportunity Charging.

Ebenso sind separate Ladestationen möglich, an die das Flottenmanagement die Fahrzeuge schickt, wenn sie gerade keine Transportaufträge auszuführen haben oder das Batteriemangement es als erforderlich meldet.

Das Fahrzeug besitzt Ladekontaktflächen, die an der Ladestation gefedert kontaktiert werden. Erst wenn das Fahrzeug angedockt ist und der Kontakt zur Ladestation hardwaretechnisch bestätigt ist, fließt der Ladestrom. Sobald das Batteriemangement dem Fahrzeug meldet, dass die Batterie voll geladen oder zu warm ist, wird der Ladevorgang beendet.

Auch bei der Planung der Ladestationen und Positionierung im Layout muss die erforderliche Batteriekapazität für eine durchschnittliche und eine volle 100%-Produktivität betrachtet werden.

### **4.3. Produktionsumgebung**

#### **4.3.1. Interface zu Maschinen oder Loadports**

Die Fahrzeuge müssen mit den Maschinen oder den davorgestellten Loadports direkt kommunizieren.

Damit die Last sicher übergeben werden kann und nicht herunterfällt, muss sichergestellt sein, dass

- das Fahrzeug richtig positioniert steht (Siehe Navigation)
- beide Seiten wirklich zur Übergabe/Übernahme bereit sind
- ein übergreifender Not-Halt möglich ist (Sieht beispielsweise ein Mitarbeiter, das die Last Übergabe fehlschlägt und drückt am Fahrzeug den Not-Halt Taster, so muss auch die Fördertechnik an der Maschine gestoppt werden)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein hardwaretechnisches Handshakeverfahren zwischen den Fahrzeugen und den Übergabestellen umzusetzen.

#### **4.3.2. WLAN - Ausleuchtung**

Es müssen Messungen der WLAN Ausleuchtung auf der Produktionsfläche vorgenommen werden um die Anzahl und Position der Accesspunkte festzulegen. Ist die WLAN Abdeckung nicht überall ausreichend gegeben, könnten die Fahrzeuge den Kontakt verlieren und nicht mehr mit den anderen Fahrzeugen und ihrem Leitstand kommunizieren.

#### **4.3.3. Wände und Konturen**

Der Laserscanner arbeitet in einer bestimmten Höhe, möglichst knapp über dem Fußboden. Damit werden Konturen, die möglichst markant sein sollten, nur in dieser Höhe erkannt. Glaswände oder stark reflektierende Flächen können problematisch sein. Für diese Sonderfälle müssen geeignete Maßnahmen geplant werden, mit denen für den Laserscanner sichtbare Konturen erzeugt werden.

#### **4.3.4. Fußboden**

Der Fußboden sollte möglichst eben sein, leichte Rampen und Kanten können aber bewältigt werden.

Die Oberfläche des Fußbodens hat Einfluss auf den Bremsweg und damit auch auf die Parametrierung der Warn- und Schutzfelder des Sicherheitslaserscanners. Verschiedene Fußböden können unterschiedliche Konzepte bei Fahrwerk und Antriebsrädern bedingen.

#### **4.3.5. Platzbedarf - Breite der Gänge, Gegenverkehr oder Kreisverkehr, Überholen**

Die erforderlichen Wegbreiten sind in der Arbeitsstättenverordnung<sup>2</sup> festgelegt und von der Fahrzeugbreite abhängig, die wiederum von der Größe, Form und Gewicht der Last bestimmt wird.

Das Layout der Produktionsfläche muss hinsichtlich der Gangbreiten analysiert werden und Engstellen sowie Fluchtwege, Übergabestellen definiert werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Fahrzeuge an Übergabestellen auch länger stehen und dadurch die Verkehrswege verengen. Schon in der Planungsphase muss eine Grobplanung im Layout vorgenommen werden, weil die Wegbreiten, Engstellen, Einbahnstraßen oder One-AGV Bereiche die möglichen Fahrgeschwindigkeiten und damit auch die Kapazitätsberechnungen beeinflussen.



#### **4.4. Software**

Zum Betreiben einer Fahrzeugflotte wird ein Flottenleitsystem benötigt, bei InSystems wird diese Software als AIC (AGV Interface Controller) bezeichnet.

Der AIC besitzt eine Schnittstelle zur Auftragsverwaltung des Kunden und übersetzt die Materialanforderung in Transportaufträge für die Fahrzeuge. Der AIC funktioniert dabei wie eine Taxizentrale und disponiert die Fahraufträge jeweils an das optimale Fahrzeug.

Kriterien für die Disponierung eines Fahrzeugs sind unter anderem die Entfernung zum Abholpunkt, die Vermeidung von Leerfahrten und der Batteriezustand.

Bei der Projektierung des AICs müssen die Schnittstellen zu dem vorhandenen Produktionsleitsystem und den Maschinen sowie alle Funktionen der Software (Verhalten bei Time-out, Brandalarm) geplant werden.

#### **4.5. Fahrzeugkonfiguration**

Das Fahrzeug und das darauf installierte Lastaufnahmemittel (LAM) müssen für die individuelle Last konzipiert werden. Dabei spielt die Übergabehöhe eine entscheidende Rolle, wie alle Elemente (Batterieblock, Antriebe, Fahrzeugsteuerung etc.) am besten in dem Chassis untergebracht werden können. Es muss erreicht werden, dass der Schwerpunkt im Fahrzeug mit der Last möglichst tief liegt, damit das Fahrzeug bei Gefahrbremsungen nicht kippen kann.

Bei der Lastaufnahme ist es am besten, wenn die Last auf der Rückseite des Fahrzeugs aufgenommen wird, damit die Last bei Bremsungen sicher an einem Anschlag geführt und nicht über die offene Seite der Lastaufnahme herunterfallen kann.

Ergibt die Analyse der Produktionsumgebung, dass unterschiedliche Übergabehöhen bei den Maschinen vorliegen, dann ist zu überlegen, ob der Höhenunterschied

- auf dem Fahrzeug durch eine Hubfunktion realisiert werden kann (Nachteil: größeres Fahrzeuggewicht und höherer Energiebedarf)
- durch Loadports mit Hub, die vor die Maschinen-In-/Outfeeds montiert werden, übernommen wird, oder
- durch Anpassungen an den Maschinen auf eine einheitliche Höhe gebracht werden kann.

## 5. Beispiele Kundenprojekte

 <p><b>Bild 6: proANT390 für 200 kg</b></p>	<p>FTS für Produktion (Kosmetikerzeugnisse) Maße: Länge 1020 mm, Breite 94 mm Last: verschiedene Boxen, teilweise gestapelt und Trays mit der gleichen Grundfläche, maximal 200 kg LAM: Riemenförderer, schwimmend gelagert Übergabehöhe: 650 mm Fahrzeugflotte von 8 Fahrzeugen Vollautomatische Versorgung von Produktionsmaschinen mit Material aus dem Hochregallager</p> <p>Bei diesem Projekt wurden veraltete Fahrzeuge ersetzt. Daher waren die Maschinen bereits für eine automatische Beschickung ausgelegt und alle Übergabehöhen identisch.</p>
 <p><b>Bild 7: proANT490 für 200 kg</b></p>	<p>FTS für Produktion (Kunststoffteile) Maße: Länge 1020 mm, Breite 940 mm Last: verschiedene Boxen, teilweise gestapelt, maximal 200 kg LAM: Riemenförderer, schwimmend gelagert Übergabehöhe: 457 mm Fahrzeugflotte von 2 Fahrzeugen</p> <p>Vollautomatische Versorgung von Maschinen mit Leermagazin und Abholung von gefüllten Magazinen.</p>
 <p><b>Bild 8: proANT431 für 50 kg</b></p>	<p>FTS für die Warehouse Logistic Maße: Durchmesser 800 mm Last: Kartons unterschiedlicher Größen und Standard-Kommissionierbehälter 400 x 600 mm bis 50 kg LAM: Rollenförderer Übergabehöhe: verstellbar von 525 mm bis 610 mm</p>



**Bild 9: proANT485 für 30 kg**

FTS für Produktion (Druckerzeugnisse)

Maße: Länge 643 mm, Breite 565 mm

Last: Magazine bis 30 kg

LAM: Riemenförderer,

Übergabehöhe: 263 mm

Fahrzeugflotte mit 9 Fahrzeugen

Vollautomatische Versorgung von Maschinen mit Voll- und Leermagazinen aus einem Pufferspeicher.

Die Produktion war nur für eine manuelle Beschickung ausgelegt. Es gab sehr unterschiedliche Übergabehöhen. Es war Vorgabe des Kunden, dass an den Maschinen möglichst keine Veränderungen oder Umbauten vorgenommen werden dürfen. Daher wurden an alle In- und Outfeeds der Maschinen Loadports mit einheitlichen Riemenförderern und unterschiedlich großen Hüben installiert.

<sup>1</sup> DIN EN 1525:1997 Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme

<sup>2</sup> Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A1.8 - Verkehrswege