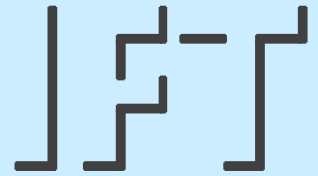


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz

UNIVERSITÄT STUTTGART



Matthias Hofmann

**Konzept, Konstruktion und prototypische Umsetzung
neuartiger intralogistischer Komponenten für die
zukünftige flexible und wandlungsfähige
Automobilmontage der Stückzahl eins**

Juli 2022

Konzept, Konstruktion und prototypische Umsetzung neuartiger
intralogistischer Komponenten für die zukünftige flexible und
wandlungsfähige Automobilmontage der Stückzahl eins

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Matthias Hofmann
aus Geislingen an der Steige

Hauptberichter: Univ.-Prof. (i. R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl-Heinz Wehking
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz
Mitberichter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2022

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt allen, die in vielfältiger Weise zum Gelingen des vorliegenden Promotionsvorhabens beigetragen haben.

Hervorheben darf ich zunächst Herrn Prof. Karl-Heinz Wehking (i.R.), den langjährigen Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), für dessen fachliche Betreuung der Arbeit, die über den Eintritt in den Ruhestand hinaus reichte und die Übernahme des Hauptberichts. Seinem Engagement ist es zu verdanken, dass zur Umsetzung für die in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte und Komponenten erforderlichen Fördermittel eingeworben werden konnten und es gelang, beginnend von ersten Ideen und Entwurfsskizzen einige Bestandteile eines umfassenden neuartigen Produktionslogistikkonzeptes bis hin ins Prototypenstadium zu überführen. Gleichermaßen gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Robert Schulz, der nach seiner Berufung zum Leiter des IFT ab 2019 das begonnene Vorhaben ebenso unterstützte.

Herzlicher Dank gilt auch Herrn Prof. Georg Kartnig für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am IFT, von denen ich in Ausübung meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter Unterstützung erfuhr und besonders bei allen, die sich mit Rat und Tat beim Bau der Prototypen beteiligten. Nicht nur der Bau, sondern auch die Konzeption der hier gegenständlichen Komponenten konnte erst durch Fördermittel des Wissenschafts- und des Wirtschaftsressorts der Landesregierung Baden-Württemberg bewerkstelligt werden. Dank gilt an dieser Stelle auch der Geschäftsführung der Firma Pilz, die sich mit Sachspenden am Bau des Mini-Regalbediengerätes beteiligte.

Mein besonderer Dank gilt abschließend all jenen, die mich in der langen Zeit der Bearbeitung des Vorhabens zu dessen Vollendung ermutigten, konstruktive Anmerkungen beisteuerten und mich mit Zuspruch motivierend begleiteten, allen voran meinen Eltern, die mir den Werdegang erst ermöglichten und stets den Rücken gestärkt und frei gehalten haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Forschungsgrundlage und thematischer Rahmen der Arbeit.....	3
2 Stand der Technik in der automobilen Endmontage.....	3
2.1 Prinzip der getakteten Fließbandmontage.....	4
2.2 Fließbandmontage im Spannungsfeld der Variantenvielfalt.....	5
2.3 Montageträger- und Werkstückfördertechnik.....	8
2.3.1 Elektrohängebahn.....	11
2.3.2 Schubplattform.....	15
2.3.3 Fahrerlose Transportfahrzeuge.....	17
2.3.4 Zwischenfazit zum Stand der Technik.....	22
2.3.5 Erweiterter Stand der Technik Fahrerloser Transportfahrzeuge.....	23
2.4 Automatisierte Transport- und Materialbereitstellungssysteme zur Versorgung der Montage.....	25
2.4.1 Automatisierte Routenzugfahrzeuge.....	27
2.4.2 Transport-FTF.....	29
2.4.3 Fazit zum Stand der Technik.....	31
3 Zielkonzept einer flexiblen und wandelbaren Produktionslogistik für die automobilen Endmontage.....	32
3.1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.....	32
3.2 Leitbilder einer flexiblen und wandlungsfähigen Fördertechnik des Werkstück- und Materialflusses für die Automobilendmontage.....	36
4 Anforderungen an die intralogistischen Prozesse hinsichtlich Flexibilität und Wandlungsfähigkeit im Kontext der automobilen Endmontage.....	37
4.1 Montageträger.....	44
4.2 Materialbereitstellung.....	46
5 Komponenten des IFT-Produktionslogistikkonzeptes.....	49
5.1 Mobile Montageinsel.....	49
5.1.1 Technischer Aufbau der Mobilen Montageinsel.....	52
5.1.2 Technischer Aufbau der Fahrzeugaufnahme mit integrierter Abladefunktion.....	59
5.1.3 Verfahren zum Abladen eines Kraftfahrzeugs von der Mobilen Montageinsel.....	68
5.2 Dynamisches Lager.....	72
5.2.1 Technische Ausgestaltung des Dynamischen Lagers.....	73
5.3 Mobiler Supermarkt mit Mini-Regalbediengerät.....	79
5.3.1 Technische Ausgestaltung der mobilen Transport- und Lagerungskomponenten.....	82
5.3.1.1 Mobile Regalmodule.....	82
5.3.1.2 Schlepper-FTF.....	85
6 Konstruktion des Mini-Regalbediengerätes.....	92
7 Logistische Anwendungsszenarien des Mini-RBG.....	101
7.1 Anwendungsszenario Mobiler Supermarkt / Verbauort.....	101
7.2 Anwendungsszenario Kommissionierzone.....	103
8 Problemstellung Absicherung Mobiler Supermarkt.....	106
8.1 Übergeordnete Anforderungen und Rahmenbedingungen durch Gesetzgebung, Normung und Richtlinien.....	106
8.2 Grundzüge einer Risikobeurteilung.....	107
8.2.1 Grenzen der Maschine.....	109

8.2.2 Identifizierung der Gefährdungen und Risikoeinschätzung.....	109
8.2.3 Risikobewertung.....	113
8.2.4 Risikominderung.....	113
8.3 Risikobeurteilung des Mini-Regalbediengerätes.....	114
8.3.1 Mechanische Gefährdungen am Mini-Regalbediengerät.....	118
8.3.1.1 Mechanische Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen.....	120
8.3.1.2 Mechanische Gefährdung Nr.2 – Quetschen und Scheren.....	121
8.3.1.3 Mechanische Gefährdung Nr.3 – Erfassen und Quetschen.....	122
8.3.1.4 Mechanische Gefährdung Nr.4 – Erfassen und Quetschen.....	122
8.3.1.5 Mechanische Gefährdung Nr.5 – Quetschen und Scheren.....	124
8.3.2 Konzept zur Risikominderung.....	124
8.3.2.1 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen.....	125
8.3.2.2 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.2 – Quetschen und Scheren.....	126
8.3.2.3 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.3 – Erfassen und Quetschen.....	127
8.3.2.4 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.4 – Erfassen und Quetschen.....	128
8.3.2.5 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.5 – Quetschen und Scheren.....	129
8.4 Konstruktive Maßnahmen zur Risikominderung.....	130
8.4.1 Einhausung bewegter Teile der Hülltriebe.....	130
8.4.2 Nachweis der Standsicherheit.....	131
8.4.3 Redundante Hubwerksbremse.....	135
8.5 Fazit der Risikobeurteilung.....	136
9 Sicherheitsarchitektur und Bedienkonzept des Mini-Regalbediengerätes im Anwendungsszenario des Mobilien Supermarktes.....	137
9.1 Sensorkonzept mit Sicherheitslaserscannern.....	139
9.1.1 Steuerungssystem der berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung.....	146
9.2 Mensch-Maschine-Interaktion.....	148
9.3 Maschine-Maschine-Interaktion.....	157
10 Zusammenfassung und Ausblick.....	159
11 Literaturverzeichnis.....	163

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 2.1: Elektrohängebahn (links) und Schubplattform mit Hubeinrichtung (rechts) am Beispiel der Endmontage von BMW.....	9
Abbildung 2.2: Beispiele von Elektrohängebahnen mit abgehängten Schienensystemen..	11
Abbildung 2.3: Gehänge von Elektrohängebahnen in nach unten geöffneter C-Form zur Aufnahme von Karosserien am Unterboden.....	11
Abbildung 2.4: Elektrohängebahnen mit in die Gehänge integrierter Schwenkvorrichtung..	12
Abbildung 2.5: Elektrohängebahn mit darunter befindlichem Bandförderer als Standfläche des Montagepersonals.....	13
Abbildung 2.6: Montagepersonal in sitzender Arbeitshaltung auf Dreh-/ Rollstühlen.....	13
Abbildung 2.7: Gehänge von Elektrohängebahnen mit Hubfunktion.....	14
Links: In die Tragarme des Gehänges integrierter Teleskophub.....	14
Rechts: Zentral an der Fahrwerksanbindung des Gehänges positionierter Scherenhub.....	14

Abbildung 2.8: Einzelne Schubplattform.....	15
Abbildung 2.9: Plattformen in lückenlosem Schubverbund.....	16
Abbildung 2.10: Schubplattformförderer mit Stehplattform in Holzbodenausführung.....	17
Abbildung 2.11: Linienförmige Förderung der Werkstücke auf monofunktionalen FTF in den Endmontagen des Porsche 918 Spyder und des Audi R8.....	18
Abbildung 2.12: Monofunktionales FTF als Werkstückträger in der Fertigung des Audi R8...	19
Abbildung 2.13: FTF mit Hubfunktion zur ergonomischen Werkstückpositionierung.....	20
Abbildung 2.14: Interaktion zwischen FTF mit Hubfunktion und Elektrohängebahn zur Werkstückübergabe (links) und der Hochzeit von Fahrwerk und Karosserie (rechts).....	20
Abbildung 2.15: Verladen und auf den Boden Absetzen eines fertig montierten BMW i3 mithilfe einer Säulenhubarbeitsbühne.....	21
Abbildung 2.16: Absetzen fertig montierter Porsche 918 Spyder vom FTF auf den Boden im end-of-line-Bereich.....	21
Abbildung 2.17: Achs- und Fahrwerkvormontage in der Produktion des Porsche Taycan....	23
Abbildung 2.18: Hochzeit in der Produktion des Porsche Taycan mittels FTF und EHB.....	24
Abbildung 2.19: Materialbereitstellung aus Regalsystemen zu beiden Seiten der Montagelinie.....	25
Abbildung 2.20: Logistiksupermarkt für den Warenumsatz, die Kommissionierung und Beschickung von Transporteinheiten zum Verbauort.....	26
Abbildung 2.21: Automatisiertes Zugfahrzeug eines Routenzuges.....	27
Abbildung 2.22: Automatisiertes Routenzugfahrzeug mit zweiachsigem Regal im Schlepp..	28
Abbildung 2.23: FTF zum Transport von Regalmodulen.....	29
Abbildung 2.24: Regaltransport im angehobenen Zustand.....	30
Abbildung 2.25: FTF mit Ladungsträger als Einheit und integrierter Handhabungstechnik....	30
Abbildung 3.1: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gem. Zäh et al. [Zäh05].....	35
Abbildung 4.1: Intelligente Pfadwahl innerhalb des Produktionslayouts.....	40
Abbildung 4.2: Zusammenfassung einzelner Module zu Workflowsegmenten.....	41
Abbildung 4.3: Materialzuführung zu einer mobilen Montageinsel.....	43
Abbildung 4.4: Im Aufbau befindlicher PKW auf der Mobilen Montageinsel.....	45
Abbildung 4.5: Fertig montierter PKW auf der Mobilen Montageinsel.....	45
Abbildung 4.6: Ware-zur-Person-Prinzip des Mobilen Supermarktes.....	48
Abbildung 5.1: Monofunktionales Transport-FTF mit Hubfunktion in der Produktion des Audi R8.....	50
Abbildung 5.2: Monofunktionales Transport-FTF mit Hubfunktion in der Manufakturproduktion des Porsche 918 Spyder.....	50
Abbildung 5.3: Stationäre Schwenkeinheit in der Produktion des Audi R8.....	50
Abbildung 5.4: Mobiler manuell geführter Werkstückmanipulator auf Basis eines Elektrohubgabelwagens für die Produktion des Porsche 918 Spyder.....	50
Abbildung 5.5: Hauptbaugruppen der Mobilen Montageinsel.....	52
Abbildung 5.6: Positionierung der 4 Schwenkantriebe im Chassis der Mobilen Montageinsel – Ansicht von unten.....	54
Abbildung 5.7: Verwendete Schwenkantriebe.....	54
Abbildung 5.8: Hohlprofilfachwerkkonstruktion eines einzelnen Plattformsegmentes.....	55
Abbildung 5.9: Stehplattform bestehend aus 4 verschraubbaren Einzelsegmenten.....	55
Abbildung 5.10: Elastischer, verwindungsfähiger Kontakt zwischen Plattform und Chassis mittels Polyurethan-Puffer (rot dargestellt). Schnitt durch Chassis und Plattform.....	56
Abbildung 5.11: Überhang der Stehplattform bestehend zur Antriebsachse.....	56
Abbildung 5.12: Neigen des Werkstückträgers um dessen Querachse.....	57
Abbildung 5.13: Neigen des Fahrzeugträgers um dessen Längsachse.....	57
Abbildung 5.14: Aufbau des vollvariablen Fahrzeugträgers mit Linearverstellung der Aufnahmepunkte.....	58
Abbildung 5.17: Aufbau der Mobilen Montageinsel – Fahrzeugträger in Grundposition.....	60
Abbildung 5.18: Vollvariabler Fahrzeugträger auf Untergrund abgeklappt in Abfahrstellung.	62
Abbildung 5.19: Aufbau der Mobilen Montageinsel – Fahrzeugträger gegen Basis verdreht.	63

Abbildung 5.20: Führung des Fahrzeugträgers am Hubtischkopf mit einem Freiheitsgrad....	63
Abbildung 5.21: Führung des Fahrzeugträgers mit zwei Freiheitsgraden.....	63
Abbildung 5.22: Fertig montierter PKW auf der Mobilen Montageinsel.....	65
Abbildung 5.23: Auffahrhebebühne.....	66
Abbildung 5.24: Plattform-Scherenhubprinzip einer Auffahrhebebühne.....	66
Abbildung 5.25: Zwei-Säulenhebebühne.....	67
Abbildung 5.26: Schwenkbar gelagerte Tragarme einer Zwei-Säulenhebebühne.....	67
Abbildung 5.27: Teleskop-Säulenhebebühne.....	67
Abbildung 5.28: Abgeklappter Fahrzeugträger der Mobilen Montageinsel.....	68
Abbildung 5.29: Phase 1 des Abladeprozesses – beide Querträger verfahren synchron.....	69
Abbildung 5.30: Phase 2 des Abladeprozesses – Vorderwagen rollt auf dem Boden ab.....	69
Abbildung 5.31: Phase 3 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.....	70
Abbildung 5.32: Phase 4 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.....	70
Abbildung 5.33: Phase 5 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.....	71
Abbildung 5.34: Dynamisches Lager.....	72
Abbildung 5.35: Funktionaler Aufbau des Dynamischen Lagers.....	74
Abbildung 5.36: Dynamisches Lager.....	75
Abbildung 5.37: Dynamisches Lager mit variabler Verstellung der Lagerplatzhöhe, z.B. zur Einlagerung von Endmontagefahrzeugen und Bodenmodulen.....	77
Abbildung 5.38: Detailansicht Zahnstangenantriebe des Dynamischen Lagers.....	78
Abbildung 5.39: Konzept des Mobilen Supermarktes, bestehend aus Mini- Regalbediengerät (Pos.1), FTF (Pos.2) und mobilen Regalmodulen (Pos.3). Materialübergabe in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration.....	80
Abbildung 5.40: Prototyp des Mobilen Supermarktes.....	81
Abbildung 5.41: Mobile Regalmodule für die Teileversorgung und -lagerung im Mobilen Supermarktes.....	83
Abbildung 5.42: Untenansicht Regalmodul.....	84
Abbildung 5.43: Kupplungsplatte der Regal-module.....	84
Abbildung 5.44: Aufbau des Schlepper-FTF.....	85
Abbildung 5.45: Ansicht von unten des Schlepper-FTF mit drei Fahr-/ Lenkantrieben (Pos.1).....	86
Abbildung 5.46: Kräfte am angetriebenen Rad.....	88
Abbildung 5.47: Schlepper-FTF mit Warenkorbgestell / Sonderladungsträger.....	90
Abbildung 5.48: Mobiler Supermarkt mit Kommissioniereinheit auf Basis eines FTF.....	91
Abbildung 6.1: Hebe- und Anschlagpunkte am Mini-RBG.....	92
Abbildung 6.2: Teleskopachse des Mini-RBG.....	93
Abbildung 6.3: Hauptbaugruppen des Mini-RBG.....	94
Abbildung 6.4: Horizontal- und Hubantrieb des Mini-RBG mit formschlüssigen Riementrieben.....	95
Abbildung 6.5: Hauptabmessungen des Mini-RBG – Seitenansicht.....	96
Abbildung 6.6: Hauptabmessungen des Mini-RBG – Vorderansicht.....	96
Abbildung 6.7: Fahrwegkonstellation mit maximalen Fahrwegen.....	97
Diagramm 6.1: Fahrtspiel eines Auslagerungsauftrages des Mini-RBG zu einer Übergabeposition mit maximalen Fahrwegen.....	98
Abbildung 7.1: Anwendungsszenario des Mini-RBG am Verbauort.....	102
Abbildung 7.2: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer automatischen Kommissionierzone zur Beschickung von Regalmodulen für den Mobilen Supermarkt.....	103
Abbildung 7.3: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer automatischen Kommissionierzone zur Beschickung von FTF für den Einzeltransport von KLT.....	104
Abbildung 7.4: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer halbautomatischen Kommissionierzone.....	105

Abbildung 8.1: Iterativer Prozess zur Risikobeurteilung und Risikominderung in Anlehnung an DIN EN ISO 12100.....	108
Abbildung 8.2: Risikograph in Anlehnung an DIN ISO/TR 14121-2.....	110
Abbildung 8.3: Risikomatrix in Anlehnung an DIN ISO/TR 14121-2.....	111
Abbildung 8.4: Risikoelemente in Anlehnung an DIN EN ISO 12100.....	111
Abbildung 8.5: Bestimmung des Performance Levels anhand des Risikographen gemäß DIN EN ISO 13849-1.....	117
Abbildung 8.6: Übersichtsdarstellung der mechanischen Gefährdungen am Mobilien Supermarkt.....	119
Abbildung 8.7: Mechanische Gefährdungen an den Antrieben der y- und z-Achse des Mini-RBG.....	119
Abbildung 8.8: Mechanische Gefährdung durch Relativbewegung.....	121
Abbildung 8.9: Mechanische Gefährdung durch Relativbewegung zwischen Regalbediengerät und den an das Maschinenbett angrenzenden Regalmodulen.....	123
Abbildung 8.10: Einhausung des Riemtrieb an der Hubachse.....	131
Abbildung 8.11: Statisches Ersatzsystem des Mini-RBG zur Bestimmung der Auflagerreaktionen des Fahrwerks.....	132
Abbildung 8.12: Fahrwerkskonstellation des Mini-RBG.....	133
Abbildung 8.13: Maßgebende Ansicht für statisches Ersatzsystem in Abbildung 8.14.....	134
Abbildung 8.14: Statisches Ersatzsystem des Mini-RBG zur Bestimmung der Kippneigung infolge Radlastverlagerung der Spuren 1 und 2 bei vollständig ausgefahrenem Teleskoptisch.....	134
Abbildung 8.15: Sicherheits-Linear-Fangbremse am Hubgerüst des Mini-Regalbediengerätes.....	136
Abbildung 9.1: Maßgebende Anwendungskonstellation am Mini-RBG für die Sicherheits-betrachtung.....	138
Abbildung 9.2: Anbringung der Laserscanner auf der Abgabeseite.....	139
Abbildung 9.3: Bemessung der Schutzfeldzonierung auf der Abgabeseite des Mini-RBG.....	141
Abbildung 9.4: Erfassungsbereiche der Laserscanner am Mini-RBG.....	142
Abbildung 9.5: Gefahren-/ Schutzfeldbereich (rot dargestellt) auf der Abgabeseite des Mini-RBG.....	143
Abbildung 9.6: Schutzfeld / Gefahrenbereich am Mini-RBG während des Betriebs aller 3 Achsen.....	144
Abbildung 9.7: Reduziertes Schutzfeld am Beginn des Andienungsprozesses, x- und y-Achse im SOS-Zustand, z-Achse aktiv.....	144
Abbildung 9.8: Aktives Warnfeld während der Materialübergabe, wenn sich alle 3 Achsen im SOS-Zustand befinden.....	145
Abbildung 9.9: Aktives Warnfeld während der Materialübergabe mit Quittierzone (grün schraffiert).....	146
Abbildung 9.10: Bestimmung des Performance Levels der Stufe d anhand des Risikographs für die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung des Mini-RBG.....	147
Abbildung 9.11: Steuerungsarchitektur Kategorie 3 gem. DIN EN ISO 13849-1.....	148
Abbildung 9.12: Zwei in y-Richtung versetzt stehende Personen (Nummern 1 und 2) entlang der x-Achse des Mini-RBG im Erfassungsbereich der Laserscanner.....	149
Abbildung 9.13: Darstellung der Blickrichtung bzgl. der Visualisierung der Laserscanner-Messdaten für die Abbildungen 9.13 und 9.14.....	150
Abbildung 9.14: Visualisierung der Laserscannermessdaten am Mini-RBG im 3D-Raum..	150
Abbildung 9.15: Gabelhubwagen im Erfassungsbereich der Laserscanner und zugehörige Visualisierung der Messdaten.....	151
Abbildung 9.16: Klassifizierung und Identifikation einer Person anhand spezifischer Merkmale (Extremitäten) mittels bildverarbeitender Sensorik und eines Radarsensors.....	153

Abbildung 9.17: Möglichkeit zur Bestimmung der x-Koordinate für die Übergabeposition anhand der Warteposition der Person entlang der x-Achse mittels Identifikation durch bildeverarbeitender Sensorik und Überlagerung mit den Laserscannerdaten gemäß des Sensorkonzeptes nach Korte.....	153
Abbildung 9.18: Platzierung von ortsauflösenden Sicherheitsschaltmatten (grau mit gelber Schraffur) in der Übergabebzone am Mini-RBG.....	154
Abbildung 9.19: Zielgerichtete Signalisierung des Gefahrenbereichs (rot) und Information, diesen nicht zu betreten, bei Eintritt in den Warnbereich (gelb).....	155
Abbildung 9.20: Signalisierung nach Beendigung der Fahrbewegung, das Material zu entnehmen.....	156
Abbildung 9.21: Shared-Safety-Konzept des Mobilien Supermarktes für den An- und Abtransport von Regalmodulen per FTF.....	158

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 5.1: Legende zu den Abbildungen 5.17 bis 5.21 sowie 5.28 bis 5.33.....	62
Tabelle 5.2: Legend zu Abbildung 5.36.....	77
Tabelle 8.1: Parameter des Pilz-Hazard-Rating Bewertungssystems.....	115
Tabelle 8.2: Übersicht DPH-Werte.....	116
Tabelle 8.3: Übersicht PO-Werte.....	116
Tabelle 8.4: Übersicht PA-Werte.....	116
Tabelle 8.5: Übersicht FE-Werte.....	117
Tabelle 8.6: Übersicht PHR-Werte.....	117
Tabelle 8.7: Wertebereich der im Risikograph angewandten Parameter.....	119
Tabelle 8.8: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.1.....	121
Tabelle 8.9: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.2.....	122
Tabelle 8.10: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.3.....	123
Tabelle 8.11: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.4.....	124
Tabelle 8.12: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.5.....	125
Tabelle 8.13: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 1 bei Umsetzung der Risikominderung.....	126
Tabelle 8.14: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 2 bei Umsetzung der Risikominderung.....	127
Tabelle 8.15: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 3 bei Umsetzung der Risikominderung.....	128
Tabelle 8.16: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 4 bei Umsetzung der Risikominderung.....	129
Tabelle 8.17: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 5 bei Umsetzung der Risikominderung.....	130

Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a	Beschleunigung	m/s ²
C	Eindringabstand	mm
DPH	Degree of Possible Harm	-
e	Exzentrizität	m
F	Häufigkeit und/oder Dauer einer Gefährdungsexposition	-
FE	Frequency of exposure	-
F_N	Normalkraft	N
$F_{Stütz}$	Stützkraft	N
F_T	Tangentialkraft	N
F_U	Umfangskraft	N
$F_{(z, erf)}$	Zugkraftbedarf	N
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	-
g	Gravitationskonstante	m/s ²
G	Gewichtskraft	N
G_R	Radlast	N
H	Höhe eines Schutzfeldes über Bezugsebene	mm
K	Annäherungsgeschwindigkeit	m/s
M_R	Antriebsmoment	Nm
m	Masse	kg
P	Möglichkeit der Vermeidung einer Gefährdung	-
PA	Possibility of Avoidance	-
PHR	Pilz-Hazard-Rating	-
PO	Probability of Occurence	-
R	Reaktions-/Normalkraft	N
S	Schwere einer Verletzung	-
S	Mindest-Sicherheitsabstand	mm
s	Wegstrecke	m

VIII

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
S_{Flex}	Flexibilitäts-Sicherheitsabstand	m
S_{PKW}	Fahrzeuglänge des größten in einer Linie gefertigten PKW	m
$S_{Sicherheit}$	Sicherheitsabstand	m
S_{Takt}	Wegstreckenlänge eines Taktes	m
T	Nachlaufzeit	s
t	Zeitspanne	s
v	Geschwindigkeit	m/s
α	Steigungswinkel	°
μ	Kraftschlussbeiwert	-
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹

Abkürzungen und Indices

Abkürzungen	
Abh.	Abhängigkeit
AKL	Automatisches Kleinteilelager
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
B2B	Business to Business
B2C	Business to Customer
BWS	Bewegliche Schutzeinrichtung
bzw.	beziehungsweise
EHB	Elektrohängebahn
erf.	erforderlich
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GHz	Giga-Hertz
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
LiDAR	Light Detection and Ranging.
KLT	Kleinladungsträger
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
max.	maximal
min.	minimal
RBG	Regalbediengerät
RFID	Radio Frequency Identification
SLS	Safe Limited Speed
SOS	Safe Operating Stop
TPS	TOYOTA-Produktionssystem
th.	theoretisch
UWB	Ultra-Wide-Band
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.

X

Bildquellennachweis

Quellenbezeichnung	Bildquelle
Audi AG	Mediencenter der Audi AG, www.audi-mediacycenter.com zuletzt aufgerufen am 8.07.2021
Automobili Lamborghini S.p.A.	Lamborghini Media Center, www.media.lamborghini.com zuletzt aufgerufen am 13.07.2021
Bär Automation GmbH	https://baer-automation.de/de/fts zuletzt aufgerufen am 23.10.2015
BMW AG	Presseportal der BMW Group, www.press.bmwgroup.com zuletzt aufgerufen am 24.06.2021
Daimler AG	Daimler Global Media Site, www.media.daimler.com zuletzt aufgerufen am 2.07.2021
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG	Pressedatenbank der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, www.presse.porsche.de zuletzt aufgerufen am 27.06.2021
IMS Handhabungstechnik GmbH	Website der IMS Handhabungstechnik GmbH. www.ims-tec.de/ zuletzt aufgerufen am 23.10.2015
Magazino GmbH	www.magazino.eu/produkte zuletzt aufgerufen am 8.07.2021
TestDriven	www.testdriven.co.uk/2014-bmw-i3/ , abgerufen am 23.10.2015.
TruPhysics GmbH	www.truphysics.com/trushelf zuletzt aufgerufen am 8.07.2021
Twin Busch GmbH	www.twinbusch.de zuletzt aufgerufen am 21.02.2021

Zusammenfassung

Die Etablierung einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion für die effiziente Fertigung variantenreicher Automobile bis hin zu Losgrößen mit Stückzahl eins bedingt implizit die Abkehr von den bis dato bewährten Prinzipien der Fließbandmontage. Für die Produktionslogistik bedeutet dies nicht weniger als einen Paradigmenwechsel, indem damit die Ausrichtung sämtlicher logistischer Prozesse auf die getaktete Abarbeitung einer mit mehreren Tagen Vorlauf festgelegten Plansequenz hinfällig würde. Gleichwohl verlangt eine Produktion in einem flexiblen Layout ohne strikte Zeit- und Ortsbindung im Werkstückdurchlauf nach disruptiven fördertechnischen Ansätzen. Insofern bedarf es zur Etablierung einer flexiblen Fertigung in einem frei rekonfigurierbaren Layout den Anforderungen an Layoutflexibilität genügender Fördertechnik. Dies betrifft primär die Werkstückfördertechnik sowie Systeme der Materialbereitstellung, so dass die vorliegende Arbeit in übergeordneter Instanz die Forschungsfrage nach der technischen Übertragbarkeit eines produktionslogistischen Ansatzes einer Fertigung ohne Band und Takt auf die Prozess- und Betriebsmittelebene in Gestalt mobiler Komponenten adressiert. Des Weiteren ergibt sich hiervon abgeleitet einerseits die Frage, ob es gelingt, die PKW-Endmontage von Fließbandfördertechnik auf Fahrerlose Transportfahrzeuge zu verlagern, ohne dabei Abhängigkeiten zu statischen Einrichtungen zu schaffen, und ferner, ob es realisierbar ist, unter arbeitssicherheitstechnischen Gesichtspunkten ein kollaboratives Materialzuführsystem zu konzipieren, das auf automatisierten mobilen Komponenten basiert. Die vorliegende Arbeit hat insofern die Konzeption und Konstruktion der zur Umsetzung eines neuartigen Produktionslogistikkonzeptes, das auf eine losgrößenunabhängige Fertigung von Automobilen in einer nicht-getakteten Endmontage abzielt, erforderlicher intralogistischer Komponenten unter Berücksichtigung der Maßgabe der technischen Realisierbarkeit von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zum Gegenstand. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet dabei die Darlegung der Konzeption, Konstruktion und die prototypische Umsetzung einer mobilen Montageinsel auf Basis eines Fahrerlosen Transportfahrzeuges, sowie eines mobilen kleinskaligen Mini-Regalbediengerätes für die automatisierte Handhabung und Andienung von Kleinladungsträgern in der Teilezuführung direkt am Verbauort in einer manuellen Montage respektive in Kommissionierzonen. Maßstab und Leitlinie für die konstruktive Ausgestaltung bilden dabei die Leitbilder der Wandlungsfähigkeit und deren Befähigern in Gestalt von Skalierbarkeit, Mobilität, Modularität sowie Universalität. So stellt die Mobile Montageinsel nicht nur einen adäquaten mobilen Ersatz für schienengebundene starre Fließband-Werkstückfördertechnik dar, sondern ist mit technischen Merkmalen versehen, die sie zu einem wandlungsfähigen – da insbesondere universell verwendbarem – mobilem Arbeitsplatz werden lassen. Für die zielgerichtete Materialbereitstellung an die Mobile Montageinsel bedarf es entsprechender Systeme, die ihrerseits ebenso den Anforderungen an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gerecht werden. Diesbezüglich bildet die konzeptionelle und zugleich konstruktive Umsetzung dahingehender Hardware einen weiteren inhaltlichen Schwerpunkt dieser Arbeit, wobei hier vorrangig die Umsetzung eines Mini-Regalbediengerätes zu nennen ist, welches innerhalb eines sogenannten Mobilen Logistiksupermarktes als semimobile Kommissionierereinheit für die automatisierte Handhabung und Bereitstellung von Kleinladungsträgern fungiert. Hierbei sind jedoch nicht nur rein konstruktive Merkmale gegenständlich, vielmehr wird darüber hinaus ein Sicherheits- und Bedienkonzept für die Anlage vorgestellt, um eine Materialandienung in direkter Mensch-Maschine-Interaktion zu ermöglichen.

Abstract

The establishment of flexible and convertible production for the efficient manufacture of variant-rich automobiles down to batch sizes of one implicitly requires a departure from the previously proven principles of assembly line production. For production logistics, this means nothing less than a paradigm shift, as the orientation of all logistics processes to the clocked processing of a planned sequence defined several days in advance would become obsolete. At the same time, production in a flexible layout without precise timing and location constraints in the workpiece throughput requires disruptive approaches for conveyor technology. In this respect, the establishment of flexible production in a freely reconfigurable layout requires conveyor technology that meets the requirements for layout flexibility. This primarily concerns workpiece conveyor technology as well as material provision systems, so that the present work addresses the research question of the technical transferability of a production logistics approach of manufacturing without belts and precise timing to the process and resource level in the form of mobile components. Furthermore, this raises the question of whether it is possible to shift the final assembly of automobiles from assembly line conveyor technology to automated guided vehicles without creating dependencies on static equipment, and whether it is possible to design a collaborative material provision system based on automated mobile components from the point of view of occupational safety. In this respect, the present work deals with the conception and design of the intralogistic components required for the implementation of a novel production logistics concept, which aims at a batch size-independent production of automobiles in a non-timed final assembly line, taking into account the technical feasibility of flexibility and convertibility. The main focus of the work is the presentation of the conception, design and prototypical implementation of a mobile assembly island based on an automated guided vehicle, as well as a mobile small-scale mini-storage and retrieval system for the automated handling and feeding of small load carriers in the parts provision directly at the point of assembly in a manual assembly or in picking zones. The guiding principles of convertibility and its enablers in the form of scalability, mobility, modularity and universality form the benchmark and guideline for the constructive design. Thus, the Mobile Assembly Island not only represents an adequate mobile replacement for rail-bounded rigid assembly line workpiece carrier technology, but is also equipped with technical features that make it a versatile - in particular because it can be used universally - mobile workstation. For the targeted provision of materials to the mobile assembly island, appropriate systems are required which also meet the requirements for flexibility and convertibility. In this respect, the conceptual and constructive implementation of hardware for this purpose forms a further focus of this work, whereby the implementation of a mini-scale storage and retrieval system is of primary importance, which functions within a so-called mobile logistics supermarket as a semi-mobile picking unit for the automated handling and provision of small load carriers. However, not only the purely constructive features are relevant here, but also a safety and operating concept for the system is presented in order to enable material handling in direct man-machine interaction.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage 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. 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. Die Prozessstufen der Materialbereitstellungskette sind von besonderer Bedeutung, wenn es gilt, die Abläufe in der Produktionslogistik und Montage effizienter zu gestalten¹. 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 zur Losgröße mit Stückzahl eins, 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, in denen aus einem großen Teilespektrum bedarfsgerecht die Bereitstellungssequenz für kleine Produktionslosgrößen gebildet werden muss.

Die 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. Vor dem Hintergrund der parallelen Fertigung von PKW-Baureihen mit Hybridantrieb oder gar rein elektrischem Antrieb

¹ Vgl. Lotter 2012 [Lot12].

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 verkörpert jedoch nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Automobilproduktion, zumal eine Produktion ohne Band und Takt die Entwicklung disruptiver förder- lager- und handhabungstechnischer Maschinen erfordert, denn die in den Endmontagelinien der Automobilproduktion anzutreffenden starren, schienengebundenen Fördertechniken, wie z.B. Elektrohängebahnen oder Schubplattformen, stehen dem Wunsch nach flexiblen, wandlungsfähigen Montage- und Produktionslogistiksystemen entgegen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Aufhebung der starren Taktung mit fest verketteter Abfolge von Bearbeitungsschritten bedarf einer grundlegenden strukturellen Neuausrichtung der produktionslogistischen Prozesse. Dies betrifft sowohl die Auftrags- und Materialflussplanung und -steuerung, als auch in besonderem Maß die Hardware der Materialfluss- und Werkstückträgersysteme. So werden neuartige Montageträger samt zugehöriger Fördertechnik sowie reaktionsschnelle Materialflusssysteme für die Teilebereitstellung benötigt, da durch die Aufhebung der getakteten Sequenzierung auch die Perlenkette in der Zuführung der Bauteile aufgelöst wird. 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 Montagematerial einen zentralen – da zwingend zusammen zu betrachtenden – Bestandteil einer vollumfänglichen produktionslogistischen Neuausrichtung der automobilen Endmontage darstellen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den prozessualen und technischen Anforderungen, die aus dem Wunsch nach einem höheren Grad an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Endmontage von Automobilwerken erwachsen. Dabei wird der Fokus auf die konstruktive Umsetzung zentraler Hardwarebestandteile eines dahingehenden logistischen Konzeptes, wie es Wehking und Popp [WP15], [Pop18] bereits 2015 respektive 2018 vorstellten, gerückt. Die für die vorliegende Arbeit übergeordnete Forschungsfrage lautet demnach: Lässt sich der produktionslogistische Ansatz einer Fertigung ohne Band und Takt technisch auf die Prozess- und Betriebsmittelebene in Gestalt mobiler Komponenten übertragen? Des Weiteren ergibt sich hiervon abgeleitet einerseits die Frage, ob es gelingt, die PKW-Endmontage von Fließbandfördertechnik auf FTF zu verlagern, ohne dabei Abhängigkeiten zu statischen Einrichtungen zu schaffen, und ferner, ob es realisierbar ist, unter arbeitssicherheitstechnischen Gesichtspunkten ein kollaboratives Materialzuführsystem zu konzipieren, das auf automatisierten mobilen Komponenten basiert. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet daher die Darlegung der Konzeption, Konstruktion und die prototypische Umsetzung einer mobilen Montage- und Logistikeinzel auf Basis eines fahrerlosen Transportfahrzeuges, sowie eines mobilen kleinskaligen Mini-Regalbediengerätes, das für die automatisierte Handhabung und Andienung von Kleinladungsträgern in der Teilezuführung am Verbauplatz in einer manuellen Montage respektive in Kommissionierzonen Anwendung finden soll. Hierbei handelt es sich um eine Anlage, die in direkter Mensch-Maschine-Interaktion dem

Personal das zum jeweiligen Zeitpunkt benötigte Material automatisiert andient. Um dies zu realisieren, bedarf es sowohl intuitiver Bedienstrukturen mit Interaktionsschnittstellen als auch eines über den Stand der Technik hinausgehenden Sicherheitskonzeptes, um eine effektive und zugleich sichere Kollaboration zu gewährleisten. Eine dahingehende konzeptionelle Ausgestaltung verschiedener Realisierungsvarianten ist ebenso Bestandteil dieser Arbeit. Insofern hat die vorliegende Arbeit die grundsätzliche Umsetzbarkeit der zur Realisierung einer Automobilendmontage ohne Band und Takt erforderlichen zentralen Hardwarekomponenten zum Gegenstand. Vor diesem Hintergrund richtet sich der Fokus der Abhandlung nicht auf die detaillierte Darstellung einzelner partikulärer Lösungsansätze, vielmehr nimmt sich die Arbeit die Darlegung eines umfangreichen Konzeptes mit diversen Komponenten zur Aufgabe, nicht nur in konstruktiver Hinsicht, sondern vielmehr unter Berücksichtigung der übergeordneten prozessualen Anforderungen des Anwendungsszenarios hinsichtlich Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Die Ergebnisse der Arbeit in Gestalt von Funktionsprototypen bilden sodann für einen folgenden use case die konstruktive Basis indem die hier vorgestellten Lösungsprinzipien lediglich noch einer spezifischen Anpassungskonstruktion zu unterziehen sind.

1.3 Forschungsgrundlage und thematischer Rahmen der Arbeit

Am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) wurden beginnend im Jahr 2014 im Rahmen mehrerer vom Land Baden-Württemberg geförderter Projekte Logistikkonzepte und zugehörige Hardware für die Neuausrichtung der Automobilproduktion hin zu höherer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit unter Zugrundelegung einer Abkehr von den Prinzipien der getakteten Fließbandmontage entwickelt. Diese am IFT durchgeführten Forschungstätigkeiten waren thematisch am Forschungscampus ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) angesiedelt. Die vorliegende Arbeit steht daher im engen Bezug zu der theoretischen Arbeit Popps aus dem Jahr 2018 [Pop18], in der „Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band“ vorgestellt worden sind.

2 Stand der Technik in der automobilen Endmontage

Die Fertigung eines Automobils bzw. die Wertschöpfungskette innerhalb eines Automobilwerkes lässt sich grundsätzlich in die vier Bereiche, Presswerk, Rohbau, Lackiererei und Montage untergliedern.² Gemäß der 2018 zur Überarbeitung zurückgezogenen VDI-Richtlinie 2860 umfasst die Montage sämtliche Vorgänge, die den Zusammenbau geometrisch bestimmter Körper aus Einzelteilen zum Ergebnis haben.³ Hinsichtlich der Montage im Kontext der Automobilindustrie ist zwischen Vormontage von Baugruppen und Funktionseinheiten sowie der Endmontage, bei der das komplette Fahrzeug aus all seinen Bestandteilen gefügt wird, zu differenzieren. Insbesondere in der Serienfertigung von Automobilen ist in der Endmontage das Fließlinienprinzip die vorherrschende Produktionsmethode.⁴ Für die nachfolgende Betrachtung und die vorliegende Arbeit im Gesamten ist ausschließlich die Endmontage gegenständlich.

² Vgl. Ihme 2006 S.10 ff [Ihm06] und Kratzsch 2000 S. 107 [Kra00].

³ Vgl. auch Warnecke et al. 1975 [WLK75].

⁴ Vgl. Richter 2006 S.102 [Ric06].

Hinsichtlich des in Kapitel 2.3 dargelegten Stands der Technik bezüglich der eingesetzten förder-technischen Anlagen in Gestalt von Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) erfolgt eine in zeitlicher Hinsicht differenzierte Betrachtung für den Zeitraum vor und nach dem Jahr 2016. Der Stand der Technik hinsichtlich der Ausprägung von FTF für die automobilen Endmontage hat sich ab der Veröffentlichung erster auf den Verfasser zurückgehender Forschungsergebnisse – insbesondere im Zuge der Offenlegung der in Kapitel 5.1 beschriebenen patentierten Mobilien Montageinsel – nachhaltig verändert, so dass es dies zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit zu berücksichtigen gilt und der Zeitraum nach 2016 als im Ergebnis der bis dahin veröffentlichten Forschungsergebnisse bereits als erweiterter Stand der Technik zu betrachten ist.

2.1 Prinzip der getakteten Fließbandmontage

Henry Ford legte mit der Einführung des Fließbandprinzips in der Automobilfertigung im frühen 20. Jahrhundert den Grundstein für die Massenproduktion des Automobils und damit der Etablierung der motorisierten Individualmobilität. Bis dahin verkörperte das Automobil ein Luxusgut, dessen Besitz und Nutzung lediglich einer wohlhabenden Gesellschaft vorbehalten war. Ford konzentrierte ab 1909 die Fahrzeugproduktion auf lediglich einen Typ PKW – das Model-T. Dem lag der Ansatz Henry Fords zugrunde, ein standardisiertes Fahrzeug mit einheitlicher Ausstattung – und sogar Lackierung – möglichst kostengünstig herzustellen, um über die Preisgestaltung neue Käuferschichten zu erschließen und damit die automobilen Fortbewegung in der Breite der Gesellschaft zu verankern. Indem Ford seine Entwicklung und Fertigung auf lediglich ein Modell fokussierte, schien für ihn festgestanden zu haben, dass zur Erlangung des Ziels, einer signifikanten Senkung der Gestehungskosten, ein untrennbarer kausaler Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Produkts, der Art der Fertigung sowie des Stückzahlaukommens bestünde. So zielte bereits die Konzeption des Model-T auf die Belange der Produktionsmethode – sprich der massenweisen Herstellung mit exakt definierten, invarianten und in sequentieller Abfolge zu vollziehenden Arbeitsschritten ab. Der auf Henry Ford zurückgehende und überlieferte Satz „a customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black“ hat sich damit zum Inbegriff für auf dem Fließband gefertigter Güter und deren Invarianz entwickelt. Eine Serienproduktion mit hohem Stückzahlaukommen bei geringer Varianz hat sich fortan in der Automobilproduktion zu einem Paradigma entwickelt.⁵

Bei dem als umgangssprachlich als „Fließband“ bezeichneten Produktionsprinzip handelt es sich um eine getaktete Fließmontage⁶, bei der die Arbeitsschritte sequentiell innerhalb einer definierten Zeitvorgabe vollzogen werden.⁷ Eine Fließmontage stellt ein komplexes logistisches System dar, bei dem gemäß Kropik⁸ ein hoher Synchronisierungsgrad zwischen Mensch, Maschine, Material und Methode besteht. Wie bei anderen logistischen Systemen, besteht auch hier das Ziel darin, eine hohe Effektivität zu erzielen, was sich im Ergebnis anhand des Durchsatzes bzw. Ausstoßes bemisst. Anders als beispielsweise bei der Baustellen- oder Einzelplatzmontage⁹, sollen sich hier die Montageobjekte / Werkstücke in einem kontinuierlichen Fluss mit größtmöglicher Durchflussleistung durch die Teilsysteme und Stationen befinden.¹⁰ Grundsätzlich ist per Definition der Montageorganisation hinsichtlich der Fortbewegung der Werkstücke von Station zu Station zwischen der kontinuierlichen

5 Vgl. MacDuffie et al. [DSF96].

6 Vgl. Pröbster 2015 S. 9 [Prö15].

7 Vgl. Kratzsch 2000 S.7 [Kra00] und Boysen 2005 [Boy05].

8 Vgl. Kropik 2021 S. 38 [Kro21].

9 Vgl. Seliger 2018 [Sel18].

10 Vgl. Wehking 2020 S. 35 [Weh20].

Förderung und einem getakteten Aussetzbetrieb des Förderelements zu differenzieren. Erfolgt lediglich eine getaktete Förderung im Aussetzbetrieb, handelt es sich um eine Taktstraßenmontage, wohingegen bei kontinuierlicher Förderung der Werkstücke eine Fließmontage vorliegt. Die Abgrenzung dieser beiden Prinzipien zur Inselmontage, bei der die Werkstücke ebenfalls von Insel zu Insel bewegt werden, besteht in der Taktung und somit der Orts- und Zeitbindung des Werkstück- und Materialflusssystem. Eine weitergehende Charakterisierung der Fließmontage erfolgt letztlich anhand des Zustandes des Werkstückes in den Stationen, während Montagearbeiten vollzogen werden, indem zwischen stationärem Verweilen in der Station – bei stationärer Fließmontage – und stetiger Bewegung – bei kontinuierlicher Fließmontage – differenziert wird.¹¹ Abhängig von den Montageinhalten sind in der Endmontage von Automobilwerken Taktstraßen- als auch Fließmontagesysteme koexistent. So bestehen Abschnitte, die als Taktstraße betrieben werden, als auch solche, bei denen die Montageprozesse in kontinuierlicher oder stationärer Fließmontage durchgeführt werden.

Die Taktzeit definiert die Zeitspanne, die für die Erledigung von Arbeitsinhalten, die einer Montagestation zugewiesen sind, dem Personal zur Verfügung steht. Die Festlegung der Taktzeit ist Resultat der kapazitiven Auslegung einer Linie¹², die auch Austaktung genannt wird. Für die Errechnung der Taktzeit sind daher zahlreiche Faktoren, wie z.B. das Montagelayout, die Absatzprognose eines Produktes – und der damit einhergehende Soll-Ausstoß –, die Gesamt-Montage- bzw. Durchlaufzeit eines Werkstücks, die zur Verfügung stehende Nettoarbeitszeit der Belegschaft sowie die Belegungsdichte einer Station, maßgebend. Insofern ist die Taktzeit eine für ein jeweiliges Werk bzw. eine Linie individuelle Größe. In der Fertigung von Großvolumenmodellen deutscher Automobilhersteller finden sich daher vielfach Taktzeiten im Bereich zwischen 60 und 90 Sekunden¹³, während bei kleineren Serien im Luxussegment, das sich durch noch höheren Individualisierungsgrad auszeichnet, längere Takte von bis zu 5 Minuten¹⁴ anzutreffen sind.

2.2 Fließbandmontage im Spannungsfeld der Variantenvielfalt

Zunehmende Modellvielfalt, geradezu überbordende Ausstattungsoptionen und alternative Antriebskonzepte führten indessen zu einer immensen Steigerung des Komplexitätsgrades hinsichtlich der Austaktung einer Linie und einem Spannungsfeld zwischen dem Produktionsprinzip, das auf die massenweise Herstellung invarianter Produkte ausgelegt ist, und der faktischen Varianz, die es in den produktionstechnischen und logistischen Prozessen abzubilden gilt.¹⁵ So berichteten beispielsweise Röder und Tibken [RT06] bereits 2006 von bis zu 2²⁷ theoretisch möglichen Varianten der Mercedes C-Klasse mit all ihren Karosserievarianten.¹⁶ Bereits aufgrund der Karosserieform unterscheiden sich die Varianten fundamental in der benötigten Bearbeitungsdauer. Hinzu kommen vielfältige Ausstattungsoptionen, den Antrieb und Fahrwerk betreffend, Komfort- und Innenausstattung und nicht zuletzt ein breites Spektrum an Assistenzsystemen mit Sensorik, Steuergeräten und Aktorik. Dies führt dazu, dass selbst bei Zugrundelegung einer Linie, auf der nur eine

11 Vgl. Seliger 2018 [Sel18].

12 Vgl. Roscher 2008 S.19 [Ros08].

13 z.B. Audi, BMW, Mercedes.

14 z.B. Porsche 911, Audi A8.

15 Vgl. Bauernhansl et al. 2020 [BFD20].

16 Karosserievarianten sind z.B. Limousine mit Stufenheck, Kombi, Coupé, 4-türiges Coupé, Cabrio.

Modellreihe produziert¹⁷ wird, de facto eine Variantenfließfertigung vorliegt. Es ist daher Aufgabe der Produktionsprogrammplanung die Problemstellungen, die sich aus der nominell konträren Anforderungskonstellation, resultierend aus Produktmerkmalen und Fertigungsmethode, zumindest insoweit aufzulösen, als dass das gewünschte Mindestmaß an Ausstoß und Produktivität erzielt wird. Mit der Produktionsprogrammplanung geht die Festlegung einer Produktionsreihenfolge / Sequenzierung einher. Bei der Sequenzbildung wird eine homogene Auslastung der Arbeitsstationen und deren Personal angestrebt. Aufgrund der stark divergierenden Bearbeitungszeitbedarfe der verschiedenen PKW-Konfigurationen wird daher ein sogenannter Modellmix¹⁸ produziert, um eine Vereinbarkeit der einheitlichen Endmontagedurchlaufzeit trotz variierender Bearbeitungszeiten der Werkstücke zu erzielen. Die Durchlaufzeit stellt eine infolge des Fließbandprinzips mit konstanter Taktung – und damit zwangsweise einhergehender Fördergeschwindigkeit der Werkstückträger – eine feste Größe dar, der infolge Modell- und Ausstattungsvarianz stark variierende Bearbeitungsumfänge und Montagezeitbedarfe entgegenstehen.

Der Modellmix bildet daher einen zur Einhaltung der Taktung erforderlichen Mittelwert der Montagezeitbedarfe. Bereits bei der initialen Auslegung einer Fließlinie und Bemessung der an einer Station zu vollziehenden Umfänge, wird mit einem durchschnittlichen Arbeitsaufkommen gerechnet.¹⁹ In Konsequenz dessen ist über das Produktionsprogramm – respektive den Modellmix – eine Nivellierung der Bearbeitungsbedarfe der Werkstücke bezogen auf die Kapazitäten der Stationen herbeizuführen, da Werkstücke mit über- als auch unterdurchschnittlichen Bearbeitungsaufwänden infolge Kundenkonfiguration bestehen. In diesem Zusammenhang wird von Über- und Unterlast des Personals an einer Station gesprochen. Einen besonders hohen Komplexitätsgrad birgt daher die Eintaktung von mit Hybridantrieb ausgestatteten Fahrzeugen. 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 aufwendigeren Hybridvarianten aktiv generiert wird.²⁰ Hierzu werden Sequenzierungsregeln²¹ angewandt. Diese Regeln berücksichtigen die jeweiligen Bedarfe und definieren, welche Varianten und Fahrzeuge mit bestimmten Ausstattungsoptionen (z.B. Schiebedach) in einem Betrachtungszeitraum in welcher Abfolge und maximaler Anzahl in den Fertigungsablauf eingesteuert und montiert werden können. Bereits dies lässt erkennen, dass in kapazitiver Hinsicht nicht nur bzgl. des Gesamtproduktionsaufkommens, sondern vielmehr auch konkret einzelne technische Merkmale betreffend, weitreichende Einschränkungen bestehen, die es erschweren, das Produktionsaufkommen auf die Nachfragesituation hin auszurichten. Dies belegt eine im Rahmen des Forschungsprojekts „FlexProLog - Neuausrichtung der Produktionslogistik für eine bezahlbare Elektromobilität“ am IFT durchgeführten Datenerhebung, nach der in der Fließfertigung eines namhaften deutschen Automobilherstellers nur ein gewisser Prozentsatz des gesamten Produktionsaufkommens auf Hybrid- oder Elektrovarianten einer Fahrzeugbaureihe entfallen kann, vgl. Popp 2018 [Pop18]. Die Sequenzbildung unterliegt neben der Einhaltung

17 Aus einer Erhebung durch Stäblein und Aoki [SA15] geht hervor, dass dies bei deutschen Automobilherstellern mehrheitlich anzutreffen ist. Demnach unterscheiden sich in dieser Beziehung deutsche Automobilwerke, in denen durchschnittlich 1,6 verschiedene Modelle produziert werden, offenbar fundamental von japanischen, in denen durchschnittlich 3,8 verschiedene Modelle in einer Montagelinie produziert werden.

18 Vgl. Becker 2006 S.306 [Bec06] und Meyr 2004 S.451 [Mey04].

19 Vgl. Boysen 2005 [Boy05] und Dörmer 2013 S.21ff [Dör13].

20 Vgl. Stäblein und Aoki 2015 S. 261 [SA15] sowie Meyr 2004 S. 451 [Mey04].

21 Vgl. Dörmer 2013 [Dör13] und Boysen et al. 2011 [BGR11].

kapazitiver Grenzen weiteren Restriktionen, wie z.B. der Bauteilverfügbarkeit und Terminverbindlichkeiten. Die Komplexität der Programmplanung korreliert somit unweigerlich mit der durch das Produktions- und Logistiksystem abzubildenden Varianz. Dennoch existieren auch bei deutschen Herstellern Werke, die eine deutlich überdurchschnittliche Varianz abbilden können. Zu nennen sind hier beispielsweise das BMW-Werk in Regensburg, sowie die Porsche-Werke in Zuffenhausen und Leipzig. BMW produziert am Standort Regensburg Modelle der 1er, 2er, 4er, X1 und X2 Serie sowie BMW M-Modelle auf einem Hauptband.²² Porsche produziert am Stammwerk in Zuffenhausen die Mittelmotorsportwagen Boxster und Cayman, sowie alle Modellvarianten des 911 inklusive der Rennsportfahrzeuge.²³ Insofern bestehen in manchen deutschen Automobilwerken nicht nur hinsichtlich der Materialbereitstellung Just-in-Time, siehe Kapitel 2.4, deutliche Parallelen zum Produktionsprinzip, das insbesondere TOYOTA schon seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich praktiziert und namentlich als TOYOTA-Produktionssystem (TPS) bekannt ist. Das TPS soll die Vorzüge einer handwerklichen Fertigung hinsichtlich Qualität mit jenen der Kosteneffizienz einer Massenfertigung verbinden, ohne jedoch an deren Inflexibilität gebunden zu sein.²⁴ Dem TPS liegt der Ansatz einer schlanken Produktion ohne Lagerhaltung zugrunde.²⁵ Der Absatzerfolg Toyotas, aber auch anderer asiatischer Hersteller, ist wohl mitunter deren Strategie, die darauf abzielt, Fahrzeuge mit bereits hohem Grundausstattungslevel²⁶ – und dementsprechend niedrigerer Varianz – kosteneffizient zu produzieren²⁷, um entsprechend attraktive Endkundenpreise realisieren zu können, geschuldet. Insofern relativieren sich die durch Stäblein und Aoki [SA15] erhobenen Daten bzgl. der pro Linie abgebildeten Fahrzeugmodelle im Vergleich deutscher und japanischer Hersteller, wenn man eine Betrachtung der Varianz insgesamt vornimmt. Der Bericht weist dementsprechend auch die mit den Modellen verknüpfte Variantenvielfalt aus. Sie verglichen dabei die meistverkauften Modelle von je fünf OEMs²⁸. Dabei sind bereits die Unterschiede in der Anzahl der verfügbaren Antriebsvarianten mit durchschnittlich 9,2 bei den deutschen zu 5,6 bei den japanischen beachtlich. Deutlich signifikanter fällt jedoch das Verhältnis der ab Werk erhältlichen Sonderausstattungen mit 65,4 zu 11,6 aus. Nicht zuletzt diese Zahlen belegen den hohen Komplexitätsgrad für die Produktionsprogrammplanung und Austaktung der Linien deutscher Hersteller im Premiumsegment, das sich gemeinhin durch eine große Angebotsvielfalt²⁹ auszeichnet. Die Untersuchungen legen nahe, dass zur Beurteilung der Flexibilität einer Linie nicht nur die darauf produzierte Anzahl unterschiedlicher Modelle herangezogen werden kann, sondern vielmehr auch die Produktvarianz der jeweiligen Modelle. In der Hinsicht bestehen fundamentale Unterschiede zwischen den deutschen Premiumherstellern und japanischen, aber auch amerikanischen Automobilherstellern. Sowohl die japanischen, als auch die amerikanischen Hersteller versuchen die Varianz ihrer Produktportfolios zu limitieren. Beiden gemein ist das Ziel, die Kosten über das Stückzahlaufkommen positiv beeinflussen zu können. Die Ausprägungen derer Maßnahmen sind jedoch höchst unterschiedlich und in gewisser Weise wohl auch historisch gewachsen. So zeichnete sich das Angebot US-amerikanischer Automobilmarken dadurch aus, dass sie die Modellvielfalt begrenzten, dem Kunden jedoch weitreichende Sonderausstattungsoptionen anboten. Demgegenüber waren die Produktportfolios japanischer Marken seit je her von einer

22 Vgl. Bericht 2020 der BMW Group [BMW20].

23 Vgl. Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG [PAG20].

24 Vgl. Becker 2006 [Bec06].

25 Vgl. Monden 2012 [Mon12].

26 Vgl. Becker 2007 S. 9ff [Bec07].

27 Vgl. Rinza und Boppert 2007 [RB07].

28 OEM ist die Abkürzung für Original Equipment Manufacturer und bezeichnet im engeren Sinne einen Erstausrüster. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich der Begriff auch als Synonym für die Automobilproduzenten etabliert.

29 Vgl. Becker 2007 [Bec07].

größeren Modellvielfalt geprägt, wobei die Modelle durch sehr eingeschränkte Wahlmöglichkeiten an paketweisen Ausstattungslinien und wählbarer Einzelausstattungen nur in geringem Umfang variierten.³⁰

Insofern ist nachvollziehbar, dass angesichts der hohen Varianz die Produktion deutscher Automobilmarken von PKW des Premiumsegments eine nachfrage- und auftragsorientierte Ausrichtung (Build-to-Order) aufweist, während bei amerikanischen und japanischen Volumenherstellern – respektive dem asiatischen Raum insgesamt – mit deutlich weniger variantenreichen Modellportfolios, das Produzieren auf Halde (Build-to-Stock) immer noch vorherrscht und insoweit noch größere Anleihen an den von Henry Ford bei Einführung der Fließfertigung im Automobilbereich verfolgten Zielen, nimmt. Ungeachtet der Frage, ob die Begrenzung der Varianz einer vorherrschenden Marktphilosophie und Käuferverhaltens geschuldet ist, oder eine Anpassungsfunktion – im Sinne einer fertigungsgerechten Produktgestaltung – an die Inflexibilität des Fließbandproduktionsprinzips, bleibt festzustellen, dass die hiesigen Automobilhersteller mit deren ausdifferenzierten Modellpaletten in Kombination mit weitreichenden Ausstattungsoptionen eine Sonderstellung einnehmen, wenn es darum geht, durch planerische Maßnahmen eine hohe Varianz in einer Fließbandfertigung abzubilden.

2.3 Montageträger- und Werkstückfördertechnik

Eine Montage, die dem Fließbandprinzip unterliegt zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Werkstücke zumindest zwischen den Stationen in einem kontinuierlichen Fluss befinden.³¹ Indem sich die Endmontage dem Grunde nach in verschiedene Abschnitte mit spezifischen Montageinhalten und Tätigkeitsfeldern des Personals unterteilen lässt, erfolgt eine dahingehende nominelle und ebenso in technischer Hinsicht motivierte Einteilung in Abschnitte, so dass anhand der Montageinhalte die Endmontagelinie in Sektionen unterteilt wird.³² Die Diversität der Montageinhalte impliziert damit einhergehende prozessuale und ergonomische Gesichtspunkte, die sich in einem breiten Anforderungsspektrum an Werkstückträger-, Handhabungs- und Fördertechnik niederschlagen. Kratzsch [Kra00] untergliedert die Endmontage in die Bereiche Inneneinbau, Fahrwerk, Fertigmontage, Einfahrbereich und Wagenfertigstellung. Diese Differenzierung unterstreicht die Diversität der Prozesse in den Fertigungsstadien eines PKW. Um die höchst unterschiedlichen Inhalte der Endmontage von Automobilen zu bewerkstelligen, erfolgt die Montage – zumindest in der Großserie – bis dato nicht durchgängig auf einem Werkstückträger mit zugehöriger Fördertechnik. Vielmehr lassen sich in den Montagelinien konkrete Zuordnungen verschiedener fördertechnischer Systeme zu den Sektionen, anhand derer die technischen Anforderungen an die Werkstückträger-, Handhabungs- und Fördertechnik hervorgehen, ausmachen. Insofern impliziert die nominelle Einteilung der Endmontage in Abschnitte auch, dass zur Bewerkstelligung der Montagevorgänge an die Werkstückträger und Handhabungstechnik ebenso differenzierte Anforderungen bestehen, die einen Wechsel dieser letztlich erforderlich machen können. Dementsprechend kommen bis weilen in den Endmontagelinien auch verschiedene Fördertechniken zum Einsatz. Inwieweit ein Wechsel der Fördertechniken zum Durchlaufen der Sektionen erforderlich ist und welche Systeme zum Einsatz kommen, ist letztlich von der Produktgestaltung und der individuellen

30 Vgl. MacDuffie et al. 1996 [DSF96].

31 Vgl. Wehking 2020 S.35 [Weh20] und Seliger 2018 [Sel18].

32 Vgl. Kratzsch 2000 S.111 [Kra00] und Jesse 2017 S.17 [Jes17].

Montageplanung abhängig. Einerseits nehmen die technischen Möglichkeiten der Werkstückträgerfördertechnik Einfluss auf die Montageabläufe, andererseits bestehen auch im Zuge der Produktgestaltung Spielräume, die Komplexität der Anforderungen an die Montagetechnik zu verringern und damit bereits im Produktentstehungsprozess monetären Einfluss auf die hardwaretechnische Ausgestaltung der Endmontage zu nehmen. Gleichwohl sind dieser Einflussnahme auch Grenzen gesetzt, indem hinsichtlich der Montageabfolge Restriktionen bestehen, die sich in Gestalt von Vorranggraphen³³ niederschlagen. Die Werkstückfördertechnik stellt insofern Einflussgröße und zugleich Resultat der Montageplanung dar. Dementsprechend ist der Fördertechnik in der Endmontage der Automobilfertigung eine weit aus größere Bedeutung beizumessen, als die Primärfunktion des Längs-, Quer- und Vertikalförderns von Werkstücken, da in die Werkstückfördertechnik Ergonomie- und Handhabungsfunktionen integriert sind respektive sich Restriktionen hinsichtlich der Zugänglichkeit von Montagestellen ergeben. Zudem besteht stets eine Korrelation zwischen Fortbewegung des Werkstücks und dem Montagepersonal, so dass dies in der Gesamtheit zu betrachten ist. Die kontinuierliche oder absätzigige Fortbewegung des Werkstücks innerhalb des Layouts kann dabei auf unterschiedliche Art erfolgen, so dass diverse Förderprinzipien Anwendung finden können.

Die Taktzeit entspricht der Zeitspanne, die ein Werkstück in einer Station verbringt respektive es zum Durchlaufen der Station benötigt. Unter Zugrundelegung einheitlicher Abmessungen der Stationen innerhalb einer Montagelinie spiegelt sich die Taktzeit in der Fördergeschwindigkeit der Werkstückträger insofern wieder, als dass die Fördergeschwindigkeit so zu wählen ist, dass die gewünschte Taktzeit erreicht wird. Dem Prinzip der einheitlichen Taktung einer Linie folgend, finden in Fließbandsystemen der automobilen Endmontage mehrheitlich noch starre Fördersysteme, wie z.B. Elektrohängebahnen, Schubglieder- und Bandförderer sowie Tragkettenförderer Anwendung, vgl. Abbildung 2.1.



Abbildung 2.1: Elektrohängebahn (links) und Schubplattform mit Hubeinrichtung (rechts) am Beispiel der Endmontage von BMW.

Quelle: BMW AG

Starr impliziert im vorliegenden Kontext insbesondere die Unveränderlichkeit – respektive nur mit großem Aufwand zu bewerkstellende Änderung der Förderstrecke – die z.B. ein aufgeständertes beziehungsweise Flur- oder Unterflurschienensystem darstellt, an das die einzelnen Förderelemente bzw. Werkstückträger gebunden sind. Hinzu kommt bei einigen

³³ Vorranggraphen stellen graphische Darstellungen der Abfolge von Montageprozessen dar, bei denen technologische Abhängigkeiten bestehen und es der Einhaltung einer Reihenfolge bedarf, vgl. Seliger 2018 [Sel18].

Fördersystemen eine mechanische Kopplung der Fördererlemente, wenn diese, wie z.B. bei Tragketten- oder Gurtförderern³⁴, über ein gemeinsames Zugmittel miteinander verbunden sind. Die Abstände der Fördererlemente / Werkstückträger zueinander bemisst sich nach der Taktzeit, so dass bei einer konstanten Fördergeschwindigkeit an einer definierten Stelle, z.B. dem Beginn einer Station, im zeitlichen Abstand der Taktzeit das nächste Werkstück eintrifft.

Für den zurückgelegten Weg innerhalb einer Zeitspanne gilt bei einer linearen, nicht beschleunigten Fortbewegung:

$$s = \frac{v}{t} \quad (1)$$

s	zurückgelegter Weg	$[m]$
v	Geschwindigkeit	$[m/s]$
t	Zeitspanne	$[s]$

Die Strecke, die ein Takt umfasst, bemisst sich nach der Länge des Werkstücks zuzüglich eines Sicherheitsabstandes. Jesse [Jes17] berichtet in seiner Dissertation von der Linienkonfiguration in Werken des Volkswagen Konzerns. Er weist die streckenmäßige Taktlänge wie folgt aus:

$$s_{Takt} = s_{PKW} + s_{Sicherheit} + s_{Flex} \quad (2)$$

wobei

s_{Takt}	Wegstreckenlänge eines Taktes	$[m]$
s_{PKW}	Fahrzeuglänge des größten in der Linie gefertigten PKW	$[m]$
$s_{Sicherheit}$	Sicherheitsabstand	$[1m]$
s_{Flex}	Flexibilitäts-Sicherheitsabstand	$[0,1m]$

Mit einer aufgrund der Linienkonfiguration definierten Taktzeit t_{Takt} und Strecke des Taktes s_{Takt} ergibt sich daraus die Fördergeschwindigkeit v_F der Werkstücke. Aufgrund des Prinzips der einheitlichen Taktung ist der Abstand zwischen den Werkstückträgern auch bei solchen Fördersystemen einzuhalten, bei denen die einzelnen Fördererlemente über einen eigenen Antrieb verfügen und nicht etwa über z.B. ein gemeinsames Zugelement gekoppelt sind. Fördertechnikelemente, die dem Bereich der Stückgutfördertechnik zuzuschreiben sind und über einen eigenen Antrieb verfügen, sind beispielsweise Elektrohängebahnen und Fahrerlose Transportfahrzeuge.

Nachfolgend werden ausschließlich die im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit und der damit einhergehenden Abgrenzung und Weiterentwicklung des Stands der Technik hinsichtlich des Werkstückmaterialflusses in der automobilen Serienendmontage relevantesten Fördertechniken vorgestellt.

³⁴ Vgl. Wehking 2020 S. 545 ff. [Weh20].

2.3.1 Elektrohängebahn

Elektrohängebahnen (EHB) stellen flurfreie Horizontalförderer dar, deren Schienen entweder an der Decke abgehängt, vgl. Abbildung 2.2, oder aufgeständert befestigt sind.

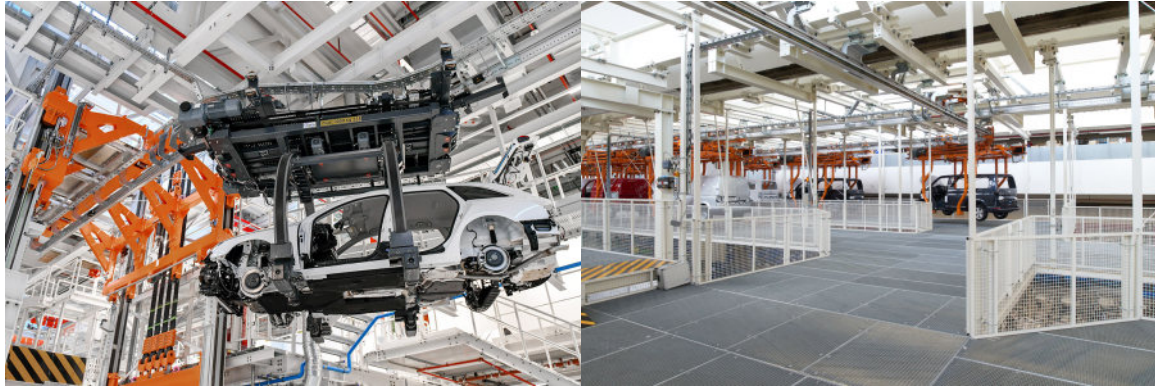


Abbildung 2.2: Beispiele von Elektrohängebahnen mit abgehängten Schienensystemen.
Quelle: ROFA Industrial Automation AG.

Die als Gehänge, vgl. Abbildung 2.3 bezeichneten Fördererlemente einer Elektrohängebahn verfügen über Fahrwerke mit eigenem Reibradantrieb, so dass jedes der Gehänge unabhängig von einander angetrieben ist.

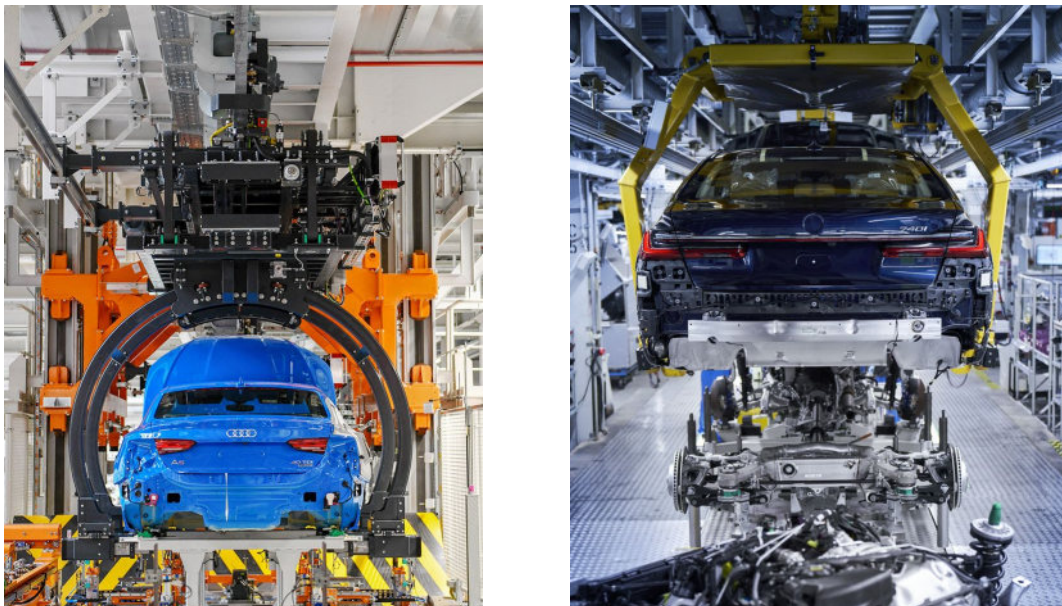


Abbildung 2.3: Gehänge von Elektrohängebahnen in nach unten geöffneter C-Form zur Aufnahme von Karosserien am Unterboden.
Quellen: ROFA Industrial Automation AG, BMW AG.

Aufgrund des kraftschlüssigen Antriebsprinzips ist die Steigfähigkeit einer Elektrohängebahn eingeschränkt und korreliert insbesondere mit der Nutzlast und den Kraftschlussverhältnissen des Rad-Schiene-Kontaktes. Zur Überwindung von größeren Höhenunterschieden z.B. für den Wechsel von Ebenen können daher Hub- und Senkstationen vorgesehen werden. Für Richtungswechsel, die sich aufgrund der Radien nicht durch Kurven realisieren lassen, werden Drehscheiben eingesetzt. Indem jedes Gehänge über einen eigenen Antrieb verfügt, sind diese zunächst von einander unabhängig. Eine Spreizung der Taktzeit unter Ausnutzung der Abstände zwischen den Gehängen als Puffer zur Kompensation von unter- oder überdurchschnittlichen Bearbeitungsaufwendungen eines Werkstücks kommt jedoch nicht infrage, da es planerisches Ziel ist, die Taktbindung aus Gründen der Effizienz einzuhalten und die Nivellierung der Bearbeitungszeiten über den Modellmix herzustellen.³⁵ Insofern wird eine per definitionem der Kategorie der Unstetigförderer zugehörige Elektrohängebahn³⁶ im Kontext der Fließbandfertigung dennoch im weiteren Sinne als Stetigfördertechnik eingesetzt. Neben der Grundfunktion des Förderns eines Werkstücks, können über Elektrohängebahnen auch handhabungstechnische Funktionen abgebildet werden. In zahlreichen Automobilwerken sind Elektrohängebahnen anzutreffen, deren Gehänge mit einer Schwenkeinheit zur Drehung des Werkstücks um dessen Längsachse ausgerüstet sind, um hierdurch eine ergonomische Montage z.B. am Unterboden zu ermöglichen, oder allgemein eine bessere Zugänglichkeit zu bewerkstelligen. Dabei werden Schwenkwinkel von annähernd 90° erreicht, siehe Abbildung 2.4. Inwieweit diese Funktion erforderlich ist, hängt von der konstruktiven Gestaltung des PKW und in letzter Konsequenz der individuellen Montageplanung ab. Gleiches gilt auch für die Frage, ob bei den betreffenden Montagetätigkeiten eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und dem Personal bestehen darf, oder es technischer Lösungen bedarf, die eine Fortbewegung der am Werkstück arbeitenden Personen grundsätzlich ermöglichen, oder gar eine Synchronität in der linearen Bewegung herstellen müssen.

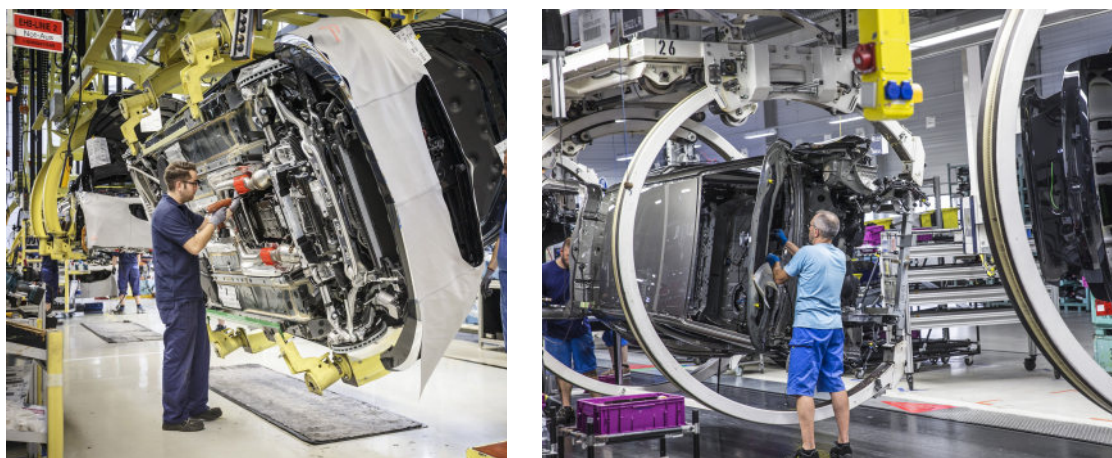


Abbildung 2.4: Elektrohängebahnen mit in die Gehänge integrierter Schwenkvorrichtung.
Quellen: Daimler AG, BMW AG.

Soll zwischen den an der Montage beteiligten Personen und dem Werkstück keine aus der Förderung des Werkstücks resultierende Relativbewegung bestehen, bzw. diese etwa durch Laufbewegung des Menschen kompensiert werden müssen, sind technische Systeme vorzusehen, die eine Form von Personenfördertechnik begleitend zur Werkstückfördertechnik

³⁵ Vgl. Küber et al. 2016 [Küb16].

³⁶ Vgl. Wehking 2020 S. 645 ff [Weh20].

darstellen. Dies kann beispielsweise in Form von sogenannten Mitlaufbändern erfolgen, die eine Art Bandförderer darstellen, auf denen das Personal während der Montage steht, vgl. Abbildung 2.5. Das Band läuft dabei synchron zum Werkstück mit gleicher Fördergeschwindigkeit, so dass keine Relativbewegung zwischen der Standfläche der Mitarbeiter:innen und dem Werkstück besteht.



Abbildung 2.5: Elektrohängbahn mit darunter befindlichem Bandförderer als Standfläche des Montagepersonals.
Quelle: BMW AG.

Für Montageinhalte, die eine weniger hohe Positionstreue zwischen Werkstück und den montierenden Personen erfordern, können hilfsweise auch auf Rollen gelagerte Stühle zum Einsatz kommen, vgl. Abbildung 2.6, um eine durch die menschliche Bewegung initiierte Positionsverlagerung in ergonomischer Arbeitshaltung zu erzielen.



Abbildung 2.6: Montagepersonal in sitzender Arbeitshaltung auf Dreh-/ Rollstühlen.
Quellen: Daimler AG, BMW AG.

Zur Unterstützung ergonomischer Arbeitsverhältnisse, der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Höhenniveaus, ohne dabei das Bezugsniveau des Schienensystems ändern zu müssen, sowie für Übergabe- und Fügeprozesse, wie z.B. der Hochzeit³⁷, können die Gehänge von Elektrohängebahnen auch mit einer Hubfunktion versehen sein. Die konstruktive Ausführung reicht hierbei von in die Tragstruktur der Gehänge integrierte Teleskopschubglieder, bis hin zu Scherenhubvorrichtungen, vgl. Abbildung 2.7.



Abbildung 2.7: Gehänge von Elektrohängebahnen mit Hubfunktion.

Links: In die Tragarme des Gehänges integrierter Teleskophub.

Rechts: Zentral an der Fahrwerksanbindung des Gehänges positionierter Scherenhub.

Quellen: Daimler AG, ROFA Industrial Automation AG.

³⁷ Als Hochzeit wird im Automobilbau das Fügen der Karosserie mit dem Fahrwerk samt Antriebsstrang bezeichnet.

2.3.2 Schubplattform

Schubplattformförderer werden aufgrund ihrer Ausprägung, wie sie im Kontext der Automobilproduktion anzutreffen sind, der Boden- oder Flurfördertechnik zugeschrieben, wenngleich deren grundsätzlicher Aufbau teilweise Anleihe bei klassischen Unterflurförderern nimmt. Dies ist insbesondere für jene Bereiche im Layout zutreffend, wo die Plattformen bündig mit dem Bodenniveau ebenerdig verlaufen. In diesen Bereichen ist deren Schienen- und Antriebssystem unterflur angeordnet, so dass sich lediglich die Fördergutaufnehmer auf Bodenniveau respektive darüber befinden. Klassische Unterflurförderer stellen Stetigförderer dar, bei denen die einzelnen Fördergutaufnehmer durch ein gemeinsames Zugelement in Form z.B. einer Schleppkette miteinander verbunden sind.³⁸ Schubplattformförderer hingegen, wie sie im automobilen Produktionskontext Anwendung finden, zeichnen sich durch das Förderprinzip aus, welches auf Schub basiert. Die Plattformen stellen mit Holz oder Metallboden belegte Rahmen mit Fahrwerken ohne eigenen Antrieb dar. Abbildung 2.8 zeigt im Vordergrund eine Schubplattform, wobei die Antriebe außerhalb der Plattform seitlich an die Schienen angeflanscht sind. Über diese, in das Schienensystem integrierte Reibradantriebe, wird den Plattformen kinetische Energie zugeführt.



Abbildung 2.8: Einzelne Schubplattform.
Quelle: ROFA Industrial Automation AG.

Bezüglich der Größe der Plattformen ist zwischen solchen Systemen, die lediglich die Vorrichtung zur Aufnahme des Werkstücks umfassen, bis hin zu solchen, die gleichzeitig die Standfläche für das Montagepersonal darstellen und dementsprechend großflächig angelegt sind, zu unterscheiden. Diese Ausprägung als Kombination aus Werkstückträger und Arbeitsplattform ist montagetechnischen Ergonomieanforderungen geschuldet, wonach zwischen den Mitarbeiter:innen und dem Werkstück keine Relativbewegung bestehen sollte. Diese Anforderung ist jedoch weder allgemein gültig noch für alle Montagevorgänge durchweg zutreffend, so dass auch jene Systeme ohne Standfläche für Personen vielfach anzutreffen sind, da sie schlichtweg platzsparender sind. Um jedoch bei diesen Systemen in jenen Bereichen, in denen sensible Montagetätigkeiten vollzogen werden, die es erfordern,

³⁸ Vgl. Wehking 2020 S. 532 ff [Weh20].

dass zwischen Personal und Werkstück keine Relativbewegung besteht – respektive das Personal dies durch Laufbewegung kompensieren müsste – zu ermöglichen, werden ebenso wie im Kontext von Elektrohängebahnen, vgl. Kapitel 2.3.1, sogenannte Mitlaufbänder installiert, die beidseits parallel im direkten Anschluss an die Werkstückträgerplattformen verlaufen. Dass sich trotz der Förderbewegung des Werkstücks die Relativposition zu den montierenden Personen in der Ausübung ihrer Tätigkeit nicht ändern sollte, ist auch hier direkter Ausfluss montagetechnischer und ergonomischer Anforderung, die nicht für alle Montageinhalte und Bandabschnitte, bei den Schubplattformen als Montageträger eingesetzt werden, Geltung besitzen. Am Ende des Taktes verlassen die Mitarbeiter:innen die Plattform – beziehungsweise die Position auf dem Mitlaufband – wieder, um sich auf dem Laufstreifen zurück an die angestammte Position zu begeben und dort das nächste Werkstück zu bearbeiten.

Innerhalb des Layouts von Schubplattformförderern ist zwischen verschiedenen Funktionszonen zu unterscheiden. Hinsichtlich der Anordnung der Plattformen und der Antriebe ist grundsätzlich zwischen solchen Zonen, wo sich die Plattformen in einem Schubverbund in direktem Kontakt zu einander befinden und solchen zu unterscheiden, wo die Plattformen einzeln und im Abstand gefördert werden. In einem lückenlosen Verbund befinden sich die Plattformen insbesondere dort, wo manuelle Tätigkeiten vollzogen werden. Dementsprechend sind dort die Plattformen in einem lückenlosen Verbund ohne Spalt, um eine gefahrlose Zugänglichkeit zu ermöglichen, vgl. Abbildung 2.9.

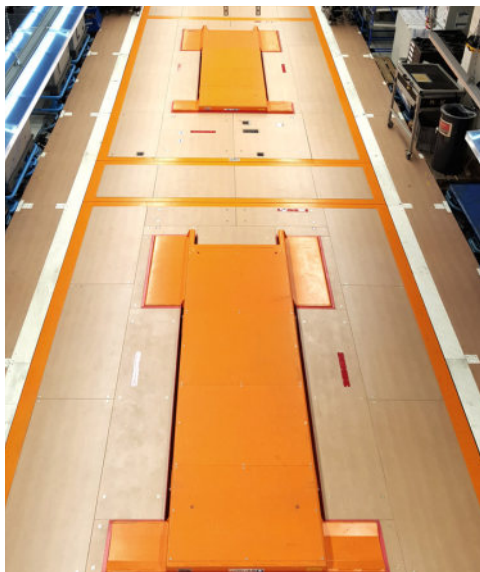


Abbildung 2.9: Plattformen in lückenlosem Schubverbund.

Quellen: ROFA Industrial Automation AG, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Weitere funktionale Bereiche innerhalb des Layouts sind beispielsweise Umsetzer, Drehscheiben und Heber etc., wo die Plattformen nicht aneinander gestoßen, sondern auf Lücke gefördert werden und es einer Vereinzelung bedarf. An welchen und wie vielen Stellen innerhalb einer Förderstrecke Antriebe vorzusehen sind, ist daher bereichsabhängig und ist zunächst dadurch bedingt, in welcher Konstellation sich die Plattformen zu einander befinden – im Schubverbund, oder einzeln. Befinden sich die Plattformen im Schubverbund korreliert die Platzierung von Antriebseinheiten – und damit den Stellen, an denen dem Schubverbund kinetische Energie zugeführt wird – mit den zu bewegenden Lasten und den

davon abhängigen Fahrwiderständen. Demzufolge werden innerhalb einer Förderstrecke in einem definierten Zeitpunkt stets nur eine begrenzte Anzahl an Plattformen aktiv durch externe Reibräder angetrieben, so dass durch das Antreiben einzelner Plattformen die Förderbewegung einer zusammenhängenden Kette der ohne Lücke aneinander gestoßenen Plattformen initiiert wird, indem durch die Einleitung kinetischer Energie an einzelnen Plattformen die davor befindlichen geschoben werden, woraus letztlich die Namensgebung dieses Fördersystems resultiert. In den Bereichen, wo manuelle Tätigkeiten vollzogen werden und sich das Personal auf die Plattformen begibt, sind die Schienen unterflur angeordnet, damit die Plattformen ebenerdig auf Höhe des Bodenniveaus verlaufen und zum Betreten keine Stufe oder Absatz überwunden werden muss, vgl. Abbildung 2.10. Auf diese Weise werden Stolperstellen vermieden, eine deutliche Abgrenzung der bewegten Teile zum Boden, wie mit der gelb/schwarzen Markierung in Abbildung 2.10 zur Kenntlichmachung des Übergangs, trägt darüber hinaus zum Arbeitsschutz bei.



Abbildung 2.10: Schubplattformförderer mit Stehplattform in Holzbodenausführung.
Quelle: Audi AG.

Wie in Abbildung 2.10 zu sehen, können Schubplattformen mit einer Hubfunktion versehen sein, um das Werkstück in eine für die Mitarbeiter:innen ergonomische Lage zu bringen, oder zur Unterstützung von Fügeprozessen, insbesondere der Hochzeit, wo über die Hubfunktion von Plattform, oder Plattform und Elektrohängebahn kombiniert, das Fahrwerk in die Karosserie eingefahren wird.

2.3.3 Fahrerlose Transportfahrzeuge

Der für die Erstellung der vorliegenden Arbeit und die hierin beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten maßgeblichen Ausgangspunkt stellt das Jahr 2013 dar. Bis dato existierten vereinzelte Beispiele der Automobilfertigung – mehrheitlich aus der Kleinserie – bei denen Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) als Werkstückträger in der Endmontage von PKW und nicht nur einzelner Vormontagebaugruppen, wie z.B. Motor-Getriebeeinheit, eingesetzt wurden. Wenngleich die FTF auch nicht durchgängig über alle Gewerke der

Endmontage hinweg eingesetzt wurden, so markierte bereits die partielle Nutzung von FTF seinerzeit eine deutliche Motivation zur Abkehr von den starren Förderprinzipien, auch wenn mit den FTF eine Art Linie mit Taktung abgebildet wurde. Mehrheitlich fand sich diese Konstellation bis dato in Kleinserien- und Manufakturfertigungen exklusiver Fahrzeuge mit geringer Stückzahl oder gar limitierter Stückzahl, wie dem Audi R8 bzw. dem Porsche 918 Spyder und u.a. auch Fahrzeugen der Marke Lamborghini wieder. Besondere Erwähnung darf daher die Produktion des BMW i3, dem ersten in Großserie von BMW in Leipzig produzierten batterieelektrisch angetriebenen PKW, finden. Hier werden in diversen Bandabschnitten FTF als Werkstück- und Montageträger eingesetzt. Weitere Beispiele für Produktionen, in denen FTF zum Einsatz kamen, fanden sich bei den Auftragsfertigern³⁹ MAGNA und VALMET Automotive, die hinsichtlich ihrer Marktposition per se eine größere Strukturflexibilität aufgrund einer höheren Frequenz in der auftragsbezogenen Layoutumgestaltung benötigen. Allen vorgenannten Beispielen gemein war jedoch, dass es sich allesamt um monofunktionale FTF handelte mit bzw. teilweise auch ohne Hubvorrichtung zur Anpassung der vertikalen Position des Werkstücks. Die FTF fungierten dabei in definierten Bandabschnitten als reines Werkstücktransportmittel, so dass deren Einsatz und Funktionsumfang qualitativ dem einer Schubplattform ohne Standfläche für das Personal ähnelte, vgl. Abbildungen 2.11 und 2.12.



Abbildung 2.11: Linienförmige Förderung der Werkstücke auf monofunktionalen FTF in den Endmontagen des Porsche 918 Spyder und des Audi R8.
Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Audi AG.

Obgleich das Förderprinzip auf FTF – und damit autarken im Sinne von singulären und nicht an einander gekoppelten Werkstückträgern – basiert, wird bei den in Abbildung 2.11 gezeigten Beispielen eine Fließfertigung in Anlehnung an eine klassische Fließbandlinie vollzogen. Dementsprechend wird dabei ein Maß an Flexibilität genutzt, indem z.B. bedarfsgerecht eine individuelle Anpassung der Fördergeschwindigkeit jedes einzelnen Werkstückträgers oder auch eine Ausschleusung aus der Linie z.B. bei mangelhaften oder

³⁹ MAGNA und Valmet Automotive fertigen oftmals gleichzeitig marken- und modellübergreifend Fahrzeuge im Auftrag von Automobil OEM. Die Auslagerung der Produktion an solche Auftragsfertiger kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Beweggründe sind bspw. die temporäre Erweiterung der Fertigungskapazität, aber auch eine generelle Auslagerung aufgrund der mangelnden Rentabilität zur Einrichtung einer Fertigung beim OEM aufgrund der zu erwartenden Stückzahlen eines Produktes. So wurde bei Valmet Automotive in den 1990er Jahren z.B. der Porsche Boxster der Baureihe 986 und der Opel Calibra gefertigt. Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit sind u.a. die Mercedes Modelle A-Klasse und GLC. MAGNA Steyr produzierte als Produktionspartner der BMW Group am Standort Graz zwischen 2004 und 2010 über 600.000 Einheiten des BMW X3 der Baureihe X83. Darüber hinaus ist die Fertigung des Geländewagens Mercedes G-Klasse seit 1979 vollumfänglich bei Magna Steyr beheimatet.

fehlenden Teilen erfolgen kann, wenngleich das volle Potential, welches FTF bieten, nicht ausgeschöpft wird, indem keine auftrags- bzw. konfigurationsabhängige Pfadwahl in einem darauf ausgelegten Fertigungslayout erfolgt.

Bei der in der Abbildung 2.12 ersichtlichen Montagesituation wird über eine an der Decke aufgehängte Hebevorrichtung der Motor in das Chassis eines Audi R8, das sich auf einem FTF befindet, gefügt. Anders als bei dem in Abbildung 2.14 dargestellten Fügeprozess bei der Hochzeit aus Fahrwerk und Karosserie, erlaubt es die Bauweise des R8, den Motor von oben in das Chassis zu fügen, so dass dieser Vorgang auf dem FTF vollzogen werden kann. Bei der in Abbildung 2.14 enthaltenen Momentaufnahme der Hochzeit aus Karosserie und Fahrwerk ist die Situation hingegen dergestalt, dass das Fügen des komplett auf einem FTF vormontierten Fahrwerks mit Antriebsstrang von unten in die auf der EHB befindlichen Karosserie mittels Hubfunktion des FTF gefügt wird. Insofern zeigt sich auch an dieser Stelle, dass die Abfolge der Montagevorgänge, die hierfür erforderliche Handhabungstechnik und Vorrichtungen, sowie die Beschaffenheit und Funktionsumfang der Werkstückträger mit der konstruktiven Ausprägung des Produktes korreliert.



Abbildung 2.12: Monofunktionales FTF als Werkstückträger in der Fertigung des Audi R8.
Quelle: Audi AG.

Zwei der insgesamt drei an dem in obiger Abbildung gezeigten Fügeprozess des Motors beteiligten Monteure stehen auf dem Boden der Werkhalle. Das FTF befindet sich im Stillstand, so dass gem. obiger Definition in Kapitel 2.1 ein stationärer Zustand des Werkstückträgers innerhalb der Montagestation vorliegt. Da der Fügeprozess des Motors mithilfe einer stationären Hebevorrichtung erfolgt, muss dieser Vorgang im stationären Zustand durchgeführt werden, wohingegen die Tätigkeit des am Vorderwagen tätigen Monteurs womöglich auch im Fluss erfolgen könnte, sofern es sich um einen Werkstückträger mit Stehplattform handeln würde. Das in der Produktion des Audi R8 eingesetzte FTF verfügt über einen Hubtisch, siehe auch Abbildung 5.1, zum Positionieren des Werkstücks in vertikaler Richtung. Dies ist einerseits für das Einstellen einer ergonomischen Arbeitshöhe von Belang, vgl. Abbildung 2.13, andererseits aber auch im Hinblick zur Unterstützung der Interaktion und Interoperabilität mit anderen fördertechnischen Einrichtungen, sowie Montagevorrichtungen und -hilfsmitteln zu sehen.

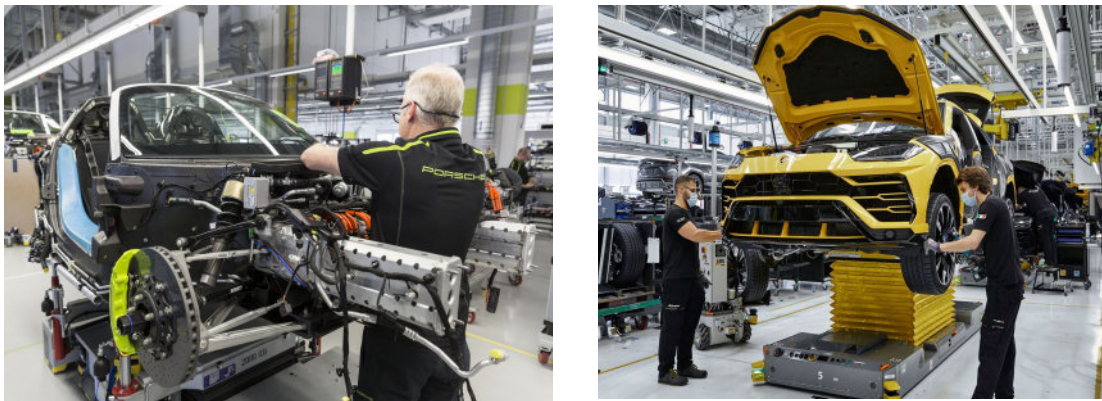


Abbildung 2.13: FTF mit Hubfunktion zur ergonomischen Werkstückpositionierung.
Quellen: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Automobili Lamborghini S.p.A.

Nicht nur im Falle des Audi R8 erfolgt die Montage nur partiell auf dem FTF, so dass die Hubfunktion neben den rein ergonomischen und montagespezifischen Gesichtspunkten auch bei Verlade- und Übergabeprozessen benötigt wird, wenn beispielsweise ein Wechsel zwischen den Fördertechniken und Werkstückträgersystemen stattfindet oder eine sonstige Interaktion zwischen FTF und z.B. Montagevorrichtungen, Bearbeitungsmaschinen etc. zu erfolgen hat, bei denen ein Höhenausgleich notwendig ist, vgl. Abbildung 2.14



Abbildung 2.14: Interaktion zwischen FTF mit Hubfunktion und Elektrohängebahn zur Werkstückübergabe (links) und der Hochzeit von Fahrwerk und Karosserie (rechts).
Quellen: Automobili Lamborghini S.p.A.

Die vorausgegangenen Beispiele von PKW-Fertigungen, in denen zumindest partiell FTF als Montageträger des Fahrzeugs bzw. Chassis/Fahrgestells verwendet werden, weisen allesamt monofunktionale FTF auf, die lediglich über ein in vertikaler Richtung wirkendes Hubsystem verfügen. Keines der Fahrzeuge umfasst weitere handhabungs- und ergonomierelevante Funktionsumfänge, wie beispielsweise das Schwenken des Werkstücks um dessen Längsachse, ähnlich wie es bei EHB-Systemen, vgl. Abbildung 2.4, der Fall ist. Des Weiteren umfassen die gezeigten FTF keine ausgeprägten Plattformen, die als Standfläche für das Montagepersonal dienen. Ferner ist es mit diesen FTF aufgrund deren prinzipiellen Aufbaus auch nicht möglich, einen PKW im fertig- oder auch teilmontierten Zustand ohne Zuhilfenahme externer Hilfsmittel in Gestalt von Hubvorrichtungen oder einer

Elektrohängebahn, von den FTF zu entladen. Als flurgebundene Verladehilfsmittel können daher Hubbühnen zum Einsatz kommen, wie das Fallbeispiel in Abbildung 2.15 veranschaulicht. Hierbei dient eine in den Boden integrierte Hubarbeitsbühne, wie sie aus dem Bereich des KFZ-Service bekannt sind, als Abladehilfsmittel. Die in Abbildung 2.15 dokumentierte Situation entstammt der Produktion des BMW i3 am Standort der BMW Group in Leipzig.



Abbildung 2.15: Verladen und auf den Boden Absetzen eines fertig montierten BMW i3 mithilfe einer Säulenhubarbeitsbühne.

Quelle: TestDriven.

Selbiges Prinzip, um das fertigmontierte Fahrzeug vom Werkstückträger bzw. Transportfahrzeug auf den Boden zu entladen, fand sich auch in der Fertigung des Porsche 918 Spyder wieder, vgl. Abbildung 2.16.



Abbildung 2.16: Absetzen fertig montierter Porsche 918 Spyder vom FTF auf den Boden im end-of-line-Bereich.

Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Die obige Abbildung 2.16 entstammt aus dem Bereich der Montage, wo die Fertigstellung der Fahrzeuge erfolgt, ehe sie dann in die Prüfzone gelangen. Das im Vordergrund sichtbare silberne Fahrzeug befindet sich noch auf dem FTF bei der Achsvermessung. Das im Hintergrund ersichtliche rote Fahrzeug befindet sich bereits am Boden und steht auf den Rädern. Das Fahrzeug wurde über vier einzelne, nicht mit einander verbundenen, Hubsäulen (rechts im Bild), welche über Radaufstandsplatten verfügen, vom Montageträger abgesetzt. Wie bereits in Abbildung 2.15 zu sehen ist, wird das FTF mit dem darauf befindlichen Fahrzeug zwischen den Hubsäulen positioniert, so dass über das Ausfahren der Hubvorrichtung mit den Radaufstandsplatten das Fahrzeug vom FTF entkoppelt wird. Das FTF kann sodann unter dem Fahrzeug hindurch weggefahren werden. Sobald dies erfolgt ist, kann das Fahrzeug durch Ablassen der Hubeinrichtung am Boden abgesetzt und von den Radaufstandsplatten gerollt oder gefahren werden.

2.3.4 Zwischenfazit zum Stand der Technik

Wie bereits eingangs von Kapitel 2.3.3 beschrieben, markiert das Jahr 2013 die Ausgangslage für die in der vorliegenden Arbeit im Weiteren dargelegten Konzepte und Konstruktionen. Anhand der in den Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.3 beschriebenen technischen Systeme, deren Funktionalitäten sowie deren prozessuale Einbindung in die Montagevorgänge lassen sich hinsichtlich des Konzeptes eines FTF's, das möglichst durchgängig über die Gewerke der Endmontage hinweg als Werkstückträger und nicht nur reines Transportmittel eingesetzt werden kann, Grundanforderungen ableiten. Einerseits manifestieren sich prinzipbedingte Schwächen starrer Fördertechnik, wie sie Elektrohängebahnen und Schubplattformförderer, siehe Kapitel 2.3.1 und 2.3.2, darstellen, die einer flexiblen Layoutumgestaltung respektive individuellen Pfadwahl entgegenstehen. Andererseits zeigen die in Kapitel 2.3.3 dargelegten Fallbeispiele, dass es bis dato existenten Konzepten von Fahrerlosen Transportfahrzeugen, die als Werkstückträger fungieren, an weitergehenden Funktionalitäten und technischen Gestaltungsmerkmalen mangelt, um einen höheren Deckungsgrad montagetechnischer, ergonomischer und prozessualer Anforderungen – und damit über alle Gewerke der Endmontage hinweg betrachtet höheren Nutzungsgrad – zu erzielen. Dieser Betrachtung folgend, lassen sich nachfolgende Eckpunkte charakterisieren, welche im Ergebnis die Verwendbarkeit eines FTF's als Montage- und Werkstückträger mit deutlich größerem Autonomiegrad von statischen Hilfsmitteln, wie Hebevorrichtungen und Handhabungseinrichtungen, aber auch begleitender Fördertechnik zu realisieren.

Diese Eckpunkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Fahrzeugaufnahmevorrichtung mit vertikalem Hub und Schwenkfunktion, zur Drehung des Fahrzeugs um dessen Längsachse, um eine ergonomische Erreichbarkeit des Unterbodens herzustellen.
- Standfläche für das Montagepersonal, um eine Fließmontage mit stetiger Förderung ohne Relativbewegung zwischen den an der Montage beteiligten Personen und dem Werkstück zu ermöglichen.
- Vorrichtung und Funktion zum automatischen Abladen eines teil- oder fertig montierten Fahrzeugs ohne Zuhilfenahme externer Hebevorrichtungen.

2.3.5 Erweiterter Stand der Technik Fahrerloser Transportfahrzeuge

Ab dem Jahr 2018 waren bei den in Baden-Württemberg ansässigen Automobilherstellern intensivierte Bestrebungen zu einer – zumindest partiellen – Abkehr von bekannten Fließbandproduktionsprinzipien vernehmbar. Als ein Beweggrund hierfür kann sicherlich der sich abzeichnende Strukturwandel hin zur Elektromobilität in Gestalt der Teileelektrifizierung des Antriebsstranges mit Hybridfahrzeugen, aber auch die Markteinführung batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge ausgemacht werden. Erste Ergebnisse und Konzeptstudien des am IFT entwickelten Produktionslogistikkonzeptes für die flexible und wandelbare losgrößenunabhängige automobilen Endmontage wurden mit den Industriepartnern des Forschungscampus ARENA2036 an der Universität Stuttgart, aber auch darüber hinaus mit der potentiellen Anwenderschaft diskutiert und publiziert.⁴⁰ Beachtlich sind dementsprechend aktuelle Beispiele neu eingerichteter Produktionen der Marken Audi, Mercedes und Porsche, bei denen verstärkt FTF zum Einsatz kommen, sowohl in der Vormontage von Baugruppen, als auch in der Endmontage des Fahrzeugs als Werkstückträger. In der Gesamtbetrachtung aller produktionslogistischer Vorgänge darf dabei die Factory 56 der Daimler AG besondere Erwähnung finden, indem hier modellübergreifend flexibel produziert werden soll, wengleich wie auch bei der Produktion des vollelektrisch angetriebenen Audi e-tron GT die eingesetzten FTF lediglich als Werkstücktransportmittel mit Hubvorrichtung, siehe Kapitel 2.3.3, eingesetzt werden. Im Hinblick auf die eingesetzten FTF als Werkstückträger markiert die im September 2019 eröffnete Produktion des vollelektrisch angetriebenen Porsche Taycan eine signifikante Weiterentwicklung des Stands der Technik. Die vormals in Kapitel 2.3.4 beschriebene Anforderung und bis dato mehrfach postulierten Vorteile eines FTF, welches nicht nur als Werkstücktransportmittel, sondern vielmehr mit einer Stehplattform versehen, ein Montage- und Logistik-FTF verkörpert⁴¹, wurden hier konkret aufgegriffen, siehe Abbildung 2.17.

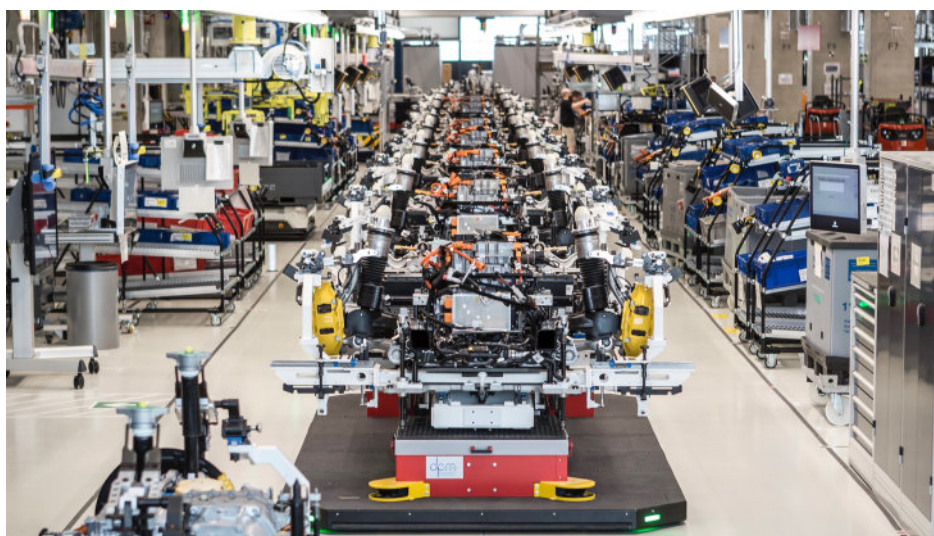


Abbildung 2.17: Achs- und Fahrwerkvormontage in der Produktion des Porsche Taycan.
Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Die obige Aufnahme in Abbildung 2.17 entstammt dem Bereich der Achs- und Fahrwerkvormontage des Taycan-Werks der Porsche AG am Standort Zuffenhausen. Deutlich zu erkennen ist, dass den Rumpf (rot) des als Werkstückträger eingesetzten FTF

40 Vgl. Wehking und Popp 2015 [WP15] und Hofmann 2016 [Hof16].

41 Vgl. Hofmann 2018 [Hof18] sowie Hofmann und Wehking 2018 [HW18].

eine ausgeprägte ebene Plattform (schwarz) umgibt. Ein ähnliches Bild bietet sich bei der Betrachtung der Endmontage, auch hier wird ein FTF mit Standfläche für das Montagepersonal eingesetzt, siehe Abbildung 2.18.



Abbildung 2.18: Hochzeit in der Produktion des Porsche Taycan mittels FTF und EHB.
Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Die in obiger Abbildung 2.18 ersichtliche Situation zeigt den Bereich der Endmontage, in dem die Hochzeit vollzogen wird. Dies geschieht, analog zu dem in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Prinzip, indem das auf dem FTF befindliche Fahrgestell in die auf der EHB befindliche Karosserie gefügt wird. Beachtlich ist, dass das eingesetzte FTF eine – wenngleich schmale aber flache – bodennahe Standfläche für das Montagepersonal aufweist. Die Mitarbeiter:innen können folglich, wie in der Abbildung zu sehen, ihre Montagetätigkeit auf dem FTF stehend verrichten, so dass sich das Personal und die Fügepartner mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen und somit keine Relativbewegung besteht, die etwa kompensiert werden müsste, oder in letzter Konsequenz dazu führen würde, dass die Montageumfänge im stationären Zustand getätigt werden müssten.

2.4 Automatisierte Transport- und Materialbereitstellungssysteme zur Versorgung der Montage

Neben der Montagetechnik und den hierfür eingesetzten Fördermitteln, folgen auch die Prozesse des Materialflusses zur Versorgung der Fertigung einer spezifischen auf das Fließlinienprinzip ausgerichteten Struktur. Die intralogistischen Prozesse der Materialbereitstellung an den Verbauort umfasst die Lagerungs-, Umschlag-, Kommissionier- und Transportvorgänge beginnend beim Wareneingang.⁴² Den letzten Schritt im Materialflusssystem der Montage stellt schließlich die Zuführung des Materials von der zur Bereitstellung bestimmten Örtlichkeit zu der Position, wo das Material verbaut bzw. gefügt wird, dar.⁴³ Am Verbauort selbst befinden sich dementsprechend kleinskalige Lagerkapazitäten, aus denen der Bedarf der Montageprozesse und Arbeitstakte gedeckt wird. Hierfür sind entlang der Linie bzw. Montagestationen Bereitstellungsflächen vorhanden, auf denen z.B. Regale und Ladungsträger für die Materialbereitstellung platziert werden, vgl. Abbildung 2.19.



Abbildung 2.19: Materialbereitstellung aus Regalsystemen zu beiden Seiten der Montagelinie.
Quellen: Audi AG.

Die Materialzuführung stellt insofern das Bindeglied zwischen der Materialbereitstellung und dem Werkstück bzw. Fügepartner dar.⁴⁴ Aufgrund der Diversität der Ausprägung, Beschaffenheit und des Aufkommens der zur Fertigung eines Produktes – hier einem PKW – benötigten Bauteile und Materials sowie des zugrundeliegenden Logistikkonzeptes kommen unterschiedliche Förder-, Lager- und Handhabungsmaschinen sowie unterstützende Techniken für manuelle Umschlag- und Kommissionierprozesse in der Materialbereitstellung und -zuführung zum Einsatz. Das Logistikkonzept, die Bereitstellungsstrategie und alle damit verknüpften Vorgänge der Materialbereitstellung und -zuführung sind darauf ausgelegt, eine bedarfsgerechte Versorgung der Montage zu gewährleisten, so dass die prozessuale und technische Ausgestaltung von den individuellen Anforderungen abhängt. Die konkrete Ausprägung des Bedarfs und somit die Prozessgestaltung beginnend im Lager bzw.

42 Vgl. Boysen et al. 2015 [Boy15].

43 Vgl. Nyhuis et al. 2012 [Nyh12].

44 Vgl. Hesse 2006 S. 244 [Hes06].

Logistiksupermarkt⁴⁵ bis zum Verbau ist dabei maßgeblich von der Abruf- und Bereitstellungsstrategie abhängig. In der Automobilproduktion finden die Prinzipien der Just-in-Time (JIT) und Just-in-Sequence (JIS), als auch das Kanban-Prinzip⁴⁶ in der Materialversorgung Anwendung. Die Beschickung der Ladungsträger bzw. die Sequenzierung der Teile erfolgt entweder bereits bei Zulieferern und Logistikdienstleistern oder aus einem Supermarkt heraus, vgl. Abbildung 2.20.



Abbildung 2.20: Logistiksupermarkt für den Warenumschlag, die Kommissionierung und Beschickung von Transporteinheiten zum Verbauort.
Quelle: Audi AG.

Während vorliegend ausschließlich die innerbetrieblichen Transporte vom Supermarkt an den Verbauort betrachtet werden, bestimmt das zugrundeliegende Logistikkonzept sämtliche Beschaffungsprozesse inklusive der Lieferanten und Dienstleister. Der JIT-Ansatz zielt darauf ab, das zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigte Material ausschließlich in der benötigten Menge in einem eng gehaltenen definierten Zeitfenster bereitzustellen.⁴⁷ Der JIS-Ansatz ist dabei noch weiter gehend, indem das Material nicht nur zum richtigen Zeitpunkt in der erforderlichen Quantität, sondern auch der richtigen Reihenfolge, der Sequenz des Werkstückdurchlaufs entsprechend, bereitgestellt wird.⁴⁸ Je nach Bereitstellungsform und in Abhängigkeit der Ausprägung der Materialien kommen unterschiedlichste Behälter und Ladungsträger zum Einsatz. Insbesondere bei der JIS-Bereitstellung von in Kleinladungsträgern verpackbaren Bauteilen und Materialien kommen häufig Regale bzw. Gestelle zum Einsatz, die per manuell geführten Flurförderzeugen oder automatisiert per FTF transportiert werden. Grundlegend ist bei den Transportformen zwischen Einzeltransport und Schleppzug mit mehreren Anhängern an einem Zugfahrzeug zu unterscheiden. Hinsichtlich der Regale und Gestelle sind sowohl fahrbare, mit eigenem Fahrwerk versehene, als auch nicht fahrbare, für deren Transport entsprechende Transfereinheiten notwendig sind, in der Praxis anzutreffen. Sowohl die Transportfahrzeuge als auch die Regalmodule sind insoweit auch in ihrer konstruktiven Gestaltung spezifisch auf deren

45 Im Umfeld der Automobilproduktion werden die Lager- und Kommissionierzonen aus denen das erforderliche Teilespektrum für die Montage bereitgestellt wird, häufig als sogenannte Logistiksupermärkte bezeichnet. Dabei kann sich die Örtlichkeit dieser Kommissionierzone sowohl innerhalb der Montagehalle befinden, als auch gebäudetechnisch getrennt von dieser sein, vgl. Battini et al. 2012 [Bat12] und Klug 2006 [Klu06].

46 Das Kanban-Prinzip ist ein verbrauchsgesteuertes Bereitstellungsverfahren, bei dem durch Unterschreitung einer definierten Vorratsmenge an der Senke analog per Karte oder digital ein Auftrag für den Nachschubprozess ausgelöst wird.

47 Vgl. Altenburg et al. 1999 [Alt99] und Klug 2006 [Klu06].

48 Vgl. Klug 2010 [Klu10].

Anwendungsszenarien ausgelegt. Werden mehrere Regale/Gestelle gleichzeitig im Schleppverbund transportiert, entspricht dies der Konstellation, wie man es von klassischen Routenzügen⁴⁹ kennt und es werden hier manuell geführte oder automatisierte Zugfahrzeuge eingesetzt. In Abhängigkeit des Automatisierungsgrades der gesamten Prozesskette der Materialbereitstellung, kommen entweder vollautomatisierte FTF zum Einsatz, oder Fahrzeuge, die sowohl im automatisierten Modus als auch manuell geführt werden können und dementsprechend über einen Führerstand und Bedienelemente verfügen.

2.4.1 Automatisierte Routenzugfahrzeuge

Bei automatisierten Routenzugfahrzeugen handelt es sich um Fahrzeuge, die bzgl. ihrer Gestaltung für die manuelle Bedienung konzipiert und mit entsprechender Sensorik zur Detektion der Umgebung und Navigation versehen sind, um einen automatisierten Fahrbetrieb zu ermöglichen, vgl. Abbildung 2.21.



Abbildung 2.21: Automatisiertes Zugfahrzeug eines Routenzuges.
Quelle: BMW AG.

⁴⁹ Ein Routenzug stellt einen Materialtransport bestehend aus einem Zugfahrzeug mit einem oder mehreren daran gekoppelten Ladungsträgern / Anhängern dar, mit dem ähnlich einem Busfahrplan definierte Punkte mit Zeitvorgabe angefahren werden, um dort Ladungsträger auf- und abzugeben, vgl. Golz et al. 2010 [Gol10].

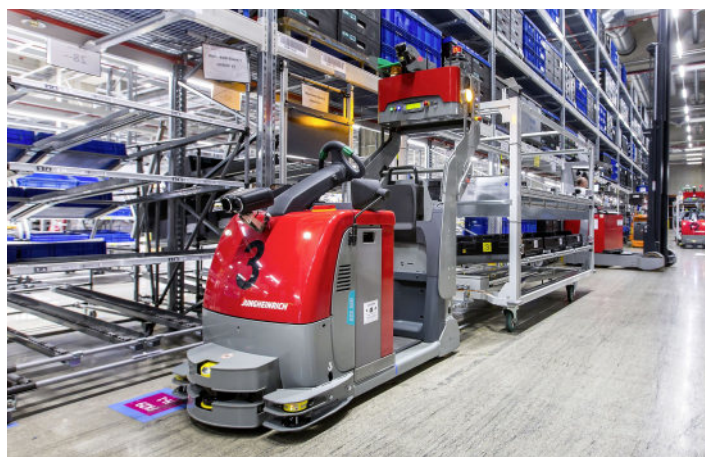


Abbildung 2.22: Automatisiertes Routenzugfahrzeug mit zweiachsigem Regal im Schlepp.
Quelle: Audi AG.

Auf der zum Zugfahrzeug zugewandten Vorderachse des in obiger Abbildung 2.22 geschleppten Regals sind Lenkrollen verbaut, wohingegen auf der Hinterachse feststehende Bockrollen angebracht sind. Da diese Fahrwerkskonstellation im Vergleich zum Einachser, siehe Abbildung 2.21, insbesondere für das Befahren enger Kurven in Lagergassen Probleme birgt und für das Rückwärtsfahren ungeeignet ist, muss hier ggf. auf das gleichzeitige Transportieren und Kuppeln mehrerer Regale/Anhänger verzichtet werden. Bei der in Abbildung 2.22 ersichtlichen Anwendung in einem Lager ist dies der Fall, so dass hier lediglich ein Regal pro Zugfahrzeug transportiert werden kann.

2.4.2 Transport-FTF

Neben den in Kapitel 2.4.1 gezeigten add-on Konzepten, bei denen manuell steuerbare Fahrzeuge automatisiert betrieben werden, finden ebenso rein als FTF konzipierte Fahrzeuge zum Transport von Regalen respektive Ladungsträgern für Kleinladungsträger Anwendung, siehe Abbildung 2.23.



Abbildung 2.23: FTF zum Transport von Regalmodulen.
Quelle: BMW AG.

Wie in Abbildung 2.23 dargestellt, ist grundsätzlich zwischen der links im Bild ersichtlichen Konstellation, wo ein FTF ein fahrbares Regal transportiert, von jener Konstellation abzugrenzen, wo der Ladungsträger fest mit dem FTF verbunden und damit integraler Bestandteil des Fahrzeugaufbaus ist, wie im rechten Teil der Abbildung 2.23 zu sehen ist. Der im linken Teil der Abbildung ersichtlichen Konstellation liegt die Systematik des Unterfahrens eines mobilen Regals durch ein flach bauendes flächiges Plattformfahrzeug zugrunde. Für den Transport der Regale werden diese über einen initialen Hub vom FTF angehoben, um den Bodenkontakt der Rollen des Regals zu lösen, siehe Abbildung 2.24. Infolge dessen ist während des Transports folglich die gesamte Gewichtskraft des Regals/Ladungsträgers resultierend aus Eigen- und Nutzlast vom FTF zu tragen. Da die Limitation der Kompaktheit eines FTF mit der Traglast korreliert und zudem die Regalmodule meistens auch manuell manövrierbar sein sollen, ist der Grund für die Nutzlastkapazität derartiger Systeme von ca. 500 kg⁵⁰ in der Kombination dieser Umstände zu sehen.

⁵⁰ Vgl. Ulrich und Albrecht 2019 [UA19].



Abbildung 2.24: Regaltransport im angehobenen Zustand.
Quellen: BMW AG, Bär Automation GmbH.

Ungeachtet der Transportform respektive der Ausprägung von Ladungsträger und Transportfahrzeug ist den bis hier her vorgestellten Systemen gemein, dass die Beschickung und Kommissionierung im Supermarkt, sowie die Entnahme des Materials am Verbauort manuell erfolgt. In Abgrenzung zu dieser Systematik, existieren auch FTF, die einen Ladungsträger mit integrierter Handhabungstechnik umfassen. Dahingehende Ausführungsbeispiele finden sich in Abbildung 2.25.



Abbildung 2.25: FTF mit Ladungsträger als Einheit und integrierter Handhabungstechnik.
Quellen: Magazino GmbH, TruPhysics GmbH.

Den in obiger Abbildung 2.25 ersichtlichen Systemen liegt das Prinzip einer fahrbaren Basis mit Aufbau, welcher den Ladungsträger verkörpert, zugrunde. Mittels der in den Ladungsträger integrierten Technik zum Handling und Fördern von Kleinladungsträgern, in Form von z.B. ausziehbarer Fachbodenschienen, Drehteller und Rollförderer, ist es möglich, die Behälter oder das darin befindliche Material den Mitarbeiter:innen entweder direkt anzudienen, oder in hierfür vorgesehene Durchlaufregale abzugeben und auf diese Weise einen automatisierten Nachschub zu bewerkstelligen.

2.4.3 Fazit zum Stand der Technik

Die in Kapitel 2.4 gezeigten Ausführungsbeispiele automatisierter Transportsysteme für die innerbetriebliche Materialbereitstellung bilden einen exemplarischen Querschnitt der grundlegend angewandten Prinzipien des automatisierten Transports respektive der Zuführung und Bereitstellung von Material am Verbauort in der Montage ab. Dabei lassen sich nach dem Funktionsprinzip nachfolgende grundsätzliche Abgrenzungen hinsichtlich der Systeme vornehmen, bei denen keine permanente mechanische Bindung zwischen Ladungsträger und Transportfahrzeug besteht:

- Schleppen eines oder mehrerer als Anhänger koppelbarer Ladungsträger durch ein Zugfahrzeug. Die Ladungsträger sind entweder mit Rollen versehen oder sind zum Transport auf fahrbare Transfereinheiten zu stellen.
- Transport von auf Rollen gelagerten Ladungsträgern/Regalen, die durch einen Applikationshub des FTF vom Boden angehoben werden. Während des Transports wirken Eigen- und Nutzlast des Ladungsträgers vollumfänglich auf die Tragstruktur sowie das Fahrwerk und die Antriebe des FTF ein.

Ferner existieren FTF, welche einen Gesamtaufbau bestehend aus fahrbarer Basis mit fest angebautem Ladungsträger und optional integrierter Handhabungstechnik zum Verlagern von Behältern und Kleinladungsträgern innerhalb des Stauraumes bzw. zur Andienung und Übergabe über die Systemgrenze hinweg nach außen aufweisen.

Es lässt sich abschließend konstatieren, dass die in den vorausgegangenen Kapiteln vorgestellten Systeme spezifische Lösungen darstellen, welche hinsichtlich ihrer technischen Ausgestaltung auf konkret vordefinierte Anwendungsszenarien ausgerichtet sind. Der Anwendungsbereich der Fahrzeuge ist folglich limitiert, da deren konstruktiver Aufbau sowie deren Funktionsprinzipien einem universellen, anwendungskontextübergreifendem Einsatz entgegenstehen. Um eine universelle Verwendbarkeit unter Reduzierung der Typenvielfalt – und damit höheren Nutzungsgrad innerhalb der Materialbereitstellung – der eingesetzten Systeme zu erzielen, bedarf es somit primär einer im Sinne der Interoperabilität unspezifischen Konstruktion der Komponenten, um eine höhere Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu erzielen, siehe Kapitel 3.2.

3 Zielkonzept einer flexiblen und wandelbaren Produktionslogistik für die automobilen Endmontage

Stetiges Wachstum von Produktionskapazitäten bedingt leistungsfähigere Materialflussprozesse. Der Warenumsatz und die Fördertechnik sind von immenser Bedeutung, wenn die Expansion des Produktionsaufkommens letztlich auch ökonomisches Wachstum bewirken soll. Damit sich das generierte Wachstum nicht nur im Umsatz, sondern auch im Ergebnis niederschlägt, sind effiziente Prozesse gefordert. Unter dieser Prämisse ist den Anforderungen nach höherem Durchsatz nicht nur durch schiere Größe und Anzahl an Fördermitteln genüge getan, sondern es bedarf vielmehr maßgeschneiderter Konzepte, die fortwährend in Veränderung begriffenen Anforderungen gerecht werden. In Anbetracht volatiler Märkte bei gleichzeitig breit gefächerten Produktpaletten werden Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zunehmend Schlüsselmerkmale effizienter Fertigungsprozesse, auf die es die intralogistischen Prozesse auszurichten gilt.

Der sich gegenwärtig in der Automobilindustrie vollziehende Strukturwandel ist hierfür exemplarisch. 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.⁵¹ Infolge dessen rückt die Abkehr von den bekannten Fertigungsprinzipien zunehmend in den Fokus mittel- und langfristiger Unternehmensplanungen. 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“.⁵²

Die Abkehr von der Fließbandfertigung würde jedoch nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Automobilproduktion darstellen, denn die – wenn auch nur sukzessive – Etablierung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der automobilen Großserienfertigung bedingt unweigerlich die Abkehr von der getakteten Fließbandfertigung und deren Prinzipien des Werkstück- und Materialflusses.⁵³

3.1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden im Kontext der Umstrukturierung und Neuausrichtung insbesondere vormals statischer Prozesse in Produktion und Logistik, hin zu einem höheren Anpassungsvermögen an sich verändernde Bedingungen, häufig Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zusammen bzw. sogar als Synonym genannt. Aus Sicht des Anwenders ist die Vermengung der Begrifflichkeiten durchaus nachvollziehbar, spiegelt sich doch darin in letzter Konsequenz das Bestreben wider, die Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit von Prozessen sowie die Rekonfigurierbarkeit von Anlagen zu steigern. Gleichwohl sind die genannten Begrifflichkeiten mit deutlicher Abgrenzung Gegenstand zahlreicher und bereits lange währender Untersuchungen verschiedenster

51 Vgl. Dietz und Fechter 2020 [DiF20], Popp 2018 S.3 ff [Pop18] sowie Roscher 2008 S.16 [Ros08].

52 Siehe Götz 2007 [Göt07].

53 Vgl. Dietz und Fechter 2020 [DiF20].

Wissenschaftsdisziplinen. Nicht zuletzt dieser Umstand lässt erkennen, dass ein weitreichendes Bedürfnis nach Anpassungsvermögen an sich ändernde Aufgabenstellungen und Randbedingungen in zahlreichen Branchen besteht. Bezug nehmend auf die Automobilproduktion betrifft dies nicht nur Fertigungsprozesse, sondern zwangsläufig auch Kapazitätsplanungen bzgl. der Personaldecke und der Maschinen, aber auch Kapitalbindung und Vertragslaufzeiten mit Lieferanten und Dienstleistern.

Folglich erstrecken sich Fragen der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit keineswegs nur auf den in dieser Arbeit in Rede stehenden Kontext der Prozessebene in Gestalt von Hardwarekonzepten für den Werkstück- und Materialfluss in der automobilen Endmontage. Vielmehr ist der Diskurs hinsichtlich Notwendigkeit und eines womöglich erforderlichen Grades an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit für sämtliche Ebenen einer Unternehmensführung relevant. So ist es nicht verwunderlich, dass das Anpassungsvermögen auf sich verändernde Bedingungen folglich für die gesamte Volkswirtschaft, die öffentliche Hand – insbesondere deren Haushalte – aber auch das Banken- und Finanzwesen von immenser Bedeutung sind. Ungeachtet der Verwendung der Begrifflichkeiten lässt sich bei verständiger Würdigung globaler Entwicklungen nicht in Abrede stellen, dass Handlungsmöglichkeiten im Umgang mit schlecht bis gar nicht vorhersehbaren Marktentwicklungen, Umwelteinflüssen oder auch epidemiologischer Ereignisse zu den drängenden Zukunftsfragen der Wirtschaft am Standort Deutschland zählt.

Eine allumfassend kontextübergreifend eindeutige Definition von Flexibilität lässt sich wohl kaum aufstellen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um eine polymorphe Begrifflichkeit handelt, deren engere Bedeutung stets in einem sachbezogenen Kontext zu sehen ist und zudem selbst innerhalb einer Disziplin einem zeitgenössischen Wandel unterliegt. So ist z.B. Flexibilität im Kontext von Militäroperationen der Antike retrospektivisch zweifelsohne in einem anderen Lichte zu betrachten, wenn man diesen das heutige Militärwesen gegenüberstellt. Gleiches gilt auch für Flexibilität in ökonomischen Systemen. In einer Planwirtschaft werden unzweifelhaft andere Grenzen und Bewertungsmaßstäbe hinsichtlich der Flexibilität der Märkte und des Finanzwesens gesetzt, als dies in marktwirtschaftlichen Ökonomien der Fall ist. Gleichwohl lässt sich ungeachtet des technischen, wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Bezugs und der anwendungsspezifischen Zielvorstellung von Flexibilität ein kleinster gemeinsamer Nenner ausmachen, indem allen Überlegungen ein substantielles Grundbedürfnis zugrunde zu liegen scheint, welches darauf abzielt, sich situativ auf in Veränderung befindliche intern und extern getriebene Faktoren einzustellen und sich in die Lage zu versetzen, auf zu einem Planungszeitpunkt noch unabsehbaren Unwägbarkeiten adäquat und effektiv reagieren zu können.

Garrel et al. [Gar14] beschreiben das Flexibilitätspotential einer Organisation als „Gesamtheit aller vorhandenen Handlungsoptionen, welche genutzt werden können, um einen Flexibilitätsbedarf befriedigen zu können“. Diese Formulierung lässt bereits erkennen, dass der Flexibilität im Zeitpunkt des Erfordernisses in der Regel Grenzen gesetzt sind. Diese Limitation ist faktische Konsequenz derjenigen Handlungsoptionen, die zuvor in der Planungsphase im Falle des Eintritts – in die Betrachtung einbezogener – möglicher Szenarien bereits Berücksichtigung fanden. In Konsequenz dessen erfordert operative Flexibilität in der Vorinstanz strategische Überlegungen und womöglich auch Antizipationsvermögen der Entscheidungsträger, um das Spektrum an Handlungsoptionen und damit einhergehend Systemgrenzen zu definieren.

So beschreibt Evans [Eva91] Formen strategischer Flexibilität und geht dabei u.a. auf Arbeiten der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts aus dem Bereich der Ökonomie ein.⁵⁴ Vergegenwärtigt man sich die weltpolitischen und wirtschaftlichen Umstände dieser Zeit, ist es nicht verwunderlich, dass es vorwiegend Ökonomen waren, die sich seinerzeit mit Fragen der Handhabbarkeit von nur schlecht bis unvorhersehbaren Marktentwicklungen und Möglichkeiten der Vorsorge respektive des effektiven Umgangs damit auseinandersetzten.

Evans weist 1991 darauf hin, dass strategische Flexibilität besonders in Hochtechnologiebereichen von entscheidender Bedeutung sei, da sich Produkte, Herstellungsprozesse, Märkte, Vertriebskanäle und Wettbewerbsgrenzen in einem ständigen Wandel befänden. Weiter führt er aus, dass der fortwährende technologische Wandel ein gesteigertes Maß strategischer Flexibilität im Management großer Unternehmen erfordern würde. Insofern lässt sich konstatieren, dass Flexibilität in der Vergangenheit mehrheitlich ein Thema darstellte, welches sich auf die strukturelle Unternehmensausrichtung bezogen hatte und dementsprechend vorwiegend auf der Management- und Organisationsebene verortet gewesen ist. Während somit vormals die Gesamtausrichtung eines Unternehmens bzw. einzelner Geschäftszweige vorwiegend gegenständlich gewesen ist, rücken nunmehr in der Automobilindustrie zunehmend Möglichkeiten und Maßnahmen der Flexibilisierung auf Prozessebene, insbesondere der Fertigung, in den Fokus der Überlegungen. Dies stellt für die Automobilindustrie angesichts der bis dato vorherrschenden Serienfertigung mit getaktetem Fließbandprinzip nicht weniger als einen Paradigmenwechsel dar. Dabei ist die Situation aber keineswegs dergestalt, dass Fertigungsprozesse und die damit verbundenen logistischen Vorgänge um ihrer selbst Willen flexibler gestaltet werden sollen. Vielmehr sind dahingehende Maßnahmen als direkter Ausfluss einer übergeordneten Unternehmensstrategie zu verstehen, welche u.a. der Konkurrenzsituation in globalisierten Märkten, Nachfrageschwankungen innerhalb eines breiten Produktspektrums, Möglichkeiten der Digitalisierung und letztlich dem Zwang zur Effizienzsteigerung infolge steigender Lohn- und Investitionskosten Rechnung trägt. Insofern besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen betriebswirtschaftlichen Strategien und technisch-operativen Ansätzen.

Westkämper et al. [Wes00] sprechen von einem flexiblen System im Kontext produzierender Unternehmen „wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist.“ Bellmann et al. [Bel10] sehen in Flexibilität „die Fähigkeit eines Produktionssystems, Produkte und Leistungen in einer Vielzahl mengen- und artverschiedener Konkretisierungen unter dem Einfluss von unterschiedlichen externen und internen Einflüssen ausbringen zu können.“ Wie Evans stellt auch Bellmann fest, dass der Grad der Intensität der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Fragen der Flexibilität stark mit wirtschaftlichen Entwicklungen korreliert und hebt dabei für den deutschsprachigen Raum insbesondere auf die Weltwirtschaftskrise 1929, die Jahre des wirtschaftlichen Aufschwungs in den 1950er Jahren sowie die Ölkrise in den 1980er und 1990er Jahren ab. Bellmann betont an der Stelle aber auch, dass sich seinerzeit Überlegungen zur Flexibilisierung fast ausschließlich auf Kapazitätsplanungen bezogen hätten und spricht sogar von einem Diskurs „Kapazität versus Flexibilität“. Bellmann sieht Flexibilität als mehrdimensionales Konstrukt mit drei Ebenen. In der ersten Ebene sieht er lediglich das Erfordernis, sich mittels operativer (Teil-)Systemanpassungen kurzfristigen Änderungen von Umweltbedingungen zu begegnen. Hierzu könnten sowohl externe Faktoren, wie Nachfrageschwankung, aber auch interne, wie der Ausfall von Maschinen und Krankheit der Beschäftigten, zählen. Bellmann sieht alle Faktoren zu dieser Ebene zugehörig, die auf operativer Ebene kompensiert werden können.

⁵⁴ Siehe McKinsey 1932 [Kins32] und Shackle 1938 [Sha38].

All jene Faktoren, die sich nicht mehr operativ kompensieren ließen, würden den Entwicklungsverlauf des Geschäftsfeldes – und damit die Unternehmensebene – berühren, was z.B. in Gestalt von Neuentwicklungen und -einführung von Produkten der Fall sein könne. Auf der dritten Ebene – der strukturellen Ebene – entstünden Flexibilitätsbedarfe laut Bellmann regelmäßig durch fundamentale Änderungen, wie sie z.B. ein grundsätzlicher technologischer Wandel mit sich bringe.

Im Sinne der Ausführungen Bellmanns ist die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Problemstellung, der Produktion von Gütern mit kleinen Losgrößen im Lichte volatiler Märkte eine Frage der Flexibilität der operativen Ebene. Für den hier in Rede stehenden Anwendungskontext einer Automobilendmontage ist diese Flexibilität somit insbesondere in der Skalierbarkeit eines Produktionssystems zu sehen⁵⁵. In Bezug auf die Werkstückfördertechnik impliziert diese Forderung, dass von einander unabhängige und zugleich mobile Werkstückträger, wie z.B. in Form Fahrerloser Transportfahrzeuge eingesetzt werden müssten. Ansätze diesbezüglich wurden bereits in den 1970er Jahren bei Volvo verfolgt. Im Hinblick auf Zielstellung, variantenreiche oder gar artverschiedene Produkte in einem Produktionssystem zu fertigen, was im vorliegenden Kontext die Herstellung unterschiedlicher PKW-Modelle bedeutet, bedingt dies nicht nur Flexibilität, sondern vielmehr auch ein Maß an Wandlungsfähigkeit. Gleichwohl ist bereits an dieser Stelle festzuhalten, dass die Flexibilität in Form einer Kapazitätsplanung im vorliegenden Kontext, was u.a. Materialabrufplanung, Lagerkapazitätsplanung sowie Materialbereitstellungsstrategien und -systeme inkludiert, bereits zu einer komplexen Aufgabe gereicht. Um darüber hinaus ein Maß an Wandlungsfähigkeit zu schaffen, bedarf es weiterer technischer Merkmale der produktionslogistischen Hardwarekomponenten. Westkämper [Wes00] bezeichnet ein System als wandlungsfähig, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess-, Struktur- und Verhaltensvariabilität verfügt. In Bezug auf die Merkmale fördertechnischer Einrichtungen und Komponenten kann anhand obiger Definitionen keine ausschließend scharftrennende Abgrenzung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bestehen. Vielmehr inkludiert Wandlungsfähigkeit die Flexibilitätsausprägungen eines Systems⁵⁶, siehe Abbildung 3.1.

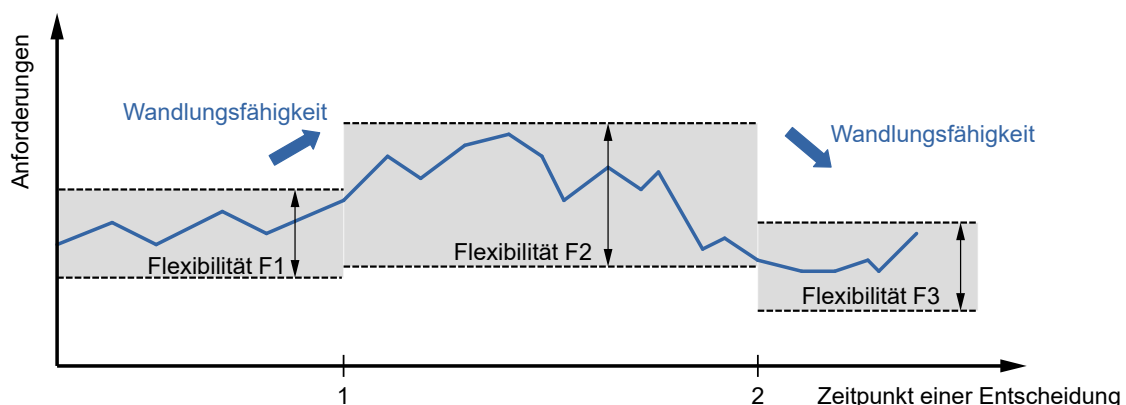


Abbildung 3.1: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gem. Zäh et al. [Zäh05].
Quelle: Eigene Darstellung.

55 Vgl. Hernández Morales 2002 [Her02].

56 Vgl. Zäh et al. 2005 [Zäh05], Nyhuis et al. 2008 [Nyh08] und Wiendahl et al. 2009 [Wie09].

So beschrieb Reinhart bereits 1997 [Rei97] Wandlungsfähigkeit als „neue Dimension der Flexibilität“ und sieht sie im Weiteren als „Kombination von Flexibilität und Reaktionsfähigkeit“ an.⁵⁷ Dabei wird Reaktionsfähigkeit als Potenzial angesehen, „um jenseits vorgedachter Dimensionen und Korridore agieren zu können“. Im Zuge eines breiten wissenschaftlichen Diskurses wurden die Begrifflichkeiten konkretisiert und erweitert sowie Leitbilder der Wandlungsfähigkeit definiert. Reinhart ergänzte 2008 seine vormals getroffenen Definition um monetäre Gesichtspunkte. Demnach sollte der nutzbare Korridor der Wandlungsfähigkeit mit einem möglichst geringem investivem Aufwand zu erzielen sein.⁵⁸

In der einschlägigen Literatur werden Mobilität und Skalierbarkeit zu den Befähigern der Wandlungsfähigkeit gezählt⁵⁹, wenngleich die technische Umsetzung der Flexibilitätsanforderungen hinsichtlich der intralogistischen Komponenten einer automobilen Endmontage bereits deren Mobilität impliziert. Bezieht man das Erfordernis der Mobilität allein auf die Frage der Skalierbarkeit der Werkstückträgerfördertechnik, kann diese als Form der Flexibilität angesehen werden. Erweitert man jedoch den Betrachtungsbereich, indem die Mobilität der Fördertechnik auch ein Befähiger der reversiblen Änderung und Umstrukturierung eines gesamten Fertigungslayouts darstellt, ist die Mobilität eindeutig als Wandlungsbefähiger anzusehen, indem sie die Möglichkeit der uneingeschränkten und schnellen Reversibilität der Layoutgestaltung eröffnet. Die bedarfsorientierte Umstrukturierung sowie der anschließende Rückbau eines Systems sind Merkmale der Wandlungsfähigkeit, die bspw. aufgrund einer kurzfristig signifikanten Stückzahlschwankung gefordert sein können. Weitere, im hier vorliegenden Kontext relevante, Wandlungsbefähiger sind Universalität, Modularität und Kompatibilität der Betriebsmittel.⁶⁰ Die Universalität ist hierbei auf die produktvariantenübergreifende Verwendbarkeit eines Betriebsmittels gerichtet. Ein modularer Aufbau zeichnet sich dabei durch fraktale Funktionseinheiten aus, die austauschbar sind und das System in seinen Grundzügen dadurch erweiterbar konstruiert ist. Die Kompatibilität betrifft letztlich die Steuerungsebene der Betriebsmittel, die mit entsprechend Schnittstellen versehen sein müssen, um in einem Gesamtsystem koordiniert zu werden respektive mit einander zu interagieren. Die insbesondere im Bereich der Fahrerlosen Transportfahrzeuge anzutreffenden proprietären Systeme stehen diesen Wandlungsfähigkeitsanforderungen entgegen. Hinsichtlich der diesbezüglichen Weiterentwicklung des Stands der Technik ist u.a. die VDA 5050 zu nennen.⁶¹ Für die vorliegende Arbeit bleibt jedoch die Betrachtung der Kompatibilität außen vor, da vorliegend ausschließlich die hardwaretechnische Umsetzbarkeit der Anforderungen an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gegenständlich ist.

3.2 Leitbilder einer flexiblen und wandlungsfähigen Fördertechnik des Werkstück- und Materialflusses für die Automobilendmontage

Resultierend aus dem vorangegangenen Kapitel 3.1 sowie des Stands der Technik in der automobilen Endmontage, siehe Kapitel 2, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

57 Siehe Reinhart 2000 [Rei00].

58 Vgl. Reinhart et al. 2008 [Rei08].

59 Vgl. u.a Westkämper et al. 2000 [Wes00], Hernández Morales 2002 [Her02] und Wiendahl et al. 2009 [Wie09].

60 Vgl. u.a. Nyhuis et al. 2008 [Nyh08] und Wiendahl et al. 2009 [Wie09].

61 In der VDA 5050 wird eine Schnittstelle zur Kommunikation und des Austauschs von Auftrags- und Statusdaten zwischen einer zentralen Leitsteuerung und Fahrerlosen Transportfahrzeugen in intralogistischen Prozessen definiert [VDA5050].

Der Etablierung eines höheren Grades an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung der Automobilproduktion steht primär das zugrundeliegende Fließbandprinzip mit festen Taktzeiten in Verbindung bzw. bedingt durch die starre Fördertechnik entgegen. Die in den Endmontagelinien der Automobilproduktion anzutreffenden starren Fördertechniken, wie z.B. Elektrohängebahnen oder Schubplattformen die als Werkstückträger fungieren, stehen dem Wunsch nach Mobilität und Universalität entgegen. Es bedarf Werkstückträger, die es erlauben, nicht nur ein oder eine begrenzte Auswahl an Modellvarianten eines Produktportfolios darauf zu fertigen, sondern über das gesamte Spektrum verwendbar sind. Es bedarf daher einer layoutflexiblen – mobilen – Werkstückfördertechnik, welche eine Anpassungsfähigkeit des Werkstückträgers an die geometrische Varianz sämtlicher PKW-Modelle eines OEM bietet. Insofern ist die modellübergreifende Verwendbarkeit und Anpassung ohne Umrüstzeiten zu bewerkstelligen. Bei Anwendung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen als Werkstückträger ist zudem aufgrund deren Mobilität die Skalierbarkeit hinsichtlich der im Umlauf befindlichen Anzahl der Werkstückträger erfüllt. Hinsichtlich der Komponenten des Materialflusses, insbesondere der Bereitstellung, sollen konstruktiv neben der Mobilität, Universalität und Skalierbarkeit auch die Modularität Berücksichtigung finden, um mit einer möglichst geringen Betriebsmittelvarianz das Spektrum der intralogistischen Aufgaben in Transport und Kommissionierung zu bewerkstelligen.

Eine Produktion ohne Band und Takt, welche den Leitbildern einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion folgt, erfordert somit die Entwicklung disruptiver förder- lager- und handhabungstechnischer Maschinen, da sich die Anforderungen nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit aus dem Stand der Technik heraus nicht erfüllen lassen.

4 Anforderungen an die intralogistischen Prozesse hinsichtlich Flexibilität und Wandlungsfähigkeit im Kontext der automobilen Endmontage

Die in den Endmontagelinien der Automobilproduktion anzutreffenden Stetigförderer mit starrer Schienen- oder Spurbindung, wie z.B. Elektrohängebahnen oder Schubplattformen, stehen dem Wunsch nach flexiblen und wandlungsfähigen Montage- und Produktionslogistiksystemen entgegen, vgl. hierzu die Kapitel 2 und 3.

Klassischer Fließbandfördertechnik wie beispielsweise Elektrohängebahnen oder Schubplattformbänder mangelt es infolge der Bindung an statisch installierten Trag- und Führungseinrichtungen an Mobilität und Layoutflexibilität. Somit besteht durch die Bindung an ein Schienensystem auch stets eine Kopplung der einzelnen Gehänge oder Plattformen, was letztlich Abhängigkeiten und Restriktionen hinsichtlich der Fördergeschwindigkeit der einzelnen Elemente zur Folge hat. Insofern ist die Taktung eine Folge der Fördergeschwindigkeit und des Abstandes zwischen den einzelnen Werkstückträgern.

Aufgrund vielfältiger Ausstattungsoptionen von PKW im Premiumsegment ergibt sich in Bezug auf die Serienausstattung eine große Spreizung von Arbeitsumfängen, vgl. Kapitel 2.2, bereits innerhalb einer PKW-Baureihe, aufgrund der kundenindividuellen Konfiguration.

Existieren von einer Baureihe zudem Derivate⁶², die ebenfalls in der gleichen Linie produziert werden, kann die Spanne zwischen minimal und maximal benötigter Bearbeitungszeit noch stärkere Diskrepanzen aufweisen. Dies 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. Bereits die mechanische Kopplung der einzelnen Gehänge und Plattformen lässt in technischer Hinsicht keine individuelle Fördergeschwindigkeit – und damit Taktzeit – zu. In Konsequenz dessen wird über den sogenannten Modellmix⁶³ ein zur Einhaltung der Taktung erforderlicher Mittelwert der Montagezeitbedarfe gewährleistet. Darüber hinaus ist durch die initiale Layout- und Kapazitätsplanung eine nachträgliche Veränderung der Anzahl der Werkstückträger – und somit Skalierbarkeit der Anlage – technisch nicht möglich, respektive nicht praktikabel.⁶⁴ Um dem Zielbild einer wandlungsfähigen Produktion zu genügen, ist jedoch die Skalierbarkeit geboten, siehe Kapitel 3.

Die starre mechanische Kopplung der einzelnen Werkstückträger bei klassischer Fließbandfördertechnik bringt jedoch nicht nur eine zwangsweise einheitliche Fördergeschwindigkeit mit sich, sondern ist auch vielfach ursächlich für vermeidbar hohen Nachbearbeitungsaufwand, indem einzelne Werkstückträger respektive Werkstücke nicht ad hoc aus dem Fließprozess herausnehmbar sind. Können dementsprechend 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 sogenannter Nacharbeit behoben werden können. Liegt das Fehlerereignis – ausgehend von der Station, an der der PKW das Band verlässt – weit zurück, ist die Nachbearbeitung mit immensem Aufwand und Rückbaumaßnahmen verbunden, was sich zwangsläufig in hohen Kosten zur Fehlerbehebung niederschlägt.⁶⁵ Fehlerereignisse können dabei höchst unterschiedliche Ausprägungen und Ursachen aufweisen und von Montagefehlern bis hin zu schadhafte und mangelhafte Bauteilen oder gar fehlenden Teilen aufgrund Lieferengpässen eines Zulieferers oder Zwischenfällen in der Materialflussskette des OEM selbst reichen. Je nach Aufbau der Fertigungslinie, deren Layoutbeschaffenheit, sowie den eingesetzten Fördertechniken und deren Schnittstellen, besteht ggf. an wenigen gesonderten Stellen im Fertigungsablauf die Möglichkeit, einen teilmontierten PKW auszuschleusen. Dies ist z.B. insbesondere an Umsetzerstellen, wo ein Wechsel zwischen verschiedenen Fördertechniken, wie z.B. von Schubplattform auf Elektrohängebahn stattfindet, gegeben. Bei einem durchgängigen Fließband hingegen, wo nicht ohnehin technisch bedingt derartige Übergangsschnittstellen bestehen, müssten Ausschleusestellen samt Kurzzeit-Lagerkapazität extra vorgesehen werden. Oftmals ist dies strukturell bedingt jedoch nicht möglich respektive nur an vereinzelt Stellen im Layout umsetzbar, so dass in Konsequenz dessen Werkstücke, an denen Fehler auftreten, noch weite Teile der Bearbeitungskette durchlaufen, ehe eine Ausschleusestelle erreicht wird, oder sogar fehlerhafte Fahrzeuge den kompletten Produktionsprozess durchlaufen, ehe erst im

62 Ein Derivat stellt im automobilen Kontext ein von einem Fahrzeugmodell abgeleitete Modellvariante mit spezifischen technischen- und optischen Merkmalen sowie Ausstattungsoptionen dar, wenngleich die Derivate auch eine große Anzahl von Gleichbauteilen aufweisen können. Typische Derivate sind z.B. die Kombivariante einer Limousine oder ein Cabrio eines Coupés.

63 Der Modellmix beschreibt die koordinierte Zusammenstellung der Produktionsabfolge verschiedener Fahrzeugmodelle, oder -baureihen, mit unterschiedlich kundenindividuell ausgeprägten Ausstattungsmerkmalen. Für die Erstellung des Modellmix liegt die Einhaltung der Taktzeit zugrunde, so dass der Modellmix ein Produktionsprogramm verkörpert, das Mehr- und Minderaufwände in der Fertigung der unterschiedlich ausgeprägten Fahrzeuge nivelliert.

64 Vgl. Wehking et al. 2020 [WPH20].

65 Vgl. Kimberly Clark 2014 [Kim14].

Nachgang durch speziell geschultes Personal die Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden können.

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 Instandsetzung deutlich zu senken. Insofern ist hinsichtlich der Reduktion von Nacharbeitsaufwand, die Behebung von Fehlern unmittelbar im Fertigungsstadium des Fehlereintritts als vordringliche Maßnahme zu nennen. Dies stellt jedoch eine völlig konträre Situation zur Fließfertigung dar, bei der das Montageobjekt in unverrückbarer Reihenfolge Stationen durchläuft, wo das Material bereits für das festgelegte Produktionsprogramm vorsequenziert bereitgestellt ist. Diese durch die Fördertechnik vorgegebene starre Verkettung der Montageträger bedingt letztlich die Taktung und Sequenzierung des Werkstückdurchlaufs am Eintritt in die Endmontage. Durch die Verlagerung der Werkstückträger auf Fahrerlose Transportfahrzeuge kann diese starre Verkettung aufgebrochen werden, indem jeder Werkstückträger eine für sich autarke Einheit bildet, deren Fortbewegungsrichtung und -geschwindigkeit keinen Restriktionen unterliegen, welche sich durch mechanische Zwangsbedingungen, wie z.B. Schienenführung oder Kopplung mit anderen Werkstückträgern, ergeben. Dieser Idee folgend, wurde am IFT eine mobile Montageinsel in Gestalt eines Montage- und Logistik-FTF konzipiert, welches sämtliche Funktionen vereint, die zur Endmontage eines PKW erforderlich sind und derzeit noch von verschiedenen intralogistischen Komponenten geleistet werden. Hinsichtlich der Funktionalitäten der Montageinsel sind vorrangig das Aufnehmen, Fixieren und Transportieren, sowie die Handhabung und Positionierung von Werkstücken in verschiedenen Raumrichtungen zu nennen.

Insofern steht hinsichtlich des Werkstückträgers die Vereinigung von Funktionalitäten auf eben diese Mobile Montageinsel nicht im Widerspruch zum vormals genannten Wandlungsbefähiger Modularisierung, indem eine Reduktion der eingesetzten Förder- und Handhabungstechnik erzielt wird und die Werkstückträger autark von einander sind. Ferner soll die Wandlungsfähigkeit des Betriebsmittels „Mobile Montageinsel“ auch in dessen universeller Verwendbarkeit begründet sein, was in concreto die rüstzeitfreie Anpassung der Fahrzeugaufnahme an unterschiedlichste Radstand- und Spurweiten der im Portfolio befindlichen Kraftfahrzeuge bedingt. Die Mobile Montageinsel besteht primär aus einem omnidirektional frei navigierendem FTF mit integrierter Handhabungstechnik und der umlaufenden Arbeitsplattform. Indem sich das Montagepersonal zum Vollziehen der Arbeitsumfänge auf der fahrzeuggebundenen Plattform befindet und das Montageobjekt stets in ergonomisch sinnvoller Position angereicht werden kann, fungiert das Montage- und Logistik-FTF nicht nur als Werkstückträger sondern als mobile Montageinsel, da die komplette PKW-Endmontage auf diesem FTF ohne Zuhilfenahme externer Hebe- oder Handhabungseinrichtungen durchgeführt werden kann.⁶⁶

Die 3.500 x 6.000 mm große Mobile Montageinsel ersetzt die einschlägigen Werkstückträger und Fördertechniken in Form von bisher verwendeten Elektrohängebahnen oder Schubplattformen etc. 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, siehe Abbildungen 4.1 und 4.2, ermöglicht wird. Abbildung 4.1 zeigt

⁶⁶ Vgl. Hofmann 2016 [Hof16] und Hofmann 2018 [Hof18].

ein produktspezifisch differenziertes Fertigungslayout auf Basis einer Schachbrettstruktur.⁶⁷ Zu sehen ist die Unterscheidung in verschiedene Pfade (hier Nr.1 bis Nr.4) sowie einer Haupt- oder Gleichbauroute. Auf der Hauptroute sind all jene Montagestationen angesiedelt, die jedes der in dieser Produktion zu fertigende PKW-Modell, unabhängig von dessen Ausstattung, durchlaufen muss. Eine differenzierte Layoutplanung und Pfadwahl ergibt sich aufgrund variierender technischer Merkmale und Ausstattungsoptionen. Der in Abbildung 4.1 eingezeichnete Pfad 1 umfasst demzufolge andere Montageschritte als Pfad 2. So könnte z. B. hier ein Fahrzeug der Baureihe X mit Verbrennungsmotor montiert werden, während ein Fahrzeug der Baureihe Y mit Hybridantrieb parallel im Schachbrettlayout gefertigt werden kann und den Pfad 2 durch die Endmontage nimmt.⁶⁸

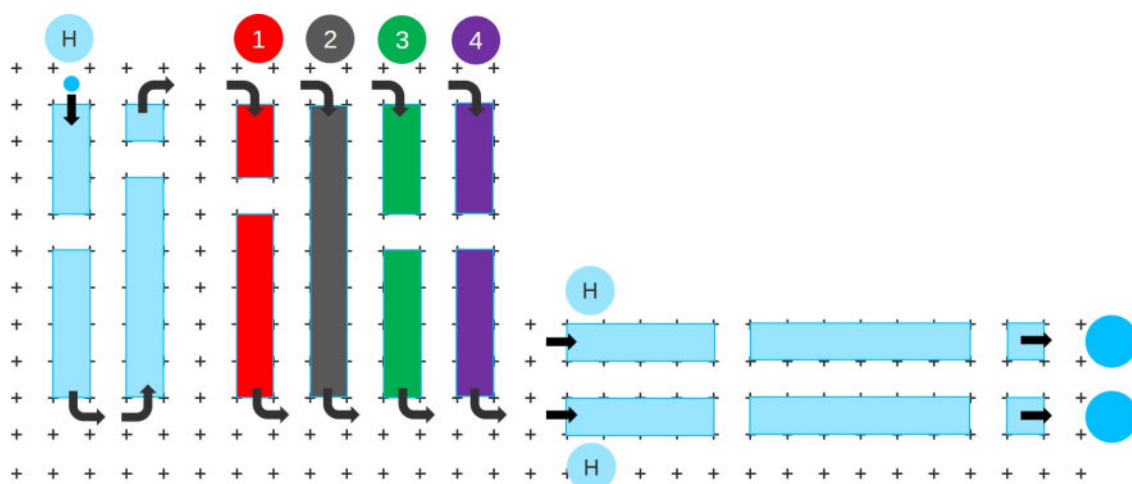


Abbildung 4.1: Intelligente Pfadwahl innerhalb des Produktionslayouts.

Pos.H: Haupt-/Gleichbauroute

Pos.1: Pfad Nr.1

Pos.2: Pfad Nr.2

Pos.3: Pfad Nr.3

Pos.4: Pfad Nr.4

Quelle: Eigene Darstellung.

Das obig in Abbildung 4.1 schematisch gezeigte Produktionslayout basiert auf einem einheitlichen Flächenraster, innerhalb dessen sich die modular aufgebauten Bearbeitungsstationen aufgrund ihres Einheitsmaßes beliebig anordnen lassen. Ein Arbeitsmodul entspricht in der Grafik einem Flächenraster-Einheitselement. Insofern bedingt die Forderung nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der intralogistischen Prozesse und Komponenten auch die Modularisierung der Bearbeitungsstationen samt der Planung eines Layouts, innerhalb dessen sich die Bearbeitungsmodule unter Beibehaltung der Fahr-, Lauf- und Funktionskorridore beliebig frei kombiniert anordnen lassen. Die Einführung eines einheitlichen Flächenrasters und damit verbundenen Bezugssystems erleichtert einerseits die Austausch- und Skalierbarkeit einzelner Module, die Umgestaltung des Fertigungslayouts, aber auch die damit verbundenen Planungsprozesse, unabhängig von der Örtlichkeit. Dies ist insofern von Belang, als dass sich durch das Zusammenfügen von Modulen mit invarianten Abmessungen das Einfügen neuer Fertigungslayouts in Bestandsgebäude erleichtert wird.

⁶⁷ Vgl. hierzu auch Foith-Förster und Bauernhansl 2015 [FB15].

⁶⁸ Vgl. Hofmann et al. 2020 [HoK20] sowie Wehking et al. 2020 [WPH20].

erfährt und sodann über die zwischen Station II und III befindliche Ausfahrt das Workflowsegment verlässt. So könnte in dem hier vorliegenden Beispiel die Station III zur Montage einer Anhängervorrichtung vorgesehen sein, die nur von denjenigen PKW, deren Konfiguration diesen Ausstattungsumfang enthält, durchlaufen wird. Alle anderen, wie der in Abbildung 4.2 auf der grün dargestellten Mobilen Montageinsel befindliche PKW, passieren diese Station über den parallel zu den Arbeitsstationen verlaufenden Fahr- und Laufweg.

Hinsichtlich der Materialbedarfsplanung und des Abrufs bilden die Workflowsegmente insofern bezüglich des Materialflusses eine Organisationseinheit. Die kausale Bindung von Arbeitsumfängen an ortsfeste Stationen entfällt somit erst in Kombination mit layoutflexibler Werkstückfördertechnik in Gestalt der Montageträger und darauf ausgerichteten Logistikkonzepten und Materialbereitstellungssystemen.

Basierend auf ersten Ideen und Anforderungen sind am IFT zunächst 10 völlig neue Logistikkonzepte⁷⁰ entstanden, die eine flexible und wandlungsfähige Automobilproduktionslogistik für die Stückzahl 1 grundsätzlich und theoretisch ermöglichen würden, vgl. Popp 2018 [Pop18]. Diese ganz unterschiedlichen Konzepte sind im Weiteren verfeinert und bewertet worden, hinsichtlich der technischen Umsetzung der Forderung nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, im Lichte der in Kapitel 3.2 formulierten Leitbilder.

Für die Umsetzung des Logistikkonzepts wurde eine Montage- und Logistikplattform als Groß-FTF 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 mit rundum begehbaren Plattform basiert, wird per se eine Entkopplung der einzelnen Montageträger bewerkstelligt. Der Materialbereitstellung liegt das allgemeine Prinzip der aktiven Zuführung zum Werkstück – sprich zu der Mobilen Montageinsel – zugrunde. Insofern durchläuft nicht das Montageobjekt ein Produktionslayout, in dem an definierten Stationen das benötigte Material mit entsprechendem Vorlauf sequenztreu bereitgehalten wird. Vielmehr basiert das am IFT entworfene Logistikkonzept auf mobilen Komponenten, so dass die Zuführung objektspezifisch, zeit- und ortsunabhängig zu erfolgen hat, siehe Abbildung 4.1. Neben der Mobilität sind weitere Eigenschaften, die Wandlungsfähigkeit der Materialbereitstellungssysteme betreffend, deren modulare und universell verwendbare Konstruktion, aus der letztlich auch eine einfache Skalierbarkeit der Systeme resultiert.

⁷⁰ Die Konzeption der Mobilen Montageinsel sowie das zugrundeliegende logistische Gesamtkonzept wurde innerhalb des Projekts „FlexProLog – Neuausrichtung der Produktionslogistik für eine bezahlbare Elektromobilität“ durch Förderung des Ministeriums für Wirtschaft und Finanzen des Landes Baden-Württemberg erarbeitet, vgl. Hofmann 2016 [Hof16] und Hofmann [Hof18].

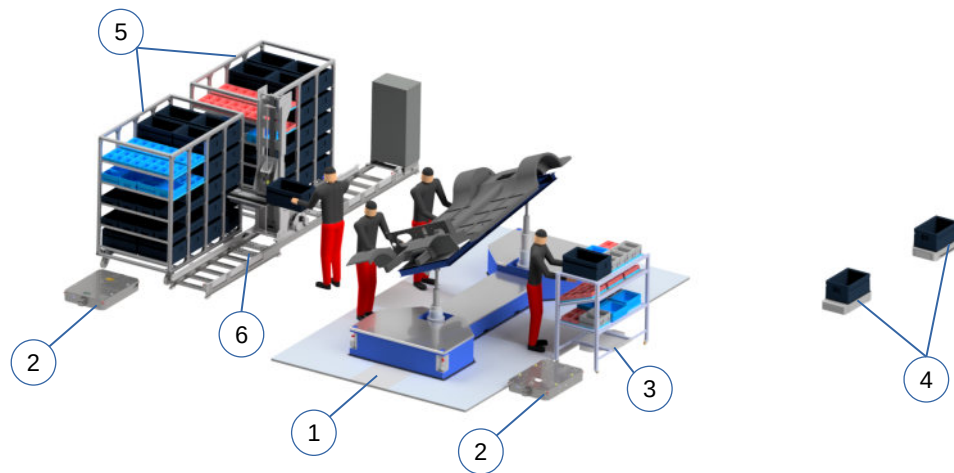


Abbildung 4.3: Materialzuführung zu einer mobilen Montageinsel.

Pos.1: Mobile Montageinsel

Pos.2: Zuliefer-/Schlepper-FTF

Pos.3: Warenkorbgestell

Pos.4: Einzeltransport-FTF

Pos.5: Mobile Regalmodule

Pos.6: Mini-Regalbediengerät

Quelle: Eigene Darstellung.

4.1 Montageträger

Die Abkehr von der Fließbandfertigung birgt nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Automobilproduktion, zumal eine Produktion ohne Band und Takt die Entwicklung disruptiver förder- lager- und handhabungstechnischer Maschinen erfordert. 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. 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 und der verwendeten Hardware unvereinbar ist.⁷¹

Gegenwärtige Endmontagelinien sind in Abschnitte mit Stationen untergliedert, vgl. Kapitel 2.1, wobei den Stationen spezifische Montagetätigkeiten 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, vgl. Abbildung 4.3, lässt die schienengebundene starre Fördertechnik nicht zu. In der Folge durchläuft das Montageobjekt ggf. diverse Bearbeitungsstationen, an denen keine Wertschöpfung vollzogen wird. Insofern wird auf Seiten der Montagetechnik zur Bewerkstelligung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der automobilen Endmontage layoutflexible Fördertechnik benötigt, um eine Produktion zu realisieren, bei der nicht die Fördertechnik, sondern die fertigungstechnischen Erfordernisse, welche sich aus den Merkmalen des herzustellenden Produktes ergeben, den Weg innerhalb des Montagelayouts vorgeben. Konkret bedeutet das in der Praxis, dass künftig lediglich diejenigen Stationen angefahren bzw. durchlaufen werden sollen, die zur Montage des jeweiligen PKW-Modells tatsächlich erforderlich sind und wertschöpfende Prozesse erfolgen, siehe Abbildung 4.2.

Um die Anforderungen nach Layoutflexibilität und individueller Fördergeschwindigkeit der Werkstückträger zu erfüllen, sieht das am IFT entwickelte Logistikkonzept die Anwendung von FTF als Werkstückträger vor, siehe Abbildungen 4.4 und 4.5 und siehe auch Abbildung 4.3.

71 Vgl. Hofmann 2016 [Hof16], Hofmann 2018 [Hof18], Hofmann 2019 [Hof19], Hofmann et al. 2020 [HoK20] sowie Wehking et al. 2020 [WPH20] und Hofmann 2021 [Hof21].



Abbildung 4.4: Im Aufbau befindlicher PKW auf der Mobilen Montageinsel.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Verlagerung der Endmontage von klassischer Fördertechnik auf darauf ausgelegte Montage-FTF birgt per se eine Aufhebung der starren Taktung und sequenziell unverrückbaren Abfolge des Durchlaufens der einzelnen Stationen. Das Potential, das mit dem Einsatz eines derartigen Montage-FTF in Gestalt der Mobilen Montageinsel verbunden ist, wird jedoch gravierend erweitert, wenn die Möglichkeit des Aus- und Wiedereinschleusens eines teilmontierten PKW, aus, respektive wieder in den Fertigungsprozess, miteinbezogen wird. Insofern ermöglicht die Montageinsel eine komplette Endmontage von Kraftfahrzeugen, indem sie bis zur Fertigstellung des Fahrzeugs, siehe Abbildung 4.5, den Werkstückträger darstellt. Andererseits besteht aber auch die Möglichkeit, teilmontierte Fahrzeuge, an denen die Räder bereits angebracht sind (sog. Rolling Chassis⁷²) ohne externe Ladehilfsmittel von der Montageinsel zu entladen, sollte der Endmontageprozess unterbrochen werden müssen.



Abbildung 4.5: Fertig montierter PKW auf der Mobilen Montageinsel.
Quelle: Eigene Darstellung mit Inhalten der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

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 Produktionslayout zu unterbrechen, ohne dass der Fertigungsprozess der anderen in der Montage befindlichen Werkstücke davon beeinträchtigt würde.

⁷² Als Rolling Chassis werden das Fahrgestell respektive Chassis oder Bodengruppe eines Fahrzeugs bezeichnet, wenn daran bereits Räder montiert sind, so dass eine Fahrbarkeit gegeben ist.

4.2 Materialbereitstellung

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. Wehking und Popp 2015 [WP15]. Größere Flexibilität hinsichtlich der Auftragsabfolge innerhalb des Produktionsprogramms, aber auch der Reihenfolge von Arbeitsschritten an einem Werkstück, sowie der räumlichen Anordnung von Montagestationen bedingt daher ebenso flexible Teilebereitstellungssysteme, die insbesondere Layoutflexibilität und geringere Vorlauf- und Reaktionszeiten aufweisen müssen. Insofern sind die logistischen Prinzipien hinsichtlich der Produktionsprogramm- und Materialflussplanung und die zugehörige Hardware der Materialflusssysteme für die Zuführung vormontierter Baugruppen, Komponenten und Montagematerial in der Gesamtheit der Auflösung von strenger Taktung und Sequenzierung zu betrachten. Eine partikuläre Betrachtung würde aufgrund der Komplexität der produktionslogistischen Anforderungen fehl gehen, indem sich die durch die Verlagerung von starrer Fördertechnik auf layoutflexible Werkstückträger ergebenden produktionstechnischen Möglichkeiten nur dann erschließen lassen, wenn die Materialbereitstellung darauf ausgerichtet ist. In Abkehr von den bis dato bekannten vorlaufgesteuerten Prinzipien, ist vielmehr eine ereignisbasierte Produktionsversorgung – Just-in-Real-Time⁷³ – zu etablieren.

Die Prozessstufen der Materialbereitstellungskette sind aber auch von besonderer Bedeutung, wenn es gilt, die Abläufe in der Produktionslogistik und Montage effizienter zu gestalten.⁷⁴ 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.⁷⁵ Vor dem Hintergrund der Produktion individualisierter, variantenreicher Serienprodukte bis hin zu Stückzahl eins, 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.⁷⁶ 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.⁷⁷

Die Automobilproduzenten des Premiumsegments nehmen diesbezüglich sicherlich gegenwärtig noch eine Ausnahmestellung ein. Der gesellschaftliche Stellenwert des

73 Just-in-Real-Time beschreibt eine ereignisgesteuerte bedarfsorientierte Materialversorgung der Produktion, die nicht alleinig auf im Vorlauf festgelegten Sollgrößen basiert, sondern in der Lage ist, dem sich kurzfristig ändernden Ist-Bedarf eines bereits in der Fertigung befindlichen Werkstücks gerecht zu werden vgl. Hofmann et al. 2020 [HoK20] und Wehking et al. 2020 [WPH20].

74 Vgl. Göpfert et al. 2017 S.12 [GSW17].

75 Vgl. Lotter 2012 [Lot12].

76 Vgl. Hofmann 2020 [Hof20A], [Hof20B] und [Hof20C] sowie Hofmann 2021 [Hof21].

77 Vgl. Hofmann 2020 [Hof20B], [Hof20C] und Hofmann 2021 [Hof21].

Automobils und das hohe Identifikationspotential für die Kunden führt hier zu einer verhältnismäßig 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, nicht nur produkt- sondern 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 Vergleich⁷⁸ 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“, siehe Abbildungen 4.3 und 4.6 zielt daher darauf ab, mittels einer automatisierten Bereitstellung nach dem Ware-zur-Person-Prinzip, insbesondere an Montagearbeitsplätzen, manuelle Umschlag- und Kommissioniervorgänge zu reduzieren und durch die Mobilität der kleinskaligen Komponenten ein hohes Maß an Strukturflexibilität zu schaffen. Das Prinzip der Materialbereitstellung des Mobilen Supermarktes ist darauf ausgerichtet, die Sequenz der Materialbereitstellung nicht dem Soll-Plan entsprechend mit Vorlauf, sondern ereignisabhängig, dem Echtzeitbedarf entsprechend, direkt am Verbauort herzustellen. Popp beschrieb hierzu in seiner 2018 veröffentlichten Dissertation [Pop18] ein Zielbild und die damit einhergehenden prozessualen Anforderungen, die auch Bestandteil einer Patentanmeldung⁷⁹ sind. In einem von Popp und dem Verfasser der vorliegenden Arbeit gemeinsam bearbeiteten und durch das Land Baden-Württemberg geförderten Projektes, oblag die konstruktive Umsetzung der Komponenten dem Verfasser. Insoweit beschränken sich die Ausführungen Pops in [Pop18] sowie der darin genannten Patentanmeldung auf die gestalterischen Grundzüge eines Materialbereitstellungskonzeptes, welches er „Riegelkonzept“ nennt. Der Patentanmeldung mangelt es insbesondere an der Beschreibung der technischen Ausführung, die es dem kundigen Fachmann ermöglichen soll, die Realisierbarkeit nachvollziehen und bei verständiger Würdigung der Sachlage auch umsetzen zu können. Die vorliegende Arbeit hat mit den Ausführungen in den Kapiteln 5.3 und 6 daher die konkrete technische Umsetzung zum Gegenstand und stellt im Weiteren auch im Hinblick auf die damit einhergehenden sicherheitstechnischen Aspekte ab.

78 Vgl. Lotter 2012 [Lot12].

79 In der Patentanmeldung mit Veröffentlichungsnummer DE102015013585A1 wird eine Lagereinrichtung auf Basis mobiler Komponenten zur Herstellung eines Fahrzeugs beschrieben. Eine technische Umsetzung ist nicht Bestandteil der Patentanmeldung.

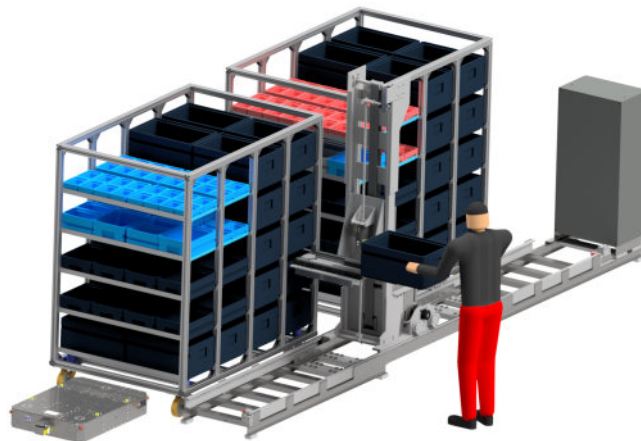


Abbildung 4.6: Ware-zur-Person-Prinzip des Mobilen Supermarktes.
Quelle: Eigene Darstellung.

5 Komponenten des IFT-Produktionslogistikkonzeptes

Am Institut für Fördertechnik und Logistik wurden beginnend ab dem Jahr 2014 im Rahmen einer Reihe durch das Land Baden-Württemberg geförderter Projekte neuartige Logistikkonzepte für die flexible und wandelbare Automobilproduktion der Zukunft entwickelt.⁸⁰ Es erfolgte dabei eine Gesamtbetrachtung der logistischen Vorgänge, so dass nicht nur Prinzipien der Materialbereitstellung und deren Abläufe gegenständlich waren, sondern vielmehr auch die hierfür erforderliche Hardware. Insofern mussten in konzeptioneller und konstruktiver Hinsicht disruptive Ansätze verfolgt werden, welche sich teilweise in Patentanmeldungen niederschlugen. Die in diesem Kapitel vorgestellten Hardwarekomponenten in Gestalt von Förder-, Lager- und Handhabungsmaschinen wurden zu großen Teilen bis hin zur Prototypenreife entwickelt und am IFT in Eigenleistung als Funktionsprototypen aufgebaut. Neben Komponenten der Teilebereitstellung und des Materialflusses, war insbesondere die konzeptionelle Entwicklung und Konstruktion eines innovativen Montage- und Logistik-Groß-FTF, das als Montageträger für die automobilen Endmontage dienen soll, Hauptbestandteil der ausschließlich durch die öffentliche Hand geförderten Forschungsprojekte.

5.1 Mobile Montageinsel

Um eine Auflösung der starren Taktung und Verkettung zu bewerkstelligen, soll gemäß dem hier zugrunde liegenden produktionslogistischen Konzept gem. Popp 2018 [Pop18] die bisher bekannten Fließbandfördertechniken durch FTF ersetzt werden, vgl. Kap. 4. Das Konzept des Montage- und Logistik-FTF stellt 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 mobiler Arbeitsplatz, an dem manuelle Wertschöpfungsprozesse auch während der Fortbewegung des FTF erfolgen können. Dies stellt ein primäres Unterscheidungsmerkmal und eine klare Abgrenzung zum Stand der Technik dar, wenn man die in Kapitel 2.3.3 aufgezeigten Beispiele heranzieht, indem sich die dort aufgezeigten Anwendungsbereiche auf Kleinserien- oder gar Manufakturfertigungen beziehen und zudem bei den Beispielen aus der Großserie, wie bei der Produktion des BMW i3, nur partiell FTF als Montageträger in der Endmontage eingesetzt werden. Es handelt sich daher bei den aus dem Stand der Technik bekannten FTF, die als Werkstückträger für die Kraftfahrzeugendmontage eingesetzt werden, meistens um monofunktionale Transportfahrzeuge, siehe. Abbildungen 5.1 und 5.2 und vgl. Kapitel 2.3.3.

⁸⁰ Vgl. Popp 2018 [Pop18].



Abbildung 5.1: Monofunktionales Transport-FTF mit Hubfunktion in der Produktion des Audi R8.
Quelle: BÄR Automation GmbH.

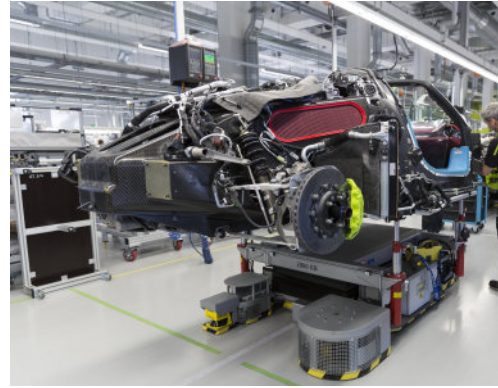


Abbildung 5.2: Monofunktionales Transport-FTF mit Hubfunktion in der Manufakturproduktion des Porsche 918 Spyder.
Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Eine bloße Adaption existierender Hardwarekonzepte bis dato praktizierter Fertigungsprinzipien, wie jene des Audi R8 oder des Porsche 918 Spyders wäre daher nicht zielführend und ginge fehl, 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. Dies belegt ein Blick auf die bereits erwähnten Fertigungsstätten. Hier ist die Situation dergestalt, dass in Ermangelung von Handhabungsfunktionen die FTF nicht über den gesamten Endmontageprozess hinweg als Werkstückträger verwendet werden können. In concreto betrifft dies eine Hub-Schwenkfunktion, um Arbeiten am Unterboden des Fahrzeuges in ergonomischer Körperhaltung zu ermöglichen. Durch Zuhilfenahme von statischen Einrichtungen bzw. Hilfsmitteln, wie sie in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt sind, wurde in den genannten Produktionen dieser Problematik begegnet.



Abbildung 5.3: Stationäre Schwenkeinheit in der Produktion des Audi R8.
Quelle: Audi AG.



Abbildung 5.4: Mobiler manuell geführter Werkstückmanipulator auf Basis eines Elektrohubgabelwagens für die Produktion des Porsche 918 Spyder.
Quelle: IMS Handhabungstechnik GmbH.

Nicht zuletzt deswegen stellt die Mobile Montageinsel eine disruptive Technologie dar, da sie Transportmittel, Montageträger, Handhabungstechnik und Arbeitsplattform verbindet.

In Konsequenz der Zielkonzeption einer flexiblen und wandlungsfähigen PKW-Produktion, siehe Kap. 3, bedingt die rationale Fertigung von Werkstücken mit in der Anzahl und Ausprägung abweichender Bearbeitungsumfänge eine intelligente Pfadwahl der Werkstückträger innerhalb des Layouts – und somit deren Mobilität –, so dass sich der Durchlauf des Werkstücks durch das Fertigungslayout nach der Konfiguration des einzelnen PKW und nicht nach einer starren Schienen- oder Spurführung der Fördertechnik richten kann. Um diesen Anforderungen zu genügen, verfügt das FTF über eine freie, nicht spurgebundene, Navigation auf Basis von Laserscannern und einer Indoornavigation mit Ultra-Wideband-Technologie⁸¹. Auf diese Weise verfügt das FTF über die Voraussetzungen, innerhalb eines veränderlichen Layouts beliebige Absolutkoordinaten anzufahren, ohne Zuhilfenahme von fest in der baulichen Struktur eingelassenen Fixpunkten wie Magnetmarken oder RFID-Tags⁸². Eine freie leitlinienlose Navigation ist insofern unabdingbar, um einerseits grundlegende Layout- und Fahrwegumplanungen vornehmen zu können, andererseits aber auch, um eine adaptive Routenplanung, die dynamische Umfahrung von Hindernissen sowie das Ausschleusen aus dem Fertigungsprozess an jeder beliebigen Stelle zu realisieren. Während hinsichtlich der Fehlervermeidung die Prozesssicherheit und Reaktionsgeschwindigkeit der intralogistischen Systeme einen wesentlichen Beitrag leisten können, bedingt die Verringerung des Nacharbeitensums primär die Realisierung des Ausschleusens des Montageobjekts zum Zeitpunkt und an der Örtlichkeit der Detektion eines Fehlerereignisses, um aufwendige Rückbaumaßnahmen zu vermeiden. Insofern erweist sich gerade diesbezüglich der Einsatz der Mobilien Montageinsel als autarke Einheit im Vergleich zur getakteten Fließbandmontage, die auf fest verketteter Stetigfördertechnik basiert, als qualitativer Vorteil.

Bei dem Montage- und Logistik-FTF handelt es sich letztlich auch deshalb um eine mobile Montageinsel, da sich die Mitarbeiter:innen auch während der Fahrt zur Verrichtung von Arbeitsprozessen auf der Stehplattform aufhalten können, so dass die Fahrzeit zwischen aufeinander folgenden Stationen aktiv für Montagetätigkeit – und damit Wertschöpfungsprozesse – genutzt werden kann. Insofern wird durch die großflächige Plattform der fördertechnische Prozess zwischen den Stationen wertschöpfend nutzbar. Gleichzeitig schafft diese Form eines mobilen Arbeitsplatzes aber auch die Möglichkeit, Montageprozesse ortsunabhängig durchzuführen, wenn Teile oder Baugruppen zu montieren sind, für deren Bereitstellung, Handling und Einbau nicht zwingend eine stationäre Einrichtung erforderlich ist und die betreffenden Bauteile durch Zuliefer-FTF zum Montage- und Logistik-FTF angeliefert werden können. Diesem Prinzip folgend, entfällt dadurch die kausale Bindung von Arbeitsumfängen an ortsfeste Stationen. Um das Potential eines derartigen Hardwarekonzeptes vollumfänglich auf Prozessebene erschließen zu können, bedarf es jedoch dezentraler Produktionssteuerungsstrukturen. 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 Mobile

81 Ultra Breitband (engl. UWB) Anwendungen dienen z.B. zur Nahbereichskommunikation und nutzen einen Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 10,6 GHz.

82 Radio Frequency Identification (RFID) ist eine funkbasierte Technik zur berührungslosen Identifikation, Erfassung und Ortung von Objekten. Ein sogenannter RFID-Tag stellt einen Datenträger dar, der aus einem Mikrochip und einer Antenne besteht.

Montageinsel respektive das Werkstück stellt dabei den Ausgangspunkt des Materialabrufs dar, worauf hin ein Cyber-physisches System⁸³ von diesem Abruf ausgehend die Zuführung von Baugruppen, Komponenten und Montagematerialien in Echtzeit über eines der infrage kommenden Bereitstellungssysteme steuert, vgl. Abbildung 4.3.

5.1.1 Technischer Aufbau der Mobilen Montageinsel

Die Mobile Montageinsel lässt sich in drei Funktions-Hauptbaugruppen, Chassis, Werkstück-/Fahrzeugträger und Stehplattform unterteilen, vgl. Abbildung 5.5. Die Konzeption und Konstruktion, sowie die Realisierung eines ersten Funktionsprototypen konnte durch Förderungen des Landes Baden-Württemberg geleistet werden.⁸⁴

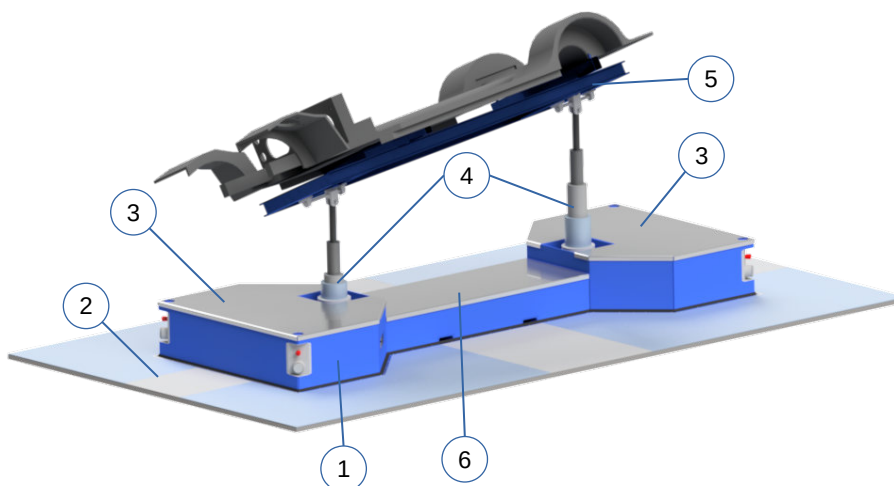


Abbildung 5.5: Hauptbaugruppen der Mobilen Montageinsel.

- Pos.1: Chassis (Hauptbaugruppe)
- Pos.2: Stehplattform (Hauptbaugruppe)
- Pos.3: Radkasten
- Pos.4: Hubzylinder
- Pos.5: Werkstückträger (Hauptbaugruppe)
- Pos.6: Taille

Quelle: Eigene Darstellung.

Das Chassis mit den Fahrtriebseinheiten und Aggregaten bildet den Rumpf, respektive die fahrbare Basis, des FTF und damit die Tragstruktur. Aufgrund des Leergewichtes der zu montierenden PKW von bis zu ca. 2500 kg, wurde bei der Konstruktion eine erforderliche

⁸³ Vgl. Wehking et al. 2018 [Weh18].

⁸⁴ Innerhalb des Projekts „FlexProLog – Neuausrichtung der Produktionslogistik für eine bezahlbare Elektromobilität“, gefördert vom Ministerium für Wirtschaft und Finanzen des Landes Baden-Württemberg, wurde die konzeptionelle Entwicklung der Mobilen Montageinsel gefördert. Projektlaufzeit 02/2014 bis 12/2015. Die Umsetzung des Konzepts in Form eines Prototypen mit eingeschränktem Funktionsumfang wurde durch Fördermittel des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg ermöglicht. Vgl. hierzu Hofmann 2016 [Hof16], Hofmann 2018 [Hof18] und Hofmann 2020 [Hof20A].

Nutzlast von 3000 kg zugrunde gelegt. Gleichwohl ist die gesamte Nutzlast der Montageinsel wesentlich höher, da in konstruktiver Hinsicht zwischen Chassis und Stehplattform zu differenzieren ist, indem keine mechanisch tragende Kopplung zwischen diesen Baugruppen besteht.

Der Aufbau des Chassis ähnelt in der äußeren Form der eines Knochens, siehe auch Abbildung 5.6. 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 Werkstück-/Ladungsträgers integriert ist. Aufgrund der durch die Abmessungen der zu montierenden PKW sich ergebenden Hauptabmessungen des FTF und dem daraus resultierenden Eigengewicht, galt es, im Sinne der Gewichts- und Bauraumersparnis alle Bestandteile des FTF auf deren Auswirkungen hinsichtlich dieser Aspekte zu untersuchen. Obgleich es sich um ein Groß-FTF handelt, ist der Bauraum endlich, zumal vom Chassis und dessen Aufbauten in Anspruch genommener Bauraum zu Lasten des Bewegungsraumes und der Ergonomie des Montagepersonals geht. Eine grundlegende Anforderung bestand folglich darin, so viel wie möglich Technikraum in die Radkästen zu legen. Dies vor dem Hintergrund betrachtet, dass die Taille sowohl in der Breite als auch in der Höhe entscheidenden Einfluss auf die Erreichbarkeit des Werkstücks – in concreto den Bereich zwischen den Achsen des PKW – für das Montagepersonal hat. Eine etwaige Maßnahme zur Kompensation wäre ggf. ein erweiterter Hubbereich, wenn Mitarbeiter:innen beispielsweise zum Erreichen von Montagestellen in der Mitte des Fahrzeugs auf die Taille steigen müssten, gleichzeitig aber sichergestellt werden muss, dass bei Überkopfmontage am Unterboden des PKW die Personen aufrecht stehen können. Mit zunehmender Hublänge steigen jedoch auch die auf die Zylinder einwirkenden Betriebskräfte, was sich letztlich in deren Dimensionierung niederschlägt. Davon direkt betroffen sind jedoch nicht nur die Zylinder selbst, da sich infolge des Drehens und Schwenkens des Ladungsträgers mit dem darauf befindlichen Montageobjekt auch die resultierenden Kräfte und Momente, die in das Chassis eingeleitet und abgefangen werden müssten, vergrößern. In Konsequenz würde dies eine steifere und massiver dimensionierte Konstruktion und dementsprechend auch ein höheres Gewicht zur Folge haben. Insofern ist die Kompensation eines höheren Aufbaus des Chassis über den Hubbereich nicht nur aufgrund der negativen Auswirkungen auf das Gewicht der Konstruktion nur bedingt geeignet, denn vielmehr sollte auch gewährleistet sein, dass das Dach des zu montierenden PKW in der Grundposition des Werkstückträgers bei Null-Hub noch ergonomisch erreichbar ist. Insofern hängt die Erreichbarkeit des Werkstückes grundsätzlich auch von der Grundposition des Werkstückträgers in Relation zum Bezugsniveau der Stehplattform ab. Eine dahingehende Ausgleichsmaßnahme könnte zwar in der Anhebung des Bezugsniveaus liegen, was jedoch zur Folge hätte, dass der Stufensprung vom Boden auf die Stehplattform entsprechend größer ausfallen würde mit einhergehend größerem Verletzungsrisiko beim Betreten und Verlassen der Montageinsel. Das an dieser Stelle resultierende Spannungsfeld hinsichtlich der Ergonomieanforderungen hatte zur Folge, durch konstruktive Maßnahmen die Bauhöhe der Taille niedrig zu halten, so dass einerseits eine Stehplattform mit geringem Höhendelta zum Bodenniveau realisiert werden konnte, andererseits aber auch das Höhendelta zwischen Stehplattform und Taille im Hinblick auf Ergonomie und Hubbereich minimal ausfällt. Diese gestalterischen Restriktionen schlagen daher auch zwangsläufig auf die Bauhöhe der Radkästen durch, indem sich der Werkstückträger in Längsrichtung partiell auch über diese hinweg erstreckt, so dass letztlich auch der für die Fahr- und Lenkantriebe verfügbare Bauraum, insbesondere bzgl. deren Durchmesser, davon tangiert ist. Da die Tragfähigkeit von Flurförderzeugrädern mit Polyurethanbandage mit deren Durchmesser korreliert, galt es daher, die auf die

Fahrertriebe wirkende Eigenlast des FTF niedrig zu halten, um eine Nutzlast von 2.500 kg zu erzielen. Aus diesem Grund wurde für die Steh- und Arbeitsplattform eine Ausführung gewählt, die vom Chassis des FTF hinsichtlich des Eigengewichts entkoppelt ist und somit ohne mechanisch tragende Verbindung zum Chassis auskommt. Das Chassis samt der darin untergebrachten Mechanik, Aggregate sowie Energie- und Fluidspeicher ist daher in einem Gesamtkontext zu sehen und stellt ein komplexes Gebilde dar, bei dem die isolierte Betrachtung eines Elements nicht zielführend ist, weil sich die einzelnen Komponenten und deren Auslegung gegenseitig beeinflussen. Es bedurfte daher von Beginn an des Konstruktionsprozesses einer Gesamtbetrachtung.

Die Antriebe sind als kombinierte Fahr- und Lenkeinheiten ausgeführt. Bei den hier gewählten Antriebseinheiten, siehe Abbildung 5.7, sind die Fahrertriebsmotoren als Radnabenmotoren ausgeführt und die Radaufhängung über einen Drehkranz mit Stellmotor an das Chassis angebunden. Der Schwenkbereich (Lenkeinschlag) ermöglicht omnidirektionales Fahren, insbesondere Drehen auf der Stelle. Aufgrund der Grundmaße der Montageinsel ist dies essentielle Voraussetzung, um flächensparend manövrieren zu können. Mit Blick auf die Fahrstabilität wurden die Antriebseinheiten maximal möglich außen im Chassis platziert, siehe Abbildung 5.6, um innerhalb der gegebenen Bauraumgrenzen eine größtmögliche Spurweite zu erzielen. Die Verwendung von Schwenkantrieben, bei denen der Radmotor, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, in die Felge integriert ist, begünstigt dies, indem deren Hüllkurve im Vergleich zu Bautypen mit außenliegendem Motor stark reduziert werden kann, was in der Folge den nicht nutzbaren Bauraum verringert. Die Größe der Antriebsräder, insbesondere deren Durchmesser, korreliert mit deren Tragfähigkeit, so dass die erforderliche Bauhöhe der Radkästen in direktem Zusammenhang mit der aus Nutzlast und Eigengewicht des FTF resultierenden Radlasten besteht. Somit galt es, im Sinne der Bauraumersparnis für die Antriebe, Maßnahmen zur Gewichtsersparnis in der Konstruktion des FTF zu untersuchen.



Abbildung 5.6: Positionierung der 4 Schwenkantriebe im Chassis der Mobilen Montageinsel – Ansicht von unten.
Quelle: Eigene Darstellung.

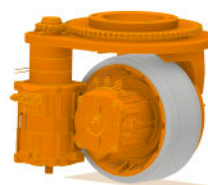


Abbildung 5.7: Verwendete Schwenkantriebe.
Quelle: CIMA1915 Srl.

Neben kompakter Bauweise ist eine weitere Primäranforderung, den Antrieb betreffend, die Spreizung des Fahrgeschwindigkeitsbereichs, für eine hohe Variabilität im Sinne der „individuellen Taktzeit“. Mit der Montageinsel im derzeitigen Prototypenstadium lassen sich Fahrgeschwindigkeiten zwischen 0,02 m/s und 1,5 m/s erzielen.

Die den Rumpf des Fahrzeugs umgebende Arbeits- und Stehplattform, vgl. Abbildung 5.5, ist mit Blick auf die Gesamt-Nutzlast der Montageinsel vom Rumpf mechanisch entkoppelt. Insofern ist bzgl. der Nutzlast der Mobilen Montageinsel zwischen dem Montageobjekt und der auf der Plattform befindlichen Personen, Bauteilen und Material zu unterscheiden. Während die infolge der Masse des Montageobjektes resultierenden Kräfte und Momente direkt in das Chassis eingeleitet und über die Radaufhängung – und somit über die

Antriebseinheiten – abgeleitet werden müssen, wurde im Zuge der mechanischen Konstruktion ein Konzept entwickelt, das eine Entkopplung der Plattform vom Chassis vorsieht. Der Vorteil der gewählten Ausführung liegt darin, dass die selbsttragende Plattform den Rumpf des FTF lediglich formschlüssig umgibt und somit nicht an diesem angebunden und gelagert ist, so dass sich die aus Eigengewicht und Nutzlast resultierende Normalkraft der Plattform nicht am Chassis abstützt. Auf diese Weise wird ein Teil der Gesamt-Nutzlast der Montageinsel vom Chassis entkoppelt, was sich hinsichtlich der Dimensionierung der tragenden Bauteile und Komponenten positiv bemerkbar macht. Insofern stellt die Plattform und deren statisches System in der gewählten Bauform weder einen Mehrfeldträger mit Auflagerpunkt am Chassis noch einen Kragarm des Chassis dar und kann dementsprechend auch weniger biegesteif ausgebildet werden. Die Plattform besteht aus vier per Schraubverbindung demontierbaren Segmenten, siehe Abbildungen 5.8 und 5.9. Die Segmente sind als kostengünstige Hohlprofilfachwerk-Schweißkonstruktion ausgeführt und mit rutschhemmenden Aluminium-Trittblechen belegt.



Abbildung 5.8: Hohlprofilfachwerkkonstruktion eines einzelnen Plattformsegmentes.
Quelle: Eigene Darstellung.

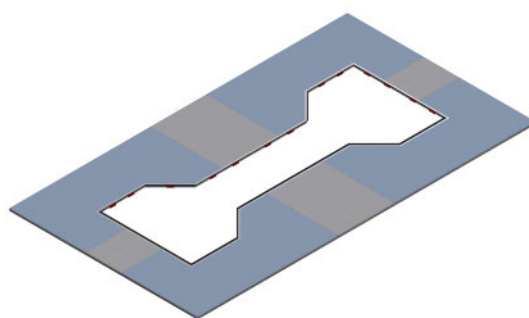


Abbildung 5.9: Stehplattform bestehend aus 4 verschraubbaren Einzelsegmenten.
Quelle: Eigene Darstellung.

Auf dem Boden gelagert ist die Plattform über Schwenkrollen mit Polyurethanbandage. Auch diesbezüglich kommt das bereits oben beschriebene Spannungsfeld aus Tragfähigkeit der Rollen und Bauhöhe der Plattform im Kontext von ergonomischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen zum Tragen. Einerseits bildet die Standebene der Stehplattform das Bezugsniveau für die Handhabungsfunktionen des Wersktückträgers, so dass bereits insofern die Bauhöhe niedrig gehalten werden muss, andererseits ist die Bodenfreiheit im Hinblick auf die Gefahr des Überfahrens und Quetschens der Zehen von Personen so gering zu halten, dass unter Verwendung von Sicherheitsarbeitsschuhen mit Zehenschutzkappe es nicht möglich ist, in den Spalt zwischen Boden und Unterkante der Plattform zu gelangen.

Über Polyurethan-Puffer, siehe Abbildung 5.10, besteht ein elastischer Kontakt zwischen Plattform und Chassis, so dass eine Verwindungsfähigkeit um die Längs- und Querachse im Hinblick auf das Befahren von Bodenunebenheiten zwischen Chassis und Plattform besteht. Dies ist insoweit erforderlich, als dass der Überhang der Plattform, gemessen von der Vorderkante bis zur Antriebsachse, ca. 1000 mm beträgt, siehe Abbildung 5.11. Indem die Stehplattform auf eigenen Rollen steht und keine mechanisch tragende Verbindung zum Chassis besteht, wird erreicht, dass die Radaufstandssituation der Antriebs- und Lenkräder nicht von der Stehplattform beeinflusst wird. undefinierte Fahrzustände hinsichtlich der

Fahrwerkskonfiguration des FTF-Chassis werden somit durch die Verwindungsfähigkeit von Chassis zu der umgebenden Plattform unterbunden. Insofern wird hierdurch die Gefahr des Abhebens eines Antriebs- und Lenkrades infolge Bodenunebenheiten wesentlich reduziert, da die Stehplattform keinen Einfluss auf die Radlasten des Chassis nimmt. Andererseits ist die Plattform nicht achsgeführt vom Rumpf des FTF, so dass die Anpassung an die Bodenkontur unabhängig von der Abstandssituation der Antriebs- und Lenkräder des Chassis erfolgt. Dies kommt insoweit besonders beim Befahren von Bodenunebenheiten zum Tragen. Überfährt – in Fahrtrichtung gesehen – die Plattform eine Kuppe, bzw. den Beginn einer Rampe, kann sich durch die Entkopplung von Rumpf und Plattform ungehindert eine vertikale Relativposition und Winkellage als Anpassung an die Bodenunebenheit einstellen.

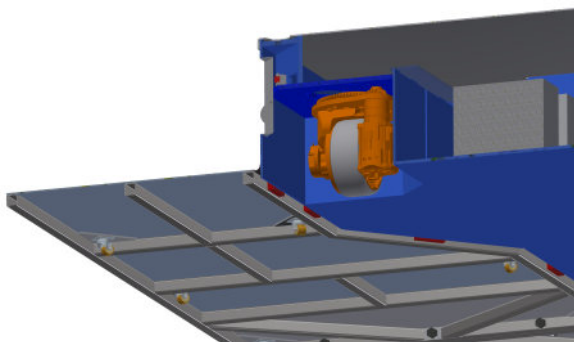


Abbildung 5.10: Elastischer, verwindungsfähiger Kontakt zwischen Plattform und Chassis mittels Polyurethan-Puffer (rot dargestellt). Schnitt durch Chassis und Plattform.
Quelle: Eigene Darstellung.

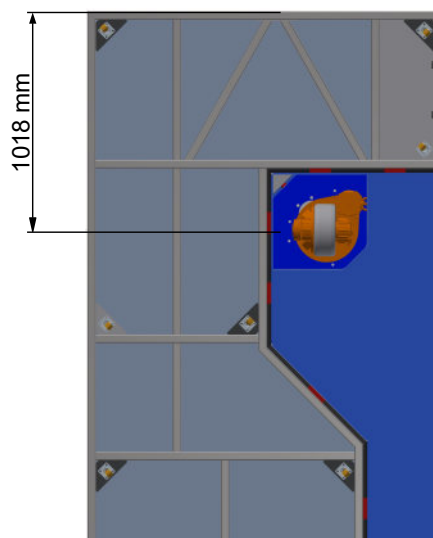


Abbildung 5.11: Überhang der Stehplattform bestehend zur Antriebsachse.
Quelle: Eigene Darstellung.

Über dem Rumpf befindet sich, angebunden an die Hubeinrichtung der vollvariable Werkstück-/Ladungsträger, der die Fahrzeugaufnahme darstellt. Das Hubkonzept ist dergestalt, dass über zwei Teleskop-Hydraulikzylinder der Ladungsträger in Relation zur Grundposition, 500 mm über der Steh-/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, vgl. Abbildung 5.12, während das Schwenken um die Längsachse am bestehenden Prototyp über zwei separate, in den Fahrzeugträger integrierte, Hydraulikzylinder erfolgt.



Abbildung 5.12: Neigen des Werkstückträgers um dessen Querachse.
Quelle: Eigene Darstellung.

Um auch Tätigkeiten am Unterboden des PKW in ergonomischer Arbeitshaltung durchführen zu können, ist der Fahrzeugträger um dessen Längsrichtung schwenkbar, siehe Abbildung 5.13. Bei der hier dargestellten Ausführungsform des Hubkonzeptes erfolgt das Schwenken über differenzielles Ein- Ausfahren der insgesamt vier Hubzylinder. Für den ersten Prototyp, wie er in Abbildung 5.12 zu sehen ist, wurde der Schwenkwinkel zunächst auf 25° begrenzt und die Schwenkvorrichtung in den Fahrzeugträger integriert, da das hier umgesetzte Hubkonzept auf lediglich zwei Hubzylindern basiert.

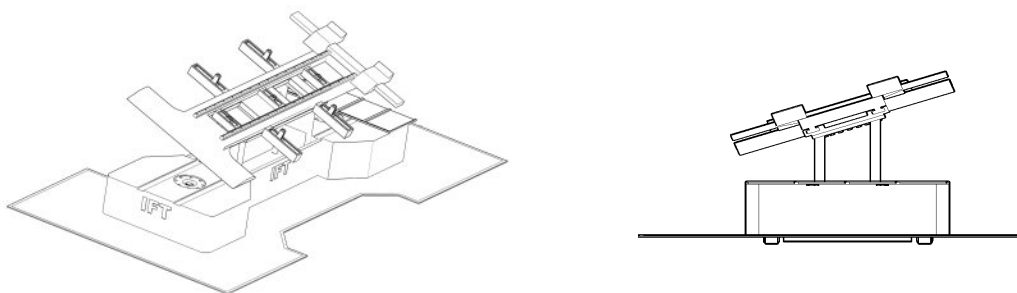


Abbildung 5.13: Neigen des Fahrzeugträgers um dessen Längsachse.
Quelle: Eigene Darstellung.

Hinsichtlich der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit im Sinne der Universalität der Montageinsel stellt die Fahrzeugaufnahme, die als Werkstückträger fungiert, die Primärkomponente dar, siehe Abbildung 5.14 und vgl. Kapitel 5.1.2. Die im Folgenden erläuterten technischen Einrichtungen und Funktionalitäten hinsichtlich des Fahrzeugträgers sind noch nicht Bestandteil des in Abbildung 5.12 ersichtlichen Prototypenstatus der Mobilen Montageinsel, gleichwohl aber Teil der Ansprüche des Patents EP 3 331 809 B1.

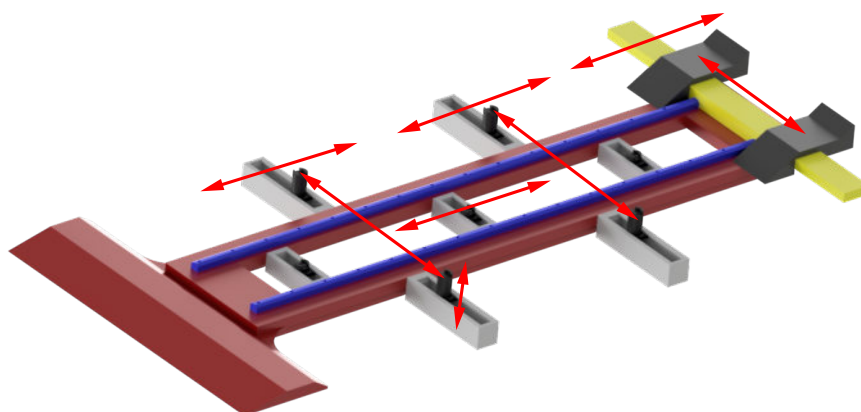


Abbildung 5.14: Aufbau des vollvariablen Fahrzeugträgers mit Linearverstellung der Aufnahme- und Abnahmepunkte.

Quelle: Eigene Darstellung.

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 respektive einem Produktionslayout 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 Montage- und Logistikeinheit erstmals auch die Möglichkeit eröffnen, die Fertigung von Derivaten diverser Baureihen mit alternativen Antriebskonzepten in Gestalt von Hybrid-, Elektro- oder Gasantrieb in einer Montagelinie zu bündeln, um auf diese Weise zwar baureihenübergreifend, aber das Antriebskonzept betreffend ähnliche PKW zusammen in einer Linie zu montieren. Dies könnte eine Art Zwischenschritt auf dem Weg zu einer vollflexiblen Produktion darstellen, indem die Varianz der Antriebskonzepte und damit das Spektrum der damit verbundenen Arbeitsprozesse zunächst noch entzerrt wird, wenn diese nicht in der gleichen Linie mit konventionell oder rein elektrisch angetriebenen Modellen produziert werden. Die Ausgestaltung der Flexibilisierung der PKW-Endmontage und die gewählten Schritte dorthin sind jedoch von den individuellen Gegebenheiten der einzelnen Automobilproduzenten abhängig.

Unabhängbare Voraussetzung für eine Flexibilisierung und Befähigung zur Wandlungsfähigkeit der Endmontage jedweder Art, bei der Fahrzeuge unterschiedlicher Abmessungen gefertigt werden sollen, ist ein vollautomatisch, ohne Rüstzeit, an verschiedenste Spur- und Radstandabmessungen anpassungsfähiger Werkstückträger/Fahrzeugträger. Dies zeigt ein Blick auf das Portfolio alternativ angetriebener Modelle der Audi AG. Die Bandbreite reicht hier vom Kleinwagen A3 über den SUV Q8 bis hin zur A8-Langversionlimousine des Luxusklassensegmentes, so dass die Spreizung der Abmessungen entsprechend groß ausfällt, vgl. Abbildungen 5.15 und 5.16. Während das Delta der Spurweiten lediglich ca. 100 mm beträgt, gilt es hinsichtlich des Radstandes ein Delta von ca. 500 mm technisch als Verstellbereich abzubilden.

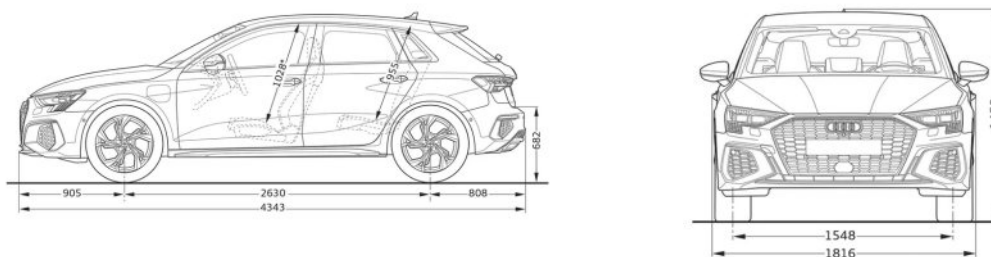


Abbildung 5.15: Hauptabmessungen des Kleinwagens A3 der Audi AG. Der Radstand beträgt 2630 mm, die Spurweite 1548 mm.

Quelle: Audi AG.

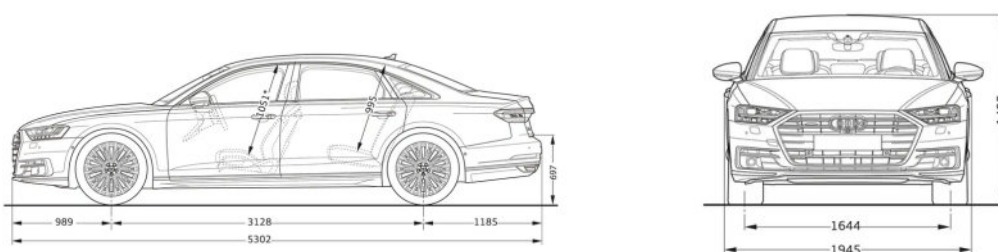


Abbildung 5.16: Hauptabmessungen der Luxusklasselimousine A8L der Audi AG. Der Radstand beträgt 3128 mm, die Spurweite 1644 mm.

Quelle: Audi AG.

5.1.2 Technischer Aufbau der Fahrzeugaufnahme mit integrierter Abladefunktion

Die Fahrzeugaufnahmeverrichtung in Form des bereits in Abbildung 5.14 dargestellten Fahrzeugträgers ist nicht nur hinsichtlich der Anforderung an die Universalität der Montageinsel – sprich bezüglich deren Verwendbarkeit als Werkstückträger für verschiedene Fahrzeugabmessungen – relevant, sondern auch im Kontext der Layoutflexibilität. Dies vor dem Hintergrund betrachtet, dass das Abladen eines teil- oder fertigmontierten PKW von der Montageinsel ohne externe Hubeinrichtungen und Ladehilfsmittel bzw. statische Einrichtungen, wie z.B. Überladevorrichtungen, an einem beliebigen Ort erfolgen können sollte, um die uneingeschränkte Layoutflexibilität und Autarkie zu gewährleisten. Dies ist insoweit von Belang, wenn man Fahrzeugproduktionen als Vergleich heranzieht, wo bereits heute FTF als monofunktionale Montageträger fungieren. Hierbei handelt es sich meistens um reine Transportmittel, die lediglich über eine Hubfunktion des Werkstückträgers verfügen, vgl. Kapitel 2.3.3. Die Kinematik der automatisierten Abladefunktion der Mobilen Montageinsel ist in den Fahrzeugträger dergestalt integriert, als dass die zur Anpassung der Aufnahmepunkte an verschiedene Fahrzeuggeometrien vorgesehenen Antriebe gleichzeitig eine Fördereinrichtung darstellen.

Um die Abgabe eines Rolling Chassis bzw. teil- oder fertigmontierten Fahrzeugs auf das Bodenniveau zu ermöglichen, ist der Fahrzeugträger (18), vgl. Abbildung 5.17 in Längsrichtung (16) zu dessen Basis (14) – dem Chassis des FTF – mittels einer Führungseinrichtung (22) verlagerbar und um eine Achse orthogonal (24), siehe hierzu Abbildung 5.28, zu dessen Längsachse (16) kippbar, vgl. Abbildung 5.18. Durch diese Funktionalität kann der Fahrzeugträger als eine Art Rampe auf den Untergrund abgelassen werden, um ein Abrollen des darauf befindlichen Fahrzeugs zu ermöglichen.

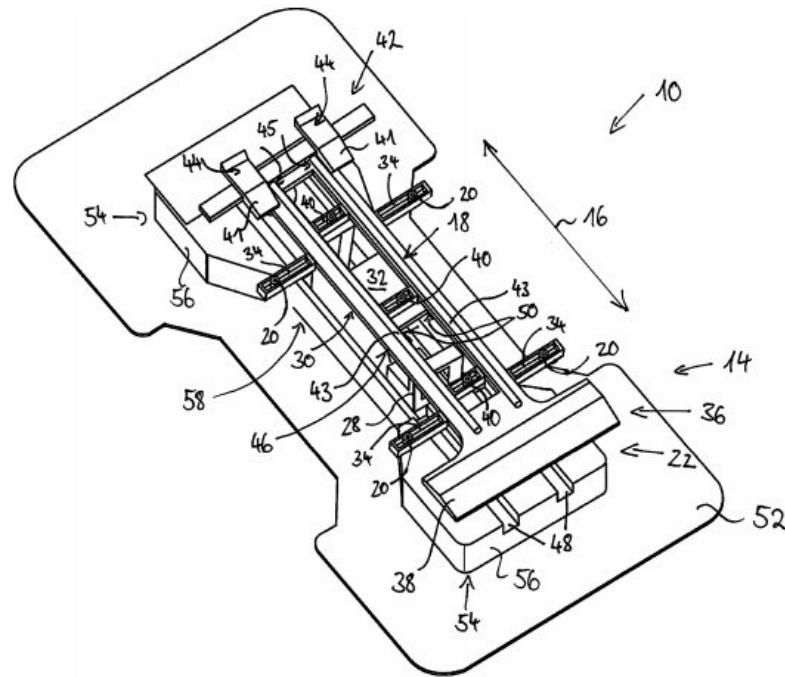


Abbildung 5.17: Aufbau der Mobilen Montageinsel – Fahrzeugträger in Grundposition.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Tabelle 5.1: Legende zu den Abbildungen 5.17 bis 5.21 sowie 5.28 bis 5.33.

Pos.10	Fahrerlose Transportvorrichtung
Pos.12	Kraftfahrzeug
Pos.14	Fahrbare Basis
Pos.16	Längsrichtung
Pos.18	Fahrzeugträger
Pos.20	Betätigbare Werkstückaufnahme
Pos.22	Längsführungseinrichtung
Pos.24	Zur Längsrichtung orthogonal orientierte Achse
Pos.26	Räder des Kraftfahrzeuges
Pos.28	Hubtisch
Pos.30	Drehantrieb
Pos.32	Hubtischkopf
Pos.34	Querträger
Pos.36	Abklappbares Ende des Fahrzeugträgers
Pos.38	Abfahrrampe
Pos.40	Halterungen
Pos.41	Keilförmige Verjüngung der Radaufnahmen
Pos.42	Verfahrbarer Schlitten
Pos.43	Schlittenschienen
Pos.44	Radaufnahme
Pos.45	Schlittenschiene
Pos.46	Profilschiene
Pos.48	Führung der Profilschiene Pos.46 mit zwei Freiheitsgraden
Pos.50	Führung der Profilschiene Pos.46 mit einem Freiheitsgrad
Pos.52	Umlaufende begehbare Plattform
Pos.54	Abschnitte der Antriebseinheiten innerhalb des Chassis
Pos.56	Radkästen
Pos.58	Taille

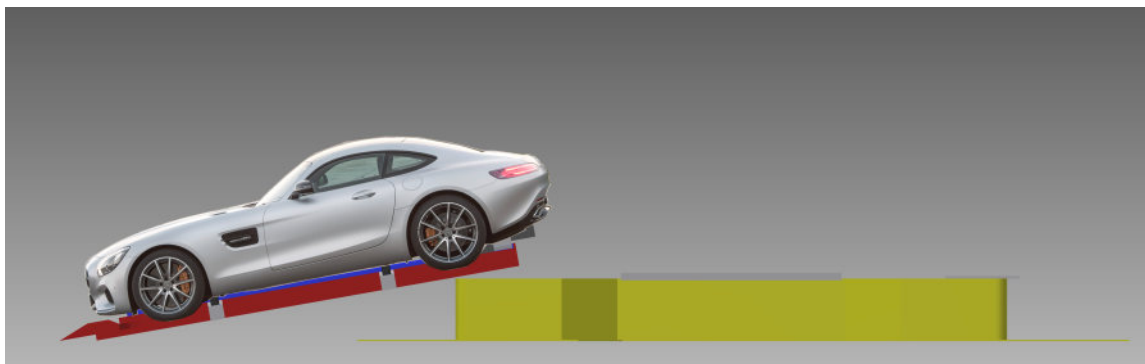


Abbildung 5.18: Vollvariabler Fahrzeugträger auf Untergrund abgeklappt in Abfahrstellung.
Quelle: Eigene Darstellung mit Inhalten der Daimler AG.

Gleichwohl ist es auch möglich, den Fahrzeugträger auf einer vom Bodenniveau abweichenden Höhe zum Abladen zu positionieren, um z.B. das Fahrzeug auf eine Lagerebene abzugeben. Befindet sich die Abgabehöhe oberhalb der vertikalen Grundposition (minimale Hubhöhe) des Fahrzeugträgers, erfolgt die Abgabe ohne dessen Verkippung. Die Längsförderung des Rolling Chassis relativ zum Fahrzeugträger sowie die Entkopplung von diesem und das freie Abrollen auf dem Boden erfolgt in einem mehrstufigen Prozess, siehe Kapitel 5.1.3. Die Verlagerung des Fahrzeugträgers entlang der Längsachse (16) relativ zur fahrbaren Basis (14) wird durch die konstruktive Trennung von der Hubeinrichtung bewerkstelligt. Bei der in Abbildung 5.12 dargestellten ersten prototypischen Umsetzung der Montageinsel ist die Hubeinrichtung mittels zweier doppelwirkender Teleskop-Hydraulikzylinder realisiert. Das bis dato noch nicht vollständig umgesetzte Konzept der Werkstückhandhabungseinrichtung ist abweichend vom in Abbildung 5.12 dokumentierten Prototypenstadium dergestalt, dass der Fahrzeugträger nicht direkt an die Hubzylinder angebunden ist. Gemäß der in Patentschrift EP 3 331 809 B1 beschriebenen Ausführung ist die Kopplung des Fahrzeugträgers an die Hubeinrichtung mittels eines Hubtisches (28) vorgesehen. Dabei ist der Fahrzeugträger vorteilhafterweise zudem gegenüber der Basis um deren vertikale Achse drehbar, vgl. Abbildung 5.19. Der Fahrzeugträger ist hierfür mittels eines Hubtischkopfes (32) über einen Drehantrieb (30) relativ zum Hubtisch (28) und der Basis verschwenkbar geführt.

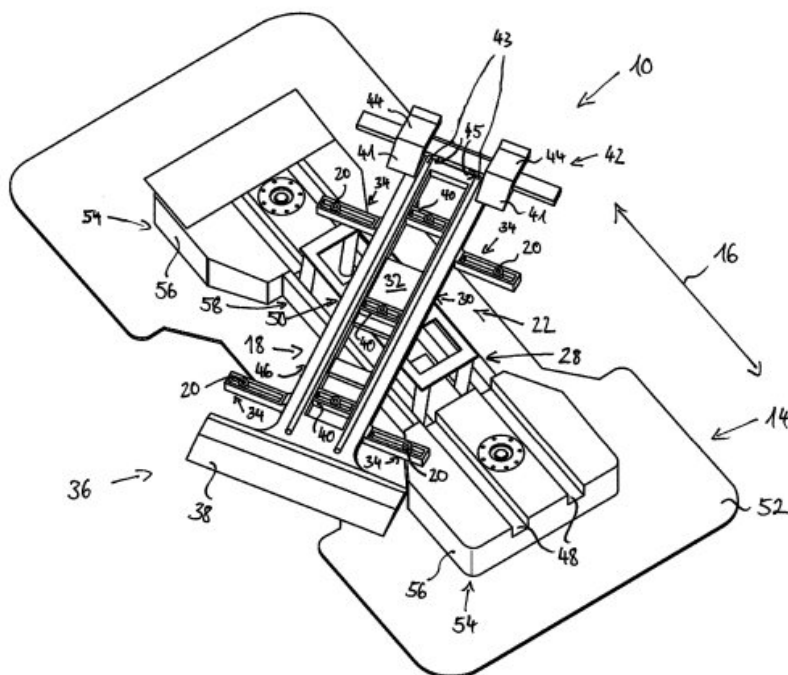


Abbildung 5.19: Aufbau der Mobilien Montageinsel – Fahrzeugträger gegen Basis verdreht
 Quelle: EP 3 331 809 B1.

Um ein Verkippen des Fahrzeugträgers (18) gegenüber dem Hubtschkopf (32) zu verhindern, ist die zur Längs-Führungseinrichtung (22) zugehörige am Fahrzeugträger befindliche Profilschiene (46) am Hubtschkopf mit lediglich einem Freiheitsgrad gelagert, vgl. vereinfachte Darstellung in Abbildung 5.20, indem die zu der Profilschiene komplementäre Aufnahme (50) einen Hintergriff bewirkt. Insofern ist im Bereich des Hubtschkopfes lediglich eine Längsverschiebung des Fahrzeugträgers möglich. Im von der Basis angehobenen Zustand weist der Fahrzeugträger lediglich eine Führung und Lagerung über den Hubtsch (28) – respektive dessen Hubtschkopf (32) – auf.

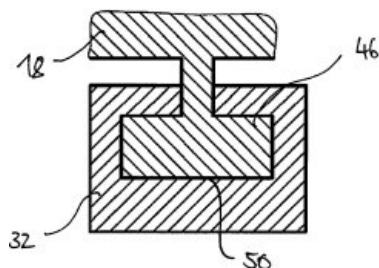


Abbildung 5.20: Führung des Fahrzeugträgers am Hubtschkopf mit einem Freiheitsgrad.
 Quelle: EP 3 331 809 B1.

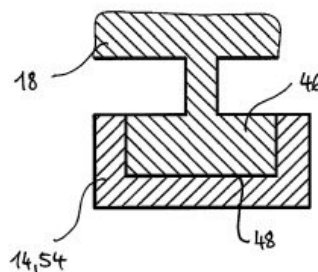


Abbildung 5.21: Führung des Fahrzeugträgers mit zwei Freiheitsgraden.
 Quelle: EP 3 331 809 B1.

Befindet sich der Fahrzeugträger in dessen Grundposition, liegt er zusätzlich auf dem Chassis der fahrbaren Basis auf und ist dort über die in Abbildung 5.21 dargestellten Schienen mit zwei Freiheitsgraden⁸⁵ geführt. Diese differenzierte Lagerung ist im Hinblick auf die für den Abladeprozess auf den Untergrund erforderliche Abklappfunktion des Fahrzeugträgers vorzusehen. Insofern darf sich die in Abbildung 5.20 dargestellte Führung des Fahrzeugträgers mit einem Freiheitsgrad nicht auf dessen vollständige Verlagerungslänge erstrecken, sondern bleibt dem Bereich des Hubtisches vorbehalten, der je nach Ausführung des Fahrzeugträgers ca. 40% bis 60% Überdeckung mit der Verlagerungslänge haben sollte. Da diese Überdeckung im angehobenen Zustand des Fahrzeugträgers die Einspannlänge am Hubtisch darstellt, korreliert die relative Länge des Hubtisches – und damit zugleich der Führung mit einem Freiheitsgrad – mit der Länge des Fahrzeugträgers und den daraus über den Hubtisch hinaus resultierenden Kragarmlängen, Schnittlasten am Träger und Lagerreaktionen. Um den Fahrzeugträger, wie in Abbildung 5.18 zu sehen, in Abklappstellung zu bringen, muss dieser somit zunächst soweit in Längsrichtung (16) verlagert werden, dass sich dieser mit den Profilschienen (46) nicht mehr im Führungsbereich des Hubtisches befindet. Die Längsverlagerung des Trägers hat keinen Einfluss auf die Position des Werkstücks – hier ein Kraftfahrzeug – relativ zum Fahrzeugträger. Das Fahrzeug verbleibt positionstreu auf dem Fahrzeugträger.

Die Längsförderung des Werkstücks für die automatisierte Abladefunktion wird durch den Aufbau, vgl. Abbildung 5.17, des Fahrzeugträgers (18) mit zwei zu dessen Längsrichtung (16) mechanisch nicht mit einander gekoppelten Querträgern (34), in die die betätigbaren Fahrzeugaufnahmepunkte (20) integriert sind, ermöglicht. Durch Verschieben mindestens eines der Querträger (34) kann der Längsabstand der Aufnahmepunkte (20) an unterschiedliche Fahrzeuglängen – respektive Radstände – und der Position der Wagenheberpunkte, die sich zwischen den Achsen befinden, erfolgen. Für die Anpassung an die Fahrzeug- und Spurbreite sind die Aufnahmepunkte (20) in Längsrichtung der Querträger (34) verschieblich. Die Aufnahmepunkte sind zudem über einen Spindeltrieb höhenverstellbar ausgeführt. Zur Realisierung der Abladefunktion im Hinblick auf die maximal zulässigen Böschungswinkel diverser Kraftfahrzeugbauarten (SUV, Sportwagen) ist zudem am abklappbaren Ende des Fahrzeugträgers (18) eine Verjüngung (38) vorzusehen, die eine Art Rampenkeil darstellt. Des Weiteren sind zur Unterstützung des Abladeprozesses ein in Längsrichtung (16) des Fahrzeugträgers verschiebbarer Schlitten (42) mit Radaufstandsflächen (44), die an zu der zum Rad des Fahrzeugs hin orientierten Seite als Sicherungs- oder Unterlegkeile (41) ausgeprägt sind, vorzusehen. Der Schlitten ist über am Fahrzeugträger angebrachte Schienen (43) und Schlittenführungen (45) verschieblich gelagert. Die Aufstandsflächen (44) sind in Längsrichtung des Schlittens zur Anpassung an die Spurbreite des auf der Montageinsel befindlichen Kraftfahrzeugs verschiebbar. Insofern stellen der Schlitten (42) mit den Unterfahrkeilen sowie die Verjüngung (38) am Fahrzeugträger (18) die einzigen Hilfseinrichtungen zum Abrollen des Kraftfahrzeugs von dem Träger dar. Aufgrund der längenmäßigen Dimensionierung des Fahrzeugträgers ragen diese in lediglich unerheblichem Maß in den Umriss des Kraftfahrzeugs, so dass die uneingeschränkte Zugänglichkeit des Unterbodens gewährleistet bleibt, vgl. Abbildung 5.22. Vor diesem Hintergrund scheidet eine technische Ausführung des Fahrzeugträgers, die Anleihe an befahrbaren Inspektions-Hebebühnen nimmt, grundsätzlich aus. In Abgrenzung

⁸⁵ Das in Abbildung 5.21 dargestellte Profil stellt quasi eine Gleitführung mit einem nach oben offenen C-Profil dar, so dass in vertikaler Richtung noch ein Freiheitsgrad verbleibt. Dahingegen verkörpert die in Abbildung 5.20 ersichtliche Gleitführung quasi ein geschlitztes Kastenprofil zur Aufnahme einer T-förmigen Scheine, die lediglich in Längsrichtung verschieblich ist und keinen weiteren Freiheitsgrad aufweist.

hierzu ist der Unterboden, insbesondere der Bereich der Schweller, des Kraftfahrzeugs frei von flächigen Radaufstandsflächen bzw. Überfahrtrampen.



Abbildung 5.22: Fertig montierter PKW auf der Mobilten Montageinsel.

Quelle: Eigene Darstellung mit Inhalten der BMW AG.

Die Abladefunktion resultiert aus der Längsverschiebung der Querträger (34), dem im hinteren Teil des Fahrzeugträgers befindlichen Schlitten mit Unterfahr-/Sicherungskeilen (44) und dem Rampenkeil (38) am vorderen Ende des Fahrzeugträgers, siehe rote Markierungen in Abbildung 5.17 und vgl. Abbildung 5.22. Die Abladefunktion kann nur durch die koordinierte Interaktion dieser Komponenten bewerkstelligt werden, da der PKW für die Montage am Unterboden zwischen den Achsen fixiert werden muss (Wagenheberpunkte), beim Abladen jedoch auf den eigenen Rädern abrollen können soll. Insofern wird an dieser Stelle offenkundig, weshalb das von PKW-Hebebühnen mit Auffahrtrampe bekannte Prinzip, auf den Fahrzeugträger der Montageinsel nicht übertragen werden kann.

Das Prinzip einer in den Abbildungen 5.23 und 5.24 dargestellten Hebebühne beruht darauf, dass der PKW über die eigentliche Hubplattform gefahren werden muss, damit sich die Hubplattform zwischen den Achsen des Fahrzeugs befindet. Dies bedingt, dass die Hubplattform befahrbar ausgeführt sein muss, um das Fahrzeug aus eigener Kraft darüber zu positionieren. Die Rampen und die Plattformen weisen daher eine Breite von ca. 400 mm und mehr, je nach Ausführungsvariante, auf, wenngleich der Kraftangriff zum Heben nur lokal an hierfür vorgesehenen und verstärkten Bereichen der Fahrzeugschweller erfolgt.



Abbildung 5.23: Auffahrhebebühne.

Quelle: Twin Busch GmbH.



Abbildung 5.24: Plattform-Scherenhubprinzip einer Auffahrhebebühne.

Quelle: Twin Busch GmbH.

Um Beschädigungen am Unterboden zu vermeiden, werden hierfür zwischen Hubplattform und Schweller Kunststoffklötze eingelegt, die einerseits einen direkten metallischen Kontakt verhindern sollen, andererseits dafür sorgen, dass der Kraftangriff nicht flächig, sondern nur an den hierfür ausgeprägten Bereichen der Schweller erfolgt. Gehoben wird der PKW sodann von den Hubplattformen, die sich flächig unter den Schwellern und dem Unterboden des Fahrzeugs erstrecken. Aufgrund der zum befahren erforderlichen Breite der Plattformen werden zwangsläufig weite Teile des Unterbodens für Montagetätigkeiten unzugänglich. Nicht zuletzt deshalb werden in Werkstätten für solche Arbeitsumfänge Säulenhebebühnen eingesetzt, bei denen die Tragarme mit den Aufnahmepunkten von der Seite einschwenkbar unter dem Fahrzeug positioniert werden, siehe Abbildungen 5.25 und 5.26. Bei diesem Hubkonzept wird lediglich diejenige Fläche am Unterboden des Fahrzeugs überdeckt, die sich aus den konstruktiv bedingten Abmessungen der Tragarme ergibt. Da die Tragarme insofern nicht befahrbar sind, werden diese von der Seite des Fahrzeugs nach dessen Positionierung zwischen den Hubsäulen eingeschwenkt. Dieses Hubkonzept scheidet somit für die Konstruktion des Fahrzeugträgers der Mobilen Montageinsel bereits insofern aus, als dass der hierfür erforderliche Bauraum an den Längsseiten des Fahrzeugs den Arbeitsbereich des Montagepersonals darstellt und infolge des Aufbaus des FTF kein Zugang unter das Fahrzeug von der Front- und Heckseite besteht. Beide Ausführungsvarianten von Hebebühnen ist darüber hinaus gemein, dass keine punktuelle Aufnahme des Fahrzeugs bei gleichzeitiger Längs- und Querverschiebung der Aufnahmepunkte unabhängig von der Relativposition der Hubzylinder realisiert werden kann. Ferner ist es bei beiden Varianten nicht möglich, den Hub über zwei in Längsrichtung zum Fahrzeug angeordnete Hubzylinder zu realisieren, ohne dass diese für den Entladeprozess ebenfalls in Längsrichtung relativ zum Chassis verschieblich sein müssen. Im Falle einer Ausführung in Säulenbauweise, vgl. Abbildung 5.25, bei der sich das Werkstück zwischen den Hubsäulen befindet, ist es darüber hinaus nur schwer möglich, eine wie in Abbildung 5.19 gezeigte Verdrehung des Fahrzeugaufnahme gegenüber der Basis zu realisieren, ohne hierfür die Hauptabmessungen des FTF massiv zu erweitern.



Abbildung 5.25: Zwei-Säulenhebebühne.

Quelle: Twin Busch GmbH.



Abbildung 5.26: Schwenkbar gelagerte Tragarme einer Zwei-Säulenhebebühne.

Quelle: Twin Busch GmbH.

Ein wie in der USA-Patentanmeldung US 8,157,079 B2, siehe Abbildung 5.27, vorgestellte Ausführung einer mobilen Säulenhebebühne leistet diesbezüglich nur bedingt Abhilfe. Hier befindet sich zwar das Werkstück stets oberhalb der Hubsäulen, da diese in Teleskopbauweise dargelegt sind, was ein Verdrehen um die Hochachse prinzipiell kollisionsfrei zuließe, jedoch bleibt die grundsätzliche Unvereinbarkeit dieses Hubkonzeptes hinsichtlich einer Verkipfung des Werkstücks um eine Achse orthogonal zu dessen Längsachse bestehen.

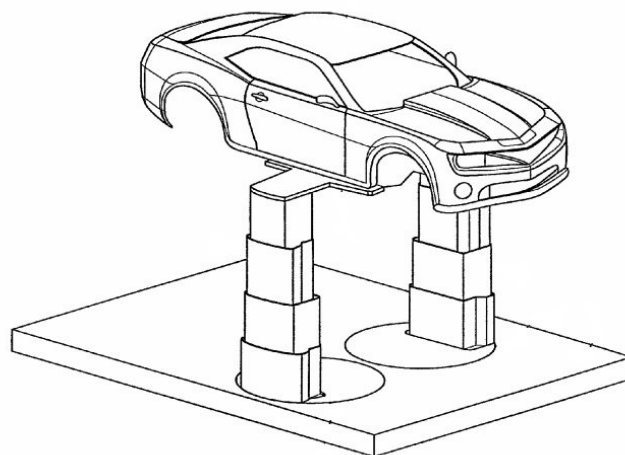


Abbildung 5.27: Teleskop-Säulenhebebühne.

Quelle: United States Patent US 8,157,079 B2.

5.1.3 Verfahren zum Abladen eines Kraftfahrzeugs von der Mobilten Montageinsel

Das Verfahren zum Abladen eines teil- oder fertigmontierten Kraftfahrzeugs (12), vgl. Abbildung 5.28, stellt einen mehrstufigen Prozess dar, an dem die bereits oben beschriebenen Funktionalitäten und Merkmale des Fahrzeugträgers beteiligt sind. Das Verfahren ist Bestandteil des Europäischen Patents EP 3 331 809 B1. Um ein komplett montiertes Fahrzeug oder ein Rolling Chassis auf den Untergrund abzugeben, ist zunächst der Fahrzeugträger (18) in seine gegenüber der Basis (14) verschobene vordere Endlage zu bringen und um eine orthogonal zur Längsrichtung (16) erstreckende Achse (24) auf den Untergrund abzuklappen. Die technische Ausführung dieser Kippfunktion kann unter anderem über eine mit Hydraulikzylindern zu betätigende Kinematik bewerkstelligt werden, die mit der Längsverschiebung des Fahrzeugträgers eine Einheit bildet.

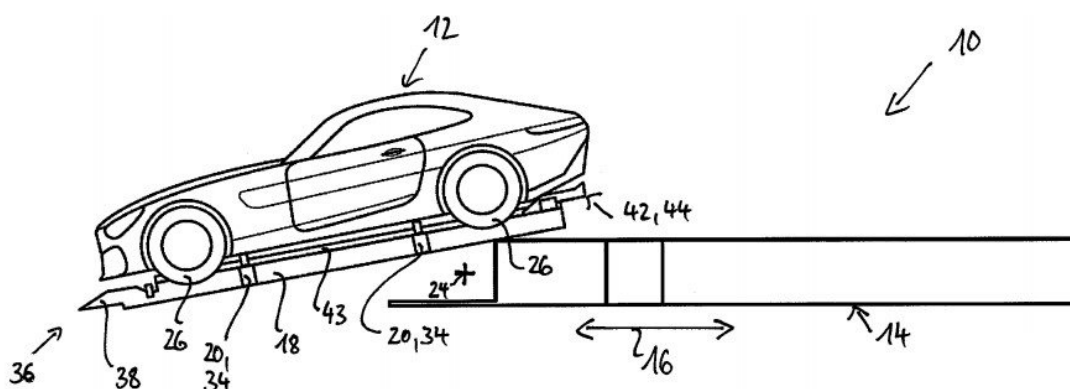


Abbildung 5.28: Abgeklappter Fahrzeugträger der Mobilten Montageinsel.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

In der in Abbildung 5.28 gezeigten Lage des Fahrzeugträgers (18) befindet sich das Fahrzeug (12) noch positionstreu auf dem Träger, da nur dieser relativ zur fahrbaren Basis (14) verlagert wird. Erst in den folgenden Schritten, erfolgt eine durch die Querträger (34) und den Schlitten (42) initiierte Relativbewegung des Fahrzeugs gegenüber der fahrbaren Basis und dem Fahrzeugträger. Zunächst werden die Querträger (34) paarweise und synchron in Richtung des vorderen Endes des Trägers verschoben, vgl. Abbildung 5.29.

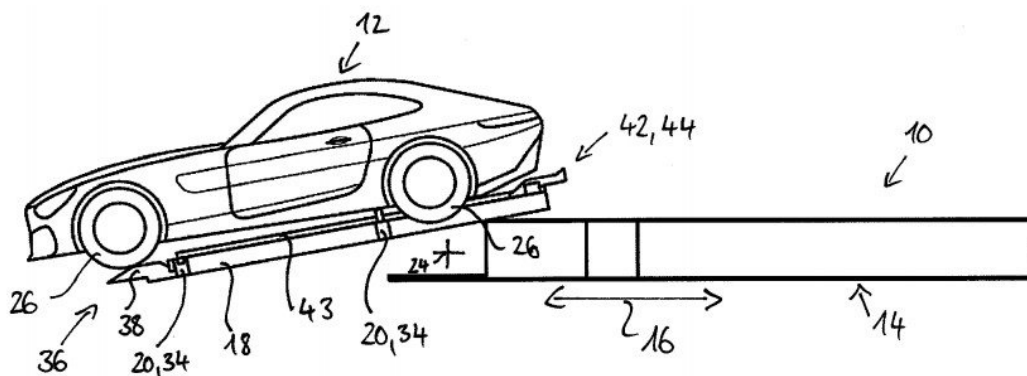


Abbildung 5.29: Phase 1 des Abladeprozesses – beide Querträger verfahren synchron.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Die betätigbaren Aufnahmepunkt (20) des – in Abgaberrichtung betrachtet – vorderen Querträgers sind zu lösen, bevor die Räder des Fahrzeugs – im gezeigten Beispiel an der Vorderachse – in Kontakt zum Rampenkeil (38) kommen. Dieser ist als asymmetrischer Doppelkeil ausgestaltet und etwas oberhalb des Höhenniveaus der Querträger platziert, so dass die Radaufhängung des Kraftfahrzeugs einfedert, wenn die Räder in Längsrichtung (16) über den Rampenkeil bewegt werden. Dies erleichtert insofern das Lösen des Fahrzeugs vom Träger, indem dadurch – hier der Vorderwagen des PKW – ein Stück weit vom Träger abgehoben wird. Das Maß dieses Hubs ist abhängig von der Federkennlinie des Fahrzeugs. Ist der vordere Querträger vom Fahrzeug gelöst, erfolgt die weitere Längsförderung ausschließlich durch den hinteren der beiden Querträger (34), während der Vorderwagen des Fahrzeugs bereits auf dem Boden abrollt, vgl. Abbildung 5.30.

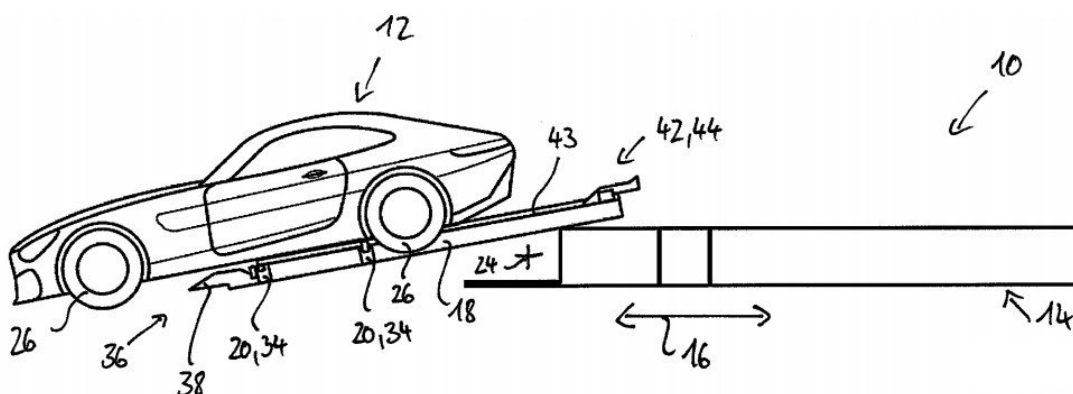


Abbildung 5.30: Phase 2 des Abladeprozesses – Vorderwagen rollt auf dem Boden ab.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Der bereits vom Kraftfahrzeug entkoppelte Querträger wird sodann in seine vordere Endlage gefahren, während der hintere eine aktive Förderwirkung des Fahrzeugs in Längsrichtung (16) erfüllt. Ist auch dieser an seinem am vorderen Endanschlag des Fahrweges angelangt, wird der Schlitten (42) mit den Unterfahrkeilen (44) unter das Fahrzeug und dessen Räder verfahren, vgl. Abbildung 5.31.

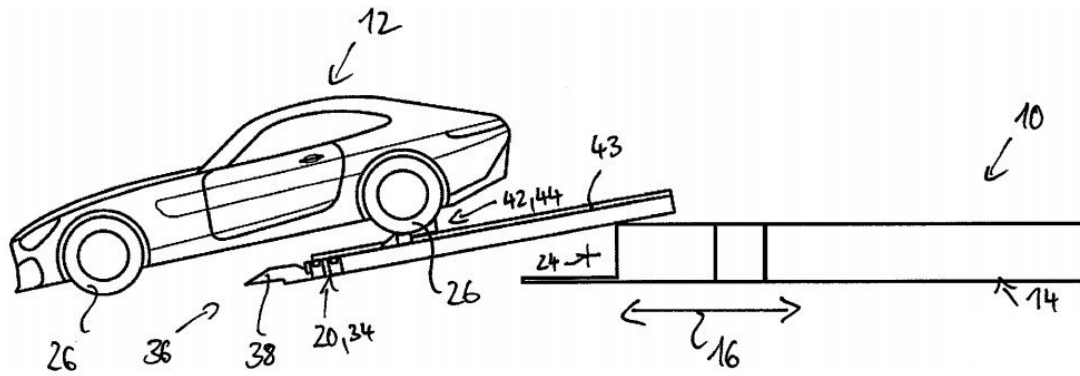


Abbildung 5.31: Phase 3 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Prinzipbedingt befindet sich beim Erreichen der vorderen Endlage des hinteren der beiden Querträger die Hinterachse des Fahrzeugs noch vor dem vorderen Querträger und dem Rampenkeil (38) des Fahrzeugträgers. Zum Abfahren müssen somit beide Querträger überwunden werden, da diese in der gleichen Ebene angeordnet sind. Insofern stellt der Schlitten (42) ein Hilfselement dar, um mit der Hinterachse des Fahrzeugs die nicht befahrbaren Querträger zu überwinden. Hierfür ist der Schlitten (42) und dessen Linearführung (43) in einer Ebene oberhalb der Querträger (34) angeordnet, damit der Schlitten samt den darauf befindlichen Unterfahrkeilen (44) über die Querträger gefahren werden kann, vgl. Abbildung 5.32.

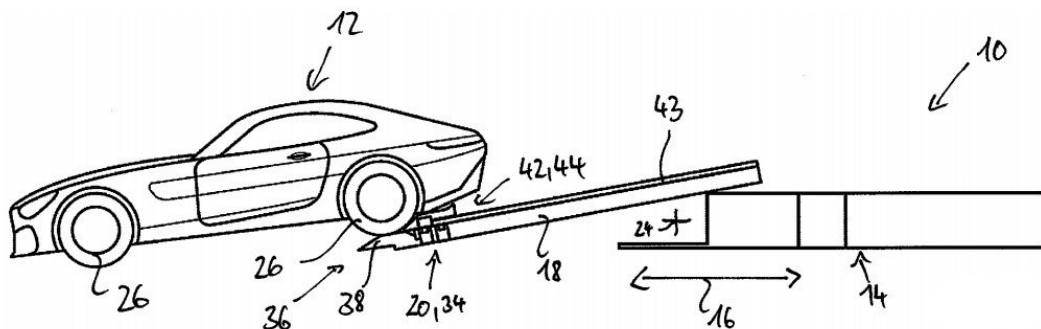


Abbildung 5.32: Phase 4 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Sobald die Unterfahr-/Sicherungskeile unter den Hinterrädern des Fahrzeugs positioniert sind, werden die betätigbaren Aufnahmepunkte (20) des Querträgers gelöst. In diesem Zustand wird das Fahrzeug ausschließlich durch den Schlitten (42) und den Unterfahr-/Sicherungskeilen (44) gehalten. Bei fertigmontierten Kraftfahrzeugen empfiehlt es sich daher für den Abladeprozess die auf die Hinterräder wirkende Feststellbremse anzuziehen, um das Fahrzeug zusätzlich gegen unbeabsichtigtes Wegrollen zu sichern. Wie in Abbildung 5.32 ersichtlich ist, fährt der Schlitten (42) in seine vordere Endlage, so dass die Hinterräder des Fahrzeugs auf dem Rampenkeil (38) des Fahrzeugträgers zum Stehen

kommen, wodurch anschließend ein freies Abrollen auf den Boden ermöglicht wird, vgl. Abbildung 5.33.

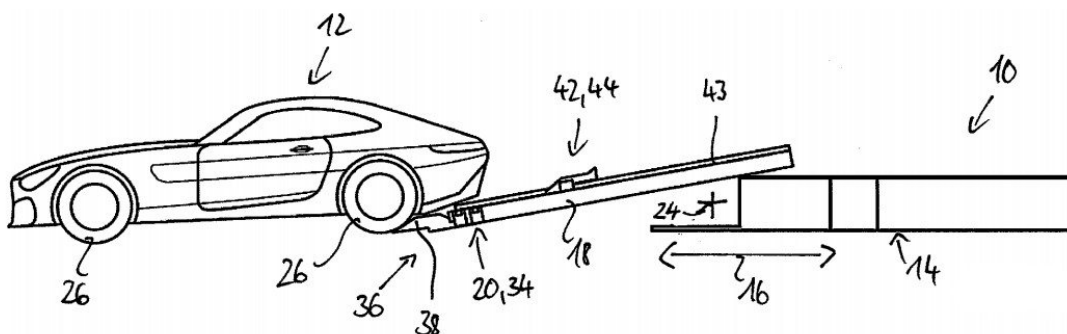


Abbildung 5.33: Phase 5 des Abladeprozesses – Schlitten fährt unter Fahrzeug, hinterer Querträger wird vom Fahrzeug gelöst.
Quelle: EP 3 331 809 B1.

Soll der Abladeprozess gänzlich autonom von statten gehen, ist ein rein passives Abrollen des Kraftfahrzeugs vom Fahrzeugträger nicht möglich, sofern zuvor zur Sicherung des Fahrzeugs gegen Wegrollen die Feststellbremse betätigt worden ist. In dem Fall ist ein aktives Zurückziehen des Fahrzeugträgers von Nöten, um die noch auf dem Rampenkeil befindlichen Hinterräder des Kraftfahrzeugs auf den Boden abzulassen. Hierfür wird der Fahrzeugträger in Längsrichtung (16) zurück Richtung seiner Ausgangslage auf der fahrbaren Basis (14) bewegt. Aufgrund der Haftungsverhältnisse der Fahrzeugreifen ist der Rampenkeil des Trägers mit Kugel- oder Rollbahnen versehen, um quasi ein Abstreifen des Fahrzeugs trotz festgebremster Hinterachse durch Zurückziehen des Trägers zu erleichtern.

5.2 Dynamisches Lager

Ein von der Fließfertigung abweichendes Produktionsprinzip, bei dem Werkstücke aufgrund Verschiebung der Priorisierung, Bearbeitungsmängeln, sowie schadhafter oder fehlender Teile aus dem Produktionsprozess temporär ausgeschleust werden, erfordert in Konsequenz ein flexibles Lagerungs- und Transportkonzept für nicht-komplettierte Werkstücke.

Treten Bearbeitungsfehler auf, deren Behebung unmittelbar erfolgen kann und lediglich einen höheren Montagezeitbedarf erfordert, oder aber Ersatzteile verbaut werden müssen, die kurzfristig verfügbar sind, kann der teilmontierte PKW an der Bearbeitungsstation respektive an einem dafür vorgesehenen Parkplatz innerhalb der Produktion verbleiben. Lässt sich jedoch die Behebung von Mängeln nicht zeitnah bewältigen, oder fehlen Teile, die nicht vorrätig sind, sollten die nur teil-gefertigten Werkstücke platzsparend und möglichst außerhalb des eigentlichen Produktionslayouts zwischengelagert werden. Das am IFT entwickelte Produktionslogistikkonzept einer nicht getakteten und nicht sequenzierten PKW-Fertigung sieht daher ein speziell auf diese Belange ausgelegtes Lager- und Transportkonzept vor.⁸⁶

Die temporäre Lagerung ausgeschleuster Fahrzeuge, Rolling Chassis, Bodenmodule und Karosserien soll in einem nicht-ortsfesten, dynamischen Lager erfolgen, siehe Abbildung 5.34. Das nachfolgend beschriebene Konzept ist patentrechtlich⁸⁷ geschützt, wurde jedoch bis dato noch nicht als Prototyp gebaut. Die Begrifflichkeit „dynamisch“ zielt dabei sowohl auf die ortsbewegliche konstruktive Ausführung mit Fahrtrieb und veränderlichem Fachbodenraster, als auch auf die Wandlungsfähigkeit hinsichtlich des Einsatz- und Anwendungsszenarios des Regalmoduls ab. Das selbstfahrende Regal stellt ein skalierbares und daher platzsparendes Zwischenlager, aber auch eine Art Großladungsträger für den autonomen Transport der Einlagerungsgegenstände dar.

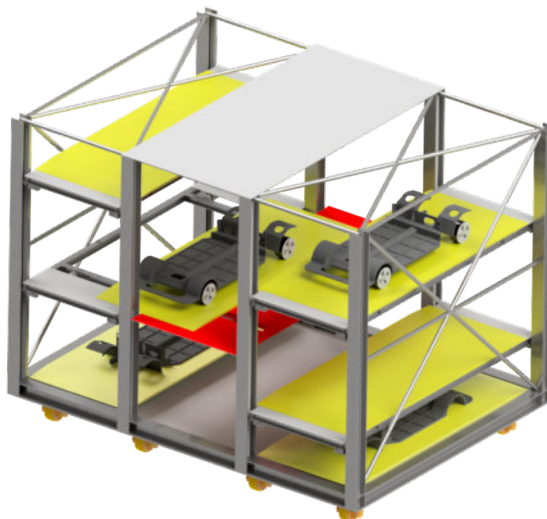


Abbildung 5.34: Dynamisches Lager.
Quelle: Eigene Darstellung.

⁸⁶ Vgl. Wehking et al. 2020 [Weh20B].

⁸⁷ Für das Dynamische Lager ist als selbstfahrende Lagerienheit mit Veröffentlichungsnummer EP3365138B1 das europäische Patent erteilt. Anmelder ist die Universität Stuttgart, die Erfinder sind Hofmann, M.; Wehking, K.-H. und Schröppel, M.

Das Dynamische Lager befindet sich zunächst produktionsnah, so dass eine Erreichbarkeit mit der Mobilten Montageinsel gewährleistet ist. Handelt es sich bei den Einlagerungsgegenständen um teilmontierte PKW, die bereits mit Rädern versehen sind, respektive Rolling Chassis, so können diese direkt ohne externe Hubvorrichtung oder Ladehilfsmittel von der Montageinsel auf die Hubplattform abgeladen werden, um so dann durch die Vertikal- und Horizontalfördereinrichtungen des Dynamischen Lagers an den vorgesehenen Lagerplatz verbracht zu werden.

Da das Dynamische Lager selbst über einen omnidirektionalen Fahrtrieb verfügt, wird es der Anforderung an Mobilität und Layoutflexibilität gerecht und stellt keine statische Lagereinrichtung dar. Aufgrund der Mobilität der Lagereinrichtung stellt das Lager auch eine Form von Großladungsträger dar, so dass das Lager aus der Produktion heraus an einen Lagerort gefahren werden kann. Einerseits ermöglicht dies die Verlagerung des Standorts innerhalb des Fertigungslayouts, andererseits kann das Dynamische Lager dadurch auch als Ladungsträger für den Transport von Einlagerungsgegenständen fungieren. Insofern ist hinsichtlich des Anwendungsbereichs innerhalb des logistischen Gesamtsystems zwischen der temporären Einlagerung – mit Verbleib in der Fertigung – sowie der mittel- bis längerfristigen Einlagerung bzw. Zurückstellung des Montageobjektes im Fertigungsprozess zu differenzieren. Die längerfristige Lagerung von ausgeschleusten PKW innerhalb des Montagelayouts würde schlichtweg zu viel Grundfläche in Anspruch nehmen, so dass in dem Fall ein Abtransport in einen von der Fertigung separierten Bereich erforderlich ist und somit das Anwendungsszenario als Ladungsträger und Transportelement zum Tragen kommt. Dies kommt insbesondere dann in Betracht, wenn sich in dem Lager ausgeschleuste Werkstücke befinden, deren Weiterbearbeitung nicht in einem derart absehbaren Zeitrahmen erfolgen kann, als dass deren Verbleib in Anbetracht der Platzverhältnisse innerhalb der Produktion sowohl praktikabel als auch wirtschaftlich wäre. Indem der Streckentransport ausgeschleuster Werkstücke nicht durch die Montageinsel, sondern durch das Dynamische Lager bewerkstelligt wird, kann einerseits eine Bündelung von Transportfahrten erzielt werden und andererseits eine Bindung von Werkstückträgerkapazität vermieden werden.

5.2.1 Technische Ausgestaltung des Dynamischen Lagers

In funktionaler Hinsicht lässt sich das dynamische Lager durch zwei Haupteinheiten charakterisieren, indem der Vertikalförderer von den Lagerplätzen getrennt ist. Das Dynamische Lager besteht demzufolge aus einem „Aufzug-Turm“ mit einer zentralen Hubplattform und mindestens einem „Lager-Turm“ in dem die Lagerbodenrahmen vertikal verfahrbar angeordnet sind, siehe Abbildung 5.35. Die hier dargestellte Ausführungsvariante weist zwei Lagertürme auf, die durch den Aufzugturm von einander getrennt werden.

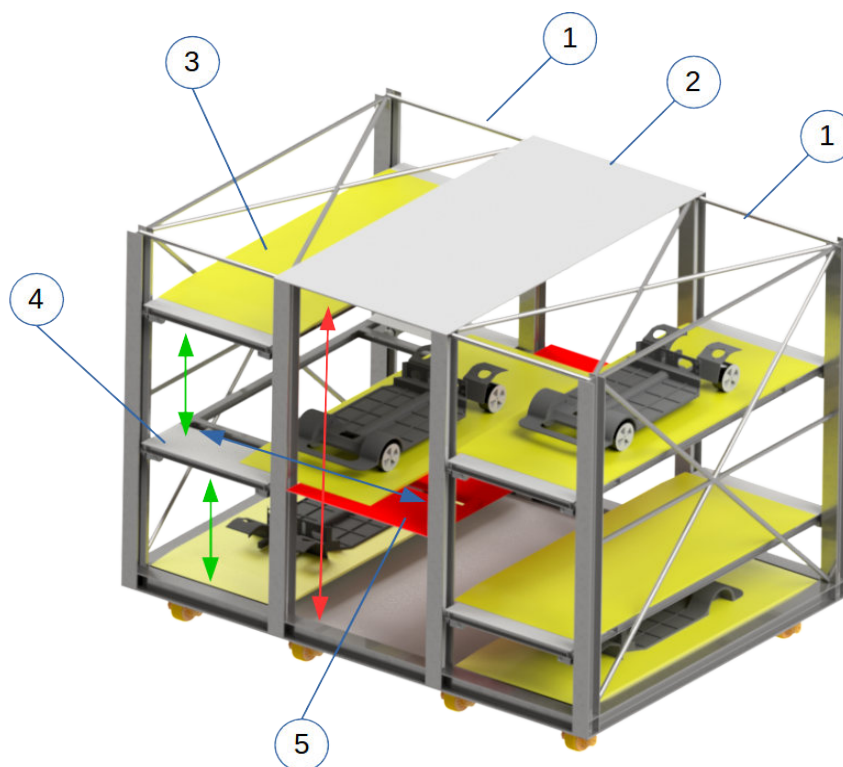


Abbildung 5.35: Funktionaler Aufbau des Dynamischen Lagers.

Pos.1: Lager-Turm

Pos.2: Aufzug-Turm

Pos.3: Lagerplatz/Fachbodenelement

Pos.4: Lagerbodenrahmen

Pos.5: Hubplattform

Die Bewegungsrichtungen der einzelnen Elemente sind mit Pfeilen folgender Farbgebung angezeigt:

rot: Vertikalbewegung der Hubplattform.

blau: Querverschiebung der Fachbodenelemente.

grün: Vertikalbewegung der Lagerbodenrahmen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tragstruktur des dynamischen Lagers besteht aus einer fachwerkartigen Stahlkonstruktion mit entsprechenden Spannverstrebungen zur Erhöhung der Steifigkeit und Stabilität. Der grundlegende Aufbau der in Abbildung 5.35 dargestellten Ausführungsvariante umfasst einen Aufzug- oder Hebeturm (22), vgl. Abbildung 5.36, mit einer Hebeeinrichtung (24) zum vertikalen Verfahren der Lagerbodenelemente (18) und zwei auf jeweils gegenüberliegenden Seiten des Hebeturms (22) angeordnete Lagertürme (26), welche die Lagerplätze (16) aufweisen.

Jeder Lagerplatz ist auf eine Tragfähigkeit von 3.000 kg ausgelegt. Die Grundfläche eines jeden Lagerplatzes beträgt 5,5 x 2,5 m, so dass auch komplett fertig montierte PKW darin eingelagert werden können.

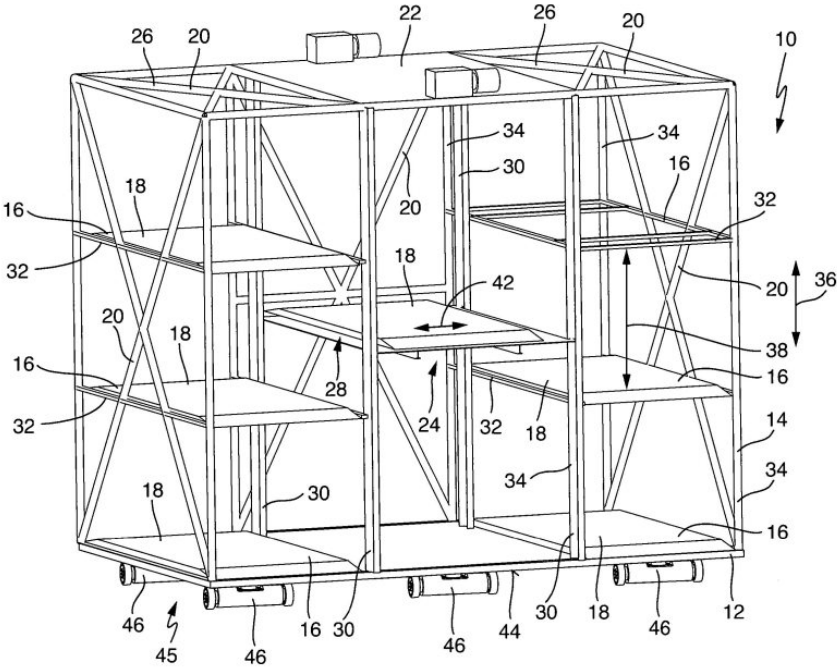


Abbildung 5.36: Dynamisches Lager.
Quelle: EP3365138.

Tabelle 5.2: Legend zu Abbildung 5.36.

Pos.10	Lagereinrichtung
Pos.12	Plattenartiges Bodenelement
Pos.14	Tragstruktur
Pos.16	Lagerplätze
Pos.18	Lagerbodenelemente
Pos.20	Verstrebung
Pos.22	Hebeturm
Pos.24	Hebeeinrichtung
Pos.26	Lagertürme
Pos.28	Hubplattform
Pos.30	Führungsschiene der Hubplattform
Pos.32	Lagerbodenrahmen
Pos.34	Führungsschiene der Lagerbodenrahmen
Pos.36	Vertikale Richtung
Pos.38	Höhe eines Lagerplatzes
Pos.42	Horizontale Richtung
Pos.44	Der Tragstruktur abgewandte Unterseite
Pos.45	Verfahreinheit
Pos.46	Schwenkantriebe

Die Hebeeinrichtung (24) im Aufzug-Turm umfasst eine Hubplattform, die dahingehend konzipiert und ausgelegt ist, dass sie vertikal zwischen einer Beladeposition und wenigstens einer Lagerposition verfahrbar ist. Hierzu weist die Hebeeinrichtung einen Hülltrieb in Form z.B. eines Seil- oder Kettentriebs auf. Mittels dieses Antriebs kann die Hubplattform (28), welche in Führungsschienen (30) des Hebeturms (22) geführt wird, vertikal verfahren werden.

Die vorliegende Ausführung des dynamischen Lagers umfasst pro Lagerturm (26) zwei Lagerbodenrahmen (32), wobei die vertikalen Hauptträger (14) ebenfalls vertikale Führungsschienen (34) zur Führung dieser Lagerbodenrahmen (32) aufweisen. Auf den Lagerbodenrahmen (32) sind die Lagerbodenelemente (18) anordenbar. Ein Lagerplatz besteht somit aus einem Lagerbodenrahmen und einem Fachboden/Lagerbodenelement.

Das Lager ist dahingehend skalierbar, als dass die Anzahl der Fachbodenelemente sowie die Fachbodenhöhe der Höhe des Einlagerungsgegenstandes angepasst werden kann, um einen hohen Ausnutzungsgrad des Regals zu realisieren. Insofern verfügt das Lager über kein festes Regalraster, vielmehr passt sich das Raster an variierende Höhen der Einlagerungsgegenstände an. Ein Beispiel hierfür ist die in Abbildung 5.37 dargestellte Konstellation, wo sich in einem Lagerturm gleichzeitig sowohl Bodenmodule als auch ein Endmontagefahrzeug mit Karosserie befinden.

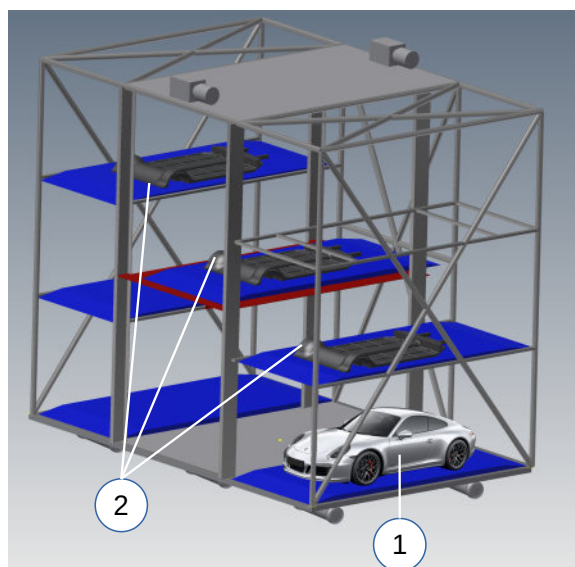


Abbildung 5.37: Dynamisches Lager mit variabler Verstellung der Lagerplatzhöhe, z.B. zur Einlagerung von Endmontagefahrzeugen und Bodenmodulen.

Pos.1: Endmontagefahrzeug

Pos.2: Bodenmodul

Quelle: Eigene Darstellung mit Inhalten der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Um die Höhe der Lagerplätze (16) verändern zu können, weist die Lagereinrichtung für jeden Lagerbodenrahmen (32) einen Vertikaltrieb in Form eines Zahnstangenantriebs auf, um die vertikale Position der Lagerböden der Höhe der Einlagerungsgegenstände entsprechend anpassen zu können, vgl. Abbildung 5.38. Indem der Vertikaltrieb so ausgeführt ist, dass jeder einzelne Lagerbodenrahmen für sich über einen eigenen Antrieb verfügt, können diese vertikal unabhängig voneinander verlagert werden. Somit kann zur Einlagerung eines Bodenmoduls in einen Lagerplatz die Höhe eines Lagerplatzes verringert werden, wobei die Höhe bspw. zur Einlagerung eines endmontierten Kraftfahrzeugs vergrößert werden kann. Insofern stellt jedes Fachbodenelement eine unabhängig angetriebene Einheit dar, damit eine individuelle Fachbodenhöhe innerhalb des Schwerlastregals eingestellt werden kann. Ermöglicht wird dies durch die funktionale und räumliche Trennung von Aufzug und Lagereinheit. Das aktive Vertikal-Förderelement stellt demzufolge die im Aufzug-Turm befindliche Hubplattform dar, so dass die Hubantriebe der Lagerbodenrahmen lediglich der Verstellung des Fachbodenabstandes dienen.



Abbildung 5.38: Detailansicht Zahnstangenantriebe des Dynamischen Lagers.
 Pos.1: Zahnstange an der Tragstruktur für Lagerbodenvertikaltrieb.
 Pos.2: Antrieb des Lagerbodenvertikaltriebs.
 Pos.3: Antrieb zur Querverschiebung des Lagerbodens.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Lagerbodenrahmen verbleiben stets im Lager-Turm, während die einzelnen Fachbodenelemente quasi Transfereinheiten darstellen, um zur Einlagerung eines Gegenstandes von der Hubplattform in den Lagerturm respektive vom Lagerturm auf die Hubplattform zur Auslagerung oder Umlagerung innerhalb des Regals verschoben zu werden. In jeden Lagerbodenrahmen sowie die Hubplattform ist daher ein horizontaler Linearantrieb integriert, um die Fachbodenelemente von der Hubeinrichtung auf den Lagerbodenrahmen respektive vom Lagerplatz auf die Hubeinrichtung im Aufzugturm zu verlagern. Der Linearantrieb ist als Zahnstangenantrieb dergestalt ausgeführt, dass die Fachbodenelemente mit Zahnstangen versehen sind und somit das passive Element der Lineareinheit darstellen. Dementsprechend befinden sich in den Lagerbodenrahmen und der Hubplattform die Antriebseinheiten mit den in den Zahnstangen kämmenden Zahnritzel. Indem keine starre Verbindung zwischen den Fachbodenelementen und der Tragstruktur des Regals besteht, sind die Fachbodenelemente nicht an ein bestimmtes Regalmodul gebunden und können als universelles Ladehilfsmittel, ähnlich einem Skid, verwendet werden. In der Grundausführung stellen die Fachbodenelemente eine ebene Plattform dar. Zur Einlagerung fertig- oder teilmontierter Fahrzeuge, an denen bereits die Räder angebracht sind (Rolling Chassis), kann somit über die automatische Entladefunktion der Mobilen Montageinsel ein direktes Überladen vom Werkstückträger in das Dynamische Lager erfolgen. Zur Aufnahme von Bodenmodulen und Karosserien können die Fachbodenelemente mit entsprechenden Haltevorrichtungen, wie sie auch am Fahrzeugträger der Mobilen Montageinsel, vgl. Abbildung 5.14, zu finden sind, versehen werden. Daher kann das Dynamische Lager auch in einem der Endmontage vorgelagerten Bereich als Pufferlager für Karosserien und Bodenmodule dienen.

5.3 Mobiler Supermarkt mit Mini-Regalbediengerät

Speziell ausgerichtet auf die Anforderung, Bauteile mit hoher Verbaquote 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 Verbaort 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 aus einem in mobilen Regalmodulen befindlichen Teileportfolio erst am Verbaort herzustellen, um dadurch der Anforderung nach Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Materialversorgung am Verbaort Rechnung zu tragen. Das Prinzip der Materialbereitstellung des Mobilen Supermarktes ist folglich darauf fokussiert, die Synchronisation mit dem Produktionsprogramm erst an der Stelle, wo der physische Bedarf in der Logistikkette entsteht – Just-in-Real-Time – herzustellen.⁸⁸ Dies ist insofern von zentraler Bedeutung, als dass sich das Produktionsprogramm unter der Maßgabe der Prozessflexibilität jederzeit ändern kann.

Die Namensgebung Mobiler Supermarkt liegt primär in der ortsbeweglichen Ausführung der Komponenten begründet. Das Gesamtsystem setzt sich aus insgesamt drei Einzelkomponenten zusammen, die auch unabhängig voneinander betrieben werden können, erst jedoch im Verbund ein mobiles AKL respektive mobilen Supermarkt bilden. Auf diese Weise wird der Forderung nach Modularisierung Rechnung getragen. So umfasst der Mobile Supermarkt, siehe Abbildungen 5.39 und vgl. Abbildung 4.3, 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. Der Verbund aus Kommissioniereinheit, mobilen Regalmodulen und dem FTF zu deren Transport stellt insofern faktisch eine mobile und kleinskalige Form eines Logistik-Supermarktes dar, bei dem die Kommissionierung automatisiert nach dem Ware-zur-Person-Prinzip in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration mit einem semimobilen Mini-Regalbediengerät erfolgt. Das Hardwarekonzept des Mobilen Supermarktes beruht im Sinne der Modularisierung auf der Trennung der Grundfunktionalitäten Lagern, Transportieren und Kommissionieren, indem diese durch nicht miteinander verbundene und austauschbare Komponenten erfüllt werden. Insofern besteht keine physische Kopplung zwischen den einzelnen Bestandteilen, so dass nicht nur eine anwendungs- sondern auch kurzfristig bedarfsfallorientierte Anpassung während des Betriebes vorgenommen werden kann. Dies betrifft nicht nur den Standort, sondern vielmehr infolge der Funktionstrennung insbesondere die Konstellation sowie Art der verwendeten Regalmodule.

Das Mini-Regalbediengerät ist frei stehend und besitzt keine Verankerung zur baulichen Substanz, insbesondere der Bodenplatte – respektive Decke –, des Aufstellungsortes. Die Regalmodule sind mit einem Teileportfolio, welches sich in VDA-KLT befindet, bestückt und werden durch ein kompaktes FTF zum Regalbediengerät transportiert und dort an dessen Fahrschiene ausgerichtet und positioniert. In der in Abbildung 5.39 dargestellten Konstellation befindet sich auf der einen Seite des Mini-Regalbediengerätes die Entnahmeseite, auf der zwei der mobilen Regalmodule platziert sind, wohingegen sich die Ausgabeseite auf der gegenüberliegenden Seite befindet. Es besteht somit eine Trennung zwischen Arbeitsraum

⁸⁸ Vgl. Wehking et al. 2018 [Weh18].

des Montagepersonals und des Bereichs zur Anlieferung und Lagerung, respektive dem Fahrbereich der FTF, vgl. auch schematische Darstellung eines Workflowsegmentes in Abbildung 4.2.

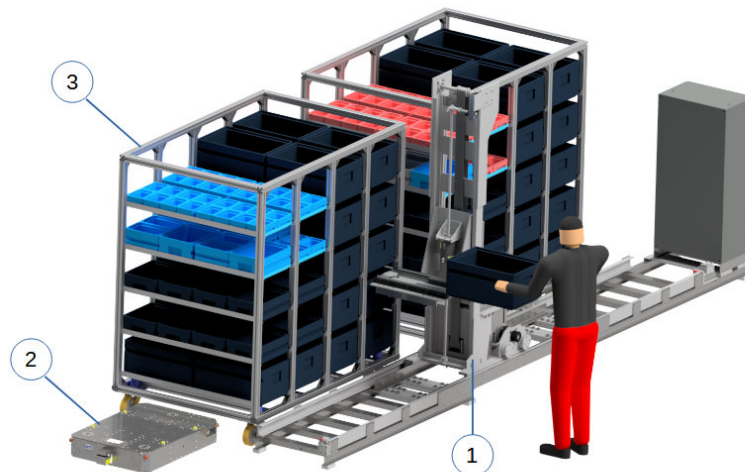


Abbildung 5.39: Konzept des Mobilen Supermarktes, bestehend aus Mini-Regalbediengerät (Pos.1), FTF (Pos.2) und mobilen Regalmodulen (Pos.3). Materialübergabe in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration.

Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund des universellen und zu dessen Längsachse symmetrischen Aufbaus des Mini-Regalbediengerätes ist es möglich, die Regale an beiden Längsseiten zu positionieren, um damit z.B. die Belieferungs- und Ausgabeseite des in Abbildung 5.39 dargestellten Anwendungsszenarios zu wechseln. Ferner ist es bspw. aber auch möglich, auf beiden Längsseiten der Kommissioniereinheit Regale zu platzieren und somit die Ausgabe auf die Stirnseite am Schienenende zu verlagern. Insofern kann die Systemarchitektur nach anwendungsspezifischen Gesichtspunkten, aber auch den räumlichen Gegebenheiten des Aufstellungsortes, entsprechend angepasst werden.

Das Konzept des Mobilen Supermarktes konnte durch Förderung des Landes Baden-Württemberg⁸⁹ in das Prototypenstadium überführt werden.⁹⁰ Alle drei Komponenten wurden als Funktionsprototypen am Institut für Fördertechnik und Logistik aufgebaut, siehe Abbildung 5.40, um die grundlegende physische Umsetzbarkeit der Einzelkomponenten und des Konzeptes insgesamt zu untersuchen. Dies betrifft einerseits die konstruktiv funktionale Realisierbarkeit der Gestaltung jeder einzelnen Funktionskomponente des Mobilen Supermarktes im Hinblick auf die Vereinbarkeit der bestehenden Anforderungen, andererseits aber auch in besonderer Weise deren Interaktion, derer es letztlich bedarf, um die Gesamtfunktionalität eines mobilen AKL zu erfüllen. Das Gesamtsystem umfasst die Teilfunktionalitäten Lagern, Transportieren und Kommissionieren. Das Funktionsprinzip des

⁸⁹ Projekt „LeitFlexPro“ - Erstellung eines Leitfadens zur Darstellung der Umsetzung von neuartigen Logistikelementen in mittelständischen Unternehmen. Gefördert durch das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg. Förderzeitraum: 09/2015 bis 10/2016.

⁹⁰ Vgl. Hofmann 2018 [Hof18], Hofmann 2019 [Hof19], Hofmann 2020 [Hof20A], [Hof20B], [Hof20C] sowie Hofmann et al. 2020 [HoK20] und Wehking et al. 2020 [Weh20B].

Mobilem Supermarktes beruht auf drei zunächst voneinander unabhängigen Komponenten, welche jeweils eine dieser Teilfunktionalitäten abbilden, so dass erst durch das orchestrierte Zusammenspiel dieser Komponenten ein wie in Abbildung 5.39 dargestelltes Ware-zur-Person Materialflusssystem gebildet wird. Gleichwohl stellt jede Teilfunktionalität für sich zentrale Bestandteile eines jeden intralogistischen Materialflusssystems dar, so dass die Verwendbarkeit der Komponenten auch außerhalb der Systemarchitektur des Mobilem Supermarktes gegeben ist und insofern nicht nur eine strukturelle Flexibilität im Sinne der Mobilität der Komponenten, sondern auch eine in prozessualer Hinsicht, den Anwendungskontext betreffend, besteht. In prozessualer Hinsicht ist im Kontext des Mobilem Supermarktes grundsätzlich zwischen der Materialzuführung zum Standort der Kommissioniereinheit, welche durch die Regalmodule und Fahrerlose Transportfahrzeuge erfolgt, sowie der Materialversorgung des eigentlichen Verbrauchers zu differenzieren. Die Regalmodule erfüllen die Lagerfunktion, wobei deren Bereitstellung und Transport durch ein FTF erfolgt. Die Funktionalität des Handlings, der Materialein-/auslagerung sowie Ware-zur-Person-Kommissionierung wird durch das Mini-Regalbediengerät bewerkstelligt. Während diese automatische Kommissioniereinheit eine semimobile Anlage, deren Standort zwar verlagert werden kann, es hierfür aber Hilfsmittel bedarf, darstellt, sind die Komponenten der Lagerung und des Transports vollumfänglich mobile Bestandteile des Gesamtsystems. Insofern verfügen nicht alle Komponenten des Mobilem Supermarktes über ein gleich hohes Maß an Mobilität.



Abbildung 5.40: Prototyp des Mobilem Supermarktes.
Quelle: Eigene Darstellung.

Der in den Abbildungen der Ziff. 5.40 ersichtliche Prototyp stellt die funktionale Realisierung der bereits in Abbildung 5.39 gezeigten Konstellation mit zwei auf einer Längsseite des Mini-Regalbediengerät angedockten Regalmodulen, die durch ein Schlepper-FTF bewegt werden, dar.

Eine detaillierte Beschreibung der Komponenten in technisch-konstruktiver Hinsicht erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln, wobei sich Kapitel 5.3.1 zunächst auf die funktionalen Bestandteile der Lagerung und des Transports, sprich die Regalmodule und das FTF, innerhalb des Systems Mobilem Supermarkt beschränkt. Hinsichtlich des Aufbaus und der Konstruktion der Kommissioniereinheit in Gestalt des Mini-Regalbediengerätes sei gesondert auf Kapitel 6 verwiesen.

5.3.1 Technische Ausgestaltung der mobilen Transport- und Lagerungskomponenten

Wie bereits oben beschrieben, umfasst das System des Mobilen Supermarktes die Teilfunktionalitäten Lagern, Transportieren und Kommissionieren. Das Funktionsprinzip beruht auf drei zunächst voneinander unabhängigen Komponenten, welche diese Teilfunktionalitäten abbilden, wobei die Materialzuführung zum Standort der Kommissioniereinheit durch auf Rollen gelagerte Regalmodule erfolgt, die von einem FTF transportiert werden. Die Regalmodule sind mit einem doppeltiefen Aufbau mit vier Spalten und fünf Zeilen konzipiert, wobei deren Grundraster auf VDA-KLT⁹¹ mit Grundmaß 600 x 400 mm ausgelegt ist. Dementsprechend weisen die wie in Abbildung 5.41 dargestellte Ausführungsvariante der Regalmodule insgesamt 40 Einlagerungsplätze für KLT bzw. Tablare dieses Grundmaßes auf. Das Raster ist damit ebenso für KLT des Grundmaßes 300 x 400 mm nutzbar. Legt man die in der VDA Empfehlung Nr.4500 ausgewiesenen Nutzlasten samt Eigengewicht der Behälter zugrunde, resultiert hieraus in Abhängigkeit der gewählten Belegungsstrategie eine Nutzlast von bis zu 1200 kg der Regalmodule.

5.3.1.1 Mobile Regalmodule

Die Regalmodule sind aus Aluminium-Konstruktionsprofilen aufgebaut, wodurch ein einfach zu montierender und zugleich kosten- und gewichtsparender Aufbau erzielt wird. Die für den Prototyp verwendeten Nuten-Konstruktionsprofile ermöglichen einerseits eine im Vergleich zu einer Schweißkonstruktionen mit wenigen und günstigen Hilfsmitteln vollziehbare Montage der vorkonfektionierten Profile, andererseits ermöglichen die Nutenprofile auch nachträgliche geringfügige Anpassungen der Fachhöhen, indem die vertikale Position der Fachbodenschienen innerhalb der Tragstruktur des Regals über eine kraftschlüssige Verbindung variabel eingestellt werden kann. Diese Variabilität war insbesondere im Hinblick auf das Prototypenstadium ein Entscheidungskriterium für einen Aufbau mit besagten Nuten-Konstruktionsprofilen, wenngleich eine Stahlkonstruktion schlanker dimensioniert werden könnte. Gleichwohl kann das Anpassungsvermögen der Regale in Form der Variabilität der Fachhöhe auch in realen Anwendungsfällen einen beachtlichen qualitativen Vorteil darstellen.

91 Der Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA) beschreibt in seiner unverbindlichen Empfehlung Nr. 4500 ein einheitliches System von manuell und maschinell handhabbaren kunststoffbasierten Kleinladungsträgern (KLT). Diese Empfehlung definiert u.a. Grundmaße, Funktions- und Erscheinungsmerkmale sowie Materialbeschaffenheit und Nutzlasten der Ladungsträger.



Abbildung 5.41: Mobile Regalmodule für die Teileversorgung und -lagerung im Mobilien Supermarkt.

Links: Aufbau der Regalmodule aus Aluminium-Nutenprofilen.

Rechts: Prototyp mit Beladung.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nicht nur für den Bau des Prototyps, sondern auch im Hinblick auf eine etwaige Serienanwendung bestand eine der Hauptanforderungen darin, das Regal nicht nur bezüglich dessen Tragkonstruktion sondern insgesamt kostengünstig zu gestalten. Dies ist insoweit von zentraler Bedeutung, als dass die Regale auch als Ladungsträger für die Transportlogistik vom Zulieferer zum OEM dienen können sollen und dementsprechend nicht nur aufgrund der intralogistischen Prozesse einer natürlichen Abnutzung unterliegen, da die Verlade- und Umschlagvorgänge in der Transportlogistik auch zu Beschädigungen führen können. Aus diesem Grund sollte der Austausch und die Neubeschaffung der Regalmodule mit einem minimalen Investitionsmittelbedarf verbunden sein. In Konsequenz dessen wurden die Regale so konzipiert, dass diese selbst über keine Intelligenz, Sensorik und elektrische Energiespeicher verfügen.

Die Flächenbeweglichkeit der Regale wird über vier je 360° schwenkbare Lenkrollen realisiert, vgl. Abbildung 5.41 sowie 5.46, die elektromagnetisch betätigt gebremst werden. Die Regale verfügen somit über eine eigene Feststellbremse, um getrennt vom FTF gegen Wegrollen gesichert werden zu können. Die Feststellbremse wirkt sowohl auf die Rollen, als auch deren Drehkranzlager. Die Betätigung der Bremsen erfolgt durch das FTF, so dass dieses auch die elektrische Energie zum Lüften der Totmannbremsen zur Verfügung stellt. Da es sich um keine Betriebsbremse, sondern lediglich eine Feststellbremse handelt, ist regalseitig somit keine zur Betätigung der Bremsen benötigte Steuerung samt Energiequelle verbaut. Um dennoch ein manuelles Verschieben der Regale zu ermöglichen, ist ein Handbedienelement für die Steuerung der Bremsen anzuschließen. Für den automatisierten Betrieb, bei dem die Regale durch das hierfür konzipierte Schlepper-FTF transportiert werden, bedarf es daher nicht nur einer Kopplung zur mechanischen Kraftübertragung, sondern auch einer elektrischen Schnittstelle für die Energie- und Signalübertragung zur Ansteuerung der Feststellbremsen des Regals durch das FTF. Beide Funktionalitäten sind in ein zentrales Kupplungselement der Regale integriert. Die zur Fortbewegung erforderliche Übertragung von Längs- und Querkräften zwischen dem Schlepper-FTF und den Regalen erfolgt rein formschlüssig mit einem Freiheitsgrad in vertikaler Richtung, da die Regale vom FTF lediglich

gezogen und nicht angehoben werden. Die Verbindung erfolgt am Prototyp über eine Kupplungsplatte, die mit vier Löchern versehen ist, in die entsprechend komplementäre Zapfen des FTF einfahren, vgl. Abbildung 5.43.

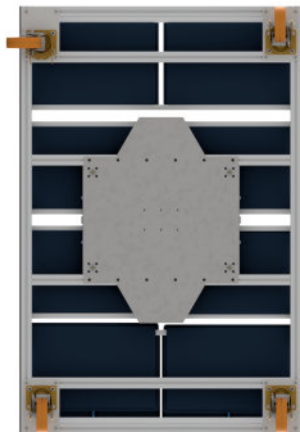


Abbildung 5.42: Untenansicht Regalmodul.
Quelle: Eigene Darstellung.

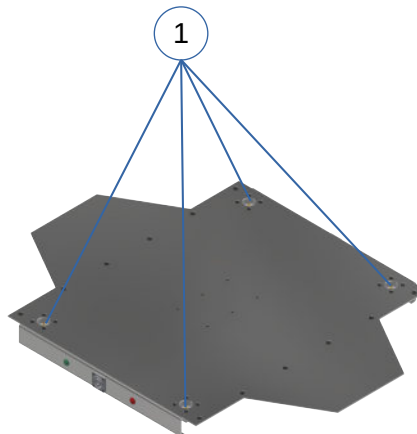


Abbildung 5.43: Kupplungsplatte der Regalmodule.
Pos.1: 4x Kupplungszapfenlöcher
Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Übertragung der Betriebskräfte für das Transportieren der Regale unterliegen diese Zapfen lediglich einer Schub- und Biegebeanspruchung. Der Freiheitsgrad in vertikaler Richtung ist insofern vonnöten, als dass dadurch ein Spiel zum Ausgleich von Bodenunebenheiten besteht, welche beim Überfahren sonst zu Verspannungen führen könnten. Diese Thematik kommt insoweit zum Tragen, als dass das FTF zentral unter den Regalmodulen positioniert ist und sich die Achsen des Regals in einem Längsabstand von 1580 mm zu jenen des FTF befinden. Überfahren in Fahrtrichtung gesehen die Räder des Regals eine Kuppe, bzw. den Beginn einer Rampe, verändert sich dadurch die vertikale Relativposition und Winkellage zwischen den gekoppelten Elementen. Bestünde eine feste Verbindung ohne Freiheitsgrad in vertikaler Richtung, hätte dies am FTF eine Rad- bzw. Achsentlastung – und im schlechtesten Fall ein Abheben dieser – zur Folge, so dass Antriebs- und Lenkkräfte nur noch in vermindertem Umfang bzw. gar nicht mehr übertragen werden könnten. Selbst wenn es nicht zum Abheben der Räder am FTF käme, könnte die verminderte Radlast einen für die Antriebs- und Lenkregelung unzulässig hohen Schlupf zur Folge haben. Der andere Extremfall besteht darin, wenn das Regal mit seiner in Fahrtrichtung gesehen Vorderachse bereits in oder durch eine Senke fährt, was im Falle einer starren Verbindung zum FTF eine Erhöhung der Normalkraftabstützung und ggf. Überschreitung der zulässigen Achslast am FTF zur Folge hätte. Um dies zu verhindern, sind die Kupplungszapfen des FTF zusätzlich zu dem vorhandenen Vertikalspiel in der Kupplung federnd gelagert. Dies ist auch insoweit geboten, als dass der elektrische Kontakt ebenfalls an die Verbindung der Zapfen zu der Kupplungsplatte geknüpft ist und schon bereits deshalb der physische Kontakt zwischen diesen beiden Elementen nicht abreißen darf. Wäre dies der Fall, fällt die Totmannbremse der Rollen des Regals ein, so dass auch während der Fahrt bei einem unbeabsichtigten Verlust der mechanischen Verbindung von FTF zu Regal dieses sicher zum Stillstand gebracht wird. Die Feststellbremsen sind dementsprechend hinsichtlich deren Bremskraft als Notbremsen ausgelegt.

5.3.1.2 Schlepper-FTF

Das FTF, das innerhalb des Systems „Mobiler Supermarkt“ als Transportelement für die Regalmodule zum Einsatz kommt, stellt eine Eigenkonstruktion des IFT dar. Zwar sind aus dem Stand der Technik, vgl. Kapitel 2.4, hinlänglich Systeme bekannt, bei denen fahrbare Regale durch ein FTF transportiert werden, jedoch werden meistens in den bekannten Ausführungsbeispielen die Regale hierzu vom Boden angehoben, so dass spezifisch für diesen Anwendungszweck konzipierte Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Diese Systeme bleiben bezüglich der Nutzlastkapazität von ca. 500 kg⁹² signifikant hinter den hier vorliegenden Anforderungen zurück. Dennoch bauen die in diesen Konstellationen verwendeten Fahrzeuge weitaus weniger kompakt, da deren Tragkonstruktion infolge der direkten Aufnahme der Nutzlast entsprechend massiver konstruiert werden müssen. Dies betrifft einerseits sämtliche Bestandteile der tragenden Chassisstruktur, die bzgl. der translatorisch zu beschleunigenden Masse zum Tragen kommt, aber auch die rotatorisch zu beschleunigenden Massen, wie z.B. Antriebsräder und Wellen. Damit einher geht zwangsläufig ein erhöhter Zugkraftbedarf für das Beschleunigen der Systemmasse, was größer dimensionierter Antriebe mit entsprechend bemessener Energiespeicher bedarf. Gleichwohl muss das Verhältnis zwischen Eigenmasse des schleppenden Fahrzeuges und der zu ziehenden Nutzlast im Hinblick auf die Kraftschlussverhältnisse gewahrt sein und kann nicht beliebig groß gewählt werden. Das Schlepper-FTF ist als Plattformfahrzeug, vgl. Abbildung 5.44 mit ebener Oberfläche konzipiert, was eine Grundvoraussetzung für eine universelle Verwendbarkeit darstellt.

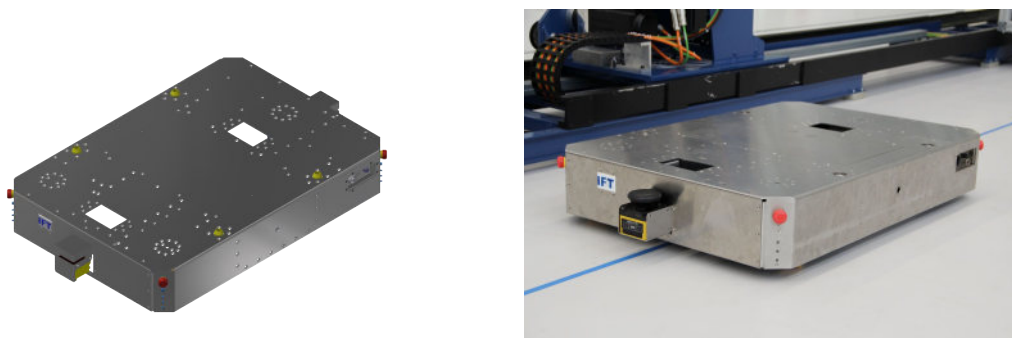


Abbildung 5.44: Aufbau des Schlepper-FTF.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Flächenbeweglichkeit wird über drei unabhängige Schwenkantriebe, vgl. Abbildung 5.45, bei der der Fahr- und Lenkantrieb eine Einheit bilden, realisiert.

⁹² Vgl. Ulrich und Albrecht 2019 [UA19].

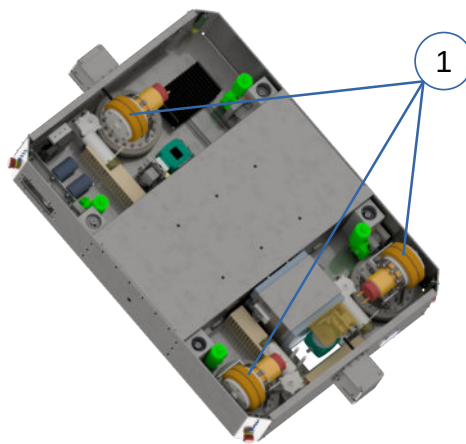


Abbildung 5.45: Ansicht von unten des Schlepper-FTF mit drei Fahr-/Lenkantrieben (Pos.1).
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Dimensionierung der Antriebseinheiten basiert primär auf den einwirkenden statischen Lasten, sowie den im Fahrbetrieb zu übertragenden Antriebskräften. Da die Tragfähigkeit von Flurförderzeugrädern mit Polyurethan-Vollmateriallaufbelägen mit deren Durchmesser und Breite korreliert, ist im Hinblick auf die von den Fahrtriebmotoren aufzubringenden Drehmomente eine Konstruktion von Vorteil, bei der die Nutzlast in Gestalt der Regalmodule nicht direkt von dem FTF aufgenommen werden muss und dementsprechend ein kleiner Raddurchmesser gewählt werden kann, vgl. Formel (4) auf Seite 88. Die dynamische Auslegung der Fahrtriebe erfolgt anhand der im Betrieb aufzubringenden Antriebskräfte zur Deckung des Zugkraftbedarfs. Für den Zugkraftbedarf $F_{Z,erf}$ bei beschleunigter Steigungsfahrt gilt unter Vernachlässigung des Einflusses der Trägheit rotatorischer Massen sowie unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes aufgrund einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 1,5 m/s:

$$F_{Z,erf} = m \cdot a + m \cdot g (\cos \alpha \cdot f_R + \sin \alpha) \quad (3)$$

$F_{Z,erf}$	Zugkraftbedarf	[N]
m	zu beschleunigende Masse	[kg]
a	Beschleunigung	[m/s ²]
g	Gravitationskonstante	[9,81 m/s ²]
α	Steigungswinkel	[°]
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	[]

Für die zu beschleunigende Regalmasse werden 1.350 kg, die sich aus der Eigenmasse des Regalgestells sowie der Nutzlast zusammensetzt, zugrunde gelegt. Weiter werden als Steigungswinkel 1,15°, was einer Rampensteigung von 2% entspricht, sowie eine Beschleunigung von 0,15 m/s² angesetzt. Hinsichtlich des Rollwiderstandes der mit Polyurethanlaufbelag versehenen Rollen wird ein mittlerer konservativer Ansatz in Höhe von 1,5% der einwirkenden Normalkraft berücksichtigt. Der zum Beschleunigen eines voll beladenen Regalmoduls aus dem Stand in einer Steigung mit 2% erforderliche Zugkraftbedarf berechnet sich gem. Formel (3), wie folgt:

$$F_{Z,erf,Regal} = m_{Regal} \cdot a + m_{Regal} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 [\cos(\alpha) \cdot f_R + \sin(\alpha)]$$

mit

$$\begin{aligned} m_{Regal} &= 1350 \quad [kg] \\ a &= 0,15 \quad [m/s^2] \\ \alpha &= 1,15 \quad [^\circ] \\ f_R &= 0,015 \quad [] \end{aligned}$$

folgt

$$\begin{aligned} F_{Z,erf,Regal} &= 1350 \text{ kg} \cdot 0,15 \text{ m/s}^2 + 1350 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 [\cos(1,15^\circ) \cdot 0,015 + \sin(1,15^\circ)] \\ &= 202,5 \text{ N} + 13243,5 \text{ N} (0,015 + 0,02) \\ &= \underline{665,98 \text{ N}} \end{aligned}$$

Für den erforderlichen Zugkraftbedarf des Gespanns, bestehend aus Regalmodul und dem Schlepper-FTF folgt dann:

$$F_{Z,erf,Gespann} = m_{FTF} \cdot a + m_{FTF} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 [\cos(\alpha) \cdot f_R + \sin(\alpha)] + F_{Z,erf,Regal}$$

Das Eigengewicht des FTF beträgt 150 kg, so dass mit

$$\begin{aligned} m_{FTF} &= 150 \quad [kg] \\ F_{Z,erf,Gespann} &= 22,5 \text{ N} + 1471,5 \text{ N} (0,015 + 0,02) + 668,98 \text{ N} \\ &= \underline{761,90 \text{ N}} \end{aligned}$$

folgt.

Von dem Schlepper-FTF muss somit eine Zugkraft von ca. 762 N aufgebracht werden, um das Gespann aus dem Stillstand in einer Steigung zu beschleunigen. Das zur Verfügung stehende Zugkraftangebot des FTF ist einerseits von den Kenndaten des Antriebes abhängig, andererseits stellen diese Werte lediglich theoretisch realisierbare Werte dar, da die Kraftschlussverhältnisse des Rad-Bodenkontaktes ggf. die Limitation der maximal übertragbaren Zugkraft darstellen. Für die folgende Berechnung wird vereinfacht von einer gleichmäßigen Verteilung des Eigengewichts des Schlepperfahrzeugs auf alle drei Antriebsräder ausgegangen. Die an einem Antriebsrad angreifenden Kräfte sind, wie in Abbildung 5.46 dargestellt, die auf das Rad einwirkende Gewichtskraft, das antreibende Moment sowie die Reaktionskraft in der Aufstandsfläche des Rades, dem sogenannten Latsch.

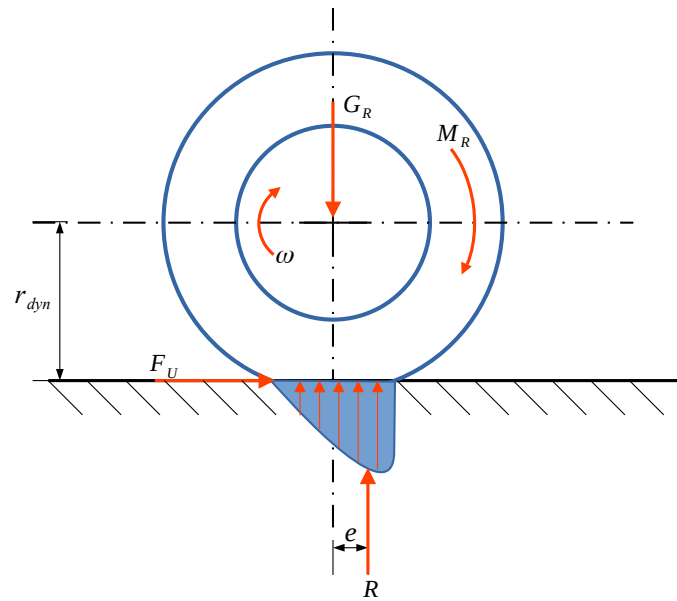


Abbildung 5.46: Kräfte am angetriebenen Rad.

G_R	Radlast	$[N]$
M_R	Antriebsmoment	$[Nm]$
F_U	Umfangskraft	$[N]$
R	Reaktions-/Normalkraft	$[N]$
ω	Kreisfrequenz	$[s^{-1}]$
e	Exzentrizität	$[m]$
r_{dyn}	dynamischer Radhalbmesser	$[m]$

Quelle: Eigene Darstellung.

Für die erforderliche Umfangskraft F_U gilt:

$$F_{U, erf} = M_R \cdot r_{dyn} \geq F_{Z, erf, Gespann} \quad (4)$$

wobei die maximal übertragbare Zugkraft bzw. die an der Kraftschlussgrenze maximal übertragbare Umfangskraft mit dem Reibungswert μ und der Reaktionskraft R

$$F_{Z, max} = F_{U, max} = R \cdot \mu \quad (5)$$

ist.

Die Tragfähigkeit von Antriebs-, Last- und Lenkrädern an Flurförderzeugen korreliert mit der Härte deren Bandage bzw. des Laufbelages. Vielfach bestehen diese aus Polyurethan-Vollmaterial mit Härtegraden von 90° Shore A und höher. Durch die Härte des Bandagenmaterials kann Einfluss auf die infolge der einwirkenden Last und Fahrgeschwindigkeit resultierende Erwärmung genommen werden, indem, die in Abbildung 5.46 dargestellte Exzentrizität e mit der Verformung des Bandagenmaterials im Latsch und damit auch der Rollwiderstand korreliert, siehe nachfolgende Formel (6).

$$f_R = \frac{e}{r_{dyn}} \quad (6)$$

Der Rollwiderstandsbeiwert f_R gem. Formel (6) ist insofern eine Folge der Verformung des Laufbelages der Räder und Rollen, vgl. Abbildung 8.1 und charakterisiert somit die innere Reibung. Mit zunehmender Härte des Bandagenmaterials geht zunächst eine geringere Verformung und damit Exzentrizität einher, was in einer höheren mechanischen Belastbarkeit des Laufbelages resultiert, da die thermische Grenztemperatur, die zur Verflüssigung des Materials führt, im Vergleich zu einem weicheren Material erst später erreicht wird. Hinsichtlich des für die Kraftschlussverhältnisse verantwortlichen Reibwertes μ besteht jedoch aufgrund der Ausgangshärte dieser Vollmaterialaufbeläge ein fundamentaler Unterschied zu z.B. kautschukhaltigen Luftreifen aus dem Automobilbereich. Bei Versuchen auf dem Radprüfstand des IFT wurden für das an dem Schlepper-FTF verwendete Bandagenmaterial ein Reibwert von 0,3 beim Befahren eines flügelgeglätteten Industrie-Estrichbodens gem. DIN EN 18560-7 ermittelt. Für die maximal übertragbare Zugkraft des Schlepper-FTF folgt damit unter den vorgenannten Steigungsverhältnissen gem. Formel (5) mit

$$\begin{aligned} \mu &= 0,3 \quad [-] \\ F_{Z,max,FTF} &= m_{FTF} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \\ &= 150 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \cos(1,15) \cdot 0,3 \\ &= \underline{441,36 \text{ N} < 762 \text{ N}} \end{aligned}$$

Der Zugkraftbedarf übersteigt in der genannten Konstellation somit die von dem Schlepper-FTF maximal übertragbare Zugkraft. Da eine Reduktion der Regalnutzlast und Beschleunigung, oder aber eine Erhöhung der Eigenmasse des FTF nicht infrage kam, wurde dem Problem konstruktiv dergestalt begegnet, dass die Normalkraft über eine Stützlast der angekoppelten Regalmodule erhöht wird. Dies geschieht über federvorgespannte Zapfen, über die die Verriegelung zwischen FTF und der Kupplungsplatte am Regalmodul erfolgt. Für die erforderliche Stützlast folgt:

$$m_{Stütz,erf} = \frac{F_{Z,erf,Gespann} - F_{Z,max,FTF}}{g} = \frac{762 \text{ N} - 442 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 32,62 \text{ kg}$$

Somit kann bereits durch das Aufbringen einer Anhängestützlast von ca. 33 kg der Zugkraftmangel kompensiert werden. Das Verhältnis aus Anhängelast zu Eigengewicht des FTF beträgt Faktor 9. Insofern konnte durch das Prinzip des reinen Schleppens der Nutzlast einerseits eine äußerst kompakte und kostengünstige, andererseits eine unspezifische Konstruktion des FTF ausgeführt werden.

Unspezifisch dahingehend, als dass das FTF nicht nur speziell für den Regaltransport innerhalb des Anwendungsszenarios des Mobilen Supermarktes konzipiert ist, sondern auch

in anderen Materialflusssystemen in Kombination mit verschiedenen Ladungsträgern eingesetzt werden kann. So ist das Schlepper-FTF in dessen Grundkonfiguration auch zum Transport von z.B. Warenkörben, Sonderladungsträgern und Kleinladungsträgern, wie in Abbildung 5.47, einsetzbar, vgl. hierzu auch [Pop18].

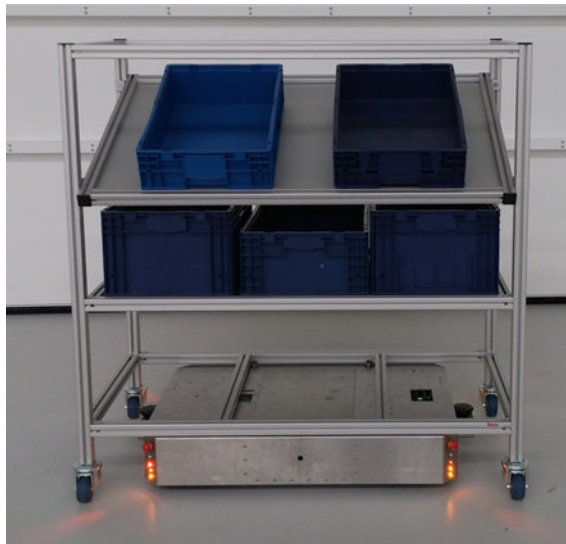


Abbildung 5.47: Schlepper-FTF mit Warenkorbgestell / Sonderladungsträger.
Quelle: [Pop18].

Darüber hinaus ist das kompakte Schlepper-FTF aufgrund seiner unspezifischen und universellen Gestaltung nach dem Baukastenprinzip „Trägerfahrzeug mit Anbaugerät“ für weitere Anwendungsszenarien geeignet, wodurch die Typenvielfalt der eingesetzten FTF in einem produktionslogistischen Gesamtsystem reduziert werden kann. So ist es bspw. möglich, das FTF mit einer als Modul aufgebauten Kommissioniereinheit zu versehen, wie in Abbildung 5.48 dargestellt. Bei dieser – bisher noch nicht als Prototyp realisierten – Variante des Mobilen Supermarktes, weist die mobile Ein-/Auslagerungseinheit somit einen noch höheren Grad an Layoutflexibilität auf, indem die Mobilitätsanforderung an die Kommissioniereinheit durch ein Fahrerloses Transportfahrzeug bewerkstelligt wird⁹³ und daher eine vollumfänglich permanent autonome Ortsbeweglichkeit besteht.

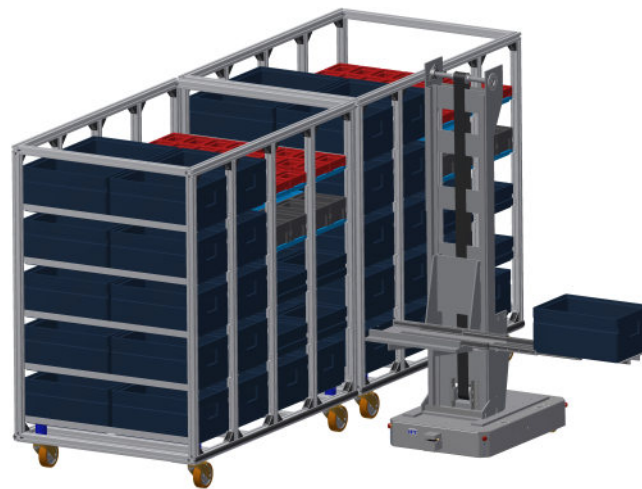


Abbildung 5.48: Mobiler Supermarkt mit Kommissioniereinheit auf Basis eines FTF.
Quelle: Eigene Darstellung.

Dem Prinzip des offenen Layouts mit intelligenter Pfadwahl der Montageträger folgend, können mit dieser Ausführungsvariante weitere Zwangsbedingungen in der Materialzuführung zum Montageobjekt aufgelöst werden, wodurch ein weiterer Freiheitsgrad hinsichtlich Layout- und Strukturflexibilität geschaffen wird.

⁹³ Vgl. Hofmann et al. 2020 [HoK20] und Wehking et al. 2020 [Weh20B].

6 Konstruktion des Mini-Regalbediengerätes

Primäres Ziel bei der Konstruktion des Mini-Regalbediengerätes war es, eine nicht-ortsfeste Anlage zu schaffen⁹⁴, für deren Betrieb lediglich eine Stromversorgung als Infrastruktur vorhanden sein muss. Sämtliche Technik ist daher maschinenseitig immanent und die Konstruktion freitragend, so dass das Mini-RBG mittels eines Staplers oder Handgabelhubwagens umgezogen werden kann, siehe Abbildung 6.1.

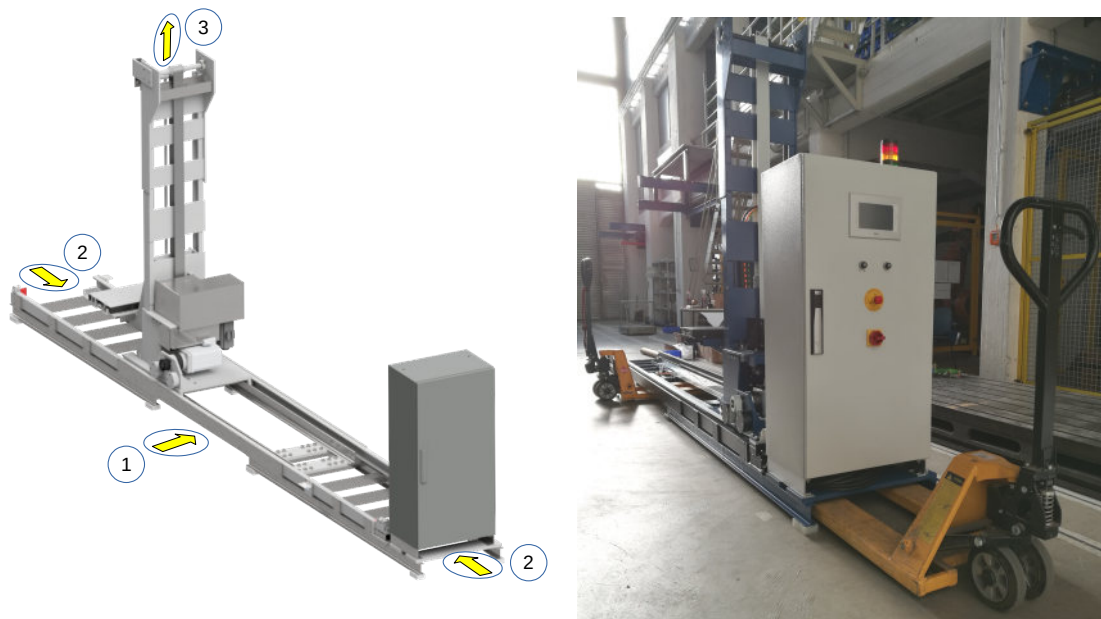


Abbildung 6.1: Hebe- und Anschlagpunkte am Mini-RBG.

Pos.1: Punkt zum Anheben des Mini-RBG quer zur Längsachse mit einem Gabelstapler/ Gabelhubwagen.

Pos.2: Hebepunkte an den Stirnseiten des Mini-RBG zum Anheben mit Gabelstapler/ Gabelhubwagen.

Pos.3: Anschlagpunkt zum Heben des Mini-RBG mit einem Kran.

Quelle: Eigene Darstellung.

Hiermit wird der Forderung nach Layoutflexibilität Rechnung getragen. Universalität, sowie eine kompakte Ausführung stellten weitere Primäranforderungen dar, die es konstruktiv umzusetzen galt.

⁹⁴ Vgl. Hofmann 2018 [Hof18], Hofmann 2019 [Hof19], Hofmann 2020 [Hof20A], [Hof20B], [Hof20C], Hofmann et al. 2020 [HoK20] sowie Wehking et al. [Weh20B].

Das Mini-RBG stellt eine Eigenkonstruktion des IFT dar, vom komplexen doppeltief ausfahrenden Teleskoptisch bis hin zu den Umlenk- und Antriebsrollen der Hülltriebe. Nur so konnte es letztlich ermöglicht werden, dass doppeltief (1.200 mm) ein- und ausgelagert werden kann, die benötigte Aufstell- bzw. Gassenbreite des Mini-RBG jedoch lediglich ca. 660 mm beträgt.



Abbildung 6.2: Teleskopachse des Mini-RBG.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Universalität dieses Betriebsmittels ist dahingehend gewährleistet, als dass die Ein-/Auslagerungseinheit unabhängig von den Spezifikationen der Kleinteilebehälter und Tableare mit Grundmaß 600 x 400 bzw. 400 x 300 mm eingesetzt werden kann. Zu deren Handhabung sind keine spezifischen Greifertaschen erforderlich, indem die Behälter lediglich über deren Boden gehandhabt werden. Das Mini-Regalbediengerät besteht aus den Hauptbaugruppen Grundrahmen mit Schiene, Fahrwerk, Hubgerüst, Hubtisch und der darauf befindlichen Teleskopiereinheit, vgl. Abbildung 6.3.

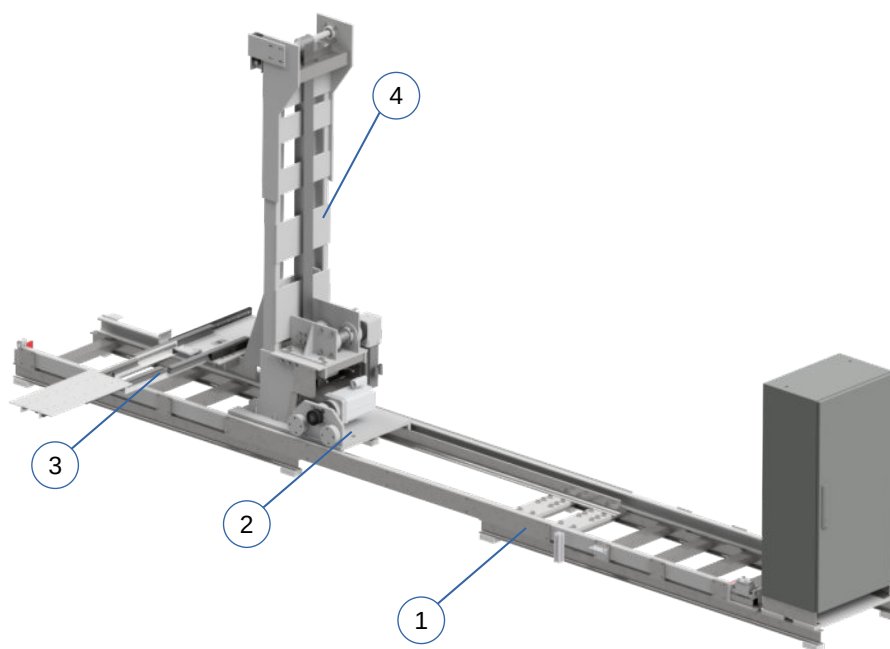


Abbildung 6.3: Hauptbaugruppen des Mini-RBG.

Pos.1: Grundrahmen mit Fahrschiene

Pos.2: Horizontalfahrwerk

Pos.3: Teleskopachse

Pos.4: Hubgerüst mit Hubtisch

Quelle: Eigene Darstellung.

Um die Anforderungen nach einer Nutzlast von 60 kg (bei Beladung des Teleskoptisches mit zwei KLT mit Abmessung 400 x 300 mm) mit hoher Umschlagleistung und freitragender Konstruktion, die ohne Bodenverankerung auskommt, zu realisieren, musste besonderes Augenmerk auf die Schwerpunktlage des Regalbediengerätes gelegt werden. Insofern wurden alle Achsen mit gewichtssparenden formschlüssigen Hülltrieben ausgeführt und die Antriebe zentral positioniert, siehe Abbildung 6.4.

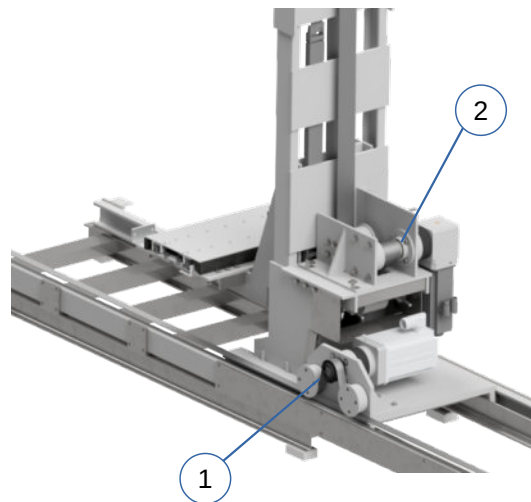


Abbildung 6.4: Horizontal- und Hubantrieb des Mini-RBG mit formschlüssigen Riementrieben.

Pos.1: Horizontalantrieb

Pos.2: Hubantrieb

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Anlage verfügt über eine Schienenlänge von 5.000 mm, vgl. Abbildung 6.5 und ist damit derzeit für die gleichzeitige Be- und Entladung von zwei nebeneinander angeordneten fahrbaren Regalmodulen mit je 40 doppeltief angeordneten Einlagerungsplätzen für VDA-KLT des Typs mit Grundmaß 600 x 400 mm, wie bereits in den Abbildungen 5.39 und 5.40 dargestellt, ausgelegt. Durch die Ausführung des Horizontalantriebs mit endlosem Zahnriemen in Omega-Anordnung und an das Horizontalfahrwerk gebundenem Antrieb, ist die Schienenlänge jedoch beliebig variierbar und für eine größere Anzahl Regalmodule erweiterbar. Die maximale Ein-/Auslagerungshöhe beträgt derzeit 1.800 mm, während die minimal erreichbare Fachbodenhöhe bei ca. 320 mm über Bodenniveau liegt, vgl. ebenfalls Abbildung 6.5.

Auf der Horizontalachse wird in der vorliegenden Konfiguration des Prototyps eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von 2 m/s erreicht, während die Vertikalachse mit 1 m/s und die Teleskopachse mit 0,4 m/s betrieben wird. Durch die hohe Dynamik der Achsbewegungen kann ein wie in Diagramm 6.1 dargestelltes Fahrtspiel mit maximalen Fahrwegen in der Konstellation mit zwei doppeltiefen Regalmodulen, vgl. Abbildung 6.7, in 18 Sekunden absolviert werden. Insofern entspricht dies der maximalen Bereitstellungsdauer für einen Auslagerungsauftrag des Systems unter Zugrundelegung der ungünstigsten Fahrwegkonstellation.

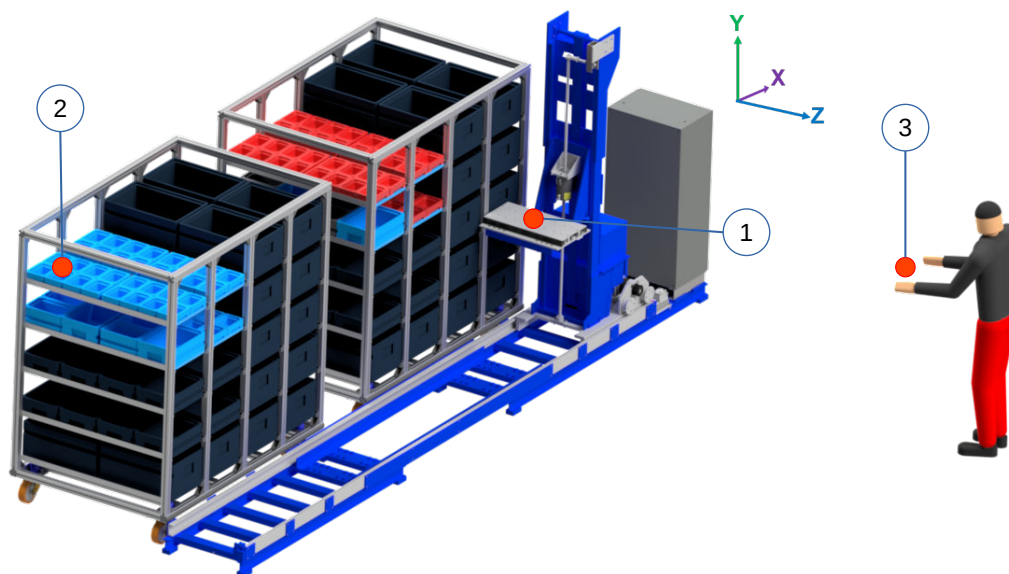


Abbildung 6.7: Fahrwegkonstellation mit maximalen Fahrwegen.
 Pos.1: Startposition am rechten Endanschlag der x-Achse (Position $x = 4200$).
 Pos.2: Zielposition zur Auslagerung eines KLT/Tablars.
 Pos.3: Übergabeposition.

Quelle: Eigene Darstellung.

In Diagramm 6.1 ist der zeitliche Verlauf der Fahrgeschwindigkeiten der Horizontal-, Hub- und Teleskopachse während eines Fahrtspiels mit maximalen Fahrwegen, für eine wie in Abbildung 5.39 ersichtliche Anwendungskonstellation des Mobil Supermarktes unter Zugrundelegung des oben in Abbildung 6.7 ersichtlichen Fahrauftrages aufgezeichnet. Es gelten hierfür die aus der geometrischen Bemessung bekannten maximalen Verfahrswege der Achsen, siehe Abbildung 6.5. Es wird somit vorliegend eine doppeltiefe Auslagerung aus dem in Längs- und Vertikalrichtung ausgehend von der Startposition (Pos.1 in Abbildung 6.7) am weitesten entfernten Regalfach (Pos.2) zugrunde gelegt. Position 1 befindet sich an dem am Schaltschrank befindlichen Endanschlag der x-Achse. Die y-Achse befindet sich auf 800 mm Höhe, was einer ergonomischen Greifhöhe entspricht und aus der dem Fahrauftrag vorausgegangenen kollaborativen Materialübergabeposition entspricht, die z-Achse befindet sich in Neutralstellung ($z = 0$).

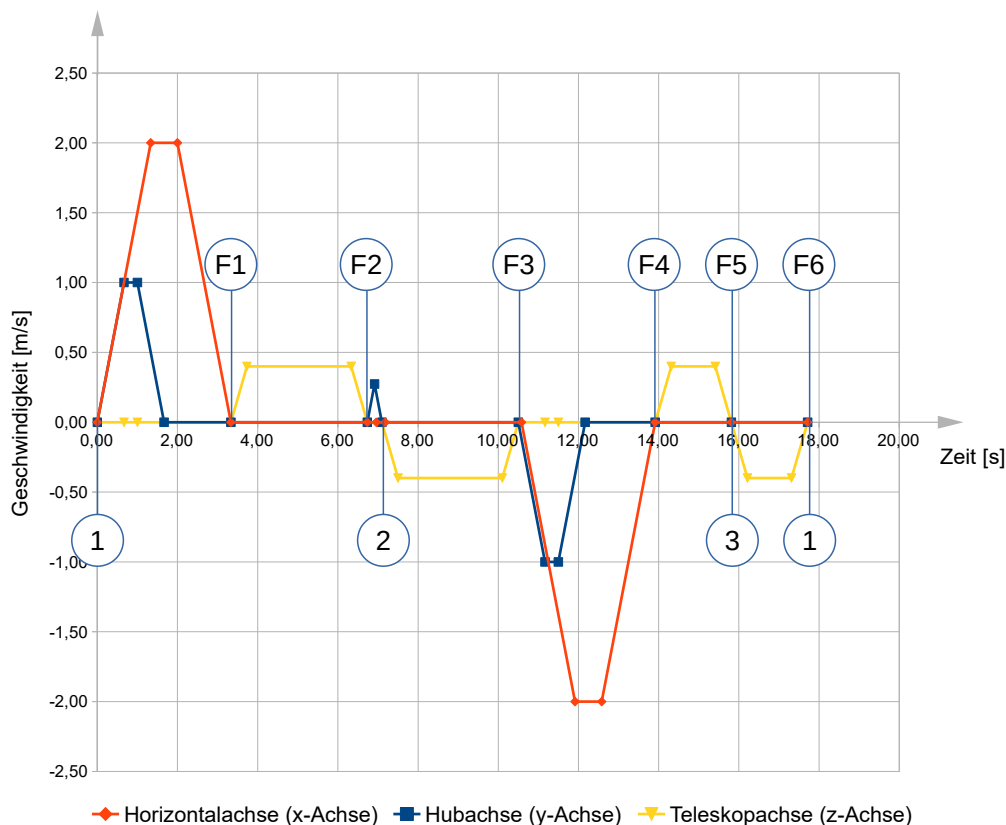


Diagramm 6.1 : Fahrtspiel eines Auslagerungsauftrages des Mini-RBG zu einer Übergabeposition mit maximalen Fahrwegen.

Pos. 1: Position $x = 4200$ mm (Endanschlag Schaltschrank), Position $y = 800$ mm entspricht der vorherigen Übergabeposition, Position $z = 0$.

Pos. F1: x - und y -Koordinate der Zielposition (Pos.2) im Regal ist erreicht.

Pos. F2: Teleskopachse hat die z -Zielkoordinate der Pos.2 erreicht.

Pos. 2: Der an Pos.2 befindliche KLT ist aus dem Regal ausgehoben.

Pos. F3: Teleskopachse wird aus dem Regal zurück in die Grundstellung $z = 0$ gefahren.

Pos. F4: x - und y -Koordinate der Übergabeposition Pos.3 sind erreicht.

Pos. F5: z -Koordinate der Übergabeposition Pos.3 ist erreicht.

Pos. F6: Teleskopachse ist wieder in Grundstellung bei $z = 0$.

Pos.1: Ausgangsposition des Fahrauftrages.

Quelle: Eigene Darstellung.

Das obige Fahrdiagramm zeigt zunächst eine parallelisierte Fahrbewegung der Horizontal- und Hubachse ausgehend vom Startpunkt (Pos.1) in Nulllage der Teleskopachse. Von dort ausgehend erfolgt zunächst eine Parallelfahrt der x - und y -Achse (Pos. F1 im Diagramm) zu den x - und y -Zielkoordinaten der Zielposition (Pos.2 im Diagramm). Danach fährt schließlich die z -Achse an die z -Zielkoordinate des Fahrauftrages (Pos. F2 im Diagramm). Im Folgenden wird der Behälter durch einen Hub von 20 mm der y -Achse aus dessen Tragschiene im Regal angehoben, so dass sich der Behälter vollständig auf dem Teleskoptisch befindet und die Zielposition (Pos.2 im Diagramm) erreicht ist. Im nächsten Schritt fährt die z -Achse in ihre Nulllage (Koordinate $z = 0$) zurück (Pos. F3 im Diagramm). Sobald die Teleskopachse wieder in ihrer Nulllage ist, beginnt eine parallelisierte Fahrbewegung der Horizontal- und der Hubachse zu der x - und y -Koordinate von Pos.3, was der Übergabeposition entspricht. Aus

Gründen der Personensicherheit, vgl. Kap. 8, erfolgt das Anfahren der z-Koordinate der Übergabeposition (Pos.3 im Diagramm) im Anwendungsszenario mit Materialübergabe in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration erst nachdem die x- und y-Achse stillstehen (Pos. F4 im Diagramm). Andernfalls würde sich durch eine parallelisierte Fahrbewegung unter Einbeziehung der z-Achse der Gefahrenbereich vergrößern, was einen höheren Flächenbedarf zur Folge hätte. Die Position F5 markiert somit das Erreichen der z-Koordinate der Übergabeposition (Pos.3). Die letzte zur Vollendung des Fahrtspiels erforderliche Fahrbewegung stellt somit die Rückstellung der z-Achse auf deren Grundstellung (Pos. F6 im Diagramm) dar, so dass damit die dem Fahrauftrag anfänglich zugrundeliegende Startposition (Pos.1) wieder erreicht ist, von der aus der folgende Fahrauftrag initiiert wird. Anhand des Fahrdiagramms ist ersichtlich, dass es hinsichtlich der benötigten Spielzeit unbeachtlich ist, dass von einer Hubhöhe von 800 mm über Bodenniveau, was einer üblichen ergonomischen Übergabehöhe entspricht, gestartet wird und somit nicht der maximale Verfahrweg der y-Achse einfließt. Dies ist dadurch begründet, dass bei einem Fahrauftrag mit maximalem Fahrweg der x-Achse der maximale Zeitbedarf der Hubbewegung beginnend von der Nulllage der y-Achse bei 323 mm über Bodenniveau innerhalb des Zeitbedarfs der x-Achse liegt und folglich hieraus keine Zeitverzögerung für den Beginn der nachfolgenden Fahrbewegung der Teleskopachse entstände, so dass hierdurch kein Mehrbedarf hinsichtlich der Spielzeit zu verzeichnen wäre.

Je nach Anwendungsszenario kann sich die Übergabeposition an einer ortsfesten Übergabestelle befinden oder aber auch variieren, wenn die Übergabe in Kollaboration zwischen Mensch und Maschine erfolgt, bei der der Mensch die Übergabeposition vorgeben kann, vgl. Kapitel 8. Die Bemessung und Auslegung der Ausbringung von vier Behältern/Ladungsträgern binnen 90 Sekunden unter den ungünstigsten – weil maximal weit entfernten – Fahrwegbedingungen entspricht den Anforderungen, die sich bei der Versorgung einer klassischen getakteten Fließbandmontage ergeben, wie sie Popp [Pop18] in seiner Simulation verschiedener Logistikkonzepte zugrundelegte. Hier wurde zur Bewertung der Durchsatzleistung für die Gesamtkonzeption einer flexiblen und wandelbaren Produktion, sowie der einzelnen Hardwarebestandteile, der Vergleich mit einer variantenreichen getakteten Fließbandfertigung aus dem Premiumsegment eines namhaften deutschen Automobilherstellers herangezogen. Gerade hinsichtlich dieser Performanceanforderungen wurde schlussendlich für die erste Prototypenstufe des Mobilien Supermarktes eine semimobile Kommissioniereinheit gewählt. Eine Vergleichbarkeit mit anderen automatisierten Kommissioniersystemen ist an der Stelle nicht möglich, respektive ginge fehl, da aus dem Stand der Technik keine vergleichbaren Systeme mit entsprechender Lagerkapazität, die der direkten Versorgung am Montagearbeitsplatz dienen, existieren. Insofern bildete zur Bemessung der Umschlag- und Ausbringungsleistung ein herkömmliches Regalsystem, aus dem die Montagemitarbeiter:innen die benötigten Teile manuell picken müssen, die Grundlage.

Die Regalmodule werden durch das Schlepper-FTF relativ zum Grundrahmen mit Fahrschiene des Mini-RBG ausgerichtet und an einer vorgegebenen Soll-Position abgestellt. Über eine Referenzfahrt, bei der die volle Schienenlänge befahren wird, werden die Relativpositionen der Regale in x-Richtung des Regalbediengerätes ermittelt. Nach dieser einmaligen Einrichtung verbleibt die Position der Regale unverändert, bis eines oder beide abtransportiert und ersetzt werden. Insofern ist die Relativpositionierung und Ausrichtung zwischen dem Mini-Regalbediengerät und den Regalen nach erfolgter Referenzierung während der Abarbeitung der Fahraufträge stets konstant. Im Gegensatz dazu ist bei der Ausführung der Kommissioniereinheit auf Basis eines FTF für jeden Ein- oder Auslagerungsauftrag, bei dem zumindest die Regalspalte gewechselt werden muss, eine

Neuaustrichtung und Positionierung anhand optischer Sensoren erforderlich. Diese Vorgänge gehen zwangsläufig zu Lasten der Umschlagleistung⁹⁵ des Systems. Insoweit besteht hinsichtlich der Ausgestaltung der Kommissioniereinheit ein Spannungsfeld zwischen Mobilität und Umschlagleistung. Für den hier in Rede stehenden Anwendungsfall wurde die umschlagleistungsorientierte Variante in Gestalt einer semimobilen Kommissioniereinheit gewählt, da keine permanente sondern lediglich eine temporäre Mobilität gefordert wurde, wie sie für die strukturelle Veränderung eines Layouts benötigt wird.

⁹⁵ Die Umschlagleistung wird in der Intralogistik meistens durch die auf-/abgegebene und transportierte Menge an Stückgütern respektive Masse von Schüttgütern, pro Zeiteinheit charakterisiert.

7 Logistische Anwendungsszenarien des Mini-RBG

Ungeachtet der Ausführungsvariante, mit semimobilem Mini-Regalbediengerät oder Kommissioniereinheit in Gestalt eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs, zielt das Konzept des Mobilen Supermarktes neben seiner Reaktionsgeschwindigkeit im produktionslogistischen Kontext auch insbesondere darauf ab, dass manuelle Kommissionier- und Umschlagprozesse reduziert werden. Den Mitarbeiter:innen wird stets das für den anstehenden Arbeitsschritt benötigte Material automatisch und zielgerichtet nach dem Ware-zur-Person-Prinzip angereicht. Dadurch wird einerseits eine Reduktion potentieller Fehlerquellen erzielt, gleichzeitig aber auch eine Entlastung des Personals ermöglicht. Diesem Grundgedanken folgend, eröffnen sich bei globaler Betrachtung der intralogistischen Prozesse, weitere – über das Anwendungsszenario des Mobilen Supermarktes in der Produktion hinausgehende – Anwendungsszenarien des Mini-Regalbediengerätes.

7.1 Anwendungsszenario Mobiler Supermarkt / Verbauort

Der Ansatz, die Versorgung der Produktion dem Echtzeitbedarf entsprechend vorzunehmen, steht dem einschlägigen Prinzip der Perlenkette diametral entgegen, da nicht von einem planerischen Bedarf ausgegangen wird, der auf der Festlegung und Prognose des Produktionsprogramms basiert. Vielmehr verfügt das Konzept des Mobilen Supermarktes durch das in den Regalmodulen befindliche Teileportfolio über die erforderliche Reaktionsfähigkeit, um die Teileversorgung auch bei kurzfristigen Änderungen des Produktionsprogramms zu gewährleisten. Anders als bei einem Warenkorb, der in seiner Zusammenstellung einen werkstückspezifischen Bausatz für mitunter eine ganze Abfolge von Montageschritten, die sich über mehrere Stationen erstrecken können, darstellt, gründet die Bereitstellung mittels des Mobilen Supermarktes auf der Vereinzelnung, so dass er vorzugsweise auf den Einsatz an Montagestationen abzielt, an denen Bauteile und Materialien mit hoher Varianz und Verbaquote bereitzustellen sind. Beispiele hierfür sind u.a. Außenspiegel, Scheinwerfer, Lenkräder etc.

Die Bestückung der Regale kann in vielfältiger Weise erfolgen und ist wesentlich von den individuellen Planungen des Anwenders abhängig. So können sich bspw. in den Regalmodulen sämtliche Varianten an Außenspiegeln einer Fahrzeugbaureihe befinden. Gleichwohl ist es denkbar, dass sich innerhalb der KLT auch kleinskalige Warenkorbvarianten befinden. Die auftragsbezogene Kommissionierung in Abhängigkeit der faktischen Reihenfolge des Fertigungsdurchlaufs erfolgt dann aus diesem definierten Teilespektrum am Verbauort selbst. Das Anwendungsszenario des Mini-Regalbediengerätes innerhalb des Systems „Mobiler Supermarkt“ ist dergestalt, dass sich auf einer Seite die Regalmodule befinden, aus denen der Materialbedarf der Senke, die sich auf der gegenüberliegenden Seite in Form einer Bearbeitungsstation befindet, gespeist wird, siehe Abbildung 7.1 und vgl. Abbildung 5.39. Da sich die Bearbeitungsstation in Längsrichtung des Mini-RBG beliebig weit ausdehnen kann, wird in Abhängigkeit der gewünschten bzw. erforderlichen Flexibilität entweder eine feste und unveränderliche Position für die Materialübergabe an den Menschen vorgesehen oder kann diese durch den Laufweg des Menschen intuitiv variabel vorgegeben werden, um Laufwege zu reduzieren, sofern sich die Bearbeitungsstation über die ganze Schienenlänge – oder sogar darüber hinaus – des Mini-RBG erstreckt.

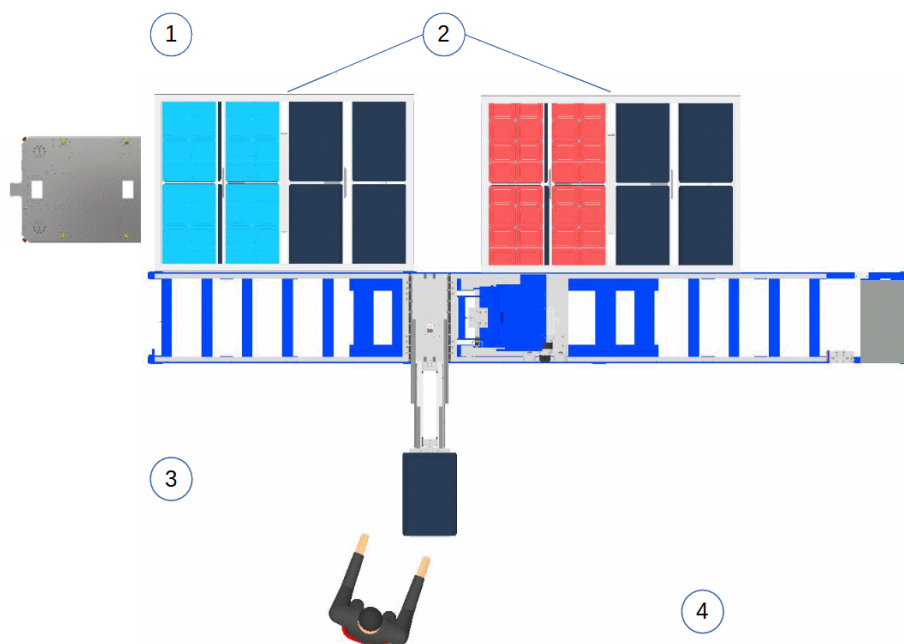


Abbildung 7.1: Anwendungsszenario des Mini-RBG am Verbauort.

Pos.1: Entnahmeseite des Mini-RBG.

Pos.2: Mobile Regalmodule.

Pos.3: Abgabeseite des Mini-RBG.

Pos.4: Bearbeitungsstation.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nicht nur hinsichtlich des logistischen Anwendungsszenarios ist bei dem oben in Abbildung 7.1 schematisch dargestellten Einsatz zwischen einer Entnahme- und Abgabeseite zu differenzieren, da die Materialübergabe in direkter Mensch-Maschine-Kollaboration komplexe Anforderungen an das Sicherheitskonzept der Anlage stellt. Je nach Form der Absicherung, vgl. Kapitel 9, ist ein Wechsel der Entnahme- und Abgabeseite nicht ohne Weiteres möglich, auch wenn es die kinematischen Voraussetzungen des Mini-RBG zuließen. So ergeben sich gemäß der in Kapitel 8 durchgeführten Sicherheitsbetrachtung differenzierte Anforderungen hinsichtlich der Entnahme- und Abgabeseite, die in der Umsetzung einer dahingehenden Sicherheitsarchitektur spezifischer technischer Maßnahmen bedürfen und insofern ein prozessualer Wechsel von Entnahme- und Abgabeseite mit Umbau und Konfiguration der in Kapitel 9 beschriebenen Sicherheitseinrichtungen verbunden wäre. Dementsprechend ist es vorteilhaft, im Falle eines Layoutumbaus, der einen Wechsel der geometrischen Anordnung von Entnahme- und Abgabeseite erfordert, in dem Zuge auch das Mini-RBG um 180° zu drehen, um so keine Umbauten der maschinengebundenen Sicherheitseinrichtungen vornehmen zu müssen.

7.2 Anwendungsszenario Kommissionierzone

Neben dem Einsatzszenario direkt am Verbauort in der Produktion eignet sich das Mini-RBG auch als autarke kleinskalige Pickereinheit für Anwendungen in Kommissionierzonen, sowohl bei OEMs und deren Zulieferern, als auch bei Kontraktlogistikern. So kann beispielsweise die Beschickung der zur Produktionsversorgung verwendeten Regalmodule des Mobil Supermarktes automatisiert durch das Mini-RBG erfolgen. Ein dahingehendes Szenario ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Das Regalbediengerät entnimmt dabei von der mit Pos.1 gekennzeichneten Seite Behälter aus einem Durchlaufregal (Pos.2), die auf der gegenüberliegenden Seite des Regalbediengerätes in die per FTF transportierten Regalmodule (Pos.3) geladen werden. Die Kommissionierung sowie der An- und Abtransport der Regale erfolgt in dem Fall vollautomatisch. Vor dem Hintergrund der notwendig zu treffenden Maßnahmen zur Absicherung des Mini-RBG hinsichtlich des Personenschutzes birgt diese Anwendung die geringsten Anforderungen, indem sich während des Betriebs keine Menschen an bzw. im näheren Umfeld der Maschine aufhalten müssen. Dementsprechend kann die Absicherung dergestalt ausfallen, dass die Kommissionierzone einen abgesperrten Bereich mit Zutrittssicherung darstellt.

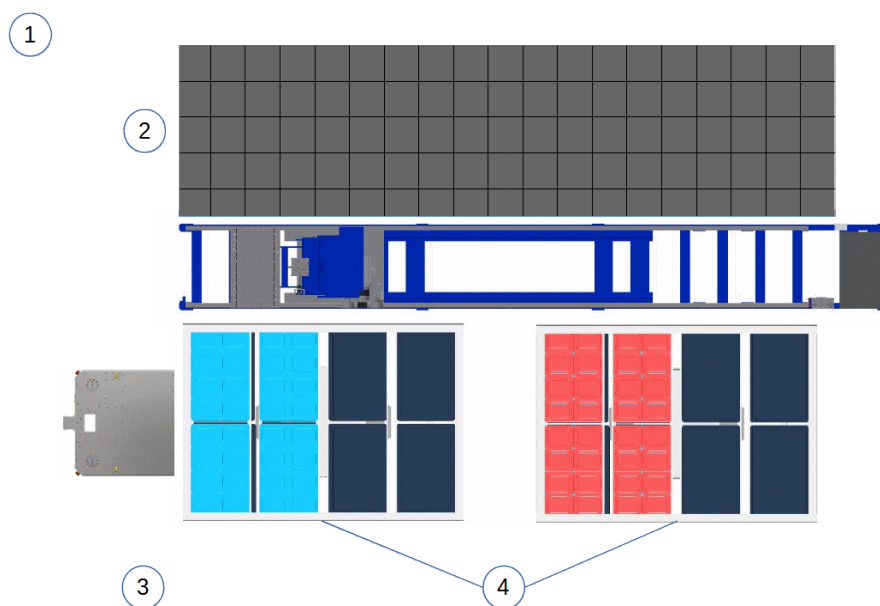


Abbildung 7.2: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer automatischen Kommissionierzone zur Beschickung von Regalmodulen für den Mobil Supermarkt.

Pos.1: Entnahmeseite des Mini-RBG.

Pos.2: Durchlaufregal.

Pos.3: Abgabeseite des Mini-RBG.

Pos.4: Mobile Regalmodule.

Quelle: Eigene Darstellung.

Ein weiteres Szenario einer vollautomatisierten Teilebereitstellung mithilfe des Mini-RBG kann die Beschickung von kleinen FTF sein, mit denen einzelne KLT transportiert werden. Auch deren Beschickung kann, wie in Abbildung 7.3 schematisch dargestellt, innerhalb einer

automatischen Kommissionierzone erfolgen. Je nach Gestalt der KLT-Aufnahme des FTF kann die Übergabe direkt oder unter Zuhilfenahme einer Absetzvorrichtung erfolgen.

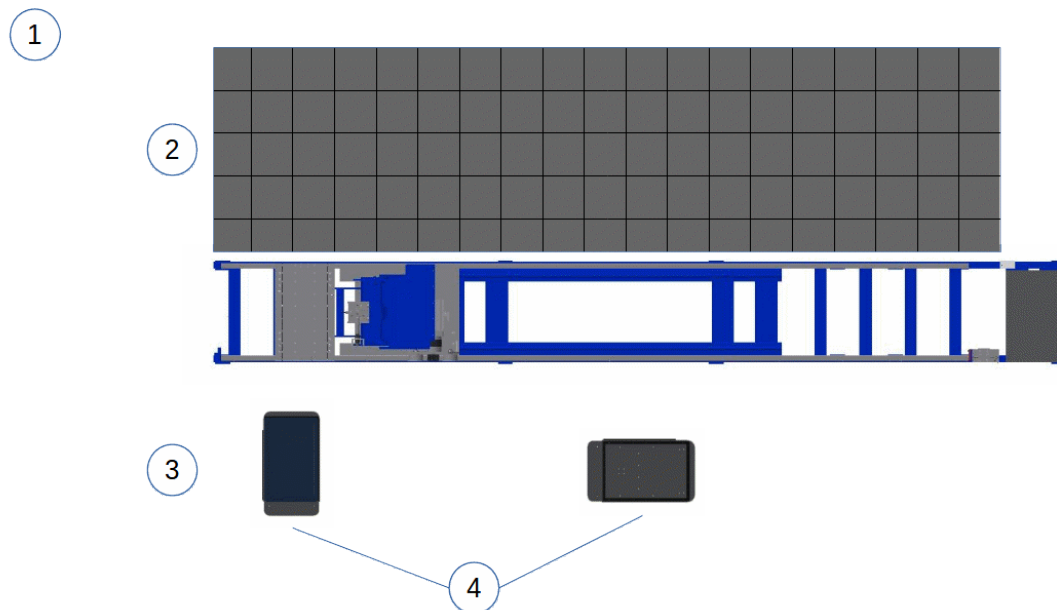


Abbildung 7.3: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer automatischen Kommissionierzone zur Beschickung von FTF für den Einzeltransport von KLT.

Pos.1: Entnahmeseite des Mini-RBG.

Pos.2: Durchlaufregal.

Pos.3: Abgabeseite des Mini-RBG.

Pos.4: FTF für den Transport einzelner KLT.

Quelle: Eigene Darstellung.

Dem gegenüber steht ein Anwendungsszenario bei dem das Mini-RBG innerhalb einer halbautomatisierten Kommissionierzone zur Unterstützung der manuellen Tätigkeiten zum Einsatz kommt. Auch dieses Szenario kann in Abhängigkeit des Aufbaus der jeweiligen Supply-Chain eines Unternehmens an mehreren Stellen innerhalb der Logistikkette, sowohl beim OEM selbst, aber auch den Zulieferern und Logistikdienstleistern verortet sein. Exemplarisch hierfür kann, wie in Abbildung 7.4 dargestellt, die manuelle Beschickung von Warenkörben für die Just-in-Sequence Belieferung einer Produktion sein. Dabei kollaboriert das Mini-RBG, ebenso wie im logistischen Anwendungsfall des Mobilien Supermarktes, aktiv mit dem Menschen und unterstützt diesen bei manuellen Tätigkeiten. Das Anwendungsszenario ist dabei dergestalt, dass das Mini-RBG Behälter aus einem Durchlaufregal (Pos.2) entnimmt und diese dem Menschen auf der gegenüberliegenden Abgabeseite (Pos.3) anreicht, um diese dann manuell in ein Warenkorbgestell zu packen. Hinsichtlich der Wahrung der Personensicherheit birgt dieser Anwendungsfall bzgl. der Abgabeseite folglich die gleichen Anforderungen, wie es beim Mobilien Supermarkt der Fall ist, vgl. Kapietl 8.

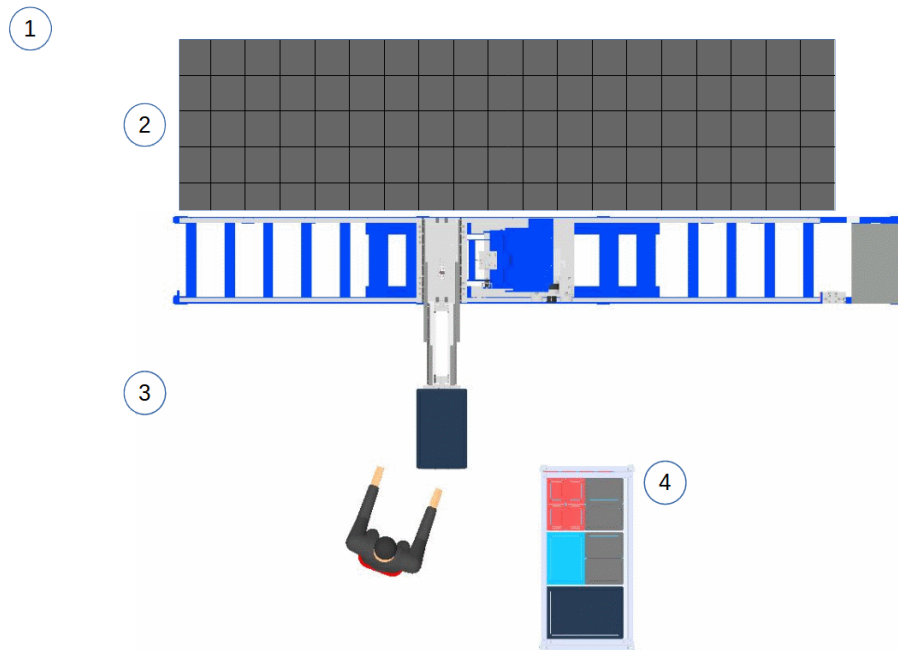


Abbildung 7.4: Anwendungsszenario des Mini-RBG in einer halbautomatischen Kommissionierzone.

Pos.1: Entnahmeseite des Mini-RBG

Pos.2: Durchlaufregal

Pos.3: Abgabeseite des Mini-RBG

Pos.4: Warenkorbgestell

Quelle: Eigene Darstellung.

Insofern ließe sich das Mini-Regalbediengerät auch in Anwendungsszenarien bis dato bekannter und auch außerhalb der Automobilindustrie etablierter Materialbereitstellungssysteme integrieren. Der potentielle Anwendungsbereich dieser teilautomatisierten kollaborativen Materialflusskomponente erstreckt sich daher über den ursprünglichen Verwendungszweck in der Konzeption einer ereignisgesteuerten verbauortnahen Materialbereitstellung – Just-in-Real-Time – hinaus und kann auch einen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Entlastung der Mitarbeiter:innen für konventionelle Materialbereitstellungsprinzipien außerhalb des am IFT entwickelten Logistikkonzeptes leisten.

8 Problemstellung Absicherung Mobiler Supermarkt

Der Mobile Supermarkt verkörpert ein Konzept eines kollaborativen automatisierten Materialflusssystem, das sowohl hinsichtlich dessen hardwaretechnischer Ausgestaltung als auch der logistischen Prozessebene ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Einsatzszenarien bietet. Im Hinblick auf die zu gewährleistende Sicherheit im Betrieb der Anlage birgt eben diese – im Sinne der durch die Anwendung geforderten – Flexibilität komplexe Rahmenbedingungen und Anforderungen. Die Wahrung der Personensicherheit ist dabei stets auch im Kontext der Bedienung und Benutzerfreundlichkeit zu betrachten, um eine sichere und zugleich effektive Kollaboration zu ermöglichen. Dies gilt es in der Gesamtbetrachtung des Mobil Supermarktes und im Besonderen für das Mini-Regalbediengerät, welches die Schnittstelle zu manuellen Prozessen darstellt, zu berücksichtigen.

8.1 Übergeordnete Anforderungen und Rahmenbedingungen durch Gesetzgebung, Normung und Richtlinien

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 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, 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 und DIN EN ISO 13857 vorsehen, während des Betriebs von Maschinen zu nennen. Hierfür kommen in der Anwendungspraxis vielfach physisch trennende Schutzeinrichtungen gemäß DIN EN ISO 14120 oder berührungslos wirkende unter Verwendung optoelektronischer Schutzsysteme gemäß DIN EN ISO 13855 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. Stillstandszeiten 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 Stillstandszeiten der Maschine infolge der Verletzung von Sicherheitsabständen und einer damit einhergehenden Nothalt-Funktion vermieden werden.

Für die zielgerichtete Anwendung des Mini-Regalbediengerätes mit direkter Materialübergabe an die Mitarbeiter:innen muss eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine bestehen, da dieses Szenario eine Form der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) darstellt und entsprechender Sicherheitsvorkehrungen bedarf.⁹⁶

8.2 Grundzüge einer Risikobeurteilung

Zur Erstellung eines Sicherheitskonzeptes bedarf es zunächst einer dezidierten anlagenspezifischen Analyse der von einer Maschine ausgehenden Gefährdungen und Risiken. Eine Risikobeurteilung stellt einen iterativen Prozess dar, bei dem Arten von Gefährdungen und Gefährdungsereignisse unter den jeweiligen Betriebs- und Einsatzbedingungen zu identifizieren und nach erfolgter Einschätzung des Gefährdungspotentials durch geeignete Maßnahmen eliminiert oder so weit abgemildert werden, dass ein sicherer Betrieb hinreichend gewährleistet ist. Eine Risikobeurteilung umfasst daher eine Risikoanalyse und -bewertung. Der Prozess der Risikobeurteilung gem. DIN EN ISO 12100 gliedert sich dabei in die folgenden 3 Schritte, vgl. Abbildung 8.1:

- Festlegen der Grenzen der Maschine/Anlage
- Identifizierung der Gefährdungen
- Risikoeinschätzung

Resultiert im Rahmen der Risikobewertung, dass das mit einer Gefährdung/Gefährdungssituation verbundene Risiko vernachlässigbar respektive bereits durch geeignete Maßnahmen gemindert ist, kann die Risikobeurteilung an dieser Stelle abgeschlossen werden. Kann hingegen im Ergebnis der Risikobewertung keine hinreichende Risikominderung festgestellt werden, sind entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, deren Wirkung einer erneuten Prüfung zu unterziehen sind, so dass der beschriebene Prozess der Risikobeurteilung erneut durchzuführen ist. Dieser iterative Prozess zur Risikominderung gestaltet sich schematisch wie in Abbildung 8.1 dargestellt.

⁹⁶ Vgl. Hofmann 2020 [Hof20B], [Hof20C] und Hofmann 2021 [Hof21].

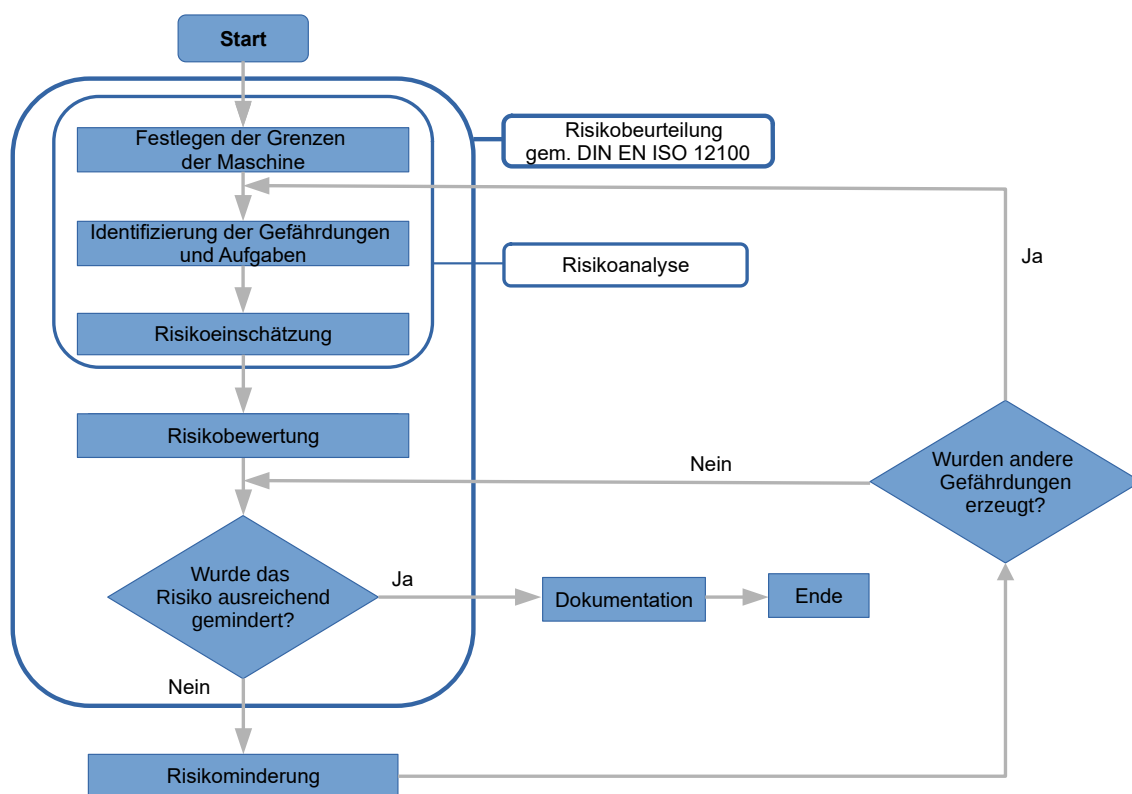


Abbildung 8.1: Iterativer Prozess zur Risikobeurteilung und Risikominderung in Anlehnung an DIN EN ISO 12100.

Quelle: Eigene Darstellung.

Der oben aufgezeigte Prozess wird so lange iterativ durchlaufen, bis im Ergebnis der Beurteilung eine hinreichende Risikominderung festgestellt wird.⁹⁷ Den Ausgangspunkt einer Risikobeurteilung gem. Abschnitt 5 der DIN EN ISO 12100 bildet die Festlegung der konstruktiv und prozessual definierten Grenzen der Maschine sowie die Identifizierung der Gefährdungen. In Kombination mit der Bestimmung des Ausmaßes und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit stellt dies die sogenannte Risikoanalyse dar, an die sich eine Bewertung des Risikos anschließt, siehe Abbildung 8.1.

⁹⁷ In Abhängigkeit der risikomindernden Wirkung, welche die in Erwägung gezogenen Maßnahmen im Zuge der Risikobeurteilung entfalten, kann es erforderlich sein, dass der beschriebene iterative Prozess in seiner Gesamtheit mehrfach durchlaufen werden muss.

8.2.1 Grenzen der Maschine

Hinsichtlich der Grenzen einer Maschine ist zwischen Verwendungsgrenzen, räumlich- und zeitlichen Grenzen, sowie Grenzen des Einsatzbereiches im Hinblick auf die Umgebung zu differenzieren.

Die Verwendungsgrenzen beziehen sich nicht etwa nur auf die prozessualen Einsatzszenarien der Maschine, sondern vielmehr auf die bestimmungsgemäße Verwendung im Gesamten, samt der vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung. Zu berücksichtigen sind hierbei sämtliche Betriebsarten und zugehörige Möglichkeiten der Einflussnahme des Bedienpersonals bzw. der Benutzer:innen im Normalbetrieb der Maschine, aber auch zur Beseitigung von Störungen. Insofern umfasst diese Betrachtung alle Lebensphasen einer Maschine, die im Zusammenhang der zeitlichen Grenzen darzustellen sind, indem in der Darlegung der Verwendungsgrenzen spezifisch auf die in den diversen Betriebszuständen und Lebensphasen beteiligten Personengruppen, deren Ausbildungs- und Erfahrungsniveau sowie Fähigkeiten inkl. etwaiger physischer Beeinträchtigungen, einzugehen ist. Darüber hinaus ist bei den Personengruppen hinsichtlich deren Kenntnisstand über die Maschine und das Bewusstsein über das von ihr ausgehende Gefährdungspotential zu differenzieren und dies in der Bewertung respektive der vernünftigerweise auftretenden Situationen zu berücksichtigen. Insofern ist zwischen den originären Nutzern bzw. dem Bedienpersonal der Maschine sowie anderweitig eingewiesenem Personal mit ausgeprägten technischen Kenntnissen und Gefahrenbewusstsein und solchen Personengruppen zu unterscheiden, die nur über geringfügige Kenntnisse bzgl. des Gefährdungspotentials bzw. dem Umgang mit dem Eintritt von gefahrbringenden Ereignissen verfügen. Bei Maschinen und Anlagen, die öffentlich zugänglich sind, kommt dies in besonderem Maße zum Tragen.

Die räumlichen Grenzen beziehen sich primär auf den Flächen- und Raumbedarf für die Installation der Maschine einschließlich deren Schnittstellen und dem Bewegungsraum der Nutzer bzw. Bediener. Als zeitliche Grenzen wird die erwartbare Lebensdauer der gesamten Anlage sowie einzelner Bestandteile und dementsprechend auch Wartungsintervalle zur Instandhaltung angesehen.

8.2.2 Identifizierung der Gefährdungen und Risikoeinschätzung

Sind die Grenzen der Maschine definiert, sind im nächsten Schritt die sowohl vorhersehbar als auch unerwartet eintretenden Gefährdungen sowie Gefährdungssituationen und Ereignisse zu identifizieren. Hierzu zählen u.a. mechanische, elektrische und thermische Gefährdungen, im Weiteren aber auch solche, die auf Lärm, Strahlung und Schwingungen zurückzuführen sind. Ferner sind auch Gefährdungen relevant, die ihren Ursprung in der Ergonomie und Nutzerfreundlichkeit haben. Dies ist für alle Betriebsphasen, beginnend bei der Montage, Inbetriebnahme, dem eigentlichen Betrieb bis hin zur Entsorgung gesondert auszuweisen. Der Identifizierung der Gefährdungen und der Einschätzung des Risikos ist die größte Bedeutung in dem gesamten Prozess beizumessen. Es müssen sämtliche Situationen, welche eine Handlung und Eingreifen einer Person in den Lebensphasen einer Maschine erforderlich machen, Berücksichtigung finden. So sind neben den mit dem Normalbetrieb verbundenen Tätigkeiten auch jene in sämtlichen anderen Betriebsarten, wie z.B. Fehlerbehebung und Wiederanlauf nach Nothalt oder manuellem Stillsetzen, aber auch Wartungs- und Instandhaltungsvorgänge in die Betrachtung einzubeziehen. Eine

systematische Identifizierung der Gefährdungen kann mithilfe von Verfahren, wie sie in DIN ISO/TR 14121-2 enthalten sind, erfolgen.

Um das Risiko einzuschätzen und auszuweisen, existieren in der Praxis mehrere Bewertungsverfahren in Anlehnung an DIN ISO/TR 14121-2, die sich hinsichtlich deren Detaillierungsgrad und Darstellungsweise unterscheiden. Die am häufigsten verwendeten Methoden stellen der Risikograph, vgl. Abbildung 8.2, die Risikomatrix, vgl. Abbildung 8.3, sowie numerische Bewertungsverfahren dar. Mithilfe des Risikographen respektive der Risikomatrix lässt sich in wenigen Schritten in graphisch nachvollziehbarer Weise der Risikoindex anhand des Schadensausmaßes (Severity), der Exposition (Frequency), der Wahrscheinlichkeit des Eintritts (Occurrence), sowie der Möglichkeit zur Vermeidung (Avoidance) einer Gefährdung bestimmen.

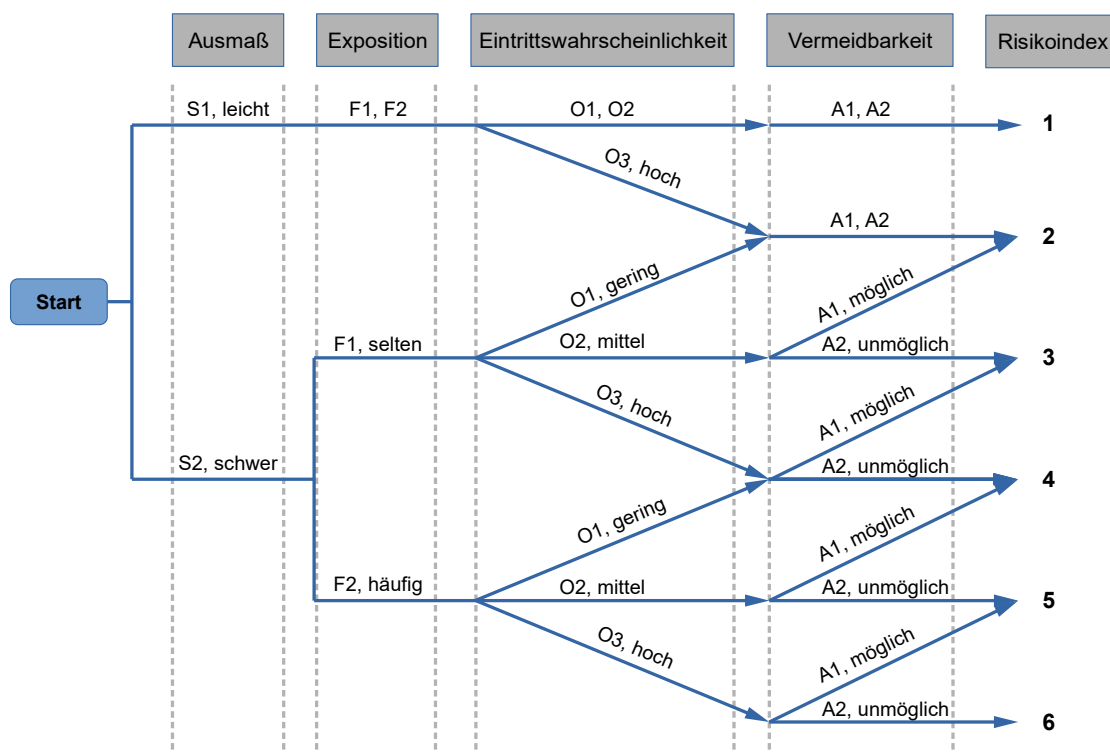


Abbildung 8.2: Risikograph in Anlehnung an DIN ISO/TR 14121-2.

S: Severity (1 = leicht, 2 = schwer)

F: Frequency (1 = selten, 2 = häufig)

O: Occurrence (1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch)

A: Avoidance (1 = möglich, 2 = unmöglich)

Quelle: Eigene Darstellung.

		Berechnung des Risikoindexes					
		O1		O2		O3	
		A1	A2	A1	A2	A1	A2
S1	F1	1				2	
	F2						
S2	F1	2		3		4	
	F2	3	4	5		6	

Abbildung 8.3: Risikomatrix in Anlehnung an DIN ISO/TR 14121-2.

- S: Severity (1 = leicht, 2 = schwer)
- F: Frequency (1 = selten, 2 = häufig)
- O: Occurrence (1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch)
- A: Avoidance (1= möglich, 2 = unmöglich)

Quelle: Eigene Darstellung.

Neben den oben abgebildeten Methoden des Graphen und der Matrix existieren zudem zahlreiche davon abgeleitete Mischformen. Allen gemein ist eine Einstufung des Risikos anhand des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit, welche die sogenannten Risikoelemente darstellen, siehe Abbildung 8.4. Das Schadensausmaß wird mit S (Severity), die Häufigkeit bzw. die Dauer der Exposition mit F (Frequency), die Eintrittswahrscheinlichkeit mit O (Occurrence) und die Möglichkeit der Vermeidung bzw. der Minderung des Schadens mit A (Avoidance) ausgewiesen. Über diese vier Elemente wird schließlich der Risikoindex berechnet.

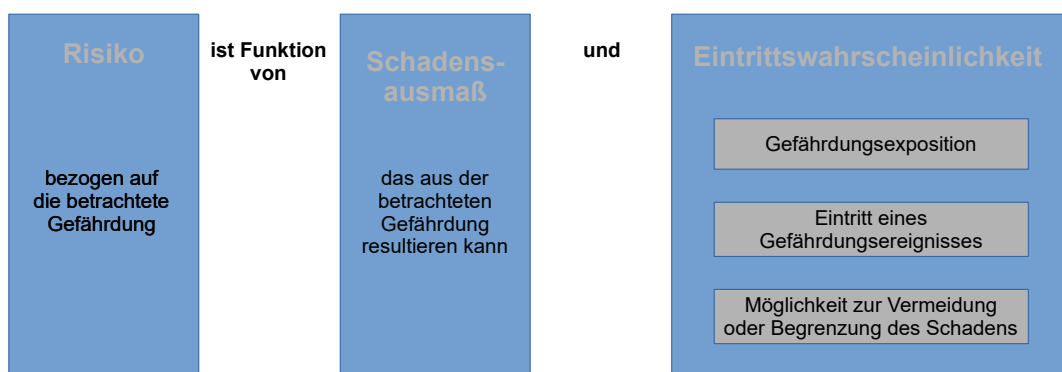


Abbildung 8.4: Risikoelemente in Anlehnung an DIN EN ISO 12100.

Quelle: Eigene Darstellung.

Hinsichtlich des Schadensausmaßes wird zunächst zwischen leichten und schweren Schäden, die bis hin zum Tode führen können, unterschieden. Der Grad des Schadens orientiert sich somit zunächst an der Reversibilität bzw. Irreversibilität einer Verletzung.

Im Weiteren kann eine Detaillierung dahingehend erfolgen, ob eine oder mehrere Personen lediglich einer Gefährdung oder einer Kombination von Gefährdungen ausgesetzt sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich aus Art, Häufigkeit und Dauer einer Gefährdungsexposition, der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Gefährdungsereignisses, sowie einer Einschätzung der technischen und menschlichen Möglichkeiten, den Eintritt eines Schadens in Gänze zu vermeiden oder dessen Folgen abzumildern.

Hinsichtlich der Gefährdungsexposition ist zunächst entscheidend, inwiefern zur Verrichtung von Tätigkeiten die Notwendigkeit des Zugangs zum Gefahrenbereich gegeben ist, welcher Gestalt der Zugang ist und wie viel Personen beteiligt sind. Ist dementsprechend ein Zugang in den Gefahrenbereich im Normalbetrieb zur Materialbeschickung vonnöten, liegt aufgrund der Häufigkeit des Zugangs eine hohe Expositionsklasse vor. Das Eintreten eines Gefährdungsereignisses kann sowohl menschlich als auch technisch hervorgerufen werden. Zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeit sind Zuverlässigkeitsdaten, die Unfallhistorie, Daten über Gesundheitsschädigungen sowie Risikovergleiche heranzuziehen. Hinsichtlich der Vermeidung eines Schadens respektive der Abmilderung des Schadensausmaßes kommen technische, organisatorische und menschliche Faktoren in Betracht. So ist zunächst zwischen qualifiziertem und nicht-qualifiziertem Personal zu differenzieren und die Frage zu klären, wie schnell der Eintritt einer Gefährdungssituation im Weiteren ein Schadensereignis zur Folge hat. Es ist insofern für die Bewertung entscheidend, ob der Schaden unmittelbar und plötzlich, oder eher langsam und absehbar eintritt und sich dadurch Handlungsspielräume eröffnen. Diese Handlungsspielräume sind maßgeblich von menschlichen körperlichen als auch kognitiven Fähigkeiten abhängig, so dass das Bewegungsvermögen aber auch Reflexe ebenso zur Schadensbegrenzung beitragen, wie das allgemeine Risikobewusstsein, das auf Erfahrungen, Beobachtungen sowie Hinweis- und Warnzeichen fundieren kann.

Gemäß DIN EN ISO 12100 Abschnitt 5.5.3 sind bei der Risikoeinschätzung Aspekte zu berücksichtigen, die sich auf etwaig vorhandene Schutzmaßnahmen beziehen. So ist dezidiert die Tauglichkeit von Schutzmaßnahmen darzulegen, sowie die Möglichkeiten zur Umgehung und des Ausschaltens von Schutzmaßnahmen zu betrachten. Hinsichtlich der Bewertung der Tauglichkeit von Schutzmaßnahmen liefert DIN ISO/TR 14121-2 quantitative Verfahren und praktische Leitlinien zur Durchführung einer Risikoeinschätzung.

Die Wahl geeigneter Schutzmaßnahmen ist stets auch im Hinblick auf deren mögliche Umgehung vorzunehmen. Insofern sind einerseits solche Schutzeinrichtungen vorzusehen, die nicht umgangen werden können, andererseits sollten die Schutzmechanismen dergestalt sein, dass den Nutzern und allen weiteren an der Maschine tätigen Personengruppen keine Veranlassung zur Umgehung oder gar Abschaltung der Sicherheitseinrichtungen geboten wird. Die bestimmungsgemäße und effiziente Nutzung der Maschine sollte dementsprechend nicht von Schutzmaßnahmen eingeschränkt oder negativ beeinflusst werden, um vorsätzlichem Handeln zur Umgehung oder Außerkraftsetzung dieser vorzubeugen. Gleichwohl ist in der Risikoeinschätzung vorsätzliches Handeln als mögliches Szenario einzubeziehen. An dieser Stelle manifestiert sich das Spannungsfeld aus Sicherheit und der effektiven und produktiven Nutzbarkeit einer Maschine. Dies kommt umso mehr bei Kollaborationsanwendungen zum Tragen. Es gilt daher, bereits zu Beginn der Konzeptions- und Konstruktionsphase eine Gesamtbetrachtung der Prozess- und Sicherheitsarchitektur vorzunehmen, da die Arbeitsprozesse, die Bedienbarkeit sowie die Sicherheitsmechanismen in untrennbarem Kontext stehen.

8.2.3 Risikobewertung

Nach erfolgter Risikoeinschätzung ist eine Bewertung des Risikos im Sinne der Beurteilung der Tauglichkeit und Effektivität der Maßnahmen zur Risikominderung vorzunehmen. In einem iterativen Prozess muss ermittelt werden, ob mit den getroffenen Maßnahmen eine ausreichende Risikominderung erzielt wird und diese eine hinreichende Sicherheit bieten. Alle Vorkehrungen sind stets auch im Lichte der etwaigen Schaffung neuer Gefährdungen und Beeinflussung vorhandener Risiken zu betrachten. Eine hinreichende Risikominderung ist dann erreicht, wenn eine Gefährdung in Gänze beseitigt werden konnte oder die das Risiko bestimmenden Faktoren, Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit, gemindert werden konnten. Teil der Risikobewertung kann ein sogenannter Risikovergleich sein, bei dem ein Vergleich bekannter Risiken, die von ähnlichen Maschinen oder Bauteilen ausgehen, herangezogen wird. Notwendige Voraussetzung hierfür ist, dass die vergleichbare Maschine einer Typ-C-Norm⁹⁸ entspricht und im Weiteren eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der bestimmungsgemäßen Verwendung, den Einsatzbedingungen, technischen Spezifikationen sowie der Gefährdungen und Risikoelemente besteht.

8.2.4 Risikominderung

Eine Risikominderung kann bestenfalls durch die vollständige Beseitigung einer Gefährdung bewerkstelligt werden. Ist dies nicht oder nur bedingt möglich, sind geeignete Schutzmaßnahmen vorzunehmen, um durch die getrennte – respektive gleichzeitige – Verringerung der Risikoelemente Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eine Risikominderung herbeizuführen. Um geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen, ist ein dreistufiger Prozess zu durchlaufen, der im ersten Schritt die Ausführung einer inhärent sicheren Konstruktion vorsieht, ehe man im Falle der Nicht-Erreichung dieses Zieles dazu übergeht, technische Schutzeinrichtungen vorzusehen. Sollte trotz der Durchführung dieser Maßnahmen ein Restrisiko verbleiben, ist durch entsprechende Benutzerinformation und organisatorische Vorkehrungen darauf hinzuweisen.

Einer inhärent sicheren Konstruktion ist stets allen anderen Optionen der Risikominderung Vorrang zu geben, da bei Anwendung jedweder Form der Risikominderung in Gestalt technischer Schutzeinrichtungen und Benutzerhinweise ein Ausfall bzw. deren Umgehung, respektive Missachtung, in der Regel nicht ausgeschlossen werden kann. Eine inhärent sichere Konstruktion hingegen gewährleistet durch entsprechende Ausgestaltung der technischen Merkmale bei bestimmungsgemäßer Verwendung das Ausbleiben von Gefährdungen bzw. die Verminderung von Risiken. Gelingt es im Zuge der Risikominderung durch konstruktive Aspekte eine Gefährdung vollständig zu beseitigen, werden weitere Schritte, die das Vorsehen von Schutzeinrichtungen und Hinweisen beinhalten, hinfällig. Eine inhärent sichere Konstruktion zeichnet sich u.a. durch geometrische und physikalische Faktoren aus. Zu den geometrischen zählen die uneingeschränkte Einsehbarkeit von Gefahrenbereichen, die Vermeidung von z.B. Quetsch- und Scherstellen sowie scharfer Kanten und vorstehender Teile. Zu den physikalischen Aspekten zählt primär die Wahrung der Standsicherheit in allen Betriebsarten und -zuständen. Diesbezüglich ist das Maschinenbett- und Fundament, die statische Schwerpunktlage, deren dynamische

⁹⁸ Typ-C-Normen rangieren unterhalb der Kategorie Typ-A (Sicherheitsgrundnorm für Gestaltungsleitsätze) und Typ-B (Sicherheitsfachgrundnorm für Maschinengattungen) und stellen normative Festlegungen für maschinenspezifische Sicherheitsanforderungen dar.

Verlagerung sowie die im Betrieb aus Arbeitsbewegungen resultierenden dynamischen Kräfte und Kippmomente zu berücksichtigen. Im Weiteren umfasst die Betrachtung der physikalischen Aspekte die Begrenzung von Betätigungskräften und der kinetischen Energie bewegter Teile sowie sämtliche Formen von Emissionen, die gesundheitliche Auswirkungen haben können. Hierzu zählen u.a. Lärm, Schwingungen, Strahlung sowie das Emittieren von Stoffen. Darüber hinaus sollten technische Grundsätze bei der Erstellung einer inhärent sicheren Konstruktion Berücksichtigung finden, die DIN EN ISO 12100 unter Ziff. 6.2.3. ausweist.

8.3 Risikobeurteilung des Mini-Regalbediengerätes

Das Mini-Regalbediengerät stellt im Sinne des Artikel 2 der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG eine Applikation dar, für die eine Risikobeurteilung gemäß DIN EN ISO 12100 nach den in Kapitel 8.2 dargelegten Grundzügen durchzuführen ist. Die Risikoeinschätzung wurde auf Basis eines von der Firma Pilz GmbH & Co KG⁹⁹ entwickelten numerischen Verfahrens, dem Pilz Hazard Rating (PHR) durchgeführt. Die dabei verwendeten Wertebereiche der Parameter beruhen ebenso wie die Schwellenwerte der tolerierbaren Restrisikowerte auf profunden Erfahrungen aus der Praxis. Die Verwendung eines numerischen Verfahrens mit einem fein abgestuften, auf soliden Erfahrungswerten basierendem, Wertebereich, zielt darauf ab, eine möglichst differenzierte Beurteilungsgrundlage in Ansatz zu bringen. Dies liegt darin begründet, dass für die vorliegend zu betrachtende Maschine keine Typ-C-Norm existiert und demzufolge im Hinblick auf Art und Ausprägung einer später ggf. erforderlichen Risikominderung ein möglichst detailliertes Abbild – insbesondere der Übergangsbereiche der Bewertung – erforderlich ist. Letztlich unterliegt die Erforderlichkeit respektive die Ausprägung einer etwaig zu ergreifenden risikomindernden Maßnahme der Differenziertheit der Beurteilung des Risikos. Hierfür bedarf es einer profunden und statistisch belastbaren Datenbasis, die von der Fa. Pilz bereitgestellt worden ist. Um vorliegend die Höhe des Risikos zu bestimmen, finden folgende Parameter Anwendung:

Tabelle 8.1: Parameter des Pilz-Hazard-Rating Bewertungssystems

– Schwere der möglichen Verletzung	(degree of possible harm)	[DPH]
– Wahrscheinlichkeit des Auftretens	(probability of occurrence)	[PO]
– Möglichkeit der Vermeidung	(possibility of avoidance)	[PA]
– Häufigkeit und Dauer der Exposition	(frequency of exposure)	[FE]

Der Pilz-Hazard-Rating (PHR) Wert berechnet sich wie folgt nach Formel (7):

$$PHR = DPH \cdot PO \cdot PA \cdot FE \quad (7)$$

⁹⁹ Die Pilz GmbH & Co KG wurde 1948 gegründet und zählt zu den Marktführern im Bereich der sicheren Automatisierung mit Stammsitz in Ostfildern, Baden-Württemberg. Neben einer breiten Produktpalette im Bereich der Sicherheits- und Automatisierungstechnik ist Pilz weltweit ein renommierter Partner in der Industrie hinsichtlich der sicherheitstechnischen Zertifizierung von Maschinen und Anlagen. Die profunde Expertise in diesem Bereich sind im vorliegenden Projekt im Zuge der Risikobeurteilung eingeflossen, indem sich Pilz beim Bau des Prototyps mit Hardware und der anschließenden sicherheitstechnischen Abnahme als Projektpartner engagierte.

Für die einzelnen Parameter werden folgende Zustände und Werte zugeordnet.¹⁰⁰

DPH – Schwere der möglichen Verletzung

Tabelle 8.2: Übersicht DPH-Werte

– Schramme / Druckstelle	[0,25]
– Wunde, auch kleine Brandwunde, Schnitt mit leichten Auswirkungen	[0,50]
– Leichter Bruch an Finger oder Zehen	[3,00]
– Schwerer Bruch an Händen, Armen oder Beinen	[5,00]
– Verlust eines oder zwei Finger oder Zehen, schwere Verbrennungen	[8,00]
– Bein-oder Handamputation, teilweiser Verlust der Hör- oder Sehkraft	[11,00]
– Amputation beider Beine / Hände, vollständiger Verlust der Seh- oder Hörkraft	[15,00]
– Kritische Verletzung, dauerhafte Erkrankung / dauerhafter Zustand	[25,00]
– Einzelner Todesfall	[40,00]
– Katastrophal	[65,00]

PO – Möglichkeit des Auftretens eines gefahrbringenden Ereignisses

Tabelle 8.3: Übersicht PO-Werte

– Nahezu unmöglich	[0,05]
– Unwahrscheinlich	[1,25]
– Möglich	[2,50]
– Wahrscheinlich	[4,00]
– Sicher	[6,00]

PA – Möglichkeit der Vermeidung

Tabelle 8.4: Übersicht PA-Werte

– Möglich	[0,75]
– Möglich unter bestimmten Umständen	[2,50]
– Nicht möglich	[5,00]

¹⁰⁰ Die jeweiligen Werte der Parameter (Tabellen 8.2 bis 8.6) sowie der Bewertungsmaßstab für die resultierenden PHR-Werte (Tabelle 8.7) entsprechen den Vorgaben der Firma Pilz und basieren auf deren langjähriger Expertise im Bereich der sicherheitstechnischen Zertifizierung von Maschinen und Anlagen.

FE – Häufigkeit der Exposition

Tabelle 8.5: Übersicht FE-Werte

– Jährlich	[0,50]
– Monatlich	[1,00]
– Wöchentlich	[2,00]
– Täglich	[3,00]
– Stündlich	[4,00]
– Permanent	[5,00]

Mit den in den Tabellen 8.2 bis 8.5 ausgewiesenen Parameter werden gem. Formel (7) die Werte des Pilz-Hazard-Ratings berechnet und anhand der nachfolgenden Tabelle 8.6 klassifiziert:

Tabelle 8.6: Übersicht PHR-Werte

	PHR	Risiko	Beschreibung möglicher Mindestmaßnahmen
	1 - 10	Vernachlässigbares Risiko	Kein relevantes Risiko für die Gesundheit oder Sicherheit vorhanden. Es sind keine weiteren risikomindernden Maßnahmen zu ergreifen.
	11 -20	Sehr geringes Risiko	Sehr geringes Risiko für die Gesundheit oder Sicherheit vorhanden. Es sind keine signifikant risikomindernden Maßnahmen zu ergreifen.
	21 - 45	Geringes Risiko	Es besteht als geringfügig einzustufendes Risiko für die Gesundheit oder Sicherheit. Es müssen risikomindernde Maßnahmen ergriffen werden.
	46 - 160	Signifikantes Risiko	Das Risiko der Gefährdung ist erheblich, es sind risikomindernde Maßnahmen erforderlich.
	161 - 500	Hohes Risiko	Es bestehen bedenklich hohe Risiken, es müssen risikomindernde Maßnahmen zwingend ergriffen werden.
	501 +	Sehr hohes Risiko	Es bestehen sehr hohe Risiken, es müssen risikomindernde Maßnahmen zwingend ergriffen werden.

Für jede der identifizierten Gefährdungen wird der PHR-Wert bestimmt und auf diese Weise die Höhe des Risikos dargestellt.

Zur Bestimmung der Risikohöhe sicherheitsbezogener Teile der Maschinensteuerung wird der Risikograph gemäß DIN EN ISO 13849-1 herangezogen, siehe Abbildung 8.5. Mithilfe dieser Form der Risikoeinschätzung wird für jede sicherheitsrelevante Funktion der Steuerung der erforderliche Performance Level PL_r bestimmt. Die sicherheitsbezogenen Teile einer Steuerung können aus Hardware und Software bestehen und sowohl integrierter als auch separater Bestandteil der Maschinensteuerung sein. Hierzu zählen beispielsweise berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen, taktile Sensoren und Verriegelungen sowie Steuerungsbaugruppen für Logik, Datenverarbeitung und Überwachung etc. Der Performance Level charakterisiert die Fähigkeit, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen und definiert die Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde. Es wird hierfür gemäß DIN EN ISO 13849-1 eine Einteilung in 5 Stufen (a bis e) vorgenommen, siehe Abbildung 8.5.

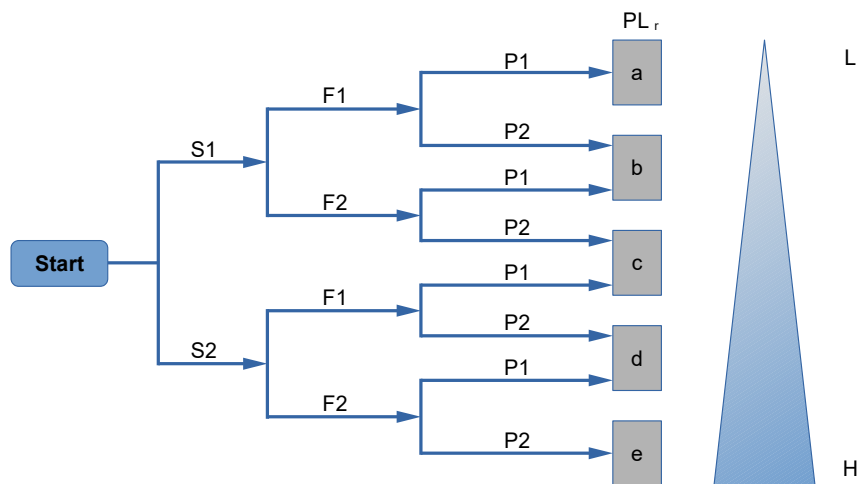


Abbildung 8.5: Bestimmung des Performance Levels anhand des Risikographen gemäß DIN EN ISO 13849-1.

PL_r : Erforderlicher Performance Level.

L: Niedriger Beitrag zur Risikominderung.

H: Hoher Beitrag zur Risikominderung.

S: Schwere der Verletzung (1 = leicht, 2 = schwer, irreversibel einschließlich Tod).

F: Häufigkeit der Gefährdungsexposition (1 = selten, 2 = häufig bis dauernd).

P: Möglichkeit zur Vermeidung (1 = möglich unter bestimmten Bedingungen, 2 = kaum möglich).

Quelle: Eigene Darstellung.

Der Risikograph verwendet zur Bezifferung des Risikos die Parameter S (Schwere der Verletzung), F (Häufigkeit und/oder Dauer der Exposition) und P (Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung).

Für die Parameter gilt der folgende, aus Tabelle 8.7 hervorgehende, Wertebereich:

Tabelle 8.7: Wertebereich der im Risikograph angewandten Parameter

S – Schwere der Verletzung

- 1 leichte, in der Regel reversible Verletzung
- 2 ernste, üblicherweise irreversible Verletzung, einschließlich Todesfall

F – Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition

- 1 selten bis wenig häufig und/oder die Dauer der Exposition ist sehr kurz
- 2 häufig bis dauernd und/oder die Dauer der Exposition ist lang

P – Möglichkeit der Vermeidung der Gefährdung

- 1 unter bestimmten Bedingungen möglich
- 2 kaum möglich

8.3.1 Mechanische Gefährdungen am Mini-Regalbediengerät

Nachfolgend wird eine exemplarische Auswahl¹⁰¹ der im Betrieb von dem Mini-Regalbediengerät ausgehenden mechanischen Gefährdungen aufgezeigt. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf die anhand der Risikoeinschätzung und -bewertung als relevantest identifizierten Gefährdungen, für die die Erstellung eines Konzeptes zur Risikominderung dringend geboten ist. Die Risikoeinschätzung und -bewertung erfolgt auf Basis des oben vorgestellten Verfahrens. Eine Übersichtsdarstellung der Verortung der nachfolgend beschriebenen Gefährdungen ist schematisch den Abbildungen 8.6 und 8.7 zu entnehmen.

¹⁰¹ Es existieren neben der hier vorgestellten Auswahl an Gefährdungen weitere, die jedoch im Ergebnis der Risikobeurteilung einem sicheren Betrieb nicht im Wege stehen bzw. durch organisatorische Maßnahmen das Risiko auf ein vernachlässigbares Niveau herabgesetzt werden kann. Hierunter fällt beispielsweise das Anbringen von Piktogrammen, um auf die Gefahr von Verbrennungen an heißen Oberflächen aufmerksam zu machen.

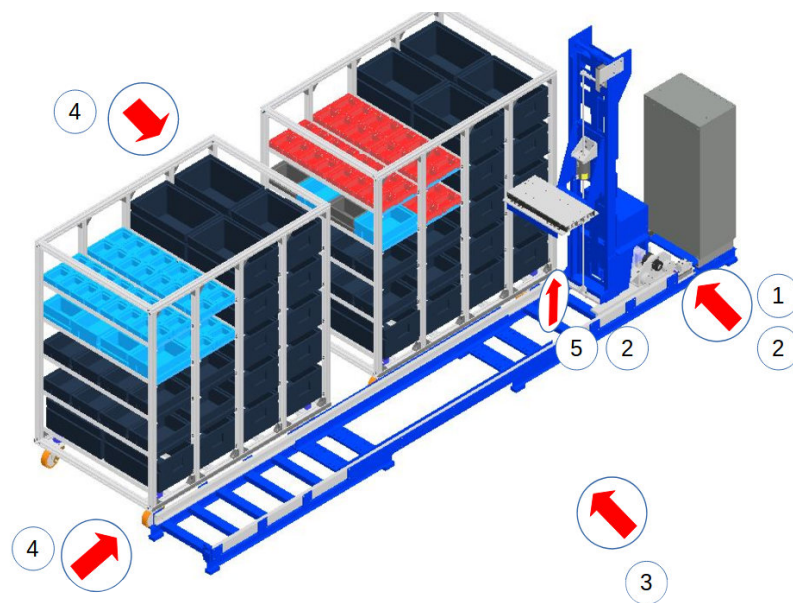


Abbildung 8.6: Übersichtsdarstellung der mechanischen Gefährdungen am Mobilem Supermarkt.

- Pos.1: Mechanische Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen.
- Pos.2: Mechanische Gefährdung Nr.2 – Quetschen und Scheren.
- Pos.3: Mechanische Gefährdung Nr.3 – Erfassen und Quetschen.
- Pos.4: Mechanische Gefährdung Nr.4 – Erfassen und Quetschen.
- Pos.5: Mechanische Gefährdung Nr.5 – Quetschen und Scheren.

Quelle: Eigene Darstellung.

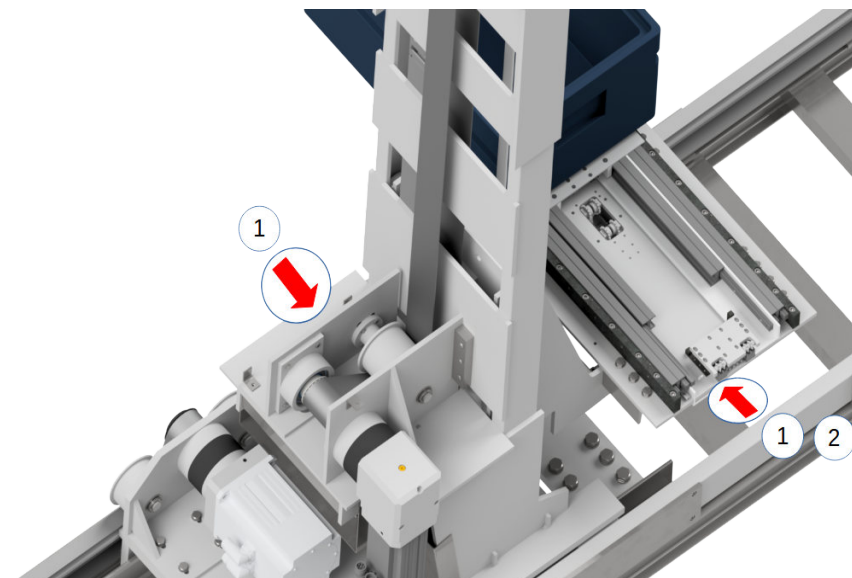


Abbildung 8.7: Mechanische Gefährdungen an den Antrieben der y- und z-Achse des Mini-RBG.

- Pos.1: Mechanische Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen.
- Pos.2: Mechanische Gefährdung Nr.2 – Quetschen und Scheren.

Quelle: Eigene Darstellung.


8.3.1.1 Mechanische Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen

Die Achsen des Mini-Regalbediengerätes sind mit Hülltrieben versehen. Diese bergen mit ihren bewegten Teilen, insbesondere an den Antriebs-, Umlenk- und Spannrollen, siehe Abbildung 8.7, die Gefahr des Einziehens und Erfassens. In der nachfolgenden Tabelle 8.8 ist die Bewertung des Risikos anhand des PHR-Wertes ausgewiesen. Hinsichtlich des Wertebereichs der einzelnen Faktoren, sowie der abschließenden Bewertung darf auf die Tabellen 8.1 bis 8.6 verwiesen werden, wobei die Festlegung der eingesetzten Werte und somit die Einstufung der maßgebenden Parameter auf Vorgaben der Firma Pilz zurückgeht. Analoges gilt auch für die weiteren Gefährdungen, deren Bewertungen sich in den Tabellen 8.9 bis 8.12 wiederfinden.

Gefährdungsauswirkung: Ganzer Körper, obere und untere Gliedmaßen

Ursachen / Folgen: Einziehen oder Fangen

Tabelle 8.8: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.1

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25	
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	2,5	
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5	
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	5	
Bewertung	[PHR]	781	
Ergebnis: Sehr hohes Risiko			 Risikominderung erforderlich

8.3.1.2 Mechanische Gefährdung Nr.2 – Quetschen und Scheren

Infolge der Achsbewegungen werden Relativbewegungen zwischen bewegten und feststehenden Bauteilen vollzogen, was die Gefahr des Quetschens und Klemmens birgt. Dies gilt beispielsweise für die x-Achse, bei der sich das Horizontalfahrwerk, vgl. Abbildung 8.6, relativ zum Maschinenbett respektive dem Grundrahmen, siehe Abbildung 8.8, mit den an den Schienenenden befindlichen Endanschlägen und dem Schaltschrank bewegt.

Gefährdungsauswirkung: Ganzer Körper

Ursachen / Folgen: Quetschen, Scheren

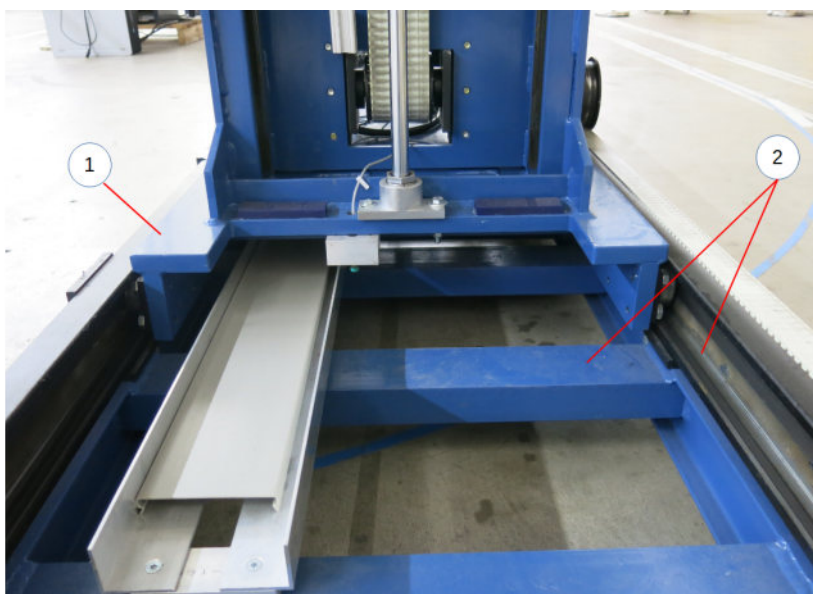


Abbildung 8.8: Mechanische Gefährdung durch Relativbewegung.

Pos.1: Horizontalfahrwerk.

Pos.2: Maschinenbett mit Fahrschiene.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 8.9: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.2

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	2,5
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	625

Ergebnis: Sehr hohes Risiko

 Risikominderung erforderlich

8.3.1.3 Mechanische Gefährdung Nr.3 – Erfassen und Quetschen

Bei dem Mini-Regalbediengerät handelt es sich um eine semimobile Anlage, ohne feste Verankerung mit der baulichen Struktur des Aufstellungsortes. Hierdurch kann es insbesondere im Betrieb, aber auch bei der Verlagerung der Anlage, statisch als auch infolge dynamischer Bewegung zu einer Schwerpunktverlagerung und damit einhergehendem Verlust der Standsicherheit kommen.

Gefährdungsauswirkung: Ganzer Körper
Ursachen / Folgen: Erfassen, Quetschen

Tabelle 8.10: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.3

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	40
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	2,5
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	1000

Ergebnis: Sehr hohes Risiko

 Risikominderung erforderlich

8.3.1.4 Mechanische Gefährdung Nr.4 – Erfassen und Quetschen

Im Anwendungsszenario innerhalb des Mobilien Supermarktes, vgl. Abbildung 7.1, aber auch in einer halbautomatischen Kommissionierzone, wie es beispielhaft in Abbildung 7.4 dargestellt ist, befinden sich auf der Entnahmeseite bewegliche respektive statische Regale, während auf der Abgabeseite Menschen agieren. Insofern muss eine generelle Zugänglichkeit der Maschine bestehen, damit eine manuelle Materialübergabe vom Mini-RBG an den Menschen erfolgen kann. Dies birgt die Gefahr, dass über den Arbeitsraum der Maschine Zugang zu den Regalen besteht, siehe Abbildung 8.9, und dies infolge Fahrbewegungen der Achsen relativ zu den Regalen zum Erfassen, Quetschen und Scheren von Körperteilen führen kann. Darüber hinaus besteht diese Gefahr insgesamt durch den umseitigen Zugriff in die Regale, der zur Beschickung erforderlich ist. Hier ist jedoch eine differenzierte Betrachtung vonnöten, indem der Zugang respektive der Zugriff zu den Regalen von der Entnahmeseite über die räumlichen Grenzen des Mini-Regalbediengerätes hinausgeht. Insofern betrifft die vorliegende Gefährdung auch die Gestaltung der Regale, die aus formalen Gründen an dieser Stelle außerhalb des Betrachtungsbereichs des Mini-RBG läge, so dass eine im Ergebnis der Beurteilung etwaig erforderliche Risikominderung nicht geboten wäre. Dennoch ist im Sinne der Gesamtbetrachtung des Anwendungsszenarios „Mobiler Supermarkt“, für dessen Realisierung eine isolierte Betrachtung einzelner Komponenten nicht zielführend ist, die Einbeziehung der Regale in die Risikoanalyse angeraten.



Abbildung 8.9: Mechanische Gefährdung durch Relativbewegung zwischen Regalbediengerät und den an das Maschinenbett angrenzend befindlichen Regalmodulen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Gefährdungsauswirkung: Ganzer Körper

Ursachen / Folgen: Erfassen durch Annäherung eines bewegten Teils an ein feststehendes, Quetschen

Tabelle 8.11: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.4

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	2,5
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	625

Ergebnis: Sehr hohes Risiko

 Risikominderung erforderlich

8.3.1.5 Mechanische Gefährdung Nr.5 – Quetschen und Scheren

Im Falle des Ausfalls der elektrischen Energiezufuhr der Anlage bzw. des Bruchs des Zahnriemens an der Hubachse besteht die Gefahr des unkontrollierten Absenkens des Hubtisches infolge des Eigengewichts bzw. in Kombination mit einer darauf befindlichen Nutzlast aufgrund der Schwerkraft. Es besteht somit die Gefahr des Quetschens und Scherens.

Gefährdungsauswirkung: Ganzer Körper, obere und untere Gliedmaßen

Ursachen / Folgen: Quetschen, Scheren

Tabelle 8.12: Risikoeinschätzung zu Mechanische Gefährdung Nr.5

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	2,5
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	625

Ergebnis: Sehr hohes Risiko

 Risikominderung erforderlich

8.3.2 Konzept zur Risikominderung

Die Risikoeinschätzung und -bewertung für die in Kapitel 8.3.1 aufgezeigten Gefährdungen führt im Ergebnis dazu, dass es für den Betrieb des Mini-Regalbediengerätes eines hinreichenden Konzeptes zur Risikominderung bedarf. Die Art und Ausprägung der Gefährdungen lassen bereits erkennen, dass diese derart schwerwiegend sind, dass sie einem sicheren Betrieb, bei dem sich Menschen in der Umgebung aufhalten bzw. mit der Maschine kollaborieren sollen, fundamental entgegenstehen. Es sind daher geeignete Maßnahmen zu treffen, die den Anforderungen der Risikominderung, gleichzeitig aber auch der Intention des Anwendungsszenarios und dessen Umsetzbarkeit gerecht werden. Nachfolgend werden Maßnahmen, die in Kombination oder alternativ grundsätzlich geeignet sind, eine Minderung des Risikos herbeizuführen, für jede der oben beschriebenen Gefährdungen aufgezeigt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen eine Auswahl generell erwägbarer Optionen darstellen und eine hinreichende Risikominderung nicht etwa erst durch Umsetzung aller Maßnahmen eintritt, sondern es vielmehr dem Konstrukteur unter Berücksichtigung der anwendungstechnischen Anforderungen obliegt, geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen. Insofern umfassen die in den nachfolgenden Kapiteln aufgelisteten Maßnahmen auch solche, die dem Grunde nach – rein aus der Sicherheitsbetrachtung heraus – einzeln oder in Kombination mit anderen eine Risikominderung bewirken können, jedoch im Anwendungskontext des Mobilien Supermarktes ungeeignet sind. So sind vorliegend beispielsweise bewegliche trennende Schutzeinrichtungen feststehenden vorzuziehen. Es liegt daher in der Verantwortung des Konstrukteurs, die gebotene Risikominderung durch Auswahl und Kombination der zur

Verfügung stehenden Maßnahmen sicherzustellen. In den nachfolgenden Kapiteln 8.3.2.1 bis 8.3.2.5 sind insofern zunächst alle aus sicherheitstechnischer Betrachtung möglichen Handlungsoptionen aufgelistet. Hinsichtlich der Umsetzung konstruktiver Maßnahmen sei gesondert auf Kapitel 8.4 und hinsichtlich technischer Schutzmaßnahmen auf Kapitel 9.1 verwiesen.

8.3.2.1 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.1 – Erfassen und Einziehen

Konstruktive Schutzmaßnahmen:

- Konstruktive Absicherung der Zugänge zu bewegten Teilen der Hülltriebe.
- Vorsehen feststehender trennender Schutzeinrichtungen.
- Konstruktive Vermeidung von Fang- und Einzugsstellen.

Technische Schutzmaßnahmen:


- Anbringen beweglich trennender Schutzeinrichtungen zur Verhinderung des Zugangs zur Maschine. Die Verriegelung muss den Anforderungen gem. DIN EN ISO 13849-1 genügen. Im Falle des Betretens des Gefahrenbereichs muss ein Abschalten aller gefahrbringenden Bewegungen gewährleistet sein.

Organisatorische Schutzmaßnahmen im Falle des Verbleibens von Restgefahren:

- Unterweisung des Personals hinsichtlich der Restgefahren.
- Anbringen von Piktogrammen mit Gefahrenhinweisen.

Durch Umsetzung einzelner oder einer Kombination oben genannter Maßnahmen, die geeignet sind, die Gefahr des Einziehens und Erfassens signifikant zu reduzieren, kann eine Neubewertung des Risikos, wie in Tabelle 8.13 ersichtlich, vorgenommen werden. Eine analoge Vorgehensweise gilt auch für die weiteren in den Tabellen 8.14 bis 8.17 vorgenommenen Risikoeinschätzungen bzgl. der weiteren Gefährdungen.

Tabelle 8.13: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 1 bei Umsetzung der Risikominderung

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	0,05
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	0,75
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	5
Bewertung	[PHR]	4
Ergebnis: Risiko vernachlässigbar		

8.3.2.2 Risikominderung der mechanischen Gefährdung – Quetschen und Scheren Nr.2

Konstruktive Schutzmaßnahmen:

- Abstände so ausführen, dass ein Quetschen und Scheren von Gliedmaßen aufgrund mangelnder Zugänglichkeit ausgeschlossen ist.
- Vorsehen feststehender trennender Schutzeinrichtungen.


Technische Schutzmaßnahmen:

- Endlagenüberwachung an den Fahrwegbegrenzungen anbringen und entsprechende Abstände vorsehen, um Fang-, Quetsch- und Scherstellen zu vermeiden.

Organisatorische Schutzmaßnahmen im Falle des Verbleibens von Restgefahren:

- Unterweisung des Personals hinsichtlich der Restgefahren.
- Anbringen von Piktogrammen mit Gefahrenhinweisen.

Tabelle 8.14: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 2 bei Umsetzung der Risikominderung

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	0,05
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	0,75
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	3
Ergebnis: Risiko vernachlässigbar		

8.3.2.3 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.3 – Erfassen und Quetschen

Konstruktive Schutzmaßnahmen:

- Schwerpunkt so anordnen, dass in allen Betriebsphasen¹⁰² ein Kippen vermieden wird.
- Tragende und zum Aufbau zugehörige Bestandteile so dimensionieren, dass sie auch unter ungünstigen Bedingungen beim Transport nicht versagen.


Technische Schutzmaßnahmen:

- Keine technischen Schutzmaßnahmen anwendbar.

Organisatorische Schutzmaßnahmen im Falle des Verbleibens von Restgefahren:

- Unterweisung des Personals hinsichtlich der Restgefahren.
- Anschlag- und Aufnahmepunkte anbringen und kennzeichnen.
- Aufstellhinweise in die Anlagendokumentation aufnehmen.

Tabelle 8.15: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 3 bei Umsetzung der Risikominderung

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	40
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	0,05
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	0,75
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	6
Ergebnis: Risiko vernachlässigbar		

¹⁰² Zu den zu berücksichtigenden Betriebsphasen zählen neben dem automatisierten auch der Handbetrieb, Einrichtvorgänge sowie das Versetzen und Verlagern der Anlage.

8.3.2.4 Risikominderung der mechanischen Gefährdung – Erfassen und Quetschen Nr.4

Konstruktive Schutzmaßnahmen:

- Absichern der Zugangsmöglichkeiten.
- Gestaltung der Regale so, dass keine Einzug- und Fangstellen existieren.


Technische Schutzmaßnahmen:

- Berührungslos wirkendes Schutzsystem vorsehen, das den Zugang zum Regal auf allen Seiten verhindert, indem bei Verletzung des Schutzfeldes alle gefahrbringenden Bewegungen schnellstmöglich gemäß DIN EN 61496-1 stillgesetzt werden. Das Schutzsystem muss mindestens den Anforderungen gem. DIN EN ISO 13849-1 genügen.

Organisatorische Schutzmaßnahmen im Falle des Verbleibens von Restgefahren:

- Unterweisung des Personals hinsichtlich der Restgefahren.
- Piktogramme mit Hinweisen darauf, dass unbefugtes Betreten und Berühren verboten ist.
- Unterweisung des Personals, nicht in die automatisierten Abläufe manuell einzugreifen.

Tabelle 8.16: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 4 bei Umsetzung der Risikominderung

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	25
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	0,05
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	0,75
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
Bewertung	[PHR]	3
Ergebnis: Risiko vernachlässigbar		

8.3.2.5 Risikominderung der mechanischen Gefährdung Nr.5 – Quetschen und Scheren

Konstruktive Schutzmaßnahmen:

- Schwerkraftbelastete Achsen müssen sowohl im Betrieb als auch im Falle des Ausfalls der elektrischen Energiezufuhr der Anlage in Position gehalten werden, wenn Personen in den Gefahrenbereich treten oder greifen können. Es sind Haltebremsen vorzusehen.
- Für Wartungsarbeiten können mechanische Sperren angebracht werden, um ein Absenken der Last zu unterbinden.


Technische Schutzmaßnahmen:

- Sicherheits-Haltebremsen mit Klemmung.

Organisatorische Schutzmaßnahmen im Falle des Verbleibens von Restgefahren:

- Unterweisung des Personals hinsichtlich der Restgefahren.
- Hinweise und Piktogramme, dass bei Wartungsarbeiten die Last durch Unterbauen zu sichern ist.

Tabelle 8.17: Risikoeinschätzung zu Gefährdung Nr. 5 bei Umsetzung der Risikominderung

Schwere der möglichen Verletzung	[DPH]	5
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	[PO]	0,05
Möglichkeit der Vermeidung	[PA]	2,5
Häufigkeit und Dauer der Exposition	[FE]	4
 Bewertung	 [PHR]	 2
Ergebnis: Risiko vernachlässigbar		

8.4 Konstruktive Maßnahmen zur Risikominderung

Der einschlägigen Normung folgend, ist die Vermeidung von Gefährdungsereignissen respektive die Minderung der damit verbundenen Risiken durch eine inhärent sichere Konstruktion zunächst jeglichen anderen Formen der Risikominderung vorzuziehen. Vorliegend ist es jedoch nicht möglich, eine Risikominderung in vollem Umfang durch die in Kapitel 8.3.2 aufgezeigten konstruktiven Maßnahmen herbeizuführen, da sie in Teilen mit den prozessualen Anforderungen, die Arbeitsabläufe betreffend, unvereinbar sind. So geht aus dem Konzept zur Risikominderung hervor, dass insbesondere trennende Schutzeinrichtungen vorzusehen wären, um die Zugänglichkeit zu gefahrbringenden Bauteilen, wie z.B. der bewegten Teile der Hülltriebe, oder sogar ggf. der gesamten Anlage zu verhindern. Gleichwohl ist insbesondere hinsichtlich der Gefährdungen Nr.1, Nr.3 und Nr.5 eine beachtliche – wenn auch nicht vollumfängliche – Risikominderung durch rein konstruktive Maßnahmen realisierbar, welche die Nutzbarkeit des Mini-Regalbediengerätes im Anwendungsszenario des Mobilien Supermarktes, bzw. generell einer halbautomatisierten Kommissionierung, nicht einschränken würden. Insofern sind die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen konstruktiven Mittel als Teil eines sicherheitstechnischen Gesamtkonzeptes zu betrachten, bei dem konstruktive und technische Maßnahmen in Kombination die gebotene Risikominderung herbeiführen.

8.4.1 Einhausung bewegter Teile der Hülltriebe

Die Antriebs-, Spann- und Umlenkrollen des Hubantriebes sind mit einfachen Mitteln gegen Zugang zu sichern, ohne neue Gefahrenquellen, wie z.B. Fangstellen zu schaffen, siehe Abbildung 8.10. Hinsichtlich des Antriebs der Horizontalachse ist dies nicht gegeben. Die Anbringung einer partiellen Einhausung am Horizontalfahrwerk, um die Antriebs- und Umlenkrollen in Omegaanordnung gegen Zugang zu sichern, würde neue Fang-, Scher- und Quetschstellen schaffen. Hier ist die Situation dergestalt, dass sich das Fahrwerk – und damit auch eine eventuelle Einhausung der Antriebselemente – relativ zum Riemen bewegt, so dass infolge dessen die Gefahr des Einziehens und Fangens nicht aufgelöst werden kann. Vielmehr würde eine Scherstelle zwischen Riemen und dem Gehäuse und im Weiteren eine Quetschstelle bei Annäherung des Gehäuses an die an den Riemenenden befindlichen Befestigungs- und Spannelemente geschaffen. Insofern ist die Anbringung einer so gearteten Einhausung, die lediglich die Antriebs- und Umlenkrollen des Horizontalantriebs umfasst, im Sinne der Risikominderung nicht nur unbehelflich sondern sogar unzutraglich. Demgegenüber hätte eine komplette Einhausung über die gesamte Länge des Riemens nicht nur eine signifikante Vergrößerung des benötigten Bauraumes zur Folge, sondern würde auch die niedrigste erreichbare Ein- und Auslagerungshöhe nach oben verschieben, indem die Einhausung in den Bewegungsbereich der z-Achse ragen würde. Da mit Blick auf die Gefährdungen Nr.2 und Nr.4 ohnehin der Zugang von der Abgabeseite her zur gesamten Anlage zu unterbinden ist, wird an der Stelle von weitergehenden konstruktiven Maßnahmen abgesehen.



Abbildung 8.10: Einhausung des Riementriebs an der Hubachse.
Quelle: Eigene Darstellung.

8.4.2 Nachweis der Standsicherheit

Um eine Risikominderung hinsichtlich der Gefährdung Nr.3 zu bewerkstelligen, ist einerseits die Konstruktion so auszuführen, dass in allen Betriebsphasen die Standsicherheit der Anlage gewährleistet ist. Dies ist insbesondere vorliegend für den Normalbetrieb relevant, da keine feste Verankerung zur baulichen Substanz des Aufstellortes besteht. Ferner betrifft diese Anforderung auch sämtliche Wartungs- und Umbaumaßnahmen, zu deren Zweck das Mini-RBG vom Boden angehoben und z.B. per Gabelstapler oder Gabelhubwagen transportiert wird. Hierfür sind Anschlagpunkte ausgewiesen und markiert, eine detaillierte Beschreibung hinsichtlich der Handhabung sowie der zu treffenden Vorkehrungen und des Positionierens der Achsen, um eine für den Transport günstige Schwerpunktlage zu erhalten, ist Bestandteil der Dokumentation und Betriebsanleitung. Während des Betriebs der Anlage verändert sich die Schwerpunktlage infolge der Achsbewegungen in Verbindung mit der Nutzlastbeaufschlagung. Hinsichtlich des Nachweises der Standsicherheit ist lediglich die z-Achse von Belang, die infolge deren Hebelarms im ausgefahrenen Zustand zusammen mit der auf dem Teleskoptisch befindlichen Nutzlast ein Kippen um die x-Achse bewirken könnte. Um eine im Sinne der Gefährdung Nr.3 inhärent sichere Konstruktion auszuführen, ist der Nachweis zu erbringen, dass die Standsicherheit in allen Betriebspunkten gewährleistet ist.

Zum Führen des Standsicherheitsnachweises wird das in Abbildung 8.11 dargestellte statische System zur Bestimmung der Achslastverteilung am Fahrwerk des Mini-RBG verwendet.

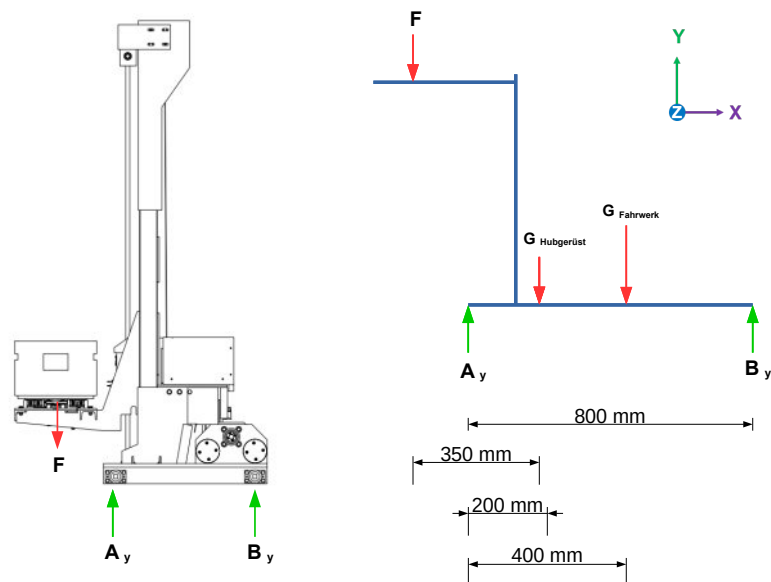


Abbildung 8.11: Statisches Ersatzsystem des Mini-RBG zur Bestimmung der Auflagerreaktionen des Fahrwerks.

Quelle: Eigene Darstellung.

Im ersten Schritt wird ausgehend von einer in z-Richtung symmetrischen Lastverteilung, bei z-Achse in Nulllage, zur Ermittlung der Auflagerreaktionen an den Achsen A und B ausgegangen. Aus der Auslegung und Dimensionierung ist bekannt:

F	Eigengewicht Hubtisch zzgl. Nutzlast	1200 N
$G_{Hubgerüst}$	Gewichtskraft des Hubgerüsts	2000 N
$G_{Fahrwerk}$	Gewichtskraft des Horizontalfahrwerks	1300 N

Es gilt infolge der statischen Gleichgewichtsbedingungen:

$$\sum y = A_y + B_y - F - G_{Hubgerüst} - G_{Fahrwerk} = 0$$

Mit dem Momentengleichgewicht um A

$$\sum M^A = F \cdot 0,35 \text{ m} - G_{Hubgerüst} \cdot 0,2 \text{ m} - G_{Fahrwerk} \cdot 0,4 \text{ m} - B_y \cdot 0,8 \text{ m} = 0$$

folgt

$$B_y = \underline{625 \text{ N}} \quad .$$

Eingesetzt in die Gleichgewichtsbedingung folgt für die Auflagerreaktion der Achse A nach Umstellen der Gleichung

$$A_y = \underline{3875 \text{ N}} \quad .$$

Für die weitere Berechnung der Radlastverteilung wird ausgehend von den obigen Ergebnissen mit gerundeten, konservativ gewählten Werten, unter Zugrundelegung einer symmetrischen Radlast auf den Achsen, gerechnet. Für die Radlasten R_1 bis R_4 , siehe Abbildung 8.12, folgt damit:

$$R_1 = 2000 \text{ N}$$

$$R_2 = 2000 \text{ N}$$

$$R_3 = 320 \text{ N}$$

$$R_4 = 320 \text{ N}$$

Für die Achslastverteilung folgt damit ein Verhältnis von 86 % (Achse A) : 14 % (Achse B).

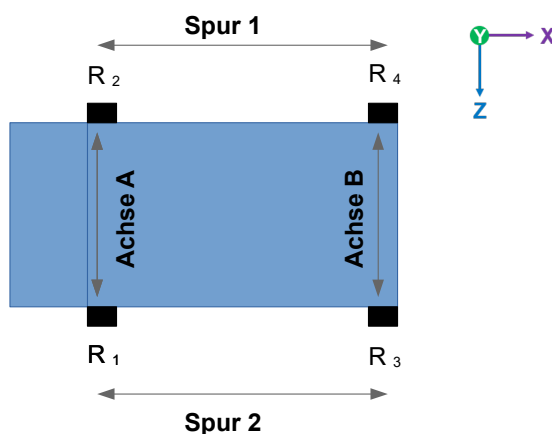


Abbildung 8.12: Fahrwerkskonstellation des Mini-RBG.
Quelle: Eigene Darstellung.

Basierend darauf wird die für ein etwaiges Kippen um die x -Achse maßgebliche Lastverteilung für die beiden Spuren des Horizontalfahrwerks bestimmt. Der ungünstigste Fall ist dann gegeben, wenn die Teleskopachse (z -Achse) maximal ausgefahren ist. Für die nachfolgende Berechnung wird dieser Fall, wie in der Ansichtsdarstellung in Abbildung 8.14 ersichtlich zugrunde gelegt, so dass das in Abbildung 8.14 ersichtliche statische Ersatzsystem maßgebend ist.

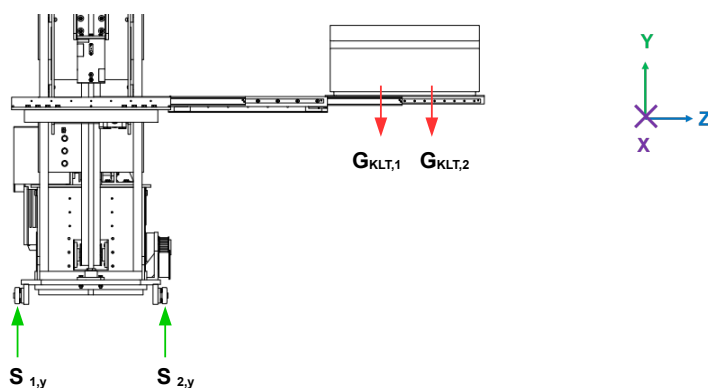


Abbildung 8.13: Maßgebende Ansicht für statisches Ersatzsystem in Abbildung 8.14.
Quelle: Eigene Darstellung.

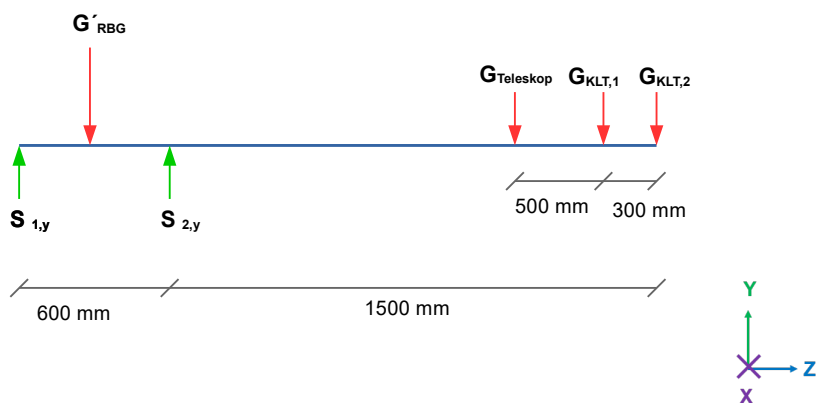


Abbildung 8.14: Statisches Ersatzsystem des Mini-RBG zur Bestimmung der Kippneigung infolge Radlastverlagerung der Spuren 1 und 2 bei vollständig ausgefahrenem Teleskoptisch.
Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei ist

$$G'_{RBG} = 3700 \text{ N}$$

die zentrisch bei der Koordinate $z = 0$ resultierend aus Eigenmasse von Fahrwerk und Hubgerüst angreifende Gewichtskraft. Die Koordinate $z = 0$ entspricht gleichzeitig auch der Schwerpunktlage in z -Richtung, wenn sich die Teleskopachse in Nulllage befindet. Aus Gründen der Vereinfachung wird die infolge Ausfahrens der z -Achse resultierende Eigenmasseverlagerung als Einzellast

$$G'_{Teleskop} = 200 \text{ N}$$

gesetzt.

Aus der Gleichgewichtsbedingung folgt:

$$\sum y = S_{1,y} + S_{2,y} - G'_{RBG} - G_{Teleskop} - G_{KLT,1} - G_{KLT,1} = 0$$

Mit dem Momentengleichgewicht um S_1

$$\sum M^{S_1} = 0$$

ist

$$-G'_{RBG} \cdot 0,3m + S_{2,y} \cdot 0,6m - G_{Teleskop} \cdot 1,3m - G_{KLT,1} \cdot 1,8m - G_{KLT,2} \cdot 2,1m = 0$$

und folgt

$$S_{2,y} = \underline{4233 N} .$$

Eingesetzt in die Gleichgewichtsbedingung folgt

$$S_{1,y} = \underline{-266 N} .$$

Insofern hebt bei voll ausgefahrener und maximal beladener Teleskopachse die der Last abgewandte Spur S1 geringfügig ab, was aufgrund der Eigenmasse des Grundrahmens mit Fahrschiene als vernachlässigbar anzusehen ist. Im Ergebnis ist somit der Nachweis der Standsicherheit gegen Kippen im Betrieb erbracht und eine hinreichende Risikominderung hinsichtlich der Gefährdung Nr.3 gewährleistet.

8.4.3 Redundante Hubwerksbremse

Um die schwerkraftbelastete y-Achse gegen unbeabsichtigtes Absenken zu sichern und damit eine Risikominderung der Gefährdung Nr. 5 herbeizuführen, wird einerseits der Antriebsmotor mit einer Sicherheitsbremse ausgeführt, andererseits am Hubwerk eine Fangbremse vorgesehen. Die mechanische Sicherheitsbremse des Antriebs ist lediglich aktiv, wenn der Antrieb in einer sicheren Position, wie es z.B. bei einem Nothalt der Fall ist, gehalten werden muss. Beim Anfahren eines Betriebshalts, sprich einer Ein- oder Auslagerungsposition aber auch einer Übergabeposition wird die Achse durch die Regelung des Motors in Position gehalten. Wird währenddessen über Absolutwert-Inkrementalwertgeber¹⁰³ der Motoren eine unzulässige Lageabweichung detektiert, fällt die Bremse ein. Ein automatischer Wiederanlauf ist in diesem Fall nicht möglich, da es zunächst einer Quittierung dieser Sicherheitsfunktion nach vorheriger Überprüfung auf z.B. Fehlfunktion oder Überlast bedarf. Da es sich hierbei um eine Lösen-Bremse handelt, ist diese geschlossen, wenn die Anlage stromlos ist. Da die Bremse auf den Antrieb wirkt, ist deren Schutzfunktion jedoch hinfällig, wenn die Welle-Nabe-Verbindung zwischen Riemenscheibe und Motor, oder der Riemen selbst versagen sollte. In dem Fall könnte sich die Last ungehindert absenken, so dass zur Minderung des Risikos der Gefährdungslage Nr.5 alleinig das Vorsehen einer Bremse am Antrieb keine vollständige Sicherheit bietet, indem hierdurch lediglich die Fälle des Normalbetriebs abgedeckt werden. Um eine hinreichende Risikominderung auch im Versagensfall der Antriebselemente zu gewährleisten, wird am Hubgerüst eine Sicherheits-Fangbremse implementiert. Dabei handelt es sich um eine elektromagnetisch betätigte Linearbremse, die sich an einer am Hubgerüst des Mini-

¹⁰³ Durch einen Absolutwert-Inkrementalwertgeber kann die Lage der Motorwelle ohne vorherige Bewegung zur Referenzierung bestimmt werden, so dass der Messwert durch die Steuerung jederzeit überwachbar ist.

Regalbediengerätes angebrachten Linearführung abstützt. Diese Linearführung in Gestalt einer Kolbenstange ist nicht nur Führung, sondern auch Reibpartner der auf einem mechanischen Wirkprinzip basierenden Bremse, siehe Abbildung 8.15, bei der es sich ebenfalls um eine Lösen-Bremse handelt, die aktiv gelüftet werden muss und somit im stromlosen Zustand und bei aktivem Nothalt geschlossen ist.

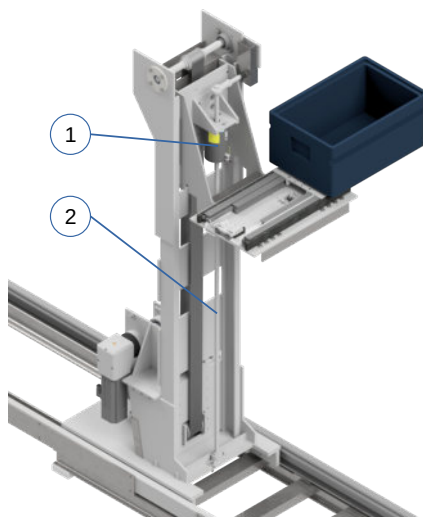


Abbildung 8.15: Sicherheits-Linear-Fangbremse am Hubgerüst des Mini-Regalbediengerätes.

Pos.1: Fangbremse.

Pos.2: Kolbenstange als Bremsgegenkörper.

Quelle: Eigene Darstellung.

Insofern ist die oben dargestellte Fangbremse sowohl hinsichtlich der Konstellation der Einbaulage, als auch des Wirkprinzips und der Ansteuerung geeignet, die Risiken der gefahrbringenden Eventualitäten bei Wartungs- und Montagearbeiten am Riementrieb zu mindern. Während eine unbeabsichtigte Soll-Lageabweichung während des Betriebes vom Antriebsmotor detektiert und kompensiert werden kann, muss zur Ansteuerung der Fangbremse am Hubgerüst eine von den Antriebselementen unabhängige Positionsermittlung vorhanden sein. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass der Antriebsriemen an einer Stelle durch Bruch versagt, wo sich das Absenken der Last nicht durch rotatorische Bewegung an einer der Umlenkrollen detektieren lässt. Dementsprechend ist am Hubtisch ein sicherer Positionssensor verbaut, der die Lage des Hubtisches gegenüber dem Hubgerüst erfasst. Wird durch diesen Sensor während des Betriebes eine Abweichung der y-Koordinate vom Soll-Wert festgestellt, fällt die Bremse ein.

8.5 Fazit der Risikobeurteilung

Die vorausgegangene Risikobeurteilung hat zum Ergebnis, dass ein sicherer Betrieb des Mini-Regalbediengerätes unter Berücksichtigung diverser konstruktiver und technischer Maßnahmen möglich ist und somit den Anforderungen an die einschlägige Normung genüge getan werden kann. Es konnte durch Umsetzung konstruktiver Merkmale eine signifikante Risikominderung bezüglich diverser Gefährdungen herbeigeführt werden. Gleichwohl verbleiben Risiken, deren Minderung die Implementierung technischer Schutzmaßnahmen erfordern. Die dahingehende Konzeption ist im nachfolgenden Kapitel 9.1 dargelegt.

9 Sicherheitsarchitektur und Bedienkonzept des Mini-Regalbediengerätes im Anwendungsszenario des Mobilien Supermarktes

Auf Basis der durchgeführten Risikobeurteilung, deren für das Anwendungsszenario des Mobilien Supermarktes relevantesten Bestandteile in Kapitel 8.3 dargelegt wurden, ist ein Sicherheitskonzept zur Risikominderung zu erstellen, da sich eine hinreichende Risikominderung nicht alleinig durch eine inhärent sichere Konstruktion herbeiführen lässt. Die Umsetzung der Risikominderung mit rein konstruktiven Maßnahmen stünde in Teilen der Verwirklichung des Anwendungsszenarios diametral entgegen, indem durch feste trennende Schutzeinrichtungen die Zugänglichkeit der Anlage im Gesamten stark eingeschränkt, respektive partiell gar nicht gegeben wäre. Gleichwohl gilt es auch bei der Nutzung beweglicher Schutzeinrichtungen eine auf das Anwendungsszenario mit aktiver Mensch-Maschine-Kollaboration ausgerichtete Sicherheitskonzeption zu erstellen, die den Anforderungen der Risikominderung uneingeschränkt gerecht wird, ohne dabei dem prozessualen Prinzip des Mobilien Supermarktes entgegenzustehen. Um diesem, sich aus multidirektionalen Anforderungen ergebenden, Spannungsfeld zu begegnen, bedarf es einer kaskadierten Sicherheitsarchitektur mit auf verschiedene Sensoreinheiten abgestuft zugeordneten Funktionalitäten.¹⁰⁴ In prozessualer Hinsicht sind die Sicherheitsarchitektur und die verwendeten Systeme zur technischen Risikominderung zwingend auch im Lichte der Benutzer- und Bedienfreundlichkeit zu sehen, so dass bereits an dieser Stelle eine Gesamtbetrachtung dieser Aspekte zu erfolgen hat. So ist bei der Wahl der technischen Schutzsysteme und deren Ausgestaltung der Belange der Bedienbarkeit und Nutzerfreundlichkeit Rechnung zu tragen, um einen größtmöglichen Erfüllungsgrad der partiell konträren Anforderungen aus einzuhaltenden Sicherheitsvorkehrungen und prozessualen Gesichtspunkten zu erzielen.

Das nachfolgend beschriebene technische Konzept zur Absicherung des Zugangs zum Gefahrenbereich des Mini-Regalbediengerätes im Anwendungsszenario des Mobilien Supermarktes fokussiert dabei auf die Abgabeseite, vgl. Abbildung 9.1. Die vollumfängliche Betrachtung der Absicherung auch auf der Entnahmeseite ist von einer Vielzahl anwendungsspezifisch wählbarer Parameter abhängig, so dass an dieser Stelle kein konkretes Ausführungsbeispiel aufgezeigt wird, sondern lediglich allgemeingültige Prinzipien der Realisierbarkeit. Der weiteren Betrachtung liegt daher die in Abbildung 9.1 illustrierte Konstellation zugrunde, wonach sich auf der Entnahmeseite des Mini-Regalbediengerätes zwei der in Kapitel 5.3.1.1 beschriebenen Regalmodule befinden, die entlang der Längsachse (x-Achse) des Mini-RBG an- und abtransportiert werden. Alle im Zusammenhang mit den Regalmodulen stehenden Aspekte hinsichtlich deren sicheren Gestaltung unterliegen nicht der vorliegenden Betrachtung, da dies formell über die gemäß DIN EN ISO 12100 zu definierenden Maschinengrenzen des Mini-RBG hinausreicht. Gleichwohl finden dahingehende Überlegungen Berücksichtigung, da im Sinne der Anwendung eine Gesamtbetrachtung aller daran beteiligten Komponenten vorzunehmen ist. Dies lässt sich bereits daran erkennen, dass die Regalmodule selbst integraler Bestandteil der Zugangsabsicherung zum Regalbediengerät darstellen können, sofern durch entsprechende technische Vorkehrungen ein Hineingreifen unterbunden wird und somit durch die Regale quasi eine physische Trennung zum Gefahrenbereich des Regalbediengerätes besteht. Auf diese Weise kann der Risikominderung zur Gefährdung Ziff.4, siehe Kap. 8.3.2.4 Rechnung

¹⁰⁴ Vgl. Hofmann 2020 [Hof20B], [Hof20C] und Hofmann 2021 [Hof21].

getragen werden. Dies könnte einerseits z.B. durch eine betätigbare trennende Schutzeinrichtung in Form eines Rolladens am Regal gegeben sein, durch den gewährleistet ist, dass bspw. für manuelle Kommissionierprozesse die Zugänglichkeit gegeben ist, jedoch bei der Beschickung durch das Mini-Regalbediengerät nur die zu diesem zugewandten Seite offen ist. Sofern dies gewährleistet ist, wäre auf der Entnahmeseite des Mini-RBG lediglich zusätzlich jener Bereich entlang der x-Achse durch zusätzliche technische Schutzeinrichtungen zu überwachen, der nicht von den Regalmodulen überdeckt wird. Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Absicherung des kompletten Entnahme- und Fahrkorridors mithilfe beweglicher Schutzeinrichtungen, die am Aufstellort fest installiert sind. Insofern korreliert die Frage nach der Sicherung des Zugangs von der Entnahmeseite her mit den individuellen örtlichen Gegebenheiten und der Einbindung des Mini-Regalbediengerätes in die Prozessstruktur der Anwenderschaft und den in Kapitel 7 beschriebenen Anwendungsszenarien.

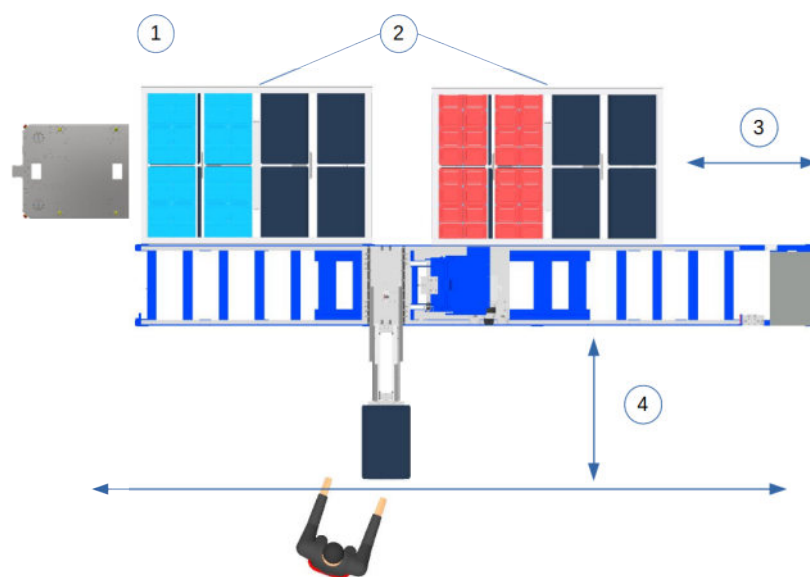


Abbildung 9.1: Maßgebende Anwendungskonstellation am Mini-RBG für die Sicherheitsbetrachtung.

Pos.1: Entnahmeseite.

Pos.2: Mobile Regalmodule.

Pos.3: An- und Abtransportrichtung von Regalmodulen parallel der Längsachse des Mini-RBG.

Pos.4: Bereich auf der Entnahmeseite, in dem die Materialübergabe vollzogen werden kann.

Quelle: Eigene Darstellung.

9.1 Sensorkonzept mit Sicherheitslaserscannern

Zur Erfüllung der aus der Gefährdungsanalyse resultierenden Anforderungen hinsichtlich der Personensicherheit werden zur Umsetzung technischer Maßnahmen ortsbewegliche optoelektronische Schutzeinrichtungen in Form von zwei Sicherheitslaserscannern auf der Abgabeseite eingesetzt, welche direkt am Mini-RBG verbaut sind, vgl. Abbildung 9.2 um die Mobilität der Maschine uneingeschränkt zu wahren. Ferner ist durch die berührungslos wirkende Schutzeinrichtung die grundsätzliche Zugänglichkeit der Anlage nicht beeinträchtigt, obgleich das Konzept zur Risikominderung vollumfänglich umgesetzt wird. Die im Weiteren beschriebene Sicherheitskonzeption adressiert die in Kapitel 8.3.1 genannten Gefährdungen mit den laufenden Nummern Ziff. 1, 2, 4 sowie 5 und ist geeignet, die in Kapitel 8.3.2 beschriebene Risikominderung herbeizuführen.



Abbildung 9.2: Anbringung der Laserscanner auf der Abgabeseite.

Pos.1: Laserscanner Nr.1

Pos.2: Laserscanner Nr.2.

Quelle: Eigene Darstellung.

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 und des daraus resultierenden Gefahrenbereichs aufhalten. Die räumliche Ausdehnung der Schutzfelder bemisst sich gemäß DIN EN ISO 13855 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 konstruktiv 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.

Wird infolge des Zugangs bzw. des Zugriffs einer Person durch die berührungslos wirkende Schutzeinrichtung ein Maschinenstopp eingeleitet, muss gewährleistet sein, dass unter Berücksichtigung der Annäherungsgeschwindigkeit der Person sämtliche Fahrbewegungen angehalten wurden und sich die Maschine in einem sicheren Zustand befindet, so dass durch den Zugang bzw. den Zugriff kein Gefährdungsereignis eintreten kann. Die Ausdehnung der durch die berührungslos wirkenden Sicherheitssensoren überwachten Schutzfelder bemisst sich anhand des in DIN EN ISO 13855 definierten Sicherheitsabstandes. Die Sicherheitslaserscanner sollen gemäß Ziff. 6.3 dieser Norm, so angebracht werden, dass deren Schutzfeld parallel zur Annäherungsrichtung orientiert ist. Laserscanner sind in der Lage, die Umgebung kontinuierlich in einer Ebene abzutasten. Das Funktionsprinzip beruht auf der Aussendung eines Lichtimpulses, der von einem Objekt reflektiert wird und wieder auf den Spiegel des Laserscanners trifft. Anhand der Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Wiederauftreffen lässt sich die Entfernung zu einem Objekt bestimmen.¹⁰⁵ Wird der Lichtstrahl von einer Oberfläche reflektiert, die sich innerhalb der definierten Schutzzone befindet, wird durch die binäre Schaltfunktion einer sicheren OSSD-Schnittstelle¹⁰⁶ in der Maschinensteuerung ein Nothalt ausgelöst. Safety-Funktionen von beweglichen Schutzeinrichtungen (BWS), wie sie Laserscanner darstellen, sind stets binär und basieren auf einem Sensorsignal, welches das Erfassen/Detektieren eines irgendwie gearteten Objektes mit z.B. Licht-Reflexionsvermögen anzeigt. Der erforderliche Sicherheitsabstand S bzw. die Ausdehnung des Schutzfeldes berechnet sich vorliegend nach DIN EN ISO 13855 wie folgt:

$$S = (K \cdot T) + C = (K \cdot T) + 1200 \text{ mm} - 0,4 \cdot H \quad (8)$$

S	Mindest-Sicherheitsabstand	[mm]
K	Annäherungsgeschwindigkeit	[mm/s]
T	Nachlaufzeit des gesamten Systems	[s]
C	Eindringabstand	[mm]
H	Höhe des Schutzfeldes über Bezugsebene	[mm]

wobei in der vorliegenden Konstellation für die Annäherungsgeschwindigkeit einer Person

$$K = 1600 \text{ mm/s}$$

zu setzen ist.

Die Nachlaufzeit T des Systems umfasst einerseits die Zeitspanne, die infolge Latenz verstreicht, bis ein von einer Schutzeinrichtung ausgehendes Signal ein Stopp-Signal der Steuerung bewirkt, andererseits fließt die Bremszeit ein, welche den Zeitbedarf für das physische Abbremsen der Achsbewegungen bis zum Stillstand umfasst. Die Werte werden im Versuch für verschiedene Betriebskonstellationen ermittelt, wobei in die weitere Berechnung der schlechteste Wert der jeweils 10 durchgeführten Messungen einfließen muss.

¹⁰⁵ Vgl. Neudörfer 2016 [Neu16].

¹⁰⁶ Eine OSSD-Schnittstelle wertet Signale von u.a. optoelektronischen Schutzeinrichtungen zur Detektion von Personen aus. Über eine binäre Schaltfunktion wird im Bedarfsfall ein Nothalt ausgelöst.

Für das Mini-Regalbediengerät wurde eine Nachlaufzeit von

$$T = 0,55 \text{ s} \text{ ermittelt.}$$

Der Eindringabstand C definiert jenen Abstand, um den sich ein Körperteil, vordringlich die Hand, an einer Schutzeinrichtung vorbei bewegen kann, ohne dass es zum Auslösen der Schutzfunktion kommt. Dieser Abstand korreliert mit der Anbringungshöhe der Sensorik, respektive der Höhe des Schutzfeldes H über der Bezugsebene.

Vorliegend folgt schließlich mit Formel (8) für den Sicherheitsabstand mit

$$H = 200 \text{ mm}$$

$$S = (1600 \text{ mm/s} \cdot 0,55 \text{ s}) + 1200 \text{ mm} - 0,4 \cdot 200 \text{ mm} = \underline{2000 \text{ mm}}$$

Obiger Berechnung folgend, ist ein schützender Sicherheitsabstand zu sämtlichen Gefahrenstellen von 2,0 Meter vorzusehen. Die Abbildung 9.3 zeigt schematisch die Schutzfeldzonierung und Anbringung der hierfür eingesetzten 2D-Sicherheitslaserscanner vom Typ Psenscan der Pilz GmbH & Co KG auf der Abgabeseite des Mini-RBG. Die Laserscanner verfügen über eine maximale Schutzfeldausdehnung von 5,5 m bei einem Öffnungswinkel von 275° .

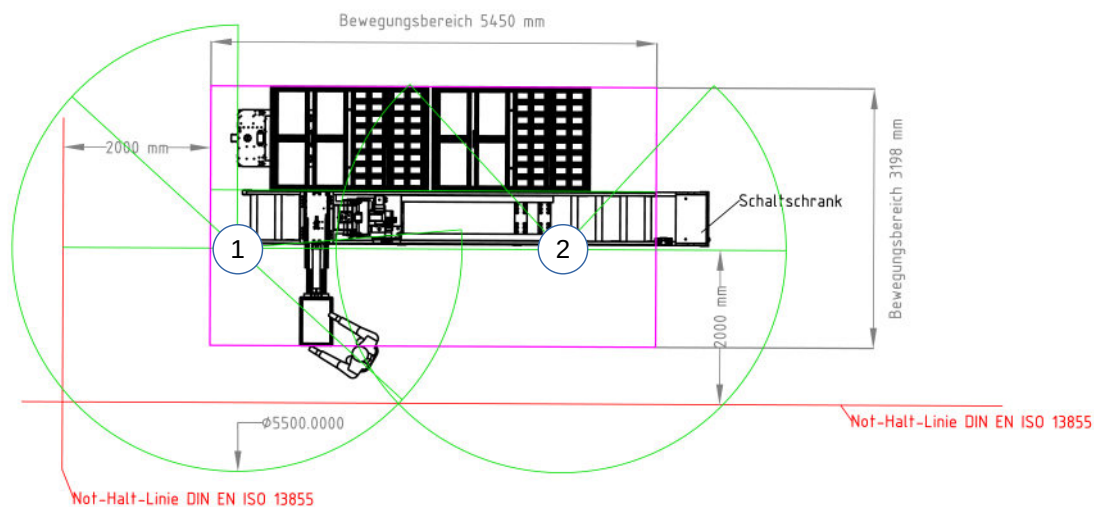


Abbildung 9.3: Bemessung der Schutzfeldzonierung auf der Abgabeseite des Mini-RBG.

Pos.1: Laserscanner Nr.1.

Pos.2: Laserscanner Nr.2.

Bewegungsbereich des Mini-RBG: magenta dargestellt.

Maximaler Erfassungsbereich der Laserscanner grün dargestellt.

Nothaltlinien rot dargestellt.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Anbringungsposition des Laserscanners Nr.1, siehe Abbildungen 9.2 und 9.3, lässt dabei auch eine Zugangsabsicherung quer zur Längsrichtung des Mini-RBG an dessen vom Schaltschrank gegenüberliegenden Schienenende zu. Auf der Seite des Schaltschranks ist dies nicht analog gegeben. Einerseits verhindert der Schaltschrank eine Ausweitung des Schutzfeldes von Laserscanner Nr.2 mit dem gebotenen Sicherheitsabstand auf die Entnahmeseite, obgleich dies der Öffnungswinkel der Laserscanner zuließe. Andererseits kann jedoch auch der Bereich zwischen Schaltschrank und dem ersten der beiden Regale, vgl. Abbildung 9.4, nicht überwacht werden, da hier Teile des Fahrwerks und des Hubgerüsts des Mini-Regalbediengerätes in den Erfassungsbereich des Laserscanners ragen würden. Dies ist der in Kapitel 6 beschriebenen Konstruktion des Mini-RBG geschuldet. Auf der dem Schaltschrank abgewandten Seite ist dies aufgrund des asymmetrischen Aufbaus bzgl. der y-Achse nicht der Fall, so dass hier auch ggf. in Abhängigkeit der Positionierung der Regale ein Schutzfeld über den Schienenkörper hinweg erfolgen könnte, da sich der tiefste Punkt der Teleskopiereinheit mit 208 mm über Bodenbezugsniveau oberhalb der Anbringungshöhe H des Laserscanners bzw des Schutzfeldes befindet. Die von den Laserscannern praktisch erfassbaren Bereiche sind dementsprechend in Abbildung 9.4 dargestellt.

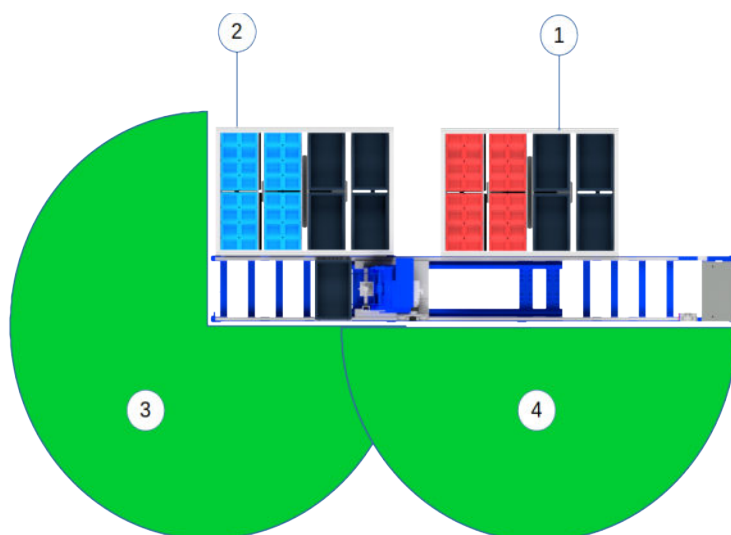


Abbildung 9.4: Erfassungsbereiche der Laserscanner am Mini-RBG.

Pos.1: Regal Nr.1.

Pos.2: Regal Nr.2.

Pos.3: Erfassungsbereich Laserscanner Nr.1.

Pos.4: Erfassungsbereich Laserscanner Nr.2.

Quelle: Eigene Darstellung.

Hieraus resultiert eine wie in nachfolgender Abbildung 9.5 ersichtliche Anordnung des Schutzfeldes entsprechend der Ausdehnung des Gefahrenbereiches.



Abbildung 9.5: Gefahren-/ Schutzfeldbereich (rot dargestellt) auf der Abgabeseite des Mini-RBG.
Quelle: Eigene Darstellung.

Für eine Ein- oder Auslagerung von KLT in bzw. aus den Regalmodulen, sind Fahrbewegungen aller drei Achsen zu vollziehen. Währenddessen besteht das höchste Gefährdungspotential in Gestalt der in Kapitel 8.3.1 genannten Gefährdungen Ziffern 1,2 und 4, da sich bezüglich derer keine rein konstruktiv gestalterischen Maßnahmen zur Risikominderung umsetzen ließen. Insofern besteht das Risiko des Einziehens und Erfassens am Riemtrieb der x-Achse, des Quetschens und Abscherens zwischen bewegten und feststehenden Teilen insbesondere am Mini-RBG selbst sowie am Spalt zwischen Hubmast und den Regalen, wobei jede Gefährdung für sich, aber auch in Kombination schwerwiegende irreversible Verletzungen hervorrufen kann. Der Vorgang der Materialübergabe an eine Person ist hingegen dergestalt, dass zunächst die zur Übergabe bestimmte x- und y-Koordinaten angefahren wird und keine parallelisierte Fahrbewegung zusammen mit der z-Achse erfolgt. In dieser Phase ist das primäre Schutzfeld mit der oben bestimmten Ausdehnung von mindestens 2000 mm noch aktiv. Umgeben ist das Schutzfeld von einem sich daran direkt anschließenden Warnfeld, siehe Abbildung 9.6. Betritt eine Person das Warnfeld während die Achsen Bewegungen ausführen, wird deren Geschwindigkeit reduziert, es wird dann mit Safe Limited Speed¹⁰⁷ (SLS) gefahren.

Ist die Zielposition hinsichtlich der x- und y-Koordinaten erreicht und befinden sich diese beiden Achsen im sicheren Stillstand – Safe Operating Stop¹⁰⁸ (SOS) –, kann im nächsten Schritt das Schutzfeld verringert werden, was über ein aktives Umschalten der Zonen-Einstellung der Laserscanner erfolgt, siehe Abbildung 9.7.

107 Safe Limited Speed stellt gemäß DIN EN 61800-5-2 die sichere Begrenzung der Fahrgeschwindigkeit dar. Diese definierte Geschwindigkeit wird überwacht, eine Abweichung von der maximal zulässigen Geschwindigkeit führt zu einem von der Sicherheitssteuerung automatisch eingeleiteten Stoppen der Achsbewegung.

108 Safe Operating Stop stellt gemäß DIN EN 61800-5-2 eine Bewegungsfunktion dar, bei der die Position einer Achse durch eine aktive Stillstandsregelung der Antriebe innerhalb eines definierten Soll-Bereichs gehalten wird.



Abbildung 9.6: Schutzfeld / Gefahrenbereich am Mini-RBG während des Betriebs aller 3 Achsen.
 Rot dargestellt: Schutzfeld der Laserscanner/Gefahrenbereich
 Gelb dargestellt: Warnfeld der Laserscanner

Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 9.7: Reduziertes Schutzfeld am Beginn des Andienungsprozesses, x- und y-Achse im SOS-Zustand, z-Achse aktiv.

Quelle: Eigene Darstellung.

Für das finale Anreichen des KLT wird lediglich die z-Achse (Teleskoptisch) zu der den Regalen abgewandten Seite verfahren. Dabei kommt die Tischplatte der Teleskopeinheit der Person, die sich an der Übergabeposition befindet, entgegen. An dieser Platte befinden sich keine rotierenden Teile, auch existieren keine Quetsch- und Scherstellen, so dass lediglich die Gefahr des Stoßens verbleibt und das hierdurch resultierende Gefährdungspotential als geringfügig einzustufen ist. Infolge dessen kann das Schutzfeld für diese Phase des Andienungsprozesses deutlich verkleinert werden, so dass sich die Person, ausgehend von der ursprünglichen Warteposition außerhalb des Primärschutzfeldes, in Richtung Übergabeposition begeben kann, wie oben in Abbildung 9.7 dargestellt ist. Ferner kann das

Schutzfeld bereits aufgrund des Umstandes, dass es sich hierbei um keine dynamische Annäherung im Sinne der DIN EN ISO 13855 handelt, reduziert werden. Insofern ist zur Bemessung des Sicherheitsabstandes bzw. des Schutzfeldes nicht die Annäherungsgeschwindigkeit von 1600 mm/s in Ansatz zu bringen. Vielmehr liegt eine statische Situation vor, indem allenfalls eine Bewegung aus dem Stand heraus erfolgt. Für die Ausdehnung des Schutzfeldes S ist diesem Ansatz folgend lediglich eine Eindringtiefe C von 850 mm zu berücksichtigen, was als normale Arm-Reichweite eines Menschen angesehen wird.

Stehen schließlich alle Achsen still, so dass auch die z-Koordinate der zur Übergabe bestimmten Position erreicht ist und sich der Antrieb der z-Achse im Safe Operating Stop befindet, kann die Person an die Tischplatte der Teleskopeinheit herantreten, um den darauf befindlichen KLT, respektive das Material daraus, entgegenzunehmen. Um eine zu frühe Annäherung der Person an den Teleskoptisch zu verhindern, wird den Mitarbeiter:innen akustisch und/oder visuell signalisiert, sobald die Materialentnahme erfolgen kann. In dieser Phase ist kein Schutzfeld, sondern lediglich ein Warnfeld der Laserscanner aktiv, siehe Abbildung 9.8, da sich alle Achsen in einem Safe Operating Stop befinden und von der Anlage keine Gefährdung ausgeht.

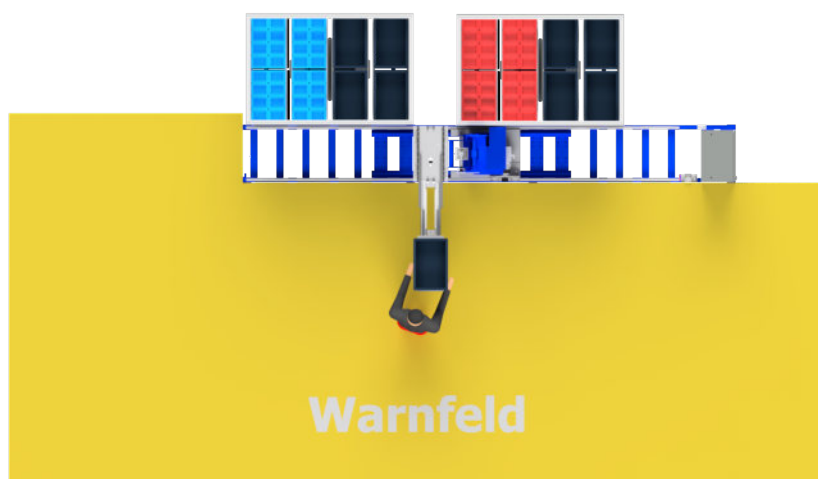


Abbildung 9.8: Aktives Warnfeld während der Materialübergabe, wenn sich alle 3 Achsen im SOS-Zustand befinden.

Quelle: Eigene Darstellung.

Aus rein sicherheitstechnischer Betrachtung könnte in dieser Betriebsphase dem Grunde nach auf ein Warnfeld verzichtet werden, indem von dem Mini-Regalbediengerät keine gefahrbringenden Bewegungen vollzogen werden. Die Überwachung des Warnbereichs wird jedoch in dieser Phase in prozessualer Hinsicht genutzt, indem das Betreten und Verlassen dieses Warnfeldes aktiver Bestandteil für die Detektion der Beendigung der Materialübergabe darstellt. Insofern kann durch die technische Schutzeinrichtung im weiteren Sinne auch eine Bedienfunktionalität der Ablaufsteuerung abgebildet werden. So stellt das Verlassen des Warnfeldes 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, siehe Abbildung 9.9. Ein unbeabsichtigter und möglicherweise automatischer Wiederanlauf der Anlage, der im Ergebnis den Eintritt eines Gefährdungsereignisses zur Folge haben könnte, wird durch die Umschaltung auf Schutzfeld sicher ausgeschlossen. Befände sich zu diesem Zeitpunkt noch eine Person im Gefahrenbereich, würde durch die Verletzung des Schutzfeldes ein Nothalt ausgelöst, so dass im Falle einer Fehlinterpretation bzgl. der Vollendung des Materialübergabeprozesses eine sichere Rückfallebene besteht.

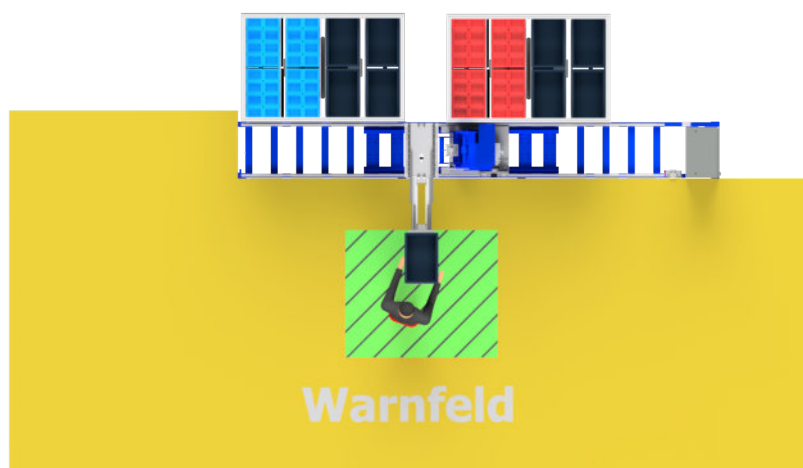


Abbildung 9.9: Aktives Warnfeld während der Materialübergabe mit Quittierzone (grün schraffiert).
Quelle: Eigene Darstellung.

9.1.1 Steuerungssystem der berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung

Werden zur Risikominderung technische Schutzmaßnahmen – wie vorliegend der Fall – ergriffen, sind die hierfür vorgesehenen Hardwarebestandteile in Gestalt von bspw. berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen stets in Verknüpfung mit der hierfür erforderlichen Steuerung zu betrachten, vgl. Kapitel 8.3. Stützt sich eine zwingend erforderliche Risikominderung auf eine Schutzeinrichtung, muss sichergestellt werden, dass diese ihre Funktion im Betrieb auch faktisch erfüllt. In Abhängigkeit des Risiko-Schweregrades einer Gefährdungslage steigen die Anforderungen hinsichtlich des Erfüllungsgrades der Schutzfunktion und somit auch der Ausfallsicherheit. Die in einer Anlage implementierten sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung haben dementsprechend den Anforderungen des gemäß DIN EN ISO 13849-1 bestimmbaren Performance Levels, vgl. auch Kapitel 8.3, zu genügen. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind seitens der Sicherheitssteuerung primär die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- Vor dem automatischen Anlauf der Maschine ist sicherzustellen, dass sich keine Person im Gefahrenbereich befindet, die berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen müssen aktiv sein.
- Wird das Schutzfeld während des Automatikbetriebs verletzt, sind alle gefahrbringenden Bewegungen unverzüglich anzuhalten.
- Im Fall einer zum Nothalt führenden Verletzung des Schutzfeldes, ist durch manuelle Quittierung die Auflösung der zum Nothalt geführten Situation durch die bedienende Person zu bestätigen.

Das in Kapitel 9.1 vorgestellte Sicherheitskonzept adressiert die Gefährdungen Ziffern 1, 2, 4 und 5, siehe Kapitel 8.3.1.1 ff. Zur effektiven Risikominderung der vorgenannten Gefährdungen ist das Stillsetzen der Achsbewegungen zu vollziehen, so dass für diese Steuerungsfunktion der erforderliche Performance Level PL_r gemäß DIN EN ISO 13849-1 über einen Risikograph zu bestimmen ist, vgl. Kapitel. 8.3. Für die hierfür erforderlichen Parameter

- S Schwere der Verletzung
- F Häufigkeit und / oder Dauer der Exposition
- P Möglichkeit zur Vermeidung

gilt für die Bestimmung des PL_r in der vorliegenden Konstellation:

- $S = 2$
- $F = 2$
- $P = 1$

so dass anhand des in Abbildung 9.10 ersichtlichen Risikographs ein Performance Level d resultiert.

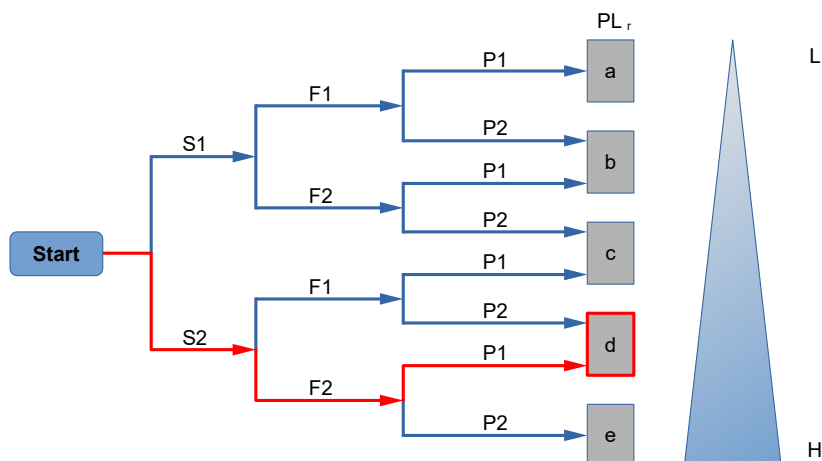


Abbildung 9.10: Bestimmung des Performance Levels der Stufe d anhand des Risikographs für die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung des Mini-RBG.
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 13849-1.

Die Steuerungsarchitektur muss demnach der Kategorie 3 gemäß DIN EN ISO 13849-1 entsprechen. Dies bedingt, dass ein einzelner Fehler an einem der sicherheitsbezogenen Teile nicht zum vollständigen Verlust der Sicherheitsfunktion führen darf und wann immer möglich, dieser Fehler von der Steuerung detektiert wird. Im Fehlerfall muss das Systemverhalten dergestalt sein, dass die Sicherheitsfunktion ausgeführt wird. Die Steuerungsarchitektur ist daher wie in Abbildung 9.11 dargestellt, auszuführen.

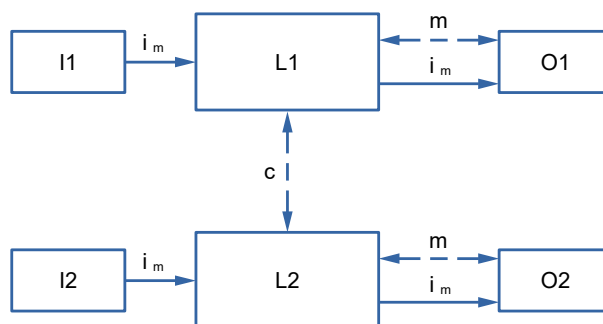


Abbildung 9.11: Steuerungsarchitektur Kategorie 3 gem. DIN EN ISO 13849-1

i_m	Verbindungsmittel
c	Kreuzvergleich
I1, I2	Eingabeeinheiten, Laserscanner 1 und 2
m	Überwachung
O1, O2	Ausgabeeinheiten, z.B. Hauptschütz
---	vernünftigerweise durchführbare Fehlererkennung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 13849-1.

9.2 Mensch-Maschine-Interaktion

Das Materialflussprinzip des Mobilten Supermarktes basiert auf einer ausgeprägten Mensch-Maschine-Interaktion, bei der Mitarbeiter:innen zur Erbringung einer Kommissionier- oder Montagetätigkeit mit einer autonom agierenden Maschine in Gestalt des Mini-Regalbediengerätes interagieren müssen. Das in Kapitel 9.1 vorgestellte Konzept zur Umsetzung der Risikominderung berücksichtigt dabei im gebotenen Maß die Belange der Personensicherheit, aber auch jene der Arbeitsabläufe, die erforderlich sind, um die generelle Umsetzbarkeit sowie die Effektivität dieses Materialflusssystemes zu gewährleisten. Gleichwohl kann die Sicherheitsarchitektur, die in ihren Grundzügen zunächst die Erfüllung der Risikominderung adressiert, die Arbeitsabläufe lediglich berücksichtigen respektive so integrieren, dass sie deren Vollziehung nicht entgegensteht. Um eine effektive und zugleich sichere Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu gestalten, bedarf es jedoch darüber hinausgehender Systeme zur Förderung der Kollaboration und Unterstützung der Mitarbeiter:innen. Diese sind einerseits im Bereich der aktiven Bedienung, aber auch der gerichteten Information an die unmittelbar mit der Maschine kollaborierenden, aber auch die in der Umgebung befindlichen Personen, angesiedelt.

Im Kontext der erzielbaren Effizienz und Umschlagleistung des Mobilten Supermarktes sind nicht nur die Leistungsdaten des Mini-RBG, wie in Kapitel 6 beschrieben, von Belang, sondern auch die mit der Materialübergabe verbundenen Wartezeiten und Laufwege der Mitarbeiter:innen. Aufgrund der Schienenlänge des Mini-RBG von ca. 5 Meter, ist in der Betrachtung der Arbeitsprozesse an einer Montagestation der Frage der mit der Materialübergabe verbundenen Laufwege durchaus Bedeutung beizumessen. Um unnötige

Laufwege zu sparen, soll die Übergabeposition möglichst variabel in Abhängigkeit der Position, wo die Mitarbeiter:innen das Material benötigen, erfolgen. Die Person, die das Material benötigt, soll somit befähigt werden, die Stelle für den Übergabevorgang intuitiv zu beeinflussen. Für die hierfür erforderliche Positionsdetektion könnten – als eine Möglichkeit – die Messdaten der Laserscanner herangezogen und ausgewertet werden. Abbildung 9.14 zeigt exemplarisch das von einer Auswerteeinheit graphisch visualisierte zweidimensionale Umgebungsabbild, der in Abbildung 9.12 ersichtlichen physischen Konstellation mit zwei versetzt stehenden Personen entlang der x-Achse des Mini-RBG.

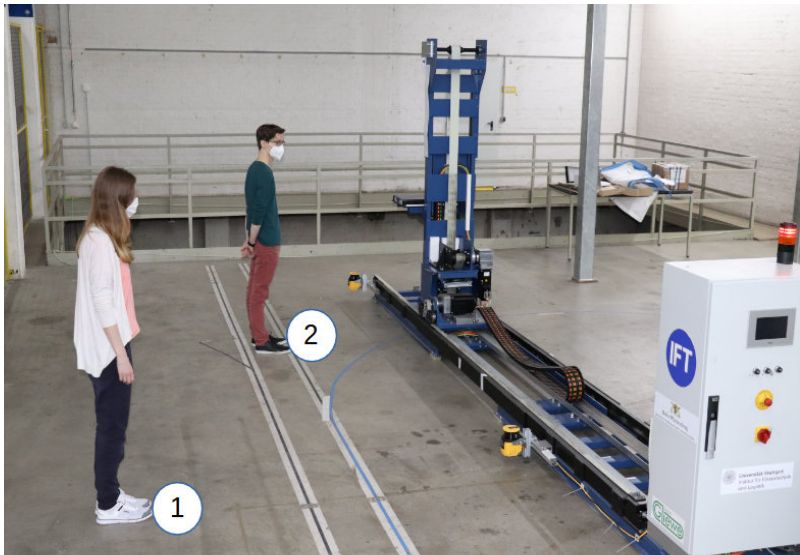


Abbildung 9.12: Zwei in y-Richtung versetzt stehende Personen (Nummern 1 und 2) entlang der x-Achse des Mini-RBG im Erfassungsbereich der Laserscanner.

Quelle: Eigene Darstellung.

Das in Abbildung 9.14 dargestellte Umgebungsabbild wird rein auf Basis der Messdaten der beiden Laserscanner generiert. Die Blickperspektive für diese Visualisierung geht aus Abbildung 9.13 hervor.

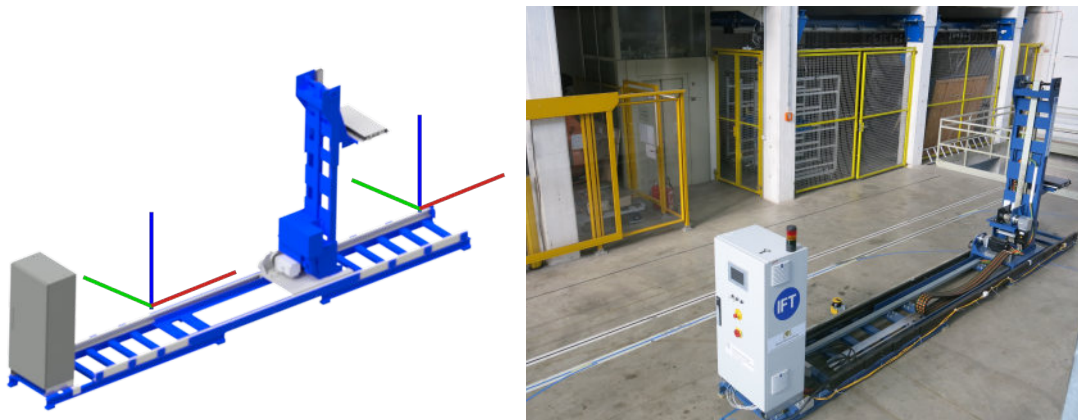


Abbildung 9.13: Darstellung der Blickrichtung bzgl. der Visualisierung der Laserscanner-Messdaten für die Abbildungen 9.13 und 9.14.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die in Abbildung 9.14 dargestellte Visualisierung im 3-dimensionalen Raum enthält die Überlagerung der Messdaten der beiden Laserscanner. Dabei sind die rot dargestellten Punkte Daten des Laserscanners Nr.1 und die grün dargestellten Punkte dem Laserscanner Nr. 2, siehe Übersichtsdarstellung in Abbildung 9.2, zuzuordnen.

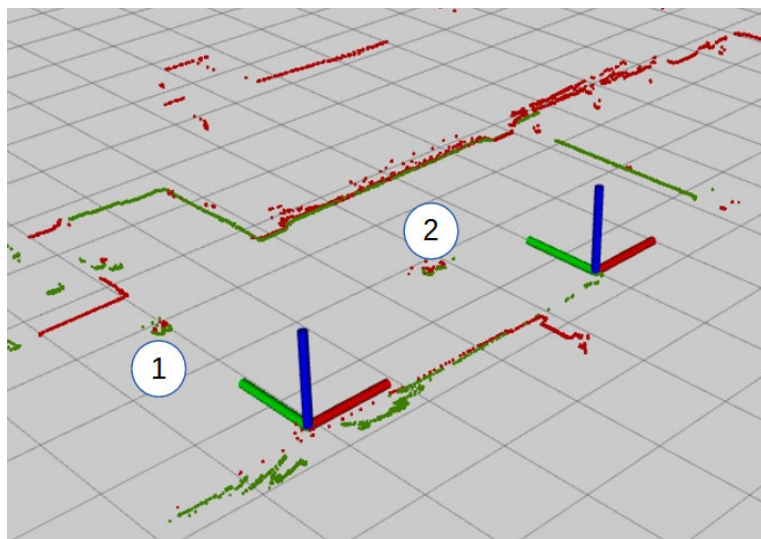


Abbildung 9.14: Visualisierung der Laserscannermessdaten am Mini-RBG im 3D-Raum.
Quelle: Eigene Darstellung.

Aus Abbildung 9.14 geht hervor, dass sich das durch die Laserscanner generierbare Umgebungsabbild auf Ansammlungen von Messpunkten beschränkt. So sind die Stellen, an

denen sich Personen im Erfassungsbereich befinden, siehe Abbildung 9.12, lediglich durch Punkthäufungen (Nummern 1 und 2) charakterisiert.

Die Verarbeitung der generierten Punktwolken und deren Interpretation erfolgt durch Algorithmen, die auf Künstlicher Intelligenz (KI) basieren und ist nicht für sicherheitsrelevante Funktionen nutzbar. Für das Auslösen einer Sicherheitsfunktion ist ausschließlich das bloße Vorhandensein eines Objektes vonnöten, um die Schaltbedingung zu erfüllen.

An dieser Stelle manifestiert sich ein fundamentales Problem, wenn die Positionsdetektion für die Materialübergabe allein auf den Laserscannern gründen soll, indem technologisch bedingt, vgl. Kapitel 9.1, eine Differenzierung zwischen Personen und Gegenständen nicht möglich ist. Die in Abbildung 9.15 dargestellte Situation verdeutlicht dies bei Vergleich mit Abbildung 9.14 eindrücklich. Anhand der Detektion der Laserscanner lässt sich nicht ausmachen, ob es sich um eine Person oder einen Gegenstand im Erfassungsbereich handelt, so dass die in Abbildung 9.15 ersichtliche Konstellation zu einem Nothalt der Anlage führen würde, wenn die Schaltbedingung innerhalb des Gefahrenbereichs erfüllt ist, obgleich hier unzweifelhaft keine Gefährdungslage einer Person vorliegt. Andererseits ist es nicht möglich, einen Menschen als Empfänger einer Materialübergabe zu identifizieren, wenn sich im Erfassungsbereich zudem Gegenstände befinden.

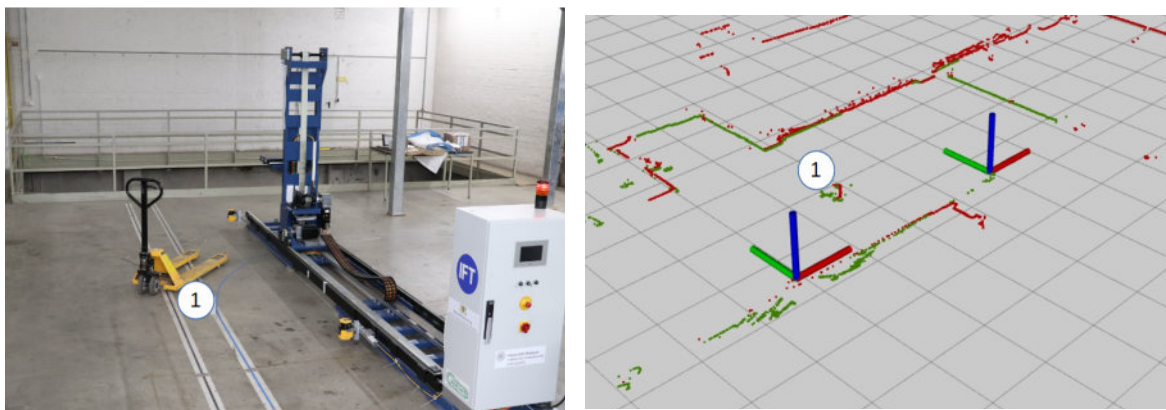


Abbildung 9.15: Gabelhubwagen im Erfassungsbereich der Laserscanner und zugehörige Visualisierung der Messdaten.
Quelle: Eigene Darstellung.

Um eine im Sinne dieser Bedienfunktion zuverlässige Differenzierung zwischen Menschen und Gegenständen zu erzielen, könnte zusätzlich 3D-Sensorik eingesetzt werden. Es ist insofern 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 Bedienungsfunktionalitäten und wäre nicht geeignet, einen Laserscanner als zertifizierte Personenschutzeinrichtung zu ersetzen. Korte [Kor21] zeigt Prinzipien auf, wie ein Sensorkonzept nicht nur zur Detektion, sondern auch zur Identifikation von Personen im Kontext des Betriebs von Fahrerlosen Transportfahrzeugen gestaltet werden kann. Diese Prinzipien sind auf den vorliegenden Anwendungsfall uneingeschränkt übertragbar.

Bei Anwendungen, welche nicht dem industriellen Anwendungsgebiet zuzuordnen sind, wie z. B. Automobile, werden im Sinne der Industrierichtlinien, wie z.B. DIN EN ISO 13849-1, nicht-personensichere 2D-Sensoren eingesetzt. In diesem Kontext sind insbesondere Ultraschallsensoren zu nennen, die gemäß Automotive-Sicherheitsintegritätslevel (ASIL¹⁰⁹) zertifiziert sind. Die Nachfrage nach Automatisierungslösungen, sowohl im industriellen als auch im Consumer Bereich, forciert derzeit die Entwicklung von 3D-Sensoren, insbesondere den bildverarbeitenden. Beispiele für Sensoren mit weit gefassten Anwendungsmöglichkeiten sind Radar-Sensoren, Mono-, Stereo-, Time-of-Flight¹¹⁰- und Infrarotkameras sowie LiDAR-Sensoren.¹¹¹ Allen gemein ist die zugrunde liegende Aufgabe, Konturen und Objekte zu detektieren, um dann mittels vortrainierter neuronaler Netze und KI-Algorithmen eine Objekterkennung und -klassifizierung – sprich Differenzierung – vorzunehmen. So werden beispielsweise für Fahrassistenzsysteme in Automobilen zum teil- und vollautonomen Fahren eine Kombination aus Kameras und Radarsensoren eingesetzt. Da die vorliegende Anwendung jedoch eine Bedienfunktionalität und gerade nicht eine mit Sicherheitsbezug darstellt, sind diese Prinzipien zu Zwecken der Etablierung einer berührungslosen Bedienfunktion im Kontext des Materialabrufes am Mini-Regalbediengerät übertragbar. Durch die Identifikation einer Person und Differenzierung von Gegenständen und mobilen Objekten, können potentielle Fehlerquellen hinsichtlich der Koordination des Andienungsprozesses mit dynamischer Übergabeposition, die in der Ablaufsteuerung angesiedelt ist, reduziert werden. So besteht die Möglichkeit über die bildverarbeitende Sensorik eine Person, die sich zur anstehenden Materialübergabe positioniert, zuverlässig anhand spezifischer Merkmale (Gestalt und Extremitäten) zu identifizieren, siehe Abbildung 9.16. Durch Überlagerung und Verknüpfung der Bilddaten mit den Messdaten der Laserscanner, vgl. Abbildung 9.16, können dann die Koordinaten der Person bestimmt werden, aus denen sich die x-Koordinate für die Übergabeposition entlang der Längsachse des Mini-RBG ergibt. Bei dem in Abbildung 9.16 dargestellten Versuchsaufbau verwendete Korte zusätzlich zu bildverarbeitender Sensorik noch Radarsensorik.

109 Das „Automotive Safety Integrity Level“ dient der Einschätzung und Beurteilung der Zuverlässigkeit von Sicherheitsfunktionen im Automotive-Bereich.

110 Time-of-Flight Kamerasysteme basieren auf der Laufzeitmessung eines Lichtimpulses, ausgehend vom Sender bis zum Auftreffen auf ein Objekt und Reflektion zurück zum Ausgangspunkt.

111 Light Detection and Ranging.



Abbildung 9.16: Klassifizierung und Identifikation einer Person anhand spezifischer Merkmale (Extremitäten) mittels bildverarbeitender Sensorik und eines Radarsensors.
Quelle: Korte 2021 [Kor21].

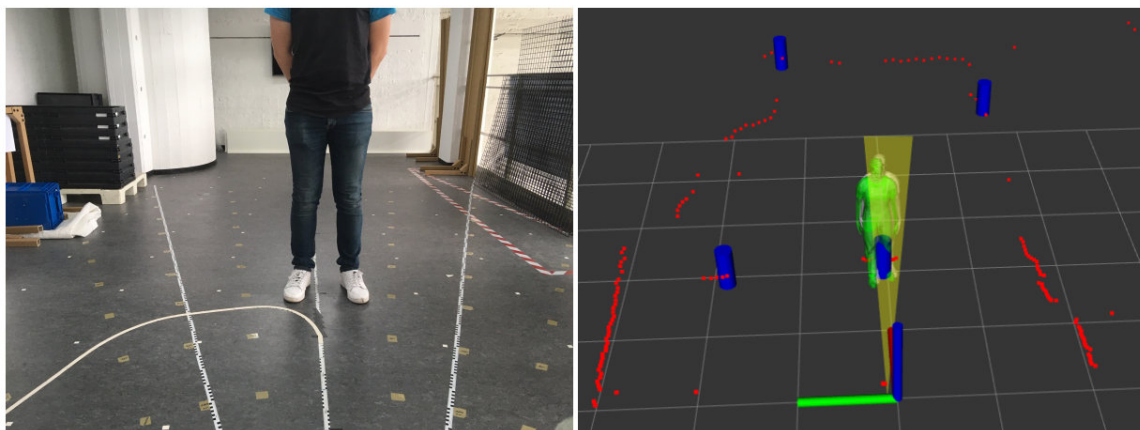


Abbildung 9.17: Möglichkeit zur Bestimmung der x-Koordinate für die Übergabeposition anhand der Warteposition der Person entlang der x-Achse mittels Identifikation durch bildverarbeitender Sensorik und Überlagerung mit den Laserscannerdaten gemäß des Sensorkonzeptes nach Korte.
Quelle: Korte 2021 S. 116 [Kor21].

In Abhängigkeit der anwendungsspezifischen Ausgestaltung der Materialbereitstellung können für einen vom Menschen gesteuerten Materialabruf ggf. weitere Bedienelemente, wie z.B. Tablet, Smartwatch oder Kommissionier-wearables¹¹², nötig sein, um den Andienungsprozess zu initiieren. 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 Interaktionsschnittstellen. Optional in der Sicherheitsarchitektur des Mobilten Supermarktes vorgesehene ortsauflösende Sicherheitsschaltmatten¹¹³ sind geeignet, Sicherheitsfunktionen abzubilden und gleichzeitig aber auch als Bedienschnittstellen zu fungieren. Werden die Schaltmatten im Korridor für die Materialübergabe platziert, siehe Abbildung 9.18 kann eine stärker differenzierte Abstufung der Schutzfeldumschaltungen an den Laserscannern erfolgen. Über das Betreten der Schaltmatten erfolgt eine Positionsermittlung, 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.

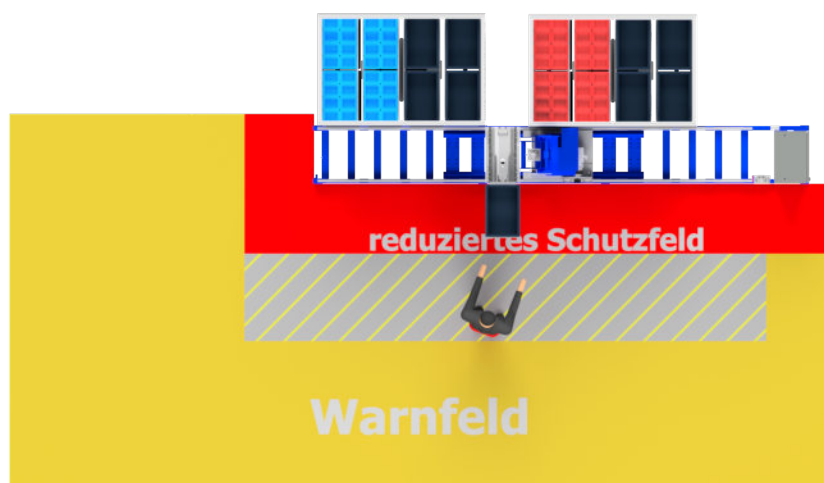


Abbildung 9.18: Platzierung von ortsauflösenden Sicherheitsschaltmatten (grau mit gelber Schraffur) in der Übergabezone am Mini-RBG.

Quelle: Eigene Darstellung.

Während die Möglichkeiten des Eingriffs der Benutzer:innen für die Bedienung der Abläufe entscheidend ist, kommt der zielgerichteten Information seitens der Maschine an die unmittelbar mit ihr interagierenden Personen, aber auch jenen in deren 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.¹¹⁴ 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

¹¹² Kommissionier-wearables können z.B. Datenbrillen, Barcodescanner, oder auch RFID-Lesegeräte, die am Handgelenk getragen werden, darstellen.

¹¹³ Sicherheitsschaltmatten stellen taktile Sensoren dar.

¹¹⁴ Vgl. Oberle, Helfert et al. 2017 [Obe17].

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. Bei der in Abbildung 9.19 ersichtlichen Situation betritt eine Person den von den Laserscannern überwachten Warnbereich, während das Mini-Regalbediengerät noch Ein-/Auslagerungsprozesse ausführt, für die die x- und/oder y-Achse Fahrbewegungen vollzieht. Der Person wird sodann per Lichtprojektion, verbunden mit einem Gefahrenhinweis und der Aufforderung zum Nicht-Betreten, das Schutzfeld visuell aufgezeigt.



Abbildung 9.19: Zielgerichtete Signalisierung des Gefahrenbereichs (rot) und Information, diesen nicht zu betreten, bei Eintritt in den Warnbereich (gelb).

Quelle: Eigene Darstellung.

Die oben dargestellte unidirektionale Kommunikation betrifft jedoch nicht nur Situationen, die einer Warnung bedürfen, wie der Anzeige des Gefahrenbereichs, sondern auch reguläre Betriebsabläufe. Darunter fällt u.a. die Signalisierung der Ankündigung und Freigabe der bevorstehenden respektive anstehenden Materialübergabe, siehe Abbildung 9.20.

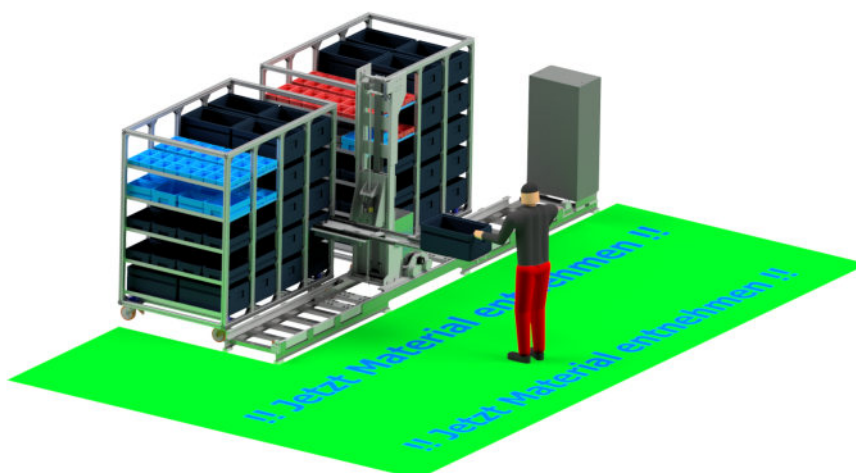


Abbildung 9.20: Signalisierung nach Beendigung der Fahrbewegung, das Material zu entnehmen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Unterstützung der Benutzer:innen durch anleitende Informationen zielt einerseits darauf ab, die kollaborativen Arbeitsvorgänge flüssig zu gestalten, indem diese Situationen und die damit verbundenen Prozesse für die Personen, die mit der Maschine interagieren müssen, transparent und vollumfänglich vorhersehbar gestaltet werden. Dies schafft die für eine – im Sinne der Arbeitseffizienz – sichere und zugleich intuitive Kollaboration unabdingbares subjektives Sicherheitsgefühl, obgleich die hier in Rede stehenden Funktionen lediglich im Bereich der passiven Sicherheit anzusiedeln sind und keine Schutzwirkung entfalten können. Gleichwohl können solche Faktoren einen signifikanten Beitrag zur Prozessstabilität eines derart auf Kollaboration fundierenden Systems leisten, indem es zur Erbringung einer geforderten Umschlagleistung gilt, Situationen, welche zum Auslösen einer Schutzfunktion führen, zu vermeiden, da dies stets mit Stillstandszeit verbunden ist. Andererseits soll die gerichtete Information auch zu Zwecken der Problembehebung, die einen Benutzereingriff erfordern, herangezogen werden. 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 auf die Problemstellung aufmerksam gemacht und informiert werden, dass Sie beispielsweise aus dem Schutzfeld treten respektive die das Schutzfeld verletzenden Gegenstände entfernen sollten, damit das Regalbediengerät seinen Betrieb fortsetzen kann. Insofern leistet die visuelle und akustische Bereitstellung zielgerichteter Informationen nicht nur einen Beitrag zum Sicherheitsniveau in der Kollaboration zwischen Mensch und Mini-Regalbediengerät, sondern trägt auch mittelbar dazu bei, dass die Arbeitsabläufe an Effizienz gewinnen, indem die mit dem Mini-Regalbediengerät verbundenen Prozesse transparent dargestellt werden und sämtliche Betriebsabläufe, die eine physische Interaktion mit der Maschine erfordern, selbsterklärend und intuitiv gestaltet werden.

9.3 Maschine-Maschine-Interaktion

Neben der Mensch-Maschine-Interaktion ist in einem fraktalen System, bei dem Funktionalitäten des Gesamtsystems auf einzelne Komponenten verteilt sind, der Interaktionsfähigkeit dieser Teilsysteme eine beachtliche Bedeutung beizumessen. Ein in den Betriebsabläufen des Mobilen 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 zumindest einen regalseitigen Zugang zum Gefahrenbereich, vgl. Kap 9.1. Würden sich Regale oder das Transport-FTF innerhalb der Schutzzone befinden, bzw. darin hinein bewegt werden, wäre das Schutzfeld verletzt, indem technologisch bedingt durch die Reflexion des Lichtimpulses – und somit der Detektion eines Objektes – innerhalb der Schutzzone die Schaltbedingung für das Auslösen der Sicherheitsfunktionen erfüllt wird, wenngleich es sich in der Situation gerade nicht um eine für einen Menschen gefahrbringende Annäherung an das Mini-Regalbediengerät handelt. Wie bereits in Kap. 9.2 dargelegt, lässt sich eine Differenzierung zwischen Menschen und Objekten, für die kein Schutzbedürfnis besteht, mit den aus dem Stand der Technik bekannten technischen Systemen, die den Anforderungen an die einschlägige Normung genügen, nicht umsetzen. Es gilt daher vorliegend, geeignete Vorkehrungen zu treffen, um die Anlieferung und den Abtransport von Regalmodulen an das Mini-RBG bewerkstelligen zu können. Dies kann bei verständiger Würdigung der sicherheitstechnischen Zwangsbedingungen lediglich durch partielles Deaktivieren der sich mit dem Fahrkorridor überschneidenden Schutzfeldbereiche erfolgen, sofern der An- und Abtransport in Längsrichtung des Mini-RBG (x-Achse), vgl. Abbildung 9.21 zu erfolgen hat und das Mini-RBG hierzu nicht in Stillstand versetzt werden soll. Das Schutzfeld des Laserscanner Nr.1 wird hierfür zur Regalseite hin insoweit reduziert, dass der Fahrweg des FTF nicht mehr davon erfasst wird.

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 werden soll, bedarf. Hierbei handelt es sich um eine Form von „Shared-Safety“¹¹⁵, 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 9.21. Insofern, wird der Fahrkorridor aus dem vom Mini-RBG aufgespannten Schutzfeld ausgespart und dieser Bereich anstatt dessen vom FTF überwacht. Bestünde eine dahingehende Absicherung nicht, wäre der Betrieb des RBG zwangsläufig zu unterbrechen, da wesentliche Bestandteile der der Risikominderung zugrunde liegenden Schutzmaßnahmen zur Zugangsabsicherung, siehe Kapitel 8.3.2, nicht aktiv wären.

115 Shared Safety beschreibt die Fähigkeit eines aus mehreren Komponenten bestehenden Gesamtsystems, die Sicherheitsfunktionen der einzelnen Teilnehmer bedarfsorientiert zu aggregieren, aber auch durch die partielle Nutzung und Verteilung sicherheitsrelevanter Funktionen eine Interaktion im Verbund zu ermöglichen respektive das Sicherheitssystem zu erweitern. Dem Prinzip von Shared Safety liegt somit die Modularisierung sicherheitsgerichteter Funktionen von modular erweiterbaren Anlagen zugrunde.

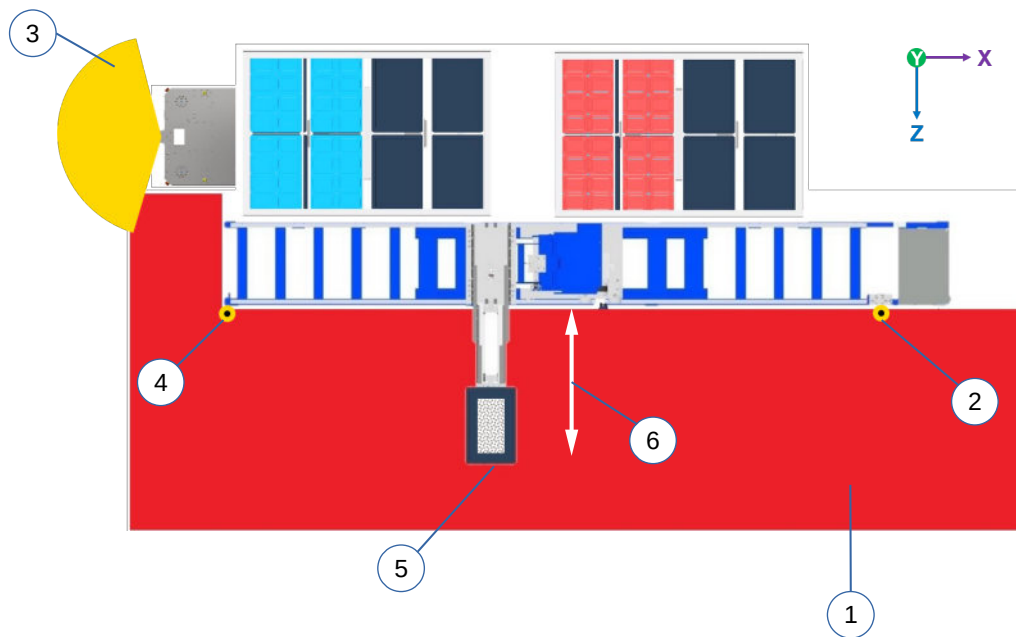


Abbildung 9.21: Shared-Safety-Konzept des Mobilten Supermarktes für den An- und Abtransport von Regalmodulen per FTF.

Pos.1: Schutzfeld des Mini-RBG.

Pos.2: Laserscanner Nr.2.

Pos.3: Schutzfeld des Schlepper-FTF.

Pos.4: Laserscanner Nr.1.

Pos.5: KLT in Übergabeposition.

Pos.6: Bewegungsrichtung z-Achse.

Quelle: Eigene Darstellung.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Automobilbranche ist im Wandel begriffen. Nicht nur Klimaschutzziele und die damit einhergehenden Verordnungen und Richtlinien zur CO₂-Reduktion im Bereich der Mobilität stellt die Automobilproduzenten vor Herausforderungen bisher nicht gekanntem Ausmaßes. Die sukzessive, aber nunmehr forcierte, Abkehr vom Verbrennungsmotor bedingt die zügige Entwicklung neuer batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge und komplette Umstellung der Produktportfolios in einem kurzen Zeitraum, wenn die durch EU-Verordnungen untermauerten Klimaschutzziele bis Mitte des kommenden Jahrzehntes eingehalten werden sollen. Bereits vor Beginn dieses massiven Strukturwandels hin zur Elektromobilität sahen sich die großen OEM der Automobilbranche mit großen Herausforderungen in der Produktion variantenreicher Modellausstattungen konfrontiert. Die Aufwands- und Kosteneffizienz der Fließbandfertigung stößt mit zunehmender Variantenvielfalt an ihre Grenzen oder wird gar unrentabel, da deren Prinzipien zu große Restriktionen bergen, welche mit der Herstellung invarianter Produkte mit in großem Umfang divergierenden technischen Merkmalen und damit einhergehenden Montageanforderungen dem Grunde nach unvereinbar sind. Hinzu kommen volatile Märkte und Ereignisse wie Produktionsausfälle bei Zulieferern, Rohstoffknappheit und Lieferengpässe, welche in besonderem Maße infolge der SARS-COV2-Pandemie die Vulnerabilität global vernetzter Warenströme offenbarte. Nicht zuletzt dadurch getrieben, sind Forderungen nach höherer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Produktion und Logistik seit geraumer Zeit in der Automobilbranche, deren Zulieferindustrien und Dienstleistern omnipräsent und auch Teil des wissenschaftlichen Diskurses.

Angesichts kleiner Auftragslosgrößen auch bei Serienprodukten lassen sich Fixkosten, die mit der Einrichtung/Anpassung einer Produktion verbunden sind, nicht mehr über die Stückzahl kompensieren, so dass Maßnahmen zur Rationalisierung der Prozesse aufgrund des immensen Lohnkostengefälles im internationalen Vergleich zum Standort Deutschland dringend geboten sind, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Insofern sind Flexibilität und Wandlungsfähigkeit Schlüsselmerkmale effizienter Fertigungsprozesse, auf die es die intralogistischen Prozesse jedoch zunächst auszurichten gilt. Die Produktionslogistik darf daher nicht Schranke, sondern muss innovativer Wegbereiter für effiziente Fertigungsprozesse sein. Während schon zu einem frühen Zeitpunkt die Möglichkeiten zur flexiblen und wandlungsfähigen Gestaltung von Planungsprozessen und der Montagelayoutgestaltung dezidiert wissenschaftlich untersucht wurden, befasste sich das Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart beginnend ab dem Jahr 2014 mit Logistikkonzepten für eine Automobilproduktion ohne Band und Takt. Die dahingehenden Forschungsaktivitäten des IFT sind im deutschlandweit einzigartigen Forschungscampus ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) der Universität Stuttgart angesiedelt.

Die Etablierung einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion für die effiziente Fertigung variantenreicher Automobile bis hin zu Losgrößen mit Stückzahl eins bedingt implizit die Abkehr von den bis dahin bewährten Prinzipien der Fließbandmontage. Für die Produktionslogistik bedeutet dies nicht weniger als einen Paradigmenwechsel, da die Ausrichtung sämtlicher logistischer Prozesse auf die getaktete Abarbeitung einer mit mehreren Tagen Vorlauf festgelegten Plansequenz/Perlenkette hinfällig würde. Im Rahmen eines durch das Land Baden-Württemberg finanzierten Projektes entstanden am IFT zunächst diverse Logistikkonzepte, die eine flexible und wandlungsfähige Produktionslogistik für Stückzahl eins grundsätzlich und theoretisch ermöglichen würden. Um tatsächlich

disruptive Ansätze zu generieren, war es erforderlich, sich von jahrzehntelang tradierten Denkmustern zu trennen. Dies bedeutet aber keineswegs, dass die Konzepte bar jeglichen Praxisbezugs entstanden sind. Vielmehr unterstreichen die von Popp¹¹⁶ anhand von Realdaten durchgeführten Simulationsstudien die Praktikabilität der zuvor am vielversprechendsten eingestuftem Konzeptentwürfe. Für die simulative Bewertung und Optimierung bildeten vertrauliche Daten bzgl. Verbaquote, Stückzahl, Gewicht etc. von Bauteilen, Baugruppen und Montagematerial eines Fahrzeuges aus dem Premiumsegment eines namhaften deutschen Automobilherstellers, von dem 800 Einheiten pro Tag produziert werden, die Basis. Im Ergebnis resümiert Popp, dass einerseits die Funktionalität gewährt ist, andererseits aber auch die erforderliche Durchsatzleistung mit dem am IFT entwickelten Konzept einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktionslogistik für die automobiler Endmontage erbracht werden kann. Eine weitergehende – insbesondere monetäre – Betrachtung konnte an der Stelle nicht erfolgen. Popp weist darauf hin, dass dies erst mit der Realisierung der bis dato rein konzeptionell entworfenen Hardwarebestandteile des Produktionslogistiksystems durchgeführt werden könne.

An der Stelle knüpft die vorliegende Arbeit an, indem hier die technische Umsetzung zentraler Komponenten des am IFT entwickelten Produktionslogistikkonzeptes für eine stückzahlunabhängige Endmontage von Automobilen ohne Band und Takt gegenständlich ist. Maßstab und Leitlinie für die konstruktive Ausgestaltung eines Werkstückträgers sowie eines am Montagearbeitsplatz einsetzbaren Kommissionier- und Zuführsystems für die automatisierte Bereitstellung von Bauteilen und Montagematerial bildeten die Leitbilder der Wandlungsfähigkeit und deren Befähigern in Gestalt von Skalierbarkeit, Mobilität, Modularität sowie Universalität.

Die vorliegende Arbeit hat demzufolge die konstruktive Ausgestaltung der zur Umsetzung des am IFT entwickelten und von Wehking und Popp vorgestellten Produktionslogistikkonzeptes unter Berücksichtigung der Maßgabe der technischen Realisierbarkeit von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zum Gegenstand. Den Schwerpunkt der Arbeit bildete dabei die Darlegung der Konzeption, Konstruktion und die prototypische Umsetzung einer mobilen Montageinsel auf Basis eines Fahrerlosen Transportfahrzeuges, sowie eines mobilen kleinskaligen Mini-Regalbediengerätes für die automatisierte Handhabung und Andienung von Kleinladungsträgern in der Teilezuführung direkt am Verbaort in einer manuellen Montage respektive in Kommissionierzonen.

Es konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden, dass durch die Abkehr von bekannten Förder- und Werkstückträgersystemen in Gestalt von Elektrohängebahnen und Schubplattformförderern und der damit einhergehenden Verlagerung der Endmontage auf eine wie in Kapitel 5.1 vorgestellten mobilen Montageinsel nicht nur die strenge Taktung und Sequenzierung aufgebrochen werden kann. Vielmehr ist es gelungen, die Mobile Montageinsel mit technischen Merkmalen zu versehen, die sie zu einem wandlungsfähigen – da insbesondere universell verwendbarem – Betriebsmittel werden lassen. Durch Fördermittel des Landes Baden-Württemberg konnte zunächst die Konzeption sowie die sich daran anschließende Konstruktion einschließlich der Fertigung eines ersten Funktionsprototypen der Mobilen Montageinsel geleistet werden. Nicht zuletzt die Patenterteilung auf internationaler Ebene untermauert dabei den innovativen Charakter und Neuheitsgrad dieses FTF, das mit seiner umlaufenden Stehplattform und den integrierten Handhabungsfunktionen einen mobilen Arbeitsplatz darstellt. In Kombination mit einer auf ebenfalls mobilen Komponenten basierenden Zuführung der zur Endmontage eines Kraftfahrzeuges erforderlichen Baugruppen, Bauteilen und Materialien, wird die aus dem Fließbandprinzip hervorgehende Zeit- und

116 Siehe Popp 2018 [Pop18].

Ortsbindung von Arbeitsumfängen hinfällig und hierdurch ein hohes Maß an Layout- und Strukturflexibilität geschaffen. Ferner ermöglicht das Konstrukt des Fahrzeugträgers, welcher die Werkstückaufnahmevorrichtung der Mobilen Montageinsel verkörpert, eine automatisierte stufenlose – und somit ohne Rüstzeit erfordernde – Anpassung an ein breites Spektrum an Abmessungen von Fahrzeugen, die darauf endmontiert werden sollen. Gleichzeitig wird über die Verstellmechanismen der Fahrzeugaufnahme eine Längsförderung des Werkstücks erzielt, die für das automatisierte Entladen in Form einer kontrollierten Abfahrfunktion des teil- oder fertigmontierten Kraftfahrzeuges dient. Es ist konstruktiv gelungen, dass der Entladeprozess ausschließlich durch die technischen Merkmale der Mobilen Montageinsel zu bewerkstelligen ist und es keiner externer stationären Einrichtungen, Ladehilfsmittel oder gar Hebezeuge bedarf. Insofern kann der Entladevorgang an einer beliebigen Stelle erfolgen, wobei das Werkstück sowohl auf den Boden, als auch auf ein höheres – innerhalb des Hubbereichs des Fahrzeugträgers gelegenes – Niveau abgegeben werden kann. Im Vergleich zu reinen Transport-FTF, wie sie in Kapitel 2.3.3 vorgestellt wurden, kann durch diese Funktionalität ein weiterer Beitrag zur Layout- und Strukturflexibilität erzielt werden.

Es wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch auch dargelegt, dass sich das anwendungstechnische Flexibilitäts- und Wandlungspotential der Mobilen Montageinsel nur mit Materialflusssystemen vollumfänglich erschließen lässt, welche ebenso den Anforderungen an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit genügen. Insofern bildet die konzeptionelle und zugleich konstruktive Umsetzung dahingehender Hardware einen weiteren inhaltlichen Schwerpunkt dieser Arbeit. Diesbezüglich ist vorrangig auf die Umsetzung eines Mini-Regalbediengerätes zu verweisen, welches innerhalb eines sogenannten Mobilen Logistiksupermarktes, siehe Kapitel 5.3, als semimobile Kommissioniereinheit für die automatisierte Handhabung und Bereitstellung von Kleinladungsträgern fungiert. Es konnte vorliegend dargelegt werden, wie sich die technischen sowie prozessualen Anforderungen, welche sich aus den Wandlungsbefähigern und den Modalitäten eines nicht getakteten Werkstückdurchlaufes durch die Endmontage ableiten, umsetzen lassen. Hierbei waren jedoch nicht nur rein konstruktive Merkmale gegenständlich, vielmehr galt es darüber hinaus, ein Sicherheits- und Bedienkonzept für die Anlage zu entwickeln, um eine Materialandienung in direkter Mensch-Maschine-Interaktion zu ermöglichen. Es konnte vorliegend ein tragfähiges Lösungskonzept dargelegt werden, um dem sich aus den Anforderungen an Personensicherheit, Umschlagleistung und intuitiver Bedienbarkeit resultierenden Spannungsfeld gerecht zu werden. Im Zuge einer dezidierten Sicherheitsbetrachtung wurde ein über den Stand der Technik hinausreichendes Konzept für die sichere Kollaboration und Interaktion mit einer Maschine, von der aufgrund ihres Aufbaus und deren Leistungsdaten ein schwerwiegendes Verletzungspotential für die Nutzer:innen und den in der Umgebung befindlichen Personen ausgeht, erstellt. Indem stets die Belange der Sicherstellung der Personensicherheit in Erfüllung der dahingehenden normativen Vorgaben verknüpft mit jenen der intuitiven Bedienbarkeit betrachtet wurden, konnte schlussendlich ein Lösungsansatz in Gestalt eines abgestuften Sensorkonzeptes vorgestellt werden. Hierbei ist es einerseits gelungen, die sicherheitsgerichteten Belange mit marktgängigen und dem Stand der Technik entsprechenden optoelektronischen Sensoren zu erfüllen und andererseits mit diesen das Mini-Regalbediengerät auch mit einem Mindestmaß an intuitivem Kollaborationsvermögen zu versehen.

Darüber hinaus wurde dargelegt, inwieweit prinzipbedingte Prozessunsicherheiten durch den Einsatz von schaltenden Sicherheitssensoren – hier Laserscanner – bestehen, indem keine Differenzierung zwischen Menschen und Gegenständen erfolgen kann. Dieser Problematik kann jedoch durch intelligente Verknüpfung aus sicheren und nicht sicheren bildverarbeitenden Sensoren begegnet werden. Ein entsprechender Ansatz ist in Kapitel 9

dargetan und basiert auf den von Korte 2021 im Rahmen seiner Dissertation mit dem Titel „Konzept eines sicherheitsbezogenen Sensorsystems für die Erkennung von Personen im Umfeld fahrerloser Transportfahrzeuge“¹¹⁷ vorgestellten Forschungsergebnisse, welche vorliegend auf einen statischen Anwendungsfall übertragen wurden. Mit einer dahingehenden Erweiterung des Sensorkonzeptes, welches zur Sicherstellung der Personensicherheit Sicherheitslaserscanner vorsieht, in Form von bildverarbeitenden Sensoren, um mit deren Daten über entsprechende Algorithmen nicht nur eine Detektion, sondern eine Identifikation und Klassifizierung der sich im Umfeld des Mini-Regalbediengerätes befindlichen Objekte vornehmen zu können, kann schlussendlich eine zielgerichtetere und effektivere Kollaboration und Interaktion an der Anlage gestaltet werden. Gleichwohl wurden auch Aspekte einer unidirektionalen Interaktion berücksichtigt, indem gezielte optische und / oder akustische Informationen an die betreffenden Personen übermittelt werden, so dass damit eine Form von Transparenz, Verlässlichkeit und damit Vorhersehbarkeit der Arbeitsabläufe der autonom agierenden Anlage für den Menschen geschaffen wird. Dahingehende Maßnahmen sind auch im Kontext einer gesteigerten Anlageneffektivität zu verstehen, indem dadurch Situationen verhindert werden, welche zum Auslösen einer Schutzfunktion – und damit einhergehend einem Nothalt und Stillstandszeit – führen, respektive die Häufigkeit deren Eintretens vermindert wird, indem Unsicherheiten auf menschlicher Seite in der Kollaboration abgebaut werden. Die Eindeutigkeit der Situationen leistet daher einen wertvollen Beitrag, das subjektive Sicherheitsempfinden der mit der Maschine interagierenden Personen zu steigern, was letztlich essentielle Grundvoraussetzung für eine gelingende Kollaboration darstellt.

Neben der Mensch-Maschine-Interaktion waren jedoch auch Aspekte der Interaktion und Interoperabilität innerhalb des Systems des Mobilien Supermarktes zu berücksichtigen, um ein Zusammenspiel aus Fahrerlosen Transportfahrzeugen, welche mobile Regalmodule an- und abtransportieren, aus denen das Mini-RBG die Kommissionierung vornimmt, zu gewährleisten, ohne dass hierfür das Mini-RBG wegen sich überschneidender Schutzfelder in den Stillstand versetzt werden müsste. So wurden diesbezüglich im Sinne einer Gesamtbetrachtung aller Prozesse innerhalb des Mobilien Supermarktes dahingehende erste Ansätze vorgestellt, die dem Prinzip der „Shared Safety“ folgen.

Hier ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, um ein dahingehendes Konzept in der Praxis realisieren zu können. 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. Ferner bedarf es zur Umsetzung einer derartigen Sicherheitsarchitektur unter anderem der Etablierung von dezentralen Steuerungsstrukturen sowie einer leistungsfähigen und redundant sicheren drahtlosen Signalübertragung. Die Fragen einer effektiven und sicheren Vernetzung von Maschinen, Werkzeugen, FTF bis hin zu einzelnen Ladungsträgern birgt große technische Herausforderungen, ist jedoch unabdingbar, um insgesamt eine flexible und wandlungsfähige Produktionslogistik, welche den hier vorgestellten Zielbildern folgt, zu etablieren. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auch die dezentrale Steuerung und Organisation der Komponenten der Materialflusssysteme zu nennen.

117 Siehe Korte 2021 [Kor21].

11 Literaturverzeichnis

Alt99: Alternburg, K. & Griscom, D. & Hart, J. & Smith, F. & Wohler, G. (1999). Just-in-time logistics support for the automobile industry.

BaFD20: Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hg.) (2020). Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg.

Bat12: Battini, D.; Boysen, N.; Emde, S. (2012). Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. In: Journal of Management Control 24.2.

Bec06: Becker, H. (2006). Phänomen Toyota. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Bec07: Becker, H. (2007). Auf Crashkurs - Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bel10: Bellmann, K.; Himpel, F.; Böhm, A. (2010). Messung von Flexibilität in der Produktion. In: Strohhecker, Größler (Hg.): Strategisches und operatives Produktionsmanagement. Wiesbaden: Gabler, S. 221-240.

BGR11: Boysen, N.; Golle, U.; Rothlauf, F. (2011). The Car Resequencing Problem with Pull-Off Tables. In: Business Research 4.2, S. 276-292.

BMW20: Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (2020). BMW Group Bericht 2020. München: Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft

Boy05: Boysen, N. (2005). Variantenfließfertigung. Zugl.: Hamburg, Univ., FB Wirtschaftswiss., Dissertation, 2005. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Boy15: Boysen, N.; Emde, S.; Hoeck, M.; Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. In: European Journal of Operational Research 242.1, S. 107-120.

DE102015013585A1: Langer, L.; Popp, J.; Küber, C. (2017-04-20). Lagereinrichtung zum Lagern von Werkstücken, insbesondere zur Herstellung wenigstens eines Fahrzeugs. Universität Stuttgart, Daimler AG.

DiF20: Dietz, T.; Fechter, M. (2020). Einleitung. In: Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

DIN EN 349: 2008-09: Sicherheit von Maschinen – Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen. 2008.

DIN EN 61496-1:2014-05: , Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen. 2014.

DIN EN 61800-5-2:2017-11: Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl - Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit - Funktionale Sicherheit. 2017.

DIN EN ISO 12100:2011-03: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung. 2011.

DIN EN ISO 13849-1:2008-12: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. 2008.

- DIN EN ISO 13855:2010-10: Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen. 2010.
- DIN EN ISO 13857:2008-06: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen. 2008.
- DIN EN ISO 14120:2016-05: Sicherheit von Maschinen – Trennende Schutzeinrichtungen – Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen. 2016.
- DIN ISO/TR 14121-2 (DIN SPEC 33885): 2013-02: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele. 2013.
- Dör13: Dörmer, J. (2013). Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion. Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- DSF96: Mac Duffie, J. P.; Sethuraman, K.; Fisher, M. L. (1996). Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study. In: Management Science 42.3, S. 350-369.
- EP3331809B1: Hofmann, M. (2019-10-02). Fahrerlose Transportvorrichtung zur Montage eines Kraftfahrzeugs und Verfahren zum Abladen eines Kraftfahrzeugs von einem solchen Transportfahrzeug. Universität Stuttgart.
- EP3365138B1: Hofmann, M.; Schröppel, M.; Wehking, K.-H. (2020-02-19). Selbstfahrende Lagereinrichtung. Universität Stuttgart.
- Eva91: Evans, J. S. (1991). Strategic flexibility for high technology manoeuvres: a conceptual framework.
- FB15: Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T. (2015). Changeable and reconfigurable assembly systems – A structure planning approach in automotive manufacturing. In: Bargende, Reuss (Hg.): 15. Internationales Stuttgarter Symposium, 2015.
- Gar14: von Garrel, J.; Schenk, M.; Seidel, H. (2014). Flexibilisierung der Produktion – Maßnahmen und Status-Quo. In: Schlick, Moser et al. (Hg.): Flexible Produktionskapazität innovativ managen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gol10: Golz, J.; Gujjula, R.; Günther, H.-O. (2010). Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. In: 17th International Annual EurOMA Conference, Porto.
- Göt07: Götz, A. (2007): Zukunftsstandort Deutschland?. In: Automobilproduktion, 2007-2, S. 16-19.
- GSW17: Göpfert I.; Schulz M.; Wellbrock W. (2017). Trends in der Automobillogistik. In: Göpfert, Braun et al. (Hg.): Automobillogistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Her02: Hernández Morales, R.(2002). Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Zugl.: Hannover, Univ., Dissertation. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, 149. Hannover: VDI-Verlag.
- Hes06: Hesse, S. (2006). Automatische Montagemaschinen. In: Lotter (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S 219-308.
- Hof16: Hofmann, M. (2016). Montage- und Logistik-FTF für die Automobilproduktion ohne Band und Takt. In: Logistics Journal: Proceedings 2016.
- Hof18: Hofmann, M. (2018). Intralogistikkomponenten für die Automobilproduktion ohne Band und Takt – erste Prototypen. In: Logistics Journal: Proceedings 2018.

- Hof19: Hofmann, M. (2019). Material flow systems and intralogistics components for a non-sequential, flexibly timed automobile production – First prototypes. In: XXIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON "MATERIAL HANDLING, CONSTRUCTIONS AND LOGISTICS" Vienna, Austria 2019.
- Hof20A: Hofmann, M. (2020). Materialfluss für Losgröße 1: Strukturwandel in der Produktionslogistik. In: f+h 04/2020 und 05/2020. Mainz: Vereinigte Fachverlage.
- Hof20B: Hofmann, M. (2020). Sicherheits- und Bedienkonzept für kollaborierende Materialflusssysteme. In: Logistics Journal: Proceedings 2020.
- Hof20C: Hofmann, M. (2020). Kollaborierende Systeme - Effizienter Materialfluss (für Losgröße 1) in Produktion und Logistik. In: Technische Logistik – Best Projects 2021. Berlin: Huss-Medien.
- Hof21: Hofmann, M. (2021). Safety and Operating Concept for Collaborative Material Flow Systems. In: Weißgräber, P.; Heieck, F.; Ackermann, C. (Hg.): Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2020) Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 441-450.
- HoK20: Hofmann, M.; Korte, D. (2020). Neuartiges Logistikkonzept für die automobiler Endmontage ohne Band und Takt. In: Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 85-100.
- HW18: Hofmann, M.; Wehking, K.-H. (2018). Mobile Montageinsel für die Automobilproduktion ohne Band und Takt. In: Bruns, R., Ulrich, S. (Hg.): Forschungskatalog Flurförderzeuge 2018, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Lehrstuhl MTL. Veröffentlicht in: Hebezeuge Fördermittel. Berlin: Huss Medien.
- Ihm06: Ihme, J. (2006). Logistik im Automobilbau. München: Hanser Verlag.
- Jes17: Jesse, T. (2017). Herausforderungen und Konzepte für die Großserien-Kraftfahrzeugendmontage der Zukunft. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Kim14: Kimberly-Clark (2014). Versteckte Kosten von Nacharbeit. URL: https://www.kcprofessional.de/media/144520592/Versteckte_Kosten_von_Nacharbeit_in_der_Automobilindustrie_von-Kimberly_Clark_Professional.pdf, Stand: 12.10.2019.
- Kins32: McKinsey, J. O., Adjusting policies to meet changing conditions, 1932.
- Klu06: Klug, Florian (2006). Synchronised automotive logistics: an optimal mix of pull and push principles in automotive supply networks. In: Logistics Research Network Conference, 2006.
- Klu10: Klug, F. (2010). Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kor21: Korte, D. (2021). Konzept eines sicherheitsbezogenen Sensorsystems für die Erkennung von Personen im Umfeld fahrerloser Transportfahrzeuge. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Kra00: Kratzsch, S. (2000). Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Dissertation. Essen: Vulkan Verlag.
- Kro21: Kropik, M. (2021). Produktionsleitsysteme für die Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Küb16: Küber, C.; Westkämper, E.; Keller, B.; Jacobi, H.-F. (2016). Method for a Cross-architecture Assembly Line Planning in the Automotive Industry with Focus on Modularized, Order Flexible, Economical and Adaptable Assembly Processes. In: Procedia CIRP 57, S. 339-344.
- Lot12: Lotter, B. (2012). Einführung. In: Lotter, Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1-8.
- Mey04: Meyr, H. (2004). Supply chain planning in the German automotive industry. In: OR Spectrum 26.4, S. 447-470.
- Mol97: Mollemeier, A. (1997). Integrierte Steuerung getakteter Variantenfließlinien. Dissertation. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Mon12: Monden, Y. (2012). Toyota production system: an integrated approach to just-in-time. Boca Raton: CRC Press.
- Neu16: Neudörfer, A. (2016). Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG Maschinenrichtlinie. 7., aktualisierte Auflage 2016 (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Nyh08: Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (2008). Wandlungsfähige Produktionssysteme: heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: Verlag PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- Nyh12: Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.; Wagner, C. (2012). Materialbereitstellung in der Montage. In: Lotter, Wiendahl (Hg.) 2012 – Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 285-313.
- Obe17: 15. Oberle, M.; Helfert, M.; König, C. et al. (2017). Experimentelle Untersuchung des menschlichen Einflusses auf die Unsicherheit in der Mensch-Technik-Interaktion. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 72.1, S. 44-55.
- PAG20: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (2020). Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht 2020. Stuttgart: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.
- Pop18: Popp, J. (2018). Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Prö15: Pröpster, M. H. (2016). Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus. Dissertation, Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag.
- RB07: Rinza T.; Boppert, J. (2007). Logistik im Zeichen zunehmender Entropie. In: Günthner, W. (Hg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17-28.
- Rei00: Reinhart, G. (2000). Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart (Hg.) Tagungsband Münchener Kolloquium 2000.
- Rei08: Reinhart, G.; Kerbs, P.; Schellmann, H. (2008). Flexibilität und Wandlungsfähigkeit – das richtige Maß finden. In: Reinhart, G.; Kerbs, P.; Schellmann, H. (Hg.): Münchener Kolloquium. Innovationen für die Produktion. Produktionskongress 9. Oktober 2008, S. 45-55.
- Rei97: Reinhart, G. (1997). Innovative Prozesse und Systeme. Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hg.): Mit Schwung zum Aufschwung. Münchener Kolloquium 1997.

- Ric06: Richter, M. (2006). Gestaltung der Montageorganisation. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hg.) 2006 – Montage in der industriellen Produktion. VDI-Buch. Berlin: Springer, S. 95-125.
- Richtlinie 2006/42/EG: Richtlinie 2006/42EG des Europäischen Parlaments und des Europäischer Rates vom 17. Mai 2006.
- Ros08: Roscher, J. (2008). Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Stuttgart.
- RT06: Röder, A.; Tibken, B. (2006). A methodology for modeling inter-company supply chains and for evaluating a method of integrated product and process documentation. In: European Journal of Operational Research 169.3, S. 1010-1029.
- SA15: Staebelin, T.; Aoki, K. (2015). Planning and scheduling in the automotive industry: A comparison of industrial practice at German and Japanese makers. In: International Journal of Production Economics 162, S. 258-272.
- Sel18: Seliger, G. (2018). Montage und Demontage. In: Grote, Bender et al. (Hg.) 2018 Dubbel 25, Neue bearbeitete und aktualisierte Auflage 2018. Berlin: Springer-Verlag, S. 1503-1509.
- Sha38: Shackle, G.L.S. (1938). Expectations, Investment and Income. In: The Economic Journal 48.191. Oxford University Press.
- UA19: Ullrich, G.; Albrecht, T. (2019). Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung. 3., vollst. überarb. Auflage 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- VDA5050: Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA). (2020). VDA 5050 V1.1 2020-0-01: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung.
- Weh18: Wehking, K.-H. , Hofmann, M. , Korte, D. , Hagg, M. , Pflieger, D (2018). Automobilproduktionslogistik im Wandel. In: Wimmer, Grotemeier (Hg.): 35. Deutscher Logistik-Kongress. Digitales trifft Reales. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, S. 300-322.
- Weh20: Wehking, K.-H. (2020). Handbuch Technische Logistik 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Weh20B: Wehking, K.-H. (2020). Handbuch Technische Logistik 2.: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wes00: Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M. (2000). Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: Werkstatttechnik online 90.1-2.
- Wie09: Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P (2009). Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München/Wien: Carl Hanser Verlag.
- WLK75: Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W. (1975). Montagetechnik. Mainz: Krauskopf.
- WP15: Wehking, K.-H.; Popp, J., Automobilproduktionslogistik – heute, morgen und übermorgen. In: Wimmer, Grotemeier (Hg.): 32. Deutscher Logistik-Kongress. Eine Welt in Bewegung.

WPH20: Wehking, K.-H.; Popp, J.; Hofmann, M. (2020). Forschungsprojekt ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) – Flexible und wandelbare Automobilproduktionslogistik der Zukunft für die Stückzahl 1. In: Wehking, K.-H. (Hg.): Technisches Handbuch Logistik 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 221-254.

Zäh05: Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W. (2005). Symbiosis of changeable and virtual production—the emperor's new clothes or key factor for future success. In: Zäh (Hg.): 1. International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV) 2005, München.