



DIPLOMARBEIT

FIRE - Factory Integrated Robotic Effector

Ein mobiles Waferhorden-Handhabungssystem für 24-Stunden-Betrieb im Reinraum unter Menschen

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Vincze¹
Dipl.-Ing. Bianca Ganser²

am

¹**Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
(ACIN)**

der Technischen Universität Wien

in Kooperation mit

²**Infineon Technologies Austria AG**

durch

Peter Henöckl
Matr.Nr. 0726443
Sandweg 12, 9500 Villach

Wien, am 12.05.2014



Das mobile Beladesystem FIRE.

Kurzfassung

In der stark vom Wettbewerb bestimmten Halbleiterindustrie zählen niedrige Produktionskosten zu den Hauptzielen eines Unternehmens. Dazu gibt es zwei unterschiedliche Herangehensweisen, die Verlagerung der Produktion in Billiglohnländer oder eine Erhöhung des Automatisierungsgrades zur Steigerung des Outputs pro Mann-Stunde. Diese Arbeit widmet sich der zweiten Variante. Ein erschwingliches System zur Automatisierung vorhandener Produktionsstandorte unter minimalen Abänderungen an bestehenden Produktionsabläufen und Fokus auf Qualität, Effizienz und Effektivität wird angestrebt.

Zur Erreichung der vorgestellten Ziele werden automatisierte Lösungen sowohl für maschineninterne Prozessabläufe als auch Be- und Entladung der Maschinen benötigt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Vollständigkeit der Automatisierung in der Halbleiterfabrik. Da Prozessabläufe in Maschinen weitgehend automatisiert sind und Anlagen für 12-Zoll-Wafer standardisierte Beladeschnittstellen (Loadports) aufweisen, besteht die Aufgabe der Be- und Entladung von 8-Zoll-Anlagen. Aufgrund einer über jahrzehnte historisch gewachsenen Produktion variieren hier die Loadports in Höhe, Winkel und Zugänglichkeit und haben unterschiedliche Öffnungen und Türmechanismen. Automatisiertes Be- und Entladen dieser Vielfalt an Maschinen kann durch das hier vorgestellte mobile System FIRE (Factory Integrated Robotic Effector) erfolgen. Der Ablauf von Prozessende an Maschine N bis Prozessstart an Maschine N+1 kann in die drei folgenden Schritte unterteilt werden:

1. Unter Verwendung von FIRE wird eine Horde mit Wafern von der Maschine genommen, in eine Box gestellt und dabei auf einer Schnittstelle zu einem Transportsystem platziert.
2. Das Transportsystem, beispielsweise ein Operator, bringt die Box mit Wafern zu einem Puffer nahe der für den nächsten Prozess benötigten Maschine.
3. Ein FIRE an dieser Maschine nimmt die Horde aus der Box vom Puffer und platziert sie am Loadport der Anlage.

Um den beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden weist das hier vorgestellte System folgende Eigenschaften auf. Eine omnidirektionale Plattform aus vier Fahr-Dreh-Modulen erlaubt ein Navigieren in den engen Reinraumgängen. Ein an einem „Power Home“ austauschbarer Akkumulator stellt eine Stromversorgung für den 24-Stunden-Betrieb im Reinraum sicher. Ein Roboterarm mit insgesamt acht Freiheitsgraden und Greifmechanismus erlaubt Handhabungsvorgänge unter starkem Platzmangel im Roboterarbeitsraum.

Ein autonomes, mobiles System zur Handhabung von Wafern im Reinraum im selben Arbeitsraum mit dem Menschen für den 24-Stunden-Betrieb an sieben Tagen der Woche beinhaltet eine Reihe innovativer Lösungen. Besonders hervorstechend ist jedoch die hohe Positioniergenauigkeit des TCP (Tool Center Point) des Roboterarms. Auf einem Gebiet von 130000 Millimetern mal 215000 Millimetern wird eine Wiederholgenauigkeit von 0,2 Millimetern angestrebt. Diese Präzision wird durch eine Kombination von drei unterschiedlichen Sensorsystemen erreicht. Grobpositionierung erfolgt über ein im Reinraum vorhandenes IPS (Indoor Positioning System), Basisnavigation über Laser-LIDAR-Scanner [TBF06] und durch Ermittlung der Feinposition über Lasersensoren erfolgt eine Adaption der Roboterarmtrajektorie. In dieser Arbeit wird ein umsetzbares Gesamtsystem mit Vorschlägen zur Einbindung in der Produktion bei Infineon vorgestellt.

Abstract

Given the highly competitive nature of the semiconductor industry, one of the main objectives of an enterprise is maintaining low manufacturing costs. There are two diverging policies to cope with the competition pressure: either outsource production to low-wage countries or increase the degree of automation to enhance the output per man-hour. This paper describes the project's aim to stimulate the latter by creating an affordable way of automating existing production sites with a minimum impact on the manufacturing plant's established processes while concentrating on manufacturing effectiveness and productivity [Hau07].

To achieve the goals above, both internal machine sequences and wafer loading/unloading procedures must be automated, creating a continuous process flow. Integrating the latest machines processing wafers with a diameter of twelve inches into a fully automated factory can be done using state of the art solutions as their load ports are standardized and optimized for the integration of conveying systems. However, due to a historically grown production site, most of the load ports for eight inch machines differ in height, angle and accessibility, and have various apertures and door mechanisms. The aim of automatically controlled load and unload sequences is achieved by the mobile Factory Integrated Robotic Effector (FIRE). The succession from a finished process at machine N to the start of the process at machine $N+1$ can be divided into three subtasks:

1. Using FIRE, the carrier is unloaded, boxed, and thereby placed on an interface to the transportation system, called the equipment buffer.
2. The transportation system (e.g. an operator) conveys the box to another equipment buffer close to the subsequent machine.
3. A FIRE at the machine takes the carrier out of the box in the equipment buffer and positions it on the machine's load port.

To meet the demands given before, a system for handling wafer cassettes should fulfill the subsequent requirements. To easily overcome the narrow aisles in the cle-

anroom environment the suggested robot system uses an omnidirectional platform composed of four motor-driven omni-drive modules. The power necessary is delivered by a rechargeable battery. To guarantee a continuous production 24 hours a day, the system is equipped with an automatic battery-changing mechanism at a “power home”. To achieve the agility required for loading within narrow confines, kinematic redundancy is exploited by the system’s arm via eight degrees of freedom: seven provided by the robot-arm itself and an additional one added by extending the robot-gripper with a modulus of torsion.

As an autonomous, mobile wafer-handling cleanroom robot sharing the workspace with humans operating 24/7 the FIRE-handling is intrinsically innovative. Regardless of the system’s extensive portfolio of innovative solutions, the accurate positioning of the mobile robot’s tool centre point is truly intrepid. It should work with a repeatability of 0.2 mm over an area of 130000 mm by 215000 mm. The precision of the advocated concept is attained by using a combination of three different sensor systems. The rough positioning is achieved by using an IPS (Indoor Positioning System) currently used to locate wafer boxes and assist the operator, wirelessly providing process information on a box-mounted display. It is used to supply the main laser navigation on the vehicle with data constraining the possible position to a clearly defined area. The laser navigation algorithm [TBF06] can achieve an accuracy of ± 15 mm including the heading uncertainty to reliably position the FIRE-vehicle in front of the machine. The meticulous precision is obtained by laser precision sensors to fine-tune the pre-programmed positions of the robot-arm. Finally a possible way of implementation is presented.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel benutzt sowie die Stellen der Arbeit, die in anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, durch Angaben der Quellen sichtbar gemacht wurden.

Wien, am 12.05.2014

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Kurzfassung | ii |
| Abstract | iv |
| Erklärung | vi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Aufgabenstellung | 2 |
| 1.2 Lösungsansatz | 2 |
| 1.3 Aufbau | 5 |
| 2 Vorhandene Systeme | 7 |
| 2.1 Prozesse im Reinraum | 8 |
| 2.2 Robotersysteme bei Infineon | 11 |
| 2.3 Angebote am Robotik-Markt | 18 |
| 3 Anforderungen und Umgebung | 35 |
| 3.1 Anforderungen an ein Robotersystem | 35 |
| 3.2 Schritte zur Umsetzung von Automatisierungslösungen | 53 |
| 3.3 Menschen, Normen und Gesetze | 58 |
| 3.4 Wirtschaftliche Aspekte bei Automatisierung | 62 |
| 4 Der mobile Manipulator FIRE | 65 |
| 4.1 Antriebseinheit | 67 |
| 4.2 Spannungsversorgung | 70 |
| 4.3 Roboterarm und Greifer | 72 |
| 4.4 Sicherheitselemente | 77 |
| 4.5 Sensorik | 78 |
| 4.6 Steuereinheit | 78 |
| 5 Funktionalitäten von FIRE | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.1 | Sensorsysteme zur Plattform-Navigation | 80 |
| 5.2 | Mapping | 92 |
| 5.3 | Lokalisierung | 95 |
| 5.4 | Bewegungsmodell | 100 |
| 5.5 | Pfadplanung | 102 |
| 5.6 | Stati-Check | 106 |
| 5.7 | Arm-Präzision | 108 |
| 5.8 | Systemkombination zur TCP-Positionierung | 123 |
| 5.9 | Software | 128 |
| 5.10 | Reinraumtauglichkeit | 136 |
| 6 | Anwendung von FIRE | 140 |
| 6.1 | Prozessablauf beim Be- und Entladen | 141 |
| 6.2 | Design | 144 |
| 6.3 | Anwendungsgebiet | 144 |
| 6.4 | Aufgaben während des Roboterbetriebs | 150 |
| 6.5 | Kollaboration mit dem Menschen | 152 |
| 6.6 | Integration von aktuellen Produktionsphilosophien | 154 |
| 6.7 | Differenzierung | 158 |
| 6.8 | Mögliche Erweiterungen | 159 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 168 |
| 7.1 | Gesamtkonzept 2020 | 169 |
| 7.2 | Robotik-Zukunft | 169 |
| A | Literatur | 171 |
| B | Anhang | 176 |
| B.1 | Danksagung | 176 |
| B.2 | Wörterklärungen | 183 |

1 Einleitung

Automatisierung – Dieser Begriff nimmt in Produktionsunternehmen weltweit einen immer wichtiger werdenden Stellenwert ein. So setzt auch der Halbleiterhersteller Infineon Technologies AG auf eine automatisierte Fabrik. Gründe für Automatisierung einer Produktion sind vielfältig. Entlastung der Arbeiter von monotoner, gesundheitsgefährdender oder schwerer Arbeitstätigkeit sind Motive, über die auch unter Mitarbeitern Wohlwollen zur Automatisierung geschaffen wird. Für Infineon zählt die durch Automatisierung bedingte Verringerung der Partikelzahl in der Reinraumluft und dadurch erreichte Steigerung der Qualität. Im Ausgleich zu Arbeitsplätzen in der Produktion kommen neue Stellen bei Konstruktion, Planung und Logistik, bei Herstellerfirmen und Zulieferern, bei Instandsetzung, Programmierung und Wartung hinzu und Know-How wird in der Fabrik aufgebaut. Menschliche Fehler können vermieden werden und der Output pro Mann-Stunde steigt. Positive Effekte der Automatisierung bilden Reduktion der Durchlaufzeiten und damit verbundene Erhöhung der Durchsatzraten. Durch automatisierte Prozessabläufe wird Handhabung ohne Wertzuwachs verhindert und eine Optimierung manuell durchgeführter Beladeprozesse durch bestmögliche Auslastung der Maschinen wird umsetzbar. Eine Verringerung der Kosten auf lange Sicht erfolgt unter anderem durch Einsparung von Personalkosten. Für Automatisierung sprechen die Erhaltung langfristiger Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmensstandorten in Hochlohnländern und Verhinderung der Abwanderung von Produktion und damit verbunden Know-How in Billiglohnländer. Automatisierte Systeme haben einen deutlichen Vorteil in Hinblick auf Kontinuität und Verfügbarkeit. Urlaubstage, Kaffee-, Rauch- oder Mittagspausen, Karenzzeiten, plötzliche Krankenstände oder Kündigungen fallen nicht an. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Grund für Automatisierung sind im B-to-B Geschäft übliche Kundenaudits. Auditoren der belieferten Firmen erhalten bei höher automatisierten Firmen ein Bild von Modernität und Qualität. Bei der Bewertung der Produktion und zukünftigen Auftragsvergabe ist ein fortschrittliches Erscheinungsbild vor allem in der Halbleiterindustrie von großer Bedeutung. Indirekt entstehen auch durch die für die Automatisierung vorher notwendigen Schritte (Enabler) Vorteile. Durch die

elektronische Erfassung der Arbeitsschritte steigt die Nachvollziehbarkeit der einzelnen durchlaufenen Prozesse. Aufgrund der elektronischen Datenerfassung von beispielsweise Messdaten, die früher oft nur händisch aufgeschrieben wurden, steigt die Datenverfügbarkeit. Daraus folgend nimmt die Automatisierung in der Produktion existierender Prozesse auch bei Infineon einen hohen Stellenwert ein. Im Rahmen dieser Arbeit wird für bestimmte Abläufe in der Fabrik eine kosteneffiziente, qualitätsfördernde und innovative Lösung präsentiert, die eine zukünftige Wettbewerbsfähigkeit und einen möglichen Vorsprung zur Konkurrenz ermöglichen kann.

1.1 Aufgabenstellung

Prozessabläufe innerhalb von Anlagen in der Produktion bei Infineon im Reinraum sind weitgehend automatisiert. Eine größtenteils händisch durchgeführte Tätigkeit stellt die Beladung und Entladung der Anlagen dar. Die Begriffe Anlage und Maschine sind im Folgenden äquivalent verwendet. Ziel dieser Arbeit ist eine Zusammenstellung eines passenden Robotersystems zum Be- und Entladen von Maschinen in der Halbleiterproduktion allgemein und speziell bei Infineon Technologies AG in Villach. Die vorhandenen Systeme, Prozessabläufe, räumlichen und reinraumtechnischen Gegebenheiten sollen analysiert werden, um ein effizientes, leistungsfähiges, sicheres und kostengünstiges Umsetzungsszenario für diesen Teil der Intralogistik zu generieren. Die Beladung der Anlagen bei Infineon Villach erfolgt bis auf die Stellen, an denen die iRobotics-Systeme eingesetzt werden per Hand durch den Operator. Der Automatisierungsgrad der Maschinenbeladung soll sich durch ein hier vorgestelltes System erhöhen. Bei weit über tausend Maschinen finden durch Operatoren nach einer Abschätzung im Programm FabCockpit über eine Million Beladungen pro Woche statt. Ein gefundenes Beladesystem soll Horden mit 8-Zoll-Losen auf Maschinen stellen und diese wieder entnehmen können. Das System soll sieben Tage die Woche im 24-Stunden-Betrieb laufen, den Reinraumanforderungen genügen, die nötige Präzision erreichen und im selben Arbeitsraum mit dem Menschen agieren können.

1.2 Lösungsansatz

Eine automatische Umsetzung dieser Aufgabe mittels eines Robotersystems kann auf viele unterschiedliche Varianten gelöst werden, von denen auf drei genauer eingegangen wird. Die Bestückung der Anlagen kann mit einem fix montierten Roboterarm in einer Roboterzelle, mit einem schienenbasierten System oder mit einem frei ver-

Tabelle 1.1: Automatisierungsoptionen.

| Roboterzelle | Schienenbasiertes System | Frei verfahrbare Einheit |
|--|--|---|
|  |  |  |
| <p>Die Anlagen stehen in einer kreisähnlichen Gruppe mit Boxennestern an einer Stelle, wobei der Roboter in der Mitte positioniert wird. Die Beladeports zeigen zum Roboter.</p> | <p>Die Anlagen stehen annähernd in einer Linie und die Beladeports zeigen in Richtung des verfahrbaren Robotersystems. Boxennester stehen vor den Anlagen.</p> | <p>Die Position von nicht geordnet aufgestellten Anlagen kann beibehalten werden. Boxennester werden geordnet passend zu einem möglichen Transportsystem aufgebaut.</p> |

fahrbaren System umgesetzt werden. Diese Automatisierungsoptionen werden in der Tabelle 1.1 beschrieben.

- *Roboterzelle*

Unter einer Roboterzelle wird hier ein abgeschlossenes System verstanden, in dem ein mittig fix montierter Roboterarm rundum platzierte Maschinen belädt. Die Beladeports der Maschinen zeigen in Richtung des Roboters. Hierbei kann es sich um eine im Betrieb vom Menschen durch eine mechanische Abschottung getrennte Einheit handeln, was die Mensch-Maschine Kooperation um einiges vereinfacht. Sollte dennoch ein Mensch eine der Maschinen manuell beladen wollen, kann ein Boxennest dafür buchbar sein und dieses Los wird in der Bearbeitung vorgezogen.

- *Schienenbasiertes System*

Ein schienenbasiertes System ist vor allem bei bereits durch den räumlichen Aufbau in einer Linie ausgerichteten Maschinen sinnvoll. Hierbei kommt es auch auf die Position des Beladeports an der Maschine an. Dieses sollte in Richtung des Roboterarmes zeigen. Geringe Abweichungen der Positionierung der Anlagen die durch das System beladen werden sollen stellen durch den variablen

Roboterarm, der für jedes Load-Port getrennt geteacht wird, keine Probleme dar.

- *Frei verfahrbare Einheit*

Mit fixen und schienengebundenen Robotern lassen sich viele Maschinen beladen. Bei komplizierteren Gegebenheiten stoßen diese Systeme aber an ihre Grenzen. Der nächste Schritt in der Beladung der Maschinen sind frei verfahrbare Konzepte. An verwinkelteren Orten des Reinraums, wo aus Platzmangel ein Ausrichten der Maschinen nur schwer möglich ist, an Plätzen wo das Einbauen einer Unterflurschiene wegen fixem Boden ohne Spiel unter den Bodenplatten nicht machbar ist und dort wo eine Schiene das regelmäßige Manövrieren von Anlagen stört ist die Einbringung von mobilen Systemen sinnvoll. Ein Anordnen der Boxennester passend zu einem später eingeführten Überkopf-Transportsystem ist empfehlenswert. Weitere Details zu der frei verfahrbaren Einheit finden sich in den folgenden Kapiteln.

Bei einer tatsächlichen Umsetzung einer Vollautomatisierung im Bereich der Beladung von 8-Zoll-Anlagen ist eine Festlegung auf einen Lösungsweg vor allem aus Kosten- und Aufwandsgründen nicht sinnvoll. Eine Zusammenstellung der einzelnen Lösungen je nach vorhandener Umgebungssituation mit einer generellen einheitlichen Benutzeroberfläche ist empfehlenswert. Der Installations- und Wartungsaufwand, sowie die Komplexität des Systems steigen beginnend mit der Roboterzelle hin zur frei verfahrbaren Einheit. Die Variabilität und Flexibilität gegenüber Maschinenrangierungen, Neueinbringungen oder Veränderungen an den Maschinen wird hin zur frei verfahrbaren Einheit dafür um einiges höher. Kosten von Maschinenrangierungen bewegen sich im Bereich von einigen hundert Euro bei beispielsweise einer kleinen Anlage mit Mikroskop bis hin zu Größenordnungen wie 500.000 Euro bei einem Implanter. Sie ergeben sich unter anderem durch Reinraumvorbereitung, Verlegung der Zuflussleitungen und Abflussleitungen für Chemikalien, Druckluft oder Unterdruckluft, Transport und Anpassung der Reinraumwände und Maschinen am Weg. Sollten von einem möglichen schienengeführten Beladesystem viele Maschinen beladen werden, die häufig rangiert werden, kann das ein Grund für den Einsatz einer frei verfahrbaren Beladeinheit sein. Für eine Kombination der drei präsentierten Automatisierungsoptionen zur Maschinenbeladung sind die Varianten der Roboterzelle und des schienenbasierten Systems bei Infineon umgesetzt und arbeiten erfolgreich und zuverlässig. Frei verfahrbare Einheiten sind aktuell bei Infineon an keinem der Standorte weltweit zur Beladung der Anlagen im Einsatz.

Zur Erfüllung der Kombination aus drei Belademöglichkeiten wird hier eine *mobile, frei verfahrbare Einheit* entwickelt. Ziel bei der Konstruktion eines mobilen Beladesystems sollte von Anfang an sein, dass es flexibler und effizienter operiert als das schienengebundene. Flexibilität wird durch die frei verfahrbare Basis gegeben. Effizienter wird das System ganzheitlich betrachtet, da mobile Beladeeinheiten auslastungsabhängig an unterschiedlichen Stellen im Reinraum eingesetzt werden können. Beispielsweise können von zwei Robotern drei Maschinen des Typs A beladen werden. Ist die Auslastung dieser A-Maschinen gering, reicht ein Roboter zur Beladung aus und der zweite kann beim Maschinentyp B, bei dem viele Lose warten, unterstützend beladen. Des Weiteren sollte das System so leicht und klein wie möglich gehalten werden. Bei jeder enthaltenen Komponente sollte überprüft werden, ob diese unbedingt benötigt wird, ob diese weggelassen werden kann oder wie diese leichter, kleiner, billiger oder einfacher umgesetzt werden kann. Robustheit und Langlebigkeit sollten eine in der Industrie eingesetzte Roboterlösung von einer Forschungsplattform unterscheiden. Unabhängig von Änderungen in Durchsatz, Prozessstyp oder Art der zu beladenden Maschine gilt es wirtschaftlich zu produzieren. Intuitive Bedienbarkeit über eine anschauliche grafische Benutzeroberfläche die mit einem Blick verständlich ist wird bei der Projektumsetzung angestrebt. Veränderungen der vorhandenen Strukturen sollten zur Kosten- und Aufwandsersparnis so gering wie möglich gehalten werden und das System muss den geltenden Sicherheitsbestimmungen genügen.

1.3 Aufbau

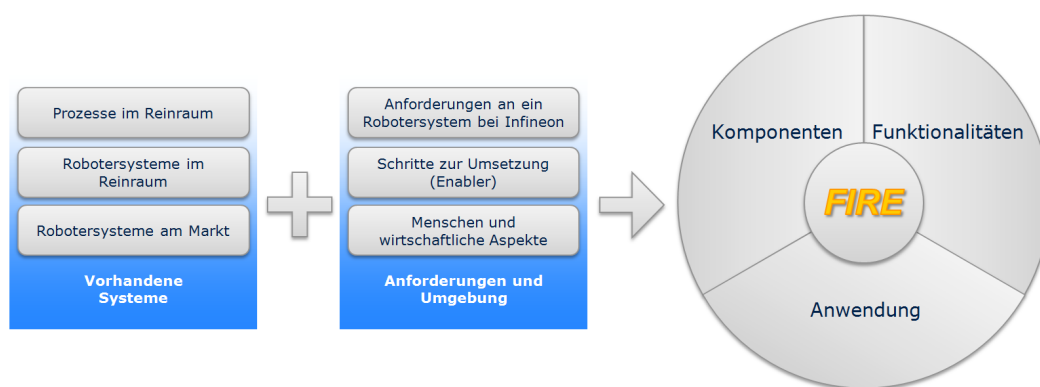


Abbildung 1.1: Aufbau der Diplomarbeit.

Der Aufbau der Arbeit zur Erreichung eines zuvor vorgestellten frei verfahrbaren

Beladesystems gliedert sich, wie Abbildung 1.1 zeigt, in eine Evaluierung von vorhandenen Systemen, eine Definition der Anforderungen und Umgebung und ein daraus resultierendes Konzept namens FIRE.

In Kapitel 2 auf Seite 7 wird auf Prozesse im Reinraum und auf Robotersysteme, welche bei Infineon im Einsatz sind eingegangen. Systeme innerhalb von Maschinen, zum Be- und Entladen der Maschinen und frei verfahrbare Systeme werden beschrieben. Angebote am Robotikmarkt bei Roboterarmen, kaufbare mobile Plattformen und Projekte in Entwicklung werden zusammengestellt und analysiert.

Kapitel 3 auf Seite 35 bildet eine Zusammenstellung von Anforderungen und der Umgebung des Robotersystems. Anforderungen an ein Robotersystem bei Infineon beinhalten räumliche Gegebenheiten, Transportboxen, Horden, Scheiben, Anlagen, Boxennester, Genauigkeiten und Toleranzen, Reinraumtauglichkeit, ein Transportsystem, Standardisierung, Geschwindigkeit, Vibrationen und ein Leitsystem, Begriffe, welche in diesem Kapitel näher erläutert werden. Danach werden Schritte zur Umsetzung von Automatisierungslösungen bei Infineon Villach, sogenannte Enabler, vorgestellt und es wird auf Menschen und wirtschaftliche Aspekte eingegangen.

Kapitel 4 bis 6 behandeln das mobile System FIRE. In Kapitel 4 auf Seite 65 werden Komponenten des Systems wie die Antriebseinheit, Spannungsversorgung, Roboterarm und Greifer, Sicherheitselemente, Sensorik und eine Steuereinheit behandelt.

Kapitel 5 auf Seite 80 befasst sich mit Funktionalitäten des Systems FIRE. Präsentiert werden Sensorsysteme zur Plattform-Navigation, Kartenerstellung, Lokalisierung, ein Bewegungsmodell, Pfadplanung, Stati-Check, Arm-Präzision, und eine Systemkombination zur Werkzeugpositionierung. Auf die benötigte Software und Reinraumtauglichkeit wird eingegangen.

Kapitel 6 auf Seite 140 beschreibt ein Umsetzungskonzept für die Anwendung des Systems FIRE. Der Prozessablauf beim Be- und Entladen, das Design, ein Einsatzort, Aufgaben während des Roboterbetriebs, Kollaboration mit dem Menschen, aktuelle Produktionsphilosophien, eine Abgrenzung zu anderen Projekten und mögliche Erweiterungen werden in diesem Kapitel thematisiert. Ein Gesamtkonzept für das Jahr 2020 wird erstellt und ein Ausblick auf zukünftige Wege in der Robotik schließt die Arbeit ab.

Kapitel 7 auf Seite 168 fasst den Weg zum hier erarbeiteten mobilen Belade-Konzept FIRE zusammen und gibt einen Ausblick nach Meinung des Autors auf zukünftige Wege in Automatisierung und mobiler Robotik.

2 Vorhandene Systeme

Die Infineon Technologies Austria AG hat ihren Sitz in Villach und ist ein Konzernunternehmen des weltweit operierenden Halbleiterherstellers Infineon Technologies AG. Entstanden ist die Infineon Technologies AG durch eine Ausgliederung aus der Siemens AG im Jahr 1999. Der Standort in Villach, zu sehen in Abbildung 2.1 existiert seit der Gründung einer Diodenproduktion im Jahr 1970 und ist stetig gewachsen. Ungefähr 2500 Angestellte arbeiten auf einer Fläche von 190.000 Quadratmetern und einer Produktionsfläche von 17.800 Quadratmetern inklusive Servicezonen. Von rund 1400 Produkten wird pro Jahr eine elfstellige Anzahl an Chips produziert.



Abbildung 2.1: Luftbild des Standortes Infineon Villach [Inf].

Der Produktionsablauf gliedert sich wie in Abbildung 2.2 grob dargestellt in eine Einschleusung von Grundmaterial, einzelne Prozesse und ein Liefern am Ende. Dazwischen liegen jeweils Wege, auf denen das bearbeitete Material transportiert wird. Dieser Transport gliedert sich in ein Entladen der Maschine des vorherigen Prozesses (Unload), ein darauffolgendes Platzieren der sogenannten Horde auf einem Puffer,

einen Transport zu einem Puffer vor dem nächsten Prozess und ein Beladen der nächsten Anlage (Load). Die Schritte Unload und Load im Ablauf der Produktion bei Infineon werden in dieser Arbeit genauer betrachtet.

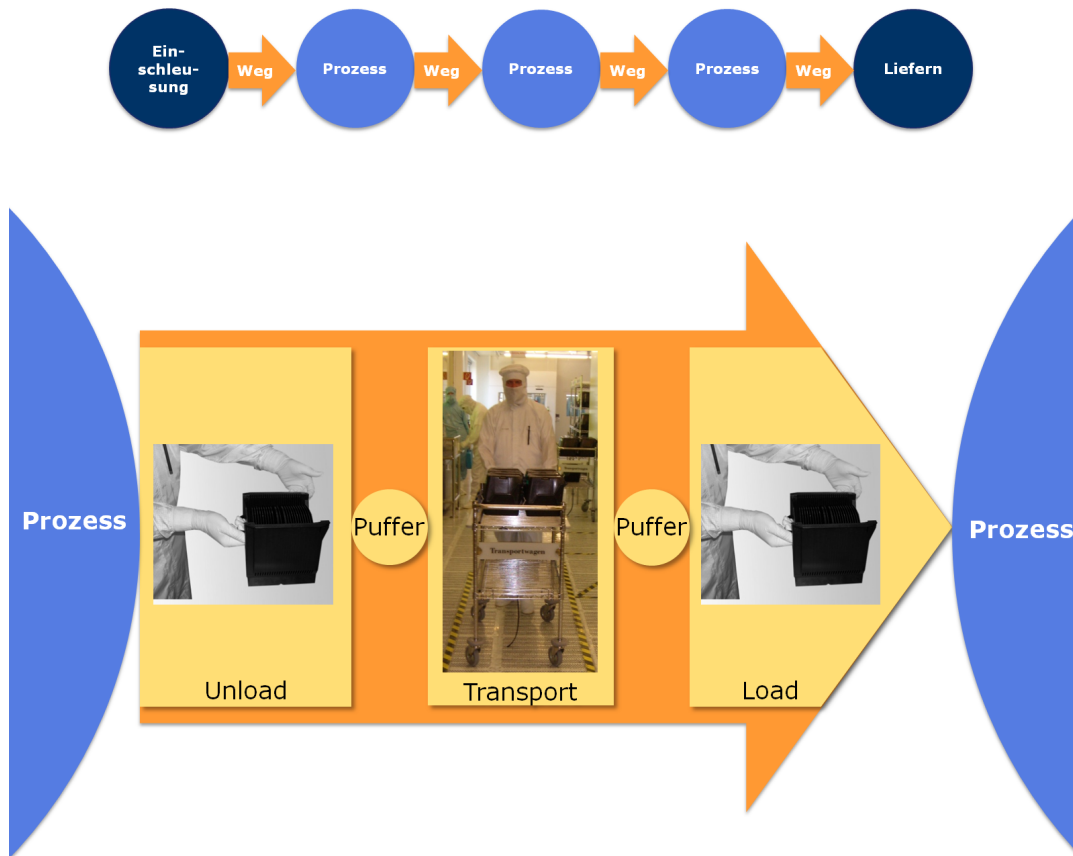


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Produktionsablaufes bei Infineon Vilach.

2.1 Prozesse im Reinraum

Die Einschleusung von Losen wird für jede Produktionswoche beginnend mit dem Geschäftsjahr im Oktober von der Produktionslogistik geplant und von der Line Control genau ausgeführt. In einer Produktionswoche werden Wafer Starts per Week (WSPW), Layer Starts per Week (LSPW) und vorhandene Kapazitäten (KAPA) geplant. LSPW sind aussagekräftiger als WSPW, da pro Layer (Schicht) auf dem Wafer ähnliche Prozessschritte durchlaufen werden und die LSPW so genauer Auskunft

Tabelle 2.1: Übliche Einschleusungswerte bei Infineon Villach.

| Scheibendurchmesser | WSPW | LSPW | KAPA LSPW |
|---------------------|-------|--------|-----------|
| 6 Zoll | 18500 | 147500 | 147500 |
| 8 Zoll | 16000 | 185000 | 188000 |
| 12 Zoll | 550 | 6300 | 7350 |

über die Auslastung der Maschinen geben. Bei Infineon Villach werden Wafer mit den Durchmessern 4, 6, 8 und 12 Zoll prozessiert, wobei 4-Zoll-Wafer so selten vorkommen, dass sie in der Tabelle vernachlässigbar sind. Übliche Einschleusungswerte sind in der Tabelle 2.1 angegeben.

In den Kapazitäten nicht mit einberechnet sind sogenannte Idle Capacities. Darunter versteht man Anlagen die für eine gewisse Zeit nicht gebraucht werden, auf den Zustand „cold steel“ gesetzt und nicht kurzfristig wieder einsetzbar sind. Mittelfristig können sie in die Kapazität miteinberechnet werden.

Die Produktion in Villach ist über vier Hallen verteilt. Die Halle 13, 14, 15 und 16 sind ein durchgängiger Reinraumbereich, wobei sich die Hallen 13 bis 15 und das untere Geschoß der Halle 16a auf derselben Ebene befinden und Halle 16 und das obere Geschoß der Halle 16a auf einer anderen. Grob gesprochen verläuft die Produktion von der Halle 16 beginnend bis zum Prüffeld in Halle 13. Im Reinraum sind ungefähr 1.330 Anlagen in Betrieb. Durch Neueinbringungen, Rangierungen und Entfernen von Maschinen ändert sich diese Zahl kontinuierlich. Des Weiteren kommt es bei der Zählung der Anlagen auf die Art der Rechnung an. Bei der hier ermittelten Zahl werden die weit über 200 Mikroskope und Anlagen, deren Automatisierung nicht zielführend ist nicht mitgerechnet. Dazu zählen unter anderem Kontroll- und Reinigungsprozesse, die vom Operator durchgeführt werden. Nur durch Ersetzen dieser Prozesse durch Maschinen mit automatischen Prozessabläufen macht eine maschinelle Beladung Sinn und die Anlagen werden hinzugezählt. Bei der Zählung werden Mehrkammeranlagen, wo mehrere Maschinen an einer einzigen Stelle beladen werden als nur eine Anlage gezählt. So ergeben sich in unterschiedlichen Dokumenten und zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Anzahlen von Anlagen bei Infineon Villach, von denen 1.330 eine aussagekräftige Zahl im Zusammenhang mit Plänen zur automatisierten Beladung von Maschinen darstellt. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die Losgrößen 6, 8 und 12 Zoll über die gesamten Hallen verteilt, wobei in Halle 16 ein deutlicher Trend zu 8 Zoll geht. Mit guten 10 Prozent Anteil an 6-Zoll-Losen im Vergleich zu knapp 70 Prozent in Halle 15 sind diese bei einer Automatisierung in Halle

16 zu vernachlässigen. Bei automatischen Prozessabläufen ist eine örtliche Trennung der Scheibendurchmesser aufgrund von einfacheren Lösungen sinnvoll.

Die in der Produktion im Reinraum (in der Linie) bearbeiteten Wafer werden in Horden zu je 25 Scheiben zusammengefasst. Bei 6 Zoll passen ein oder zwei Horden in eine Box, bei 8 Zoll passt in jede Box genau eine Horde und bei 12 Zoll sind Horde und Box in einem sogenannten Foup (Front Opening Unified Pod oder Front Opening Universal Pod) untrennbar miteinander verbunden.

Als Los wird eine Einheit von 1 bis 50 Scheiben bezeichnet, der im System eine feste Losnummer vergeben wird. Über die Losnummer ist jedes Los eindeutig identifizierbar und im System zu finden. Bis auf Splitprozesse durchläuft ein Los von der Einschleusung bis zum Ende für alle Scheiben die gleichen Prozessschritte. Nach der Einschleusung eines Loses wird dieses mit einem Transportwagen laut einem Protokoll zu einer Anlage gebracht und dort in ein Regal gestellt. Der Operator an der Anlage sieht im Programm FabCockpit welche Lose als nächstes gefahren werden sollen. Laut einer Dispatchliste, in der die Priorität der einzelnen Lose festgehalten ist, belädt der Operator die Anlage. Dazu öffnet er die Box, entnimmt die Horde mit den Wafern und stellt sie auf das Beladeport (Loadport, LP) der Maschine. Hier kommen je nach Anlage noch weitere Schritte wie ein Umhordevorgang hinzu. Dabei werden die Scheiben auf einem Umhorder beispielsweise bei der nasschemischen Reinigung von der Transporthorde in eine chemisch resistente Prozesshorde umgehordet. Nach Prozessende wird die Anlage vom Operator entladen, indem dieser die Horde von der Maschine nimmt, sie in die Box stellt und diese schließt. Auch hier kann es Zwischenschritte geben. Selten werden einzelne Scheiben mit einer Vakuumpinzette auf das Beladeport einer Maschine gelegt und nach Prozessende wieder entnommen. Beispiel dafür ist das Messen von Parametern wie Dicke bei einer einzelnen Scheibe des Loses. Mit einem Transportwagen wird das Los daraufhin zum nächsten Prozess befördert. Dieser Ablauf wiederholt sich in der Linie bis zum Ende der Bearbeitung der Wafer.

Ursprünglich musste der Operator an der Maschine bei jedem Losstart den gewünschten Prozess vom Laufzettel ablesen und eingeben, welches Programm die Maschine starten soll. Die Horden der 8-Zoll-Lose, bei denen die Scheibenvorderseite bearbeitet wird, haben eine kleine Karte mit einer Horden-ID, die über einen RFID-Reader an der Maschine gelesen werden kann. So weiß die Maschine welches Los gerade auf das Loadport gestellt wurde und kann automatisch den richtigen Prozess starten. Solch ein automatisches Starten wird mit dem Begriff Load-and-Go beschrieben und genauer in Kapitel 3.2.2 auf Seite 56 behandelt. Diese Technik ist jedoch noch nicht bei allen Horden und Maschinen umgesetzt. Bei vielen Anlagen sind wei-

tere Einstellungen oder das Drücken von verschiedenen Knöpfen notwendig.

Gewisse Anlagen sind als Bottleneck-Anlagen bekannt und werden bei der Einteilung der Auslastungen besonders beachtet. Dadurch, dass die Anlagen sieben Tage die Woche 24 Stunden in Betrieb sind, wird eine ungenutzte Zeit bis zu einer geringeren Auslastung als Verzögerung mitgezogen. Hier werden hohe Anforderungen an die automatische Beladung gestellt. Es besteht jedoch durch die Automatisierung das Potential manuell durchgeführte Beladeprozesse zu optimieren und so die Maschine bestmöglich zu nutzen.

2.2 Robotersysteme bei Infineon

Die aktuell vorhandenen Robotersysteme in der Fertigung von Infineon am Standort Villach werden in zwei Kategorien unterteilt. Es gibt Systeme innerhalb von Maschinen und Systeme zum Beladen und Entladen der Maschinen. Frei verfahrbare Systeme sind an den Standorten Villach, Regensburg und Dresden erst in der Entwicklungsphase. Im Folgenden werden die momentan bestehenden Systeme näher erläutert.

2.2.1 Systeme innerhalb von Maschinen

Interne Insellösungen mit Robotern werden in einem Großteil der in der Halbleiterproduktion verwendeten Maschinen verwendet. Es handelt sich hierbei meist um Scara-Roboter zum Waferhandling zwischen einzelnen Komponenten einer Maschine. Sie finden oft zum Transport der einzelnen Wafer aus der Horde an die entsprechende Stelle in der Maschine Anwendung. Beispiele dafür sind unter anderem RTP-Öfen oder Wafersorter. Auch andere Robotersysteme mit bis zu sechs Freiheitsgraden sind verbaut. Hier sind unter anderem die CMP-Anlagen oder Vertikalöfen zu erwähnen. Systeme wie der horizontal linear verfahrbare Belade- und Transportmechanismus der Nassbänke kommen ebenfalls zum Einsatz. Der entscheidende Unterschied zu Systemen zum Beladen und Entladen von Maschinen liegt in der Abgeschlossenheit der Systeme. Es ist dem Menschen ohne Öffnen einer Sicherheitstüre, was zum sofortigen Stillstand des Roboters führt, nicht möglich in den Arbeitsbereich des Roboters zu gelangen.

2.2.2 Systeme zum Beladen und Entladen der Maschinen

Zum Beladen und Entladen der Maschinen sind in Villach aktuell drei verschiedene automatisierte Systeme im Einsatz. Zu diesen zählen Robotersysteme mit denen

Öfen beladen werden, die Automatisierung des radioaktive Strahlung hervorrufenden Protonenimplanters und die zur Beladung unterschiedlicher Maschinen verwendeten iRobotics-Systeme. Das Konzept von Luftmuskelroboter wurde getestet und verworfen.

Roboter bei Öfen

Die am frühesten installierten automatischen Beladesysteme sind bei den Öfen zu finden. Im Jahr 1998 wurden die ersten Stäubli-Roboter angeschafft, die von einem externen Umhorder ein Boot aufgenommen und auf den Ofen positioniert haben. Der RX160 von Stäubli kam später ohne externen Umhorder aus. Im Jahr 2011 wurden die ersten 12-Zoll-Öfen automatisch bestückt. Es werden bei 12 Zoll sogenannte Foups auf die Maschine gestellt. Hierbei handelt es sich um Boxen, in denen die Horde automatisch mit integriert ist. Es wurde ein Foup-Port so weit implementiert, dass es leicht an ein zukünftig vorhandenes Transportsystem angebunden werden kann. Die Beladung der Maschinen benötigt bei 12 Zoll ungefähr sechs Minuten pro Foup und bei 8 Zoll inklusive zusätzlich nötigem Handling drei bis vier Minuten.

Bei der Installation der Roboter waren einige Punkte zu beachten. Der Arbeitsraum des Roboters, der Bereich in dem sich der Roboter bewegt, sollte nicht von Menschen betreten werden. Dies wird durch zwei Laser-Rotor-Scanner bei 8 Zoll und durch drei bei 12 Zoll sichergestellt, die von der Maschine in Richtung des Operators schauen. Der Bereich wird in eine Vorwarnzone und eine Hauptwarnzone unterteilt. Des Weiteren sollte die zu automatisierende Anlage ein Hold-Signal empfangen können. Es handelt sich hierbei um einen eigenen Prozessschritt, in dem die Anlage pausiert, während sie vom Roboter beladen wird. Daraufhin wird mittels eines Signals vom Roboter der nächste Prozessschritt eingeleitet, was bei händischer Beladung zuvor durch einen Knopfdruck erfolgte.

Die Gründe für die Automatisierung waren in diesem Bereich beispielsweise die Hitze am Ofen-Arbeitsplatz und das Gewicht der beladenen Boote, das für regelmäßiges Heben durch einen Menschen nicht geeignet ist. Aus diesem Grund wurden zu Zeiten manueller Beladung oft nur 25 statt der möglichen 75 Scheiben auf einem Boot in den Ofen gefahren. Die Automatisierung brachte eine Erleichterung für den Operator und eine Steigerung der Effizienz. Außerdem wurde dadurch ein pinzettenfreies Handhaben¹ der Wafer möglich. Des Weiteren wurde die Sicherheit der Waferhandhabung gesteigert. Der Wert des Produkts wurde von der zuständigen Abteilung inklusive

¹Mit einer Vakuumpinzette werden einzelne Wafer vom Menschen gehandhabt. Dabei fährt der Operator mit der Pinzette zur Waferaufnahme zwischen die Scheiben in der Horde und Fehlerquellen wie Zerkratzen, zusätzliche Partikelkontamination oder fallen lassen der Scheibe entstehen.

Boot festgelegt und entspricht den Anschaffungskosten eines neuen Roboters und einem Drittel der Kosten für das gesamte System.

Zu den Herausforderungen zählten neben dem beschränkten Arbeitsraum mit einem möglichen Drehwinkel der Hauptachse um 270 Grad mit einem toten Winkel die eng gebauten räumlichen Gegebenheiten. Bei neu installierten Maschinen wird, wie beispielsweise in Dresden, der benötigte Platz für den Roboter von Anfang an miteinkalkuliert.

Beladung des Protonenimplanters

Ein weiterer automatisiert beladener Maschinentyp ist der Protonenimplanter. Durch den Beschuss der Wafer mit einer Energie von bis zu 5 MeV werden die Wafer radioaktiv mit einer Abklingzeit bis zu einem gesetzlich für den Menschen zulässigen Wert von einigen Stunden. Dadurch ist die Maschine in einem Betonbunker eingeschlossen und ein manuelles Handhaben der Wafer nicht möglich. Vor der Umsetzung der Automatisierungslösung war ein Beschuss der Wafer nur mit geringer Energie möglich, oder es kam zu sehr langen Standzeiten aufgrund stundenlanger Abklingzeiten. Zur Durchführbarkeit der aktuellen Prozesse war eine Automatisierung unumgänglich. Laut Load-Unload-Protokoll werden pro Jahr ungefähr 1300 Lose an dieser Anlage gefahren.

Die Funktionsweise der automatischen Beladung des Protonenimplanters ist wie folgt. Bei einem Load-Port werden die Boxen auf das System gestellt und gelangen danach in einen Wait-Loop, sodass mehrere Boxen auf einmal angemeldet werden können, ein Puffer entsteht und der Operator sich für eine gewisse Zeit nicht kümmern muss. Die Beladung der Maschine läuft bei 12 Zoll mit Load-and-go. Bei 8 Zoll werden Foup-Inserts verwendet bei denen mit einem Barcode ein Los einem Foup zugeordnet wird. Aus dem Wait-Loop werden einzelne Lose über einen Lift und ein Transportsystem mit Shuttles in den Prozessraum transportiert. In der Prozesskammer wird der Implanter von einem Roboter beladen und entladen. Danach werden die Scheiben auf Radioaktivität gemessen und die Zeit, die sie in einem Abklingregal in dem Prozessraum warten müssen bestimmt. Sie werden erneut gemessen und bei erlaubten Strahlungswerten über ein Shuttle wieder aus der Prozesskammer gebracht. Als Sicherheitssystem dient ein Schlüsselschalter, dessen Schlüssel bei Betreten des Prozessraumes mitgenommen wird. Bei Betätigung des Schalters wird der aktuelle Prozess fertig gefahren, das Abklingregal geschlossen, der Roboter in die Ausgangsposition gefahren und alle Antriebe abgeschaltet.

Luftmuskelroboter

Auf der Suche nach einem geeigneten universell einsetzbaren Be- und Entlade-roboter, welcher unabhängig vom Maschinentyp einsetzbar ist, galt es eine Lösung zu finden, die für eine Mensch-Maschine-Kooperation im selben Arbeitsbereich zugelassen wird. In Kooperation mit den Firmen FerRobotics und Festo wurden zwei Luftmuskelroboter im Reinraum getestet. Diese Art von Robotern wurde zuvor zu Stapelarbeiten für Kunststoffprofile in der Fensterindustrie und für therapeutische Übungen nach Schulterverletzungen eingesetzt. Die Funktionsweise dieses Roboters gleicht der des menschlichen Oberarms, wobei Bizeps und Trizeps durch zwei Luftmuskeln der Firma Festo umgesetzt wurden. Die Achsen mit den Luftmuskeln geben bei Kollision nach und verletzen den Menschen nicht. Zwei dieser Roboter wurden als Prototyp im Reinraum zur Beladung von Maschinen eingesetzt. Der Roboter war sowohl für das Öffnen und Schließen der Boxen als auch für das Be- und Entladen der Maschinen zuständig. Als Nachteil dieser Umsetzung stellte sich die unzureichende Präzision des Roboterarms aufgrund konstruktionsbedingter Ungenauigkeiten der Ventile für die Muskelsteuerung heraus. Der für andere Bereiche gut geeignete Roboter war für das akkurate Handhaben der Wafer aufgrund von stufigen, nicht ganz kontinuierlichen Roboterbahnen nicht geeignet. Aus den Versuchen mit dem Luftmuskelroboter konnte aber über den Prozessablauf gelernt werden. Beispielsweise wurde später das aufwendig umgesetzte Öffnen und Schließen der Boxen nicht mehr vom Roboter ausgeführt, der so zwischen Beladen und Entladen die zwei Bewegungsabläufe zum Schließen und Öffnen der Box einspart.

iRobotics

Die momentan aktuellste automatisierte Beladung von Maschinen erfolgt durch die iRobotics-Systeme. Auf der Automatica in München wurde 2010 der LBR4 von Kuka vorgestellt. Der Leichtbauroboter mit sieben Freiheitsgraden wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt und bestach vor allem durch sein Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast. Der vorgestellte Roboterarm hatte bei einem Gewicht von nur 14 kg eine erlaubte Nutzlast von 12 kg. Die Reichweite war optimal und die Funktionalität bei Berührung stehen zu bleiben ideal im Umfeld mit dem Operator.

Für den beladenden Roboter LBR4 wurde ein sogenannter Rucksack (Shuttle) entwickelt, auf dem der Roboter schienengebunden an der Anlagenfront auf- und abfahren kann. Die Horden mit denen die Maschinen beladen werden entnimmt der Roboter aus speziellen Boxennestern, die auch als Equipment Buffer (EQB) bezeichnet werden. In diese stellt der Operator die Boxen hinein und öffnet die Clips. Am

Boxennest selbst ist eine Vorrichtung angebracht die mittels Druckluft die Boxen öffnet. Der Roboter entnimmt die Horde aus der geöffneten Box und stellt sie auf die Maschine. Beim Entladevorgang entnimmt der Roboter die fertig prozessierte Horde vom Loadport der Maschine und platziert sie wieder in die hierzu mittels Druckluft geöffnete Box im Equipment Buffer.

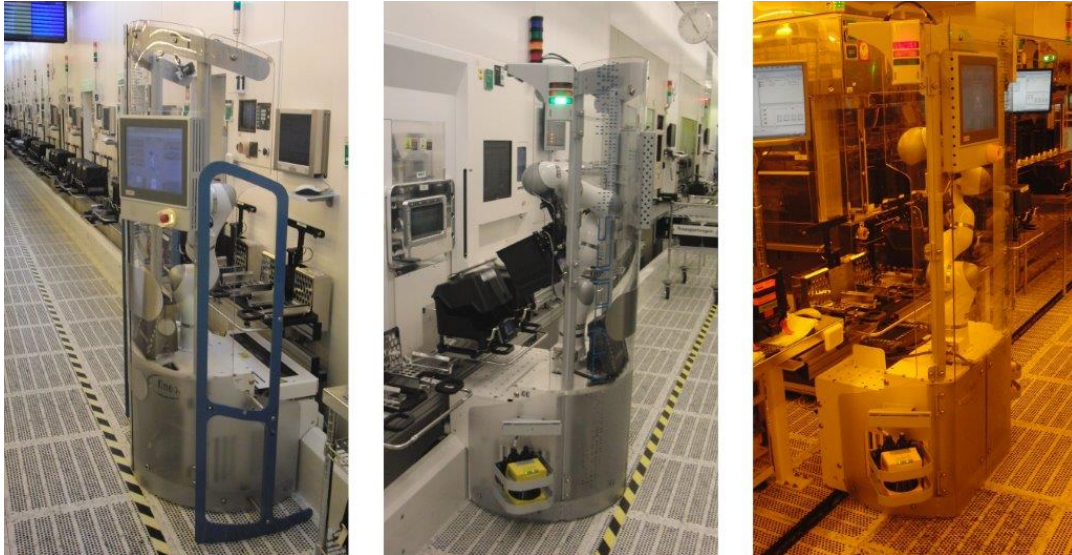


Abbildung 2.3: Drei Entwicklungsstufen des Systems iRobotics: Step 0, Step 1 und Step 2 (v.l.n.r.).

Im Step 0 wurden 2010 die ersten zwei Robotersysteme mit pneumatischem Greifer für den Mattson-Finger angeschafft (siehe Abbildung 2.3 links). Im Step 1 wurden die Finger für LAM und Implanter mit sechs weiteren Robotersystemen ausgestattet. Vom zuvor verwendeten pneumatischen Greifer wurde aufgrund neuer Beladungssituationen, die ein zusätzliches Drehmodul erforderten, zu einem Greifer mit Elektromotoren gewechselt. Bügel links und rechts an der verfahrbaren Einheit zur Erkennung von Kollisionen wurden durch Rotor-Laserscanner, die Hindernisse berührungslos wahrnehmen, ersetzt (siehe Abbildung 2.3 Mitte). Im aktuell laufenden Step 2 kommen einige weitere iRobotics-Systeme hinzu, was eine Gesamtzahl der Systeme ungefähr verdoppelt. In der aktuellen Generation wird die zuvor am Reinraumboden stehende Schiene als Unterflurschiene umgesetzt, was einen platzsparenderen Aufbau ermöglicht. Der Rucksack wird durch ein Verschieben der Robotersteuerung und ein Abflachen der Rundung in der das Roboter-Teachpanel befestigt ist kompakter gemacht. Ein kleinerer Motor für das Shuttle macht das System leichter und schmaler. Diese neueste Version des Systems ist in Abbildung 2.3 rechts zu sehen. Für genauere

Informationen zum Aufbau der iRobotics-Systeme wird auf die Bachelorarbeit von Christopher Mörtl [Mör13] verwiesen.

2.2.3 Frei verfahrbare Systeme

Neben den fixen und schienengebundenen Systemen befinden sich momentan auch mobile Systeme in der Entwicklungs- und Testphase. Im Folgenden werden die frei verfahrbare Plattform SCITOS der Firma Metralabs, das OmniRob-Projekt bei Infineon Regensburg und die Projekte CoolFlow und kabelloses Hero-System bei Infineon Dresden vorgestellt.

Scitos

Das erste tatsächlich bei Infineon eingesetzte frei verfahrbare System ist der Scitos G5 mit einer Grundplattform der Metralabs GmbH und Abänderungen durch die Roth & Rau - Ortner GmbH. Die bisher eingesetzten Modelle werden für Atmosphären-Messungen im Reinraum und zu Testzwecken für den Reticle-Transport eingesetzt. Bei Atmosphären-Messungen bewegt sich der mobile Roboter autonom zu vorgegebenen Punkten im Reinraum und Temperatur, Luftfeuchte, Partikelzahl und NH₃-Konzentration werden innerhalb von fünf Minuten pro Messpunkt ermittelt; beim Reticle-Transport platziert ein Operator Reticles am Roboter und dieser bringt sie an eine andere vorgegebene Position im Reinraum, wo sie von einem anderen Operator wieder entnommen werden. Derzeit bewegen sich fünf dieser Scitos-Roboter in Dresden und einer in Villach. Die Umsetzung eines mobilen Systems im Reinraum verläuft in der Produktion in Dresden einfacher als in Villach, da die Gänge um einiges breiter sind und der Roboter so weniger oft Menschen und anderen Hindernissen ausweichen muss. Außerdem steht der Roboter bei großzügigeren Platzverhältnissen seltener Operatoren im Weg.

OmniRob – Isabel

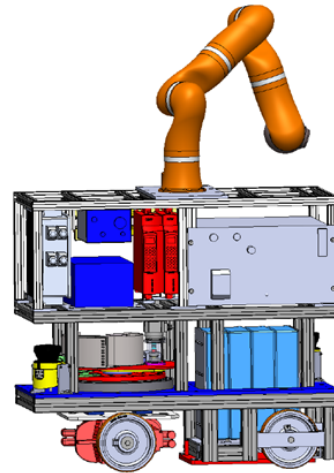
Das Projekt Isabel (Innovativer Serviceroboter mit Autonomie und intuitiver Bedienung für effiziente Handhabung und Logistik) wurde von Infineon Regensburg zusammen mit Kuka Laboratories GmbH entwickelt. Das System ist in Abbildung 2.4(a) zu sehen. Der Fokus liegt hier auf dem Anwendungsfeld Materiallogistik und Handhabung allgemein. Dazu gehören das Aufnehmen und Ablegen von Produkten, der Transport und das Einlegen und Entnehmen in bzw. aus Bearbeitungsmaschinen. Die Aufmerksamkeit liegt hier auf Schlüsseltechnologien wie „Sensorik und Perzeption“, „Planung und Ausführung“ und „Programmierung und Bedienung“.

Es handelt sich bei diesem Projekt um einen mobilen Manipulator, umgesetzt durch

einen auf einer fahrbaren Plattform montierten Roboterarm. Durch den Einsatz von Omniwheels hat die Plattform drei volle Freiheitsgrade in der Bewegung, x-Richtung, y-Richtung und Winkel. Diese Variante ist in der engen Umgebung eines Reinraums von Vorteil. Genauere Informationen zu dem Projekt sind in [Zim12] zu finden.



(a) OmniRob Isabel [Zim12].



(b) CoolFlow [Inf].

Abbildung 2.4: Projekte für mobile Beladesysteme.

CoolFlow

Bei dem Projekt CoolFlow, dargestellt in Abbildung 2.4(b), handelt es sich um zwei verschiedene Herangehensweisen an ein mobiles Maschinen-Beladesystem. Beim ersten, hier gezeigten Weg geht es um den Entwurf und Bau einer neuen Testplattform zur mobilen Beladung von Maschinen. Ziel ist das Sammeln von nützlichen Erkenntnissen bei Positioniergenauigkeit, Energiemanagement, Antriebssteuerung, Fahrwerkoptimierung, Stabilität und Sicherheitsfragen mittels eines universellen Fahrzeugs mit Robotersystem. Die zweite Annäherung an ein mobiles System ist die Weiterentwicklung des in Dresden vorhandenen schienengeführten Robotersystems Hero zu einem mobilen Hero.

Fahrerloses Transportsystem

In der Produktion in Regensburg ist für den Transport von Boxen zwischen Hallen ein fahrerloses Transportsystem im Einsatz. Als Ladegut sind 4-, 6- und 8-Zoll-Boxen, 12-Zoll-Foups, sowie Dünnscheiben und DisTag-Behälter (siehe Worterklärungen, Anhang B.2 auf Seite 183) vorgesehen. Für nähere Beschreibung der transportierten Komponenten wird auf Kapitel 3.1.2 auf Seite 37 verwiesen. Das Transportfahrzeug

fährt, wie bei dieser Technologie am Markt üblich unter einen Transportwagen, hebt diesen leicht an und befördert ihn an die gewünschte Stelle. Hierbei wird mithilfe von Orientierungsbeacons ein vorgegebener Pfad verfolgt. Versuche am System im Rahmen dieser Arbeit ergaben eine hohe Fehlertoleranz und Funktionsfähigkeit trotz bewusstem Abdecken von Orientierungsbeacons oder absichtlichem Positionieren von Hindernissen am Roboterpfad. Auch das Agieren im selben Arbeitsraum mit dem Menschen, rechtzeitiges Stehenbleiben bei plötzlichem Betreten des Pfades, so wie Aktionen wie Liftbenutzung und Reservierung funktionieren zuverlässig. Über 100.000 bewegte Boxen und eine Verfügbarkeit von über 98 Prozent zeigen eine verlässliche Einsetzbarkeit des Systems.

2.3 Angebote am Robotik-Markt

Zu der obigen Analyse der bei Infineon vorhandenen Systeme werden in der Robotik allgemein existente Lösungen bei Roboterarmen, Plattformen und Kombinationen der beiden zu einem mobilen Manipulator untersucht.

2.3.1 Roboterarme

Es werden die passendsten der analysierten, aktuell am Robotik-Markt vorhanden Roboterarme vorgestellt. Die Reihenfolge der möglichen Manipulatoren ist beginnend mit den am besten geeigneten gewählt.

Kuka LBR 4+

Als Hersteller von Lösungen zur Produktionsautomatisierung und Industrierobotern ist die Kuka Roboter GmbH weltweit tätig. Gegründet wurde das Unternehmen bereits 1898. Wie die Kuka Systems GmbH und die Laboratories GmbH ist die Kuka Roboter GmbH Teil der Kuka AG. Das Ziel des Leichtbauroboters LBR 4+ von Kuka ist die sichere Mensch-Roboter-Kollaboration der Zukunft, bei der ein Betrieb ohne Schutzzaun möglich ist und sich Mensch und Roboter einen Arbeitsraum teilen. Momentan wird der LBR 4+ bei der automatischen Beladung der Anlagen bei Infineon durch die iRobotics-Systeme angewendet. Das Verhältnis von 16 Kilogramm Eigengewicht zu 7 Kilogramm Nutzlast wird durch eine Außenstruktur aus Aluminium erreicht und eignet sich für mobile Anwendungen. Die Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,05$ Millimetern nach ISO-Norm 9283 ist für die Anwendung des Waferboxenhandlings optimal. Der Knickarmroboter besitzt sieben Achsen und die gesamten Antriebseinheiten und stromführenden Leitungen sind im Arminneren unter Abde-

ckungen angeordnet. Dadurch werden Adaptionen des nicht für den Reinraum geeigneten Arms zur Erreichung der Reinraumtauglichkeit möglich. Die dazu notwendigen Anpassungen wurden von Infineon in Zusammenarbeit mit Kuka bereits durchgeführt und der Roboterarm befindet sich im produktiven Betrieb im Reinraum mit zufriedenstellenden Messwerten innerhalb der erlaubten Grenzen der Partikelabgabe. Durch in allen Gelenken vorhandenen Positions- und Momentensensoren lässt sich der LBR 4+ positions-, geschwindigkeits- und momentengeregelt betreiben. Der Arbeitsradius des Arms beträgt 790 Millimeter. Die notwendige Versorgung des Roboterarms von 48 Volt DC intern und 115/230 Volt AC extern mit automatischer Umschaltung schließen eine mögliche Adaption auf eine Bordspannung eines mobilen Systems von 48 Volt nicht aus. Die Abmessungen der zum Arm gehörenden Robotersteuerung KR C2 lr von 478 x 431 x 269 Millimetern gelten in der Branche mit Steuerungsmontage in einem Schaltschrank als verhältnismäßig klein, nehmen bei einem mobilen System jedoch immer noch viel Platz ein. So ist eine weitere Verkleinerung der Steuereinheit auf jeden Fall wünschenswert. Die neben Teach-In vorhandene Programmiermöglichkeit durch Führen des Roboterarms durch den Menschen (Programming by Demonstration) erleichtert regelmäßiges Teachen und senkt den Arbeitsaufwand. Nähere Informationen zum Leichtbauroboter 4+ sind in [Kuk10] zu finden.

Kuka LBR iiwa

Der industrietaugliche Leichtbauroboter LBR iiwa (intelligent industrial work assistant) ist sensitiv und nachgiebig und konzeptuell für eine mögliche Zusammenarbeit mit Menschen gedacht. Als Nachfolgemodell des Kuka LBR 4+ ist der Leichtbauroboter iiwa aufgrund seines niedrigen Gewichts ebenfalls prädestiniert für eine mobile Plattform. Der in Deutschland entwickelte Roboterarm hat wie sein Vorgänger sieben Achsen und ist durch Momenten- und Positionssensoren in den Gelenken feinfühlig und für Programmieren durch direktes Handführen des Arms geeignet. Durch Vormachen können Bahnen des Roboters programmiert werden. So ist beispielsweise auch das Weichschalten in einer Koordinate des kartesischen Koordinatensystems bei starkem Widerstand in den anderen Koordinaten möglich. Feinfühligkeit macht den Roboter für mobile Anwendungen im selben Arbeitsraum mit dem Menschen interessant. Durch die Leichtbauweise in Aluminium-Guss hat er ein optimales Verhältnis von Eigengewicht zu Nenntaglast. Die Ausführung LBR iiwa 7 R800 hat bei einem Eigengewicht von 22,3 Kilogramm eine Nenntaglast von 7 Kilogramm und der LBR iiwa bei 29,5 Kilogramm Eigengewicht eine Nenntaglast von 14 Kilogramm.

Zur Steuerung des Roboterarmes wird das Kuka Sunrise Cabinet verwendet. Es

handelt sich um eine 23 Kilogramm schwere Steuereinheit mit Abmessungen von nur 500 x 483 x 190 Millimetern, einem Quadcore-Prozessor und Unterstützung aller gängigen Feldbussysteme. Als Betriebssystem wird das Kuka Sunrise.OS (Operating System) genutzt. Programmeditor und Projektverwaltung finden sich in der Kuka Sunrise.Workbench.

Universal Robots

Die Firma Universal Robots aus Dänemark bietet die zwei Leichtbaurobotermodelle UR5 und UR10 an. Der kleinere UR5 hat bei einer Reichweite von 850 Millimetern und einem Gewicht von 18,4 Kilogramm eine Tragfähigkeit von 5 Kilogramm. Der größere UR10 mit einer Tragfähigkeit von 10 Kilogramm und einer Reichweite von 1300 Millimetern hat ein Gewicht von 28,9 Kilogramm. Bei beiden Modellen kann jede der sechs Achsen um volle 720 Grad gedreht werden und die Wiederholgenauigkeit beträgt $\pm 0,1$ Millimeter. Die Abmessungen des Schaltschranks der beiden Roboterarme sind mit 475 x 423 x 268 Millimetern sehr gering und für mobile Anwendungen geeignet. Dessen erste Version Control Box 1 (CB1) kommt ohne Lüfter aus, was jedoch zu einer starken Erwärmung führt. Bei der Version CB2 ist ein Lüfter verbaut, der Geräusche produziert und bei einer Einbringung im Reinraum wegen möglicher unerwünschter Luftverwirbelungen beachtet werden sollte. Die Roboter von Universal Robot sind in Österreich offiziell für den Betrieb im selben Arbeitsraum zugelassen und werden dazu auch ohne Schutzzaun eingesetzt. Durch Messung der Motorströme in den Roboterjunkten bleiben die Roboter bei einem Kraftaufwand größer als 150 Newton automatisch stehen. Diese Funktion ist am Roboter fix implementiert und nicht durch Veränderungen umgänglich. Tests im Rahmen der Arbeit mit Menschen haben ergeben, dass bei bewusst herbeigeführten Zusammenstößen mit dem Roboterarm bei hohen Geschwindigkeiten keine schmerzhaften Zusammenstöße oder Verletzungen hervorgerufen werden. Bei den im Reinraum viel geringeren erlaubten Geschwindigkeiten als im Testbetrieb und bei zusätzlich möglichen kleineren Schranken von beispielsweise 50 Newton ist eine mögliche Zusammenarbeit mit Menschen zu empfehlen und stellt keine Gefährdung dar. Die Arme erfüllen jedoch keineswegs die bei Infineon erforderliche Reinraumtauglichkeit, welche von Universal Robots auch nicht nachgerüstet werden kann und will. Die Erfüllung der Reinheitsanforderungen ist Infineon-intern oder über ein externes Institut wie beispielsweise das Fraunhofer IPA, in welchem Erfahrung mit diesem Arm und mit der Erreichung von Reinraumtauglichkeit allgemein besteht, zu erreichen. Universal Robots hat keinen direkten Kundenkontakt, sondern operiert über Vertriebspartner, deren ältester in Österreich die Firma FJMayer aus Brunn am Gebirge ist. Vorteile der beiden Roboterarme sind

die mögliche Versorgung mit der niedrigen Gleichspannung von 24 Volt und eine im Vergleich mit anderen Roboterarmen geringere Energieaufnahme.

Schunk LWA 4.6

Der von Schunk als Powerball Lightweight Arm LWA 4.6 bezeichnete Manipulator kann bei einem Eigengewicht von 12 Kilogramm Lasten bis zu 6 Kilogramm dynamisch handhaben. Bei einem Greifradius von über 700 Millimeter hat er eine Wiederholgenauigkeit von 0,06 Millimeter. Wie beim Kuka LBR 4+ verlaufen die Versorgungsleitungen für den Greifer im Inneren des Roboterarms, was eine Adaptation zu Reinraumtauglichkeit erleichtert. Vorhandene Lüftungsschlitze im Roboterarm müssten abgeändert werden. Die 24V DC Spannungsversorgung ist für mobile Einsätze ausgelegt. Eine Leistung von durchschnittlich 80 Watt ermöglicht bei Akkubetrieb lange Laufzeiten. Im Gespräch mit Schunk wurde jedoch betont, dass es sich bei dem Arm zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit um einen Prototypen für Universitäten und dergleichen handelt und eine produktionstaugliche Verlässlichkeit noch nicht sichergestellt werden kann.

Stäubli TX60L

Der TX60L von Stäubli ist ein speziell für Reinraumanwendungen konzipierter Roboterarm. In der Version TX60 hat er bei einer Reichweite von 670 Millimetern eine maximale Tragkraft von 9 Kilogramm und in der Version TX60L hat bei einer Reichweite von 920 Millimetern eine maximale Tragkraft von 5 Kilogramm. Das Eigengewicht von 51,4 beziehungsweise 52,5 Kilogramm ist im Verhältnis zu den Leichtbauroboterarmen von Kuka hoch. Mit sechs Freiheitsgraden besitzt er einen Freiheitsgrad weniger als die Roboter von Kuka und dadurch im Allgemeinen keine für enge räumliche Verhältnisse praktische kinematische Redundanz.

Denso VS Serie

Die Denso VS Serie beinhaltet reinraumtaugliche Roboter der Klasse ISO3. Der 6-Achs-Roboter ist in vier verschiedene Armlängen zwischen 505 und 905 Millimeter erhältlich und hat eine Traglast von bis zu 7 Kilogramm. Es handelt sich hierbei jedoch wie beim TX60 von Stäubli nicht um einen Leichtbauroboter, was für eine mobile Lösung einen großen Nachteil bringt.

2.3.2 Kaufbare mobile Plattformen

Für einen mobilen Manipulator wird neben einem Roboterarm mit zugehörigen Komponenten eine frei verfahrbare Plattform als Basis benötigt. Dazu gibt es prinzipiell die zwei Möglichkeiten eine solche mobile Verfahreinheit in Eigenbau zu realisieren

oder ein fertiges am Markt erhältliches System zu verwenden. Da bereits Produkte existieren, in die einige Jahre an Erfahrung und Entwicklungsaufwand geflossen ist, macht es bei dieser Anwendung keinen Sinn das sprichwörtliche Rad neu zu erfinden. So werden vorhandene Plattformen untersucht und auf Anwendbarkeit für Infineon geprüft. Dabei wird auf die Angabe der maximal erreichbaren Geschwindigkeit verzichtet, da diese bei allen Plattformen über der maximal im Reinraum erlaubten Geschwindigkeit liegt. Im Folgenden findet sich eine Zusammenstellung tatsächlich in Frage kommender Produkte am Robotikmarkt.

Scitos

Scitos ist eine mobile Roboterplattform der Metralabs GmbH, die bereits bei Infineon im Einsatz ist und von der Roth & Rau - Ortner GmbH für die Anforderungen im Reinraum angepasst wird. In der Basisvariante ohne jeglichen Aufbau hat das System Dimensionen von 582 x 737 x 617 Millimetern und ein Gewicht von 60 Kilogramm. Die maximale Gesamtzuladung bei diesem System beträgt 50 Kilogramm und zur Spannungsversorgung dient eine 24 Volt Bleiakkumulator mit 1008 Wattstunden oder ein 25,9 Volt LiPo-Akkumulator mit 2072 Wattstunden. Als Sensorik sind Rad-Encoder mit 460 Schritten pro Radumdrehung, ein umgebender Berührungssensor und 24 Ultraschallsensoren verbaut. Die bei Infineon Villach eingesetzte Scitos-Plattform hat unter anderem zusätzlich Infrarotsensoren, Messgeräte und einen Roboterkopf mit Augen montiert. Weiterführende Informationen sind in [Met12] zu finden.

Adept Lynx

Der Lynx von Adept ist ein mobiler Roboter ohne weiteren Aufbau mit einer maximalen Traglast von 60 Kilogramm mit der Fähigkeit zur autonomen Navigation. Auf einer ebenen Fläche beträgt die maximale Tragkraft 60 Kilogramm. Die Spannungsversorgung bietet ein 24 Volt Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO₄-Akku), einer Variante eines Lithium-Ionen-Akkumulators, mit ungefähr 1440 Wattstunden. Der mobile Roboter kann optional von Adept auf eine Reinraumklasse 100 angepasst werden. Die Abmessungen der Basisvariante des Systems betragen 697 x 500 x 372 Millimeter. Genauere Daten und weiterführende Angaben finden sich in [Ade13]. Das Know-How auf dem Gebiet der mobilen Robotik hat Adept von der Firma MobileRobots, die von ihnen gekauft wurde. MobileRobots entwickelt Forschungsroboter und hat eine breitere Produktpalette die von Adept direkt wenig hervorgehoben wird.

Pioneer LX

Der Pioneer LX von Adept MobileRobots ist eine Plattform für Forschung und Entwicklung basierend auf dem System Lynx von Adept. Daten wie Gewicht, Traglast, Spannungsversorgung und Abmessungen sind ident mit dem Produkt Adept Lynx.

Pioneer P3-DX

Bei dem Pioneer P3-DX von Adept MobileRobots handelt es sich um einen weltweit erfolgreichen mobilen Forschungsroboter. Bei einem Gewicht von 9 Kilogramm und einer Traglast von 17 Kilogramm ist er trotz der angenehm kleinen Bauweise mit Abmessungen des Systems von 455 x 381 x 237 Millimetern für die hier angestrebte Applikation nicht einsetzbar. Der Pioneer P3-DX kann jedoch für Prinzipversuche zu Aufgaben eines mobilen Robotersystems herangezogen werden.

Meka OmniBase

Die Firma Meka Robotics LLC in San Francisco, Kalifornien bietet die mobile Plattform Meka OmniBase an. Die durch acht Motoren erreichte omnidirektionale Bewegung ermöglicht der Plattform eine optimale Ausnutzung der geringen Platzverhältnisse im Reinraum. Mit Abmessungen von 673 x 460 x 312 Millimetern und einem Gewicht von 101,5 Kilogramm erreicht das Vehikel eine Traglast von 100 Kilogramm. Die Bordspannung beträgt 24 Volt bei 60 Amperestunden. Als Nachteil bei der Plattform stellt sich der Firmensitz von Meka in den Vereinigten Staaten heraus. Bei einem Produkt, das Teil eines größeren Systems werden soll, ist vor allem in der Anfangsphase eine enge Zusammenarbeit zwischen Infineon und dem Hersteller notwendig. Es wirft bei einem Lieferanten in Übersee Schwierigkeiten auf, die bei gleichwertigen Angeboten anderer Firmen zum Ausschließungsgrund werden.



Abbildung 2.5: Mobile Plattform MPO-700 von Neobotix in zwei Varianten [Neo].

Neobotix MPO-700

Die mobile Roboterbasis MPO-700 in Abbildung 2.5 von Neobotix in Heilbronn in Deutschland setzt die Möglichkeit omnidirektionaler Bewegung wie die Meka OmniBase ohne Omni-Wheels um. Vier individuell lenkbare Räder bieten gegenüber Allseitenrädern den Vorteil von gleichmäßiger Fortbewegung und weniger Reibungsflächen

2 Vorhandene Systeme

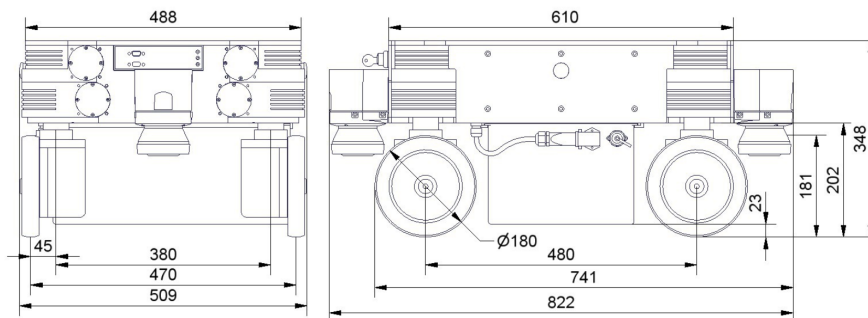


Abbildung 2.6: Abmessungen der Plattform MPO-700 [Mayd].

und sind für den Reinraum mit hohen Sauberkeitsanforderungen empfehlenswert. In Abbildung 2.6 dargestellte Abmessungen von 822 x 509 x 348 Millimetern passen zu dem vorhandenen Platzangebot im Reinraum. Die Traglast von 300 Kilogramm bei einem Eigengewicht von 120 Kilogramm ist optimal. Die 48 Volt Spannungsversorgung mit entweder einer Blei-Gel-Batterie mit 28 Amperestunden oder einer Li-Ionen-Batterie mit 55 Amperestunden lässt sich an einer automatischen Ladestation aufladen und ein manueller Akkutauch ist ohne große Umstände durchführbar.

Neobotix MPO-500

Der mobile Roboter MPO-500 kommt ebenfalls von der Firma Neobotix. Seine Abmessungen von 986 x 692 x 409 Millimetern eignen sich für die gewünschte Anwendung. Das Gewicht von ungefähr 80 Kilogramm und eine Traglast von 50 oder in der Schwerlastversion 120 Kilogramm passen wie das Batteriepack mit 24 Volt und 38 Amperestunden. Obwohl das System ein omnidirektionales Fahrwerk hat, ist es für den Reinraumbetrieb wenig geeignet, da die Fortbewegung durch einen Mecanum-Antrieb mit sogenannten Omniwheels umgesetzt ist. Dies sorgt für beim Wafertransport unerwünschte Vibrationen und die für die Navigation wichtige odometrische Verarbeitung der Radumdrehungen ist im Gegensatz zur Plattform MPO-700 nicht möglich.

Fahrerlose Transportsysteme

Eine eng mit dem mobilen Manipulator verwandte Aufgabenstellung ist der Transport durch fahrerlose Transportfahrzeuge (FTFs) eingebunden in fahrerlose Transportsysteme (FTS), welche heute zu einem wichtigen Bestandteil in der modernen Intralogistik geworden sind. Ein Beispiel stellt das bei Infineon Regensburg eingesetzte System dar. Sie unterscheiden sich durch geringere Komplexität, Navigationsalgo-

Tabelle 2.2: Wichtige, europäische, in der FTS-Branche tätige Unternehmen in alphabetischer Reihenfolge.

| Name | Firma | Land |
|---------------------|--------------------------------------|-------------|
| Bleichert | Bleichert Förderanlagen GmbH | Deutschland |
| dpm | Daum und Partner Maschinenbau GmbH | Deutschland |
| DS | DS Automotion GmbH | Österreich |
| DTA | DTA Movilidad industrial sin límites | Spanien |
| E&K | E&K Automation GmbH | Deutschland |
| Egemin | Egemin EV | Belgien |
| Eisenmann | EISENMANN Anlagenbau GmbH & Co. KG | Deutschland |
| Frog | Frog AGV Systems B.V. | Niederlande |
| Knapp | Knapp AG | Österreich |
| MLR | MLR System GmbH | Deutschland |
| Rocla | Rocla OY | Finnland |
| S-Elektronik | S-Elektronik GmbH & Co. KG | Deutschland |
| Siemens | Siemens AG | Deutschland |
| Snox | Snox NV | Belgien |
| Steca | Steca Elektronik GmbH | Deutschland |
| Telexift | Swisslog-Telexift GmbH | Deutschland |
| Willecke | Willecke Hebe- und Fördergeräte GmbH | Deutschland |

rhythmen, Genauigkeit, Fahrwerk, Größe und generellen Aufbau und Anwendungsfall deutlich von den hier benötigten Systemen. Trotzdem können einige konzeptionelle Ideen als Anregungen und gewisse Komponenten sogar direkt übernommen werden. Daher findet sich in Tabelle 2.2 eine Auflistung aktuell wichtiger, europäischer, in der FTS-Branche tätiger Unternehmen.

2.3.3 Projekte in Entwicklung

Weltweit wird an vielen Universitäten, an Institutionen und in Firmen an mobilen Roboterplattformen und Robotersystemen der Zukunft gearbeitet. Für den Anwendungsfall bei Infineon Technologies Austria AG sind einige Bedingungen wie Ausgereiftheit, Serviceunterstützung in Österreich oder industrietaugliche Zuverlässigkeit unerlässlich. Die nun vorgestellten Systeme werden daher als Forschungsprojekte betrachtet, die den aktuellen Stand der Robotik repräsentieren und als positive Beispiele und Vorbilder in gewissen Teillösungen eines mobilen Systems gesehen werden können. Die Entwicklungen reichen von experimentellen Plattformen bis hin zu fertig konstruierten, teilweise sogar schon am Robotik-Markt erhältlichen Prototypen-Testsystemen. Die Grenzlinie zwischen kaufbaren Systemen im vorigen Kapitel und Projekten in Entwicklung hier wird in Hinblick auf die von Infineon gestellten Anforderungen gewählt.



Abbildung 2.7: Projekt Hobbit [TUW].

Hobbit

Im internationalen Forschungsprojekt Hobbit (siehe Abbildung 2.7) wurde ein Haushaltsroboter mit Arm zu einem Preis von 9000 Euro zum Ziel gesetzt. In der aktuell neuesten Version kommen Komponenten der Metralabs-Plattform und ein Roboterarm mit Seilzug zum Einsatz. Das geplante Einsatzgebiet von Hobbit ist, älteren und gebrechlichen Menschen im alltäglichen Leben zu Hause ein sicheres Gefühl zu ge-

ben, bei Aktionen wie dem Aufheben von Gegenständen vom Boden zu unterstützen und im Ernstfall schnell nötige Hilfe zu kontaktieren. Dabei wird großer Wert auf das Erreichen einer erfolgreichen, harmonischen, positiven Beziehung zwischen dem Menschen und Roboter durch eine sympathische, bedienerfreundliche, verständliche Benutzerschnittstelle gelegt. Die Ergebnisse dieser Studie verstärken den theoretischen Hintergrund zum Thema „Mutual Care“. Auf die auch hier wichtige Interaktion zwischen Mensch und Roboter wird in [Lam+14] eingegangen.

viEMA

Bei dem Forschungsprojekt viEMA (Vernetzte, informationsbasierte Einlern- und Ausführungsstrategien für autonome Montageabläufe) handelt es sich um ein skalierbares, roboter- und sensorgestütztes Montagekonzept. Eine mobile Einheit mit einem Roboterarm wird an einem Arbeitsplatz angedockt und kann dort bei hohen Stückzahlen den Menschen ersetzen. Auch wenn das System nicht kurzfristig sondern nur mittelfristig mobil ist bietet es Gemeinsamkeiten mit der Aufgabenstellung hier. Für Infineon ist das Projekt interessant, da am Handplatz nur geringe Veränderungen durchgeführt werden, was in diesem Fall dazu dient bei Stückzahlrückgang wieder einen Arbeiter mit der Aufgabe zu beschäftigen. Die viEMA-Zelle ist in Abbildung 2.8(a) zu sehen.



(a) viEMA-Zelle [FZib].



(b) MM-800 [Mayb].



(c) Care-O-bot [IPAA].

Abbildung 2.8: Mobile Handlingsysteme.

Neobotix MM-800

Der mobile Industrieroboter MM-800 der Neobotix GmbH ist ein Prototyp für den Transport von Autobatterien in einem großen deutschen Automobilkonzern. Die Kombination aus einer mobilen Plattform und einem darauf montierten Arm von Kuka

stellt sich bei einem Life-Test im Rahmen der Arbeit als vielversprechend heraus. Trotz den ausgedehnten Abmessungen von 1194 x 1074 x 887 Millimetern von alleine der Plattform und einem Gewicht von über einer Tonne kann das System aufgrund der verwendeten Navigationsalgorithmen mit Partikel- und Kalmanfilter sowie der verwendeten Sensorik als Vorbild für einen mobilen Manipulator bei Infineon herangezogen werden. Abbildung 2.8(b) zeigt das System.

Care-O-bot

Die Forschungsplattform Care-O-bot des Fraunhofer IPA-Instituts ist ein mobiler Haushalts-Serviceroboter. Beginnend mit dem ersten Care-O-bot 1998 wurde Wert auf die Verwendung von Industriekomponenten für eine Testplattform zur Lösung aktueller Problemstellungen in der Robotikforschung gelegt. Seit 2008 existiert die momentan aktuellste Version Care-O-bot 3 mit 3D-Umgebungserfassung in Echtzeit (siehe Abbildung 2.8(c)). Die Einbindung von Komponenten wie dem von Infineon verwendeten Leichtbauroboter LBR4+ von Kuka oder der hier favorisierten omnidirektionalen Plattform MPO-700 machen Lösungsansätze des Systems interessant für Infineon.



(a) LISA [IFF].



(b) FRIDA [ABB].



(c) Baxter [RR].

Abbildung 2.9: Innovative umgesetzte Handlingsysteme.

LISA

Im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ wird vom Forschungszentrum Karlsruhe der in Abbildung 2.9(a) gezeigte Assistenzroboter Lisa entwickelt. Das Projekt umfasst die Entwicklung und den Aufbau einer mobilen Plattform für Handlingsaufgaben unter Laborbedingungen im selben Arbeitsbereich mit

dem Menschen. Vom Robotersystem sollen Routineaufgaben, Transportaufgaben und die Bestückung der Stationen selbstständig ausgeführt werden. Vor allem der letzte Punkt hat starke Überschneidungen mit der Aufgabenstellung bei Infineon. Das System wird in Zusammenarbeit mit Partnern wie Jenoptik, Sympalog Voice Solutions und Schunk entwickelt. Ähnliche Zielsetzungen gibt es bei Infineon unter anderem in den Aufgabenstellungen Mapping, Lokalisierung, Pfadplanung und Hindernisvermeidung.

FRIDA von ABB

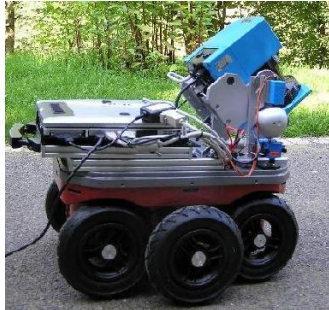
Abbildung 2.9(b) zeigt FRIDA. FRIDA steht für Friendly Robot for Industrial Dual Arm und ist ein von ABB entwickelter zweiarmiger Robotertorso. Zielanwendung ist laut dem Hersteller neue Herausforderungen im Zusammenfügen kleiner Teile zu meistern. Die Proportionen des Roboters sind denen eines menschlichen Oberkörpers mit zwei Armen mit je sieben Freiheitsgraden und dadurch kinematischer Redundanz nachempfunden. So kann sich Frida an existierende auf den Menschen zugeschnittene Arbeitsplätze anpassen und ähnlich wie ein menschlicher Mitarbeiter eingesetzt werden. Ziel des Designs ist, wie auch bei Infineon, eine reibungslose Mensch-Roboter-Kooperation. Sicherheit, einfache Inbetriebnahme und Flexibilität verbinden das Konzept ebenfalls mit der Aufgabenstellung dieser Arbeit.

Baxter

Versuche am System Baxter (siehe Abbildung 2.9(c)) von Rethink Robotics im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass dieses Robotersystem trotz des beeindruckend niedrigen Anschaffungspreises unter anderem aufgrund der geringen Präzision, der im Verhältnis zu anderen Systemen schwachen Getriebeteile und geringer erreichbarer Wiederholgenauigkeit und Präzision für die Aufgaben bei Infineon nicht geeignet ist. Auch die durch den prinzipiellen Aufbau des Systems schwer erreichbare Reinraumtauglichkeit lässt das ansonsten innovative System für diesen Anwendungsfall ausscheiden. Die getestete Feinfühligkeit der Roboterarme und somit mögliche Anwendbarkeit im selben Arbeitsraum mit dem Operator sorgt für eine Vorreiterrolle von Baxter. Bei der Umsetzung eines Systems für Infineon kann das hier Erreichte im Bereich Mensch-Maschine-Kooperation als Zielsetzung herangezogen werden. Rodney Brooks, der Unternehmensgründer von Rethink Robotics, zeigt im Gespräch Lösungswege der Handhabung auf, die auch hier evaluiert werden.

KURT3D

KURT 3D (siehe Abbildung 2.10(a)) ist ein Projekt der Universität Osnabrück, wo durch rotatorische Bewegung eines 2D-Lasersensors ein 3D-Laserscanner umgesetzt wird. Aus einer dreidimensionalen Punktwolke wird ein 3D-Modell der Umgebung



(a) KURT3D [UO].



(b) Rollin' Justin bei PHRIENDS [Bic].



(c) Saphari [Rom].

Abbildung 2.10: Beispielprojekte für mobile Systeme.

berechnet, aus dem durch einen 6D-SPLAM-Algorithmus (Simultaneous Planning, Localisation and Mapping) eine Karte erstellt wird. Für eine zukünftige automatische zweidimensionale Kartenerstellung aus 3D-Daten für ein mobiles System kann KURT 3D als Beispiel herangezogen werden.

PHRIENDS

Das von der EU unterstützte Projekt Phriends (Physical Human Robot Interaction: Dependability and Safety) beschäftigte sich in der Zeit von Oktober 2006 bis September 2009 mit der Interaktion zwischen Mensch und Maschine bei einem mobilen, zweiarmigen Roboter. Der Roboter ist in Abbildung 2.10(b) zu sehen. Die Roboterarme sind die auch bei Infineon verwendeten Leichtbauroboter. Das Gesamtkonzept nennt sich Rollin' Justin und wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt.

Saphari

Saphari (Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction) ist ein Projekt, das sich mit der Interaktion von Mensch und Roboter beispielsweise im Falle des Kuka Ibr beschäftigt. Untersucht wird hierbei der Roboter an für den Menschen optimierten Arbeitsplätzen in Zusammenarbeit mit Menschen für industrielle und professionelle Anwendungen. Im Unterschied zu anderen Projekten geht es hier nicht um Haushaltsroboter oder Unterstützung von älteren und gebrechlichen Personen. Unter Verwendung von bestehenden Robotersystemen wie Nao von Aldebaran oder Rollin' Justin des Robotik und Mechatronik Zentrums des DLR wird, wie in

Abbildung 2.10(c) zu sehen, unter anderem auf die Reihenfolge der Umsetzung von Sicherheit (Safety) als Grundvoraussetzung, Koexistenz (Coexistence) darauf aufbauend und dadurch erst möglicher Zusammenarbeit (Collaboration) zwischen Roboter und Mensch eingegangen.



Abbildung 2.11: Beispielprojekte für mobile Systeme.

HoLLiE

HoLLiE ist ein mobiler, zweiarmiger Serviceroboter, der am FZI Karlsruhe als Teil des „House of Living Labs“ (HoLL) entwickelt wurde. Bei einer Basisplattform von 800 x 800 Millimetern und einer Höhe von 1420 Millimetern erreicht der in Abbildung 2.11(a) dargestellte Roboter ein Gesamtgewicht von 160 Kilogramm. Für Infineon interessant ist die Verwendung einer omnidirektionalen Plattform, von zwei Schunk Powerball Leichtbauarmen mit je sechs Freiheitsgraden, zusätzliche Freiheitsgrade im Torso und die Positionierung der Lasersensoren an den Ecken des Vehikels.

Desire

Ein Ziel des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts Desire (Deutsche Servicerobotik Initiative) war die Schaffung eines alltagstauglichen mobilen Manipulators. Der betreffende Roboter ist in Abbildung 2.11(b) zu sehen. In dem bis 2009 laufenden Projekt sollten die Grundlagen für ein akzeptiertes, langfristig erfolgreiches Serienprodukt geschaffen werden. Vor allem dabei entwickelte Verfahren zur robusten Detektion und Identifizierung von Personen und Interaktionspartnern, sowie die sichere und schnelle Erkennung und Modellierung von Hindernissen in 3D ist für Infineon von Bedeutung.

Armar

Die Roboter mit einer Plattform mit Rädern und humanoidem Aufbau werden seit dem Jahr 2000 am KIT der Universität Karlsruhe konzipiert, umgesetzt und getestet. Abbildung 2.11(c) zeigt die Version Armar 3a. Von seinen insgesamt 43 Freiheitsgraden entfallen je sieben auf die beiden Arme mit kinematischer Redundanz. Mit Einsatz eines holonomen Fahrwerks und einem Oberkörper mit ähnlichen Größenverhältnissen wie denen des Menschen ist das System für Alltagsarbeiten im Haushalt zugeschnitten.



Abbildung 2.12: Little Helper in den Versionen 1, 2 und 3 (v.l.n.r.) [Aal].

Little Helper

Little Helper (Abbildung 2.12) ist ein mobiler Manipulator der Universität Aalborg der den Bedürfnissen bei Infineon im Vergleich mit den hier vorgestellten Systemen sehr nahe kommt. Auf einer verfahrbaren Basisstation ist ein Roboterarm montiert, wobei in den zwei aktuellsten Ausführungen die Wahl auf den Leichtbauroboter von Kuka fiel. Little Helper existiert in der momentan dritten Version. Version 1 diente als Technologiedemonstrator und Forschungsplattform. Little Helper 2 war Teil des ECHORD-Projektes GISA und konnte durch Vorzeigen geteached werden. Die dritte Version erfüllt komplizierte Handhabungs- und Assemblierungsaufgaben in der Industrie und wird zur Qualitätskontrolle eingesetzt.

Tapas

Tapas beschäftigt sich mit roboterbasierter Automation in der Logistik und Systemen für die veränderbare Fabrik der Zukunft. Auch hier handelt es sich um ein von der Europäischen Kommission unterstütztes Projekt. Projektpartner sind unter anderem Kuka und die Aalborg University. Es soll hierbei die klare Trennung zwischen flexibler Produktion mit Produktvariation und hohem Automatisierungsgrad aufgehoben werden, um hoch automatisiert und variabel zu produzieren. Unter anderem kommt hier auch der Little Helper 3 zum Einsatz.

SAMM

Der Stanford Assistant Mobile Manipulator (SAMM) ist ein Projekt der Universität Stanford aus dem Jahr 1995 für einen mobilen Manipulator mit runder Basisplattform. Als eines der ersten ernstzunehmenden Projekte im Gebiet frei verfahrbarer Aktoren dient das System zur Unterstützung des Menschen im selben Arbeitsraum. Ziel war es, dass mehrere Roboterassistenten bei der Bewegung und Positionierung von Objekten untereinander und mit Menschen kooperieren. Ein kooperierendes Paar dieser Manipulatoren unter Verwendung eines Puma-560-Arms ist in [Abbildung 2.13\(a\)](#) zu sehen.

UMan

Der mobile Manipulator UMan ist eine experimentelle Plattform der Universität Massachusetts Amherst mit einem Roboterarm auf einer frei verfahrbaren Basis, wie in [Abbildung 2.13\(b\)](#) dargestellt. Ziel war hierbei unter anderem die kollisionsfreie globale Bewegung des Arms und der Plattform. Die Mobilität erhält das System durch eine modifizierte Plattform des Typs XR4000 der Firma Nomadic. Nähere Informationen zu dem System finden sich in [\[Kat+06\]](#). Hier werden unter anderem die Entwicklung von Perzeptionsfähigkeiten und autonome mobile Manipulation beschrieben.

2 Vorhandene Systeme



(a) SAMM [Kha].



(b) UMan [Kat+06].

Abbildung 2.13: Projekte für mobile Manipulatoren an Universitäten.

3 Anforderungen und Umgebung

Nach der Darstellung vorhandener Systeme im vorherigen Kapitel soll nun auf Anforderungen an ein automatisiertes Beladesystem und umgebende Faktoren eingegangen werden. Schritte zur Umsetzung von Automatisierungslösungen werden durchleuchtet und die Akzeptanz der Mitarbeiter für Roboter, sicherheitstechnische Anforderungen, rechtliche Gegebenheiten, Normen und wirtschaftliche Aspekte beschrieben.

3.1 Anforderungen an ein Robotersystem

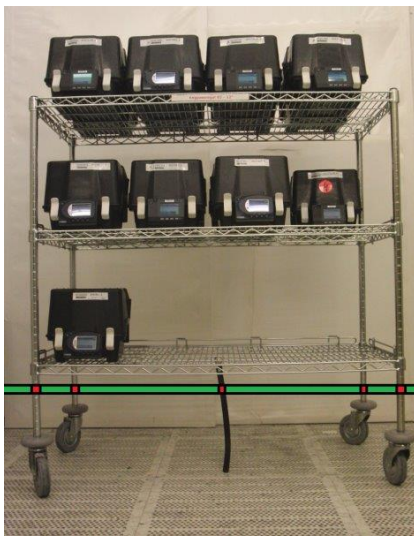
Die Anforderung an ein automatisiertes Beladesystem ist das Entnehmen einer Horde aus einer geöffneten Box in einem Boxennest und das korrekte Platzieren der Horde auf der Anlage sowie der Entladeprozess der Horde vom Loadport zurück in die Box im Boxennest. Auf diese Begriffe und umgebenden Anforderungen an einen mobilen Manipulator wird nun eingegangen.

3.1.1 Räumliche Gegebenheiten

Da Reinraumfläche teuer ist, sind die räumlichen Gegebenheiten in der Linie meist eher knapp bemessen. Die größte Herausforderung bei der Roboterperipherie ist meist akuter Platzmangel und damit verbundene Speziallösungen. Grund dafür ist neben dem hohen Preis pro Quadratmeter Reinraumfläche der historisch über Jahrzehnte gewachsene Aufbau der Produktionshallen. Die Untergrenze der Gangbreiten sind durch die gesetzlichen Vorschriften für Fluchtwege gegeben (siehe Kapitel 3.3.2 auf Seite 60 - Sicherheitstechnische Anforderungen und rechtliche Gegebenheiten). Von Vorteil vor allem für die Einbringung mobiler Roboter ist eine ebene Bodenfläche, die nur durch Lifte und Stiegen innerhalb und zwischen den einzelnen Hallen unterbrochen ist. Insgesamt handelt es sich bei der Reinraumfläche um die Hallen 13, 14, 15, 15A, 16 und 16A, wobei die Hallen mit höheren Zahlen moderner ausgestattet und leichter zu automatisieren sind. Die Produktionsfläche teilt sich in Reinraum und Grauzone bzw. Servicezone (siehe auch Kapitel 3.1.6 auf Seite 44 – Reinraumtauglichkeit).

Die Deckenhöhen in den Hallen betragen über die gesamte Reinraumfläche zwischen 2790 Millimeter in der am Übergang zwischen Halle 13 und Halle 14 und maximal 3600 Millimeter in Halle 16a. In neueren Hallen ist unter den Bodenplatten noch theoretisch verfügbarer Raum, der beispielsweise in Halle 16 weitere 160 Millimeter Platz aufweist. Die Gesamthöhe in der Weißzone erstreckt sich auf bis zu 6100 Millimeter. Die Reinraumhöhe wird jedoch an gewissen Stellen aus unterschiedlichsten Gründen wie Durchgängen oder an der Decke montierten Monitoren, Antennen oder Hinweistafeln gemindert. Der mobile Manipulator sollte daher trotzdem eine Höhe von 1800 Millimetern nicht übersteigen, um sich ohne Höheneinschränkungen im gesamten Reinraumgebiet bewegen zu können. Die Wegbreiten in den Reinraumgebieten, in denen ein mögliches mobiles Robotersystem operieren sollte, betragen mindestens 1,0 Meter. Ein umgesetzter mobiler Manipulator sollte sich auf Wegen dieser Breite problemlos fortbewegen können und bei einer Breite von 1,2 Meter wenden können. Die Seitenwände im Reinraum sind meist durch kleinere Maschinen oder Regale verstellt, sodass sich entlang der Gänge wie auch zwischen den Maschinen unregelmäßige Konturen anstatt geradliniger Korridore ergeben. Ein mobiler Manipulator sollte sich entlang dieser Konturen orientieren können. Außerdem gilt es die unterschiedliche seitliche Ausdehnung der Komponenten im Reinraum in unterschiedlichen Höhen vom Boden zu beachten. Vor allem das Detektieren von Transportwagen, fixen Regalen und Rollregalen ist aufgrund ihrer geringen Ausdehnung in gewissen horizontalen Ebenen bei der Navigation und Sicherheit speziell sicherzustellen. In Abbildung 3.1(a) sind bei einem Rollregal die sichtbaren Komponenten bei einem horizontalen Sensorschnitt in einer Höhe von 200 Millimetern in rot und als frei detektierte Bereiche in grün eingezeichnet. Das System sollte daher über in mehreren Abständen vom Boden detektierende Sensorik verfügen. Weitere Gründe dafür stellen an Wänden und Anlagenfronten vorstehende Teile wie ein an der Reinraumwand montierter Laptop dar. In Abbildung 3.1(b) ist zu sehen wie der mobile Scitos-Roboter von Metralabs aufgrund der verwendeten Infrarot-Sensorik in nur einer Ebene in einer anderen Höhe mit dem vorstehenden Laptop kollidiert ist und somit am Weiterfahren gehindert wurde. Vorkommnisse wie dieses sind bei einem mobilen Beladesystem zu unterbinden. Die Räumlichkeiten im Reinraum variieren durch kurz- mittel- und langfristige Veränderungen. Kurzfristige Veränderungen betreffen die alltäglichen Abläufe in der Linie zu denen unter anderem Bewegung der Menschen, Verschieben von Regalen und Transportwagen sowie andere mobile Systeme zählen. Mittelfristige Veränderungen betreffen Punkte wie das Hinzukommen von Engpassregalen vor übermäßig ausgelasteten Maschinen und für Wartungsarbeiten

an Maschinen notwendige Wartungsmatten, herumliegendes Werkzeug oder während Anlagenrangierungen veränderte Gegebenheiten um Platz für den Transport der Anlagen zu schaffen. Dabei entstehende mögliche Öffnungen im Boden, verstellte Gänge, veränderte Regalstellplätze oder auch kurzfristig ausgebaute Reinraumwände sollten beachtet werden. Zu langfristigen Veränderungen zählen bleibende Änderungen an der Anordnung der einzelnen Komponenten im Reinraum, die in ein zukünftiges System eingepflegt werden sollten oder automatisch erkannt werden.



(a) Rollregal mit sichtbaren Komponenten bei einem horizontalen Sensorschnitt in einer Höhe von 200 Millimetern in rot und als frei detektierten Bereichen in grün.



(b) Tatsächlich vorgekommene Kollision von Scitos mit einem an der Wand montierten Laptop wegen unterschiedlicher Höhe von Sensorik und Hindernis.

Abbildung 3.1: Räumliche Gegebenheiten und Kollisionsvermeidung.

3.1.2 Transportboxen, Horden, Scheiben

Aufgrund von äußerer Beschaffenheit, Form und Verschlussystem nicht automatisierungsfreundliche Transportboxen, sowie für manuelles Handhaben vorgesehene Horden stellen eine Herausforderung bei der Automatisierung dar. Zusätzlich erschweren die verschiedenen Wafergrößen von 4, 6, 8 und 12 Zoll und damit unterschiedlichen Transporthorden und Boxen den Automatisierungsvorgang. 4-Zoll-Wafer bilden einen verschwindend kleinen Anteil der Prozesse bei Infineon Villach und werden schrittweise mehr und mehr auf 6 Zoll umgestellt. Zukünftig ist auch eine Umstellung der

6 Zoll Prozesse auf 8 Zoll gewünscht. 12-Zoll-Lose werden durch den Aufbau der Foup-Loadports bei 12-Zoll-Maschinen von einem zukünftigen Transportsystem direkt beladen und benötigen kein Beladesystem zwischen Transportsystem und Anlage. Daher befasst sich die Abhandlung mit 8-Zoll-Wafern. In Abbildung 3.2(a) ist eine 8-Zoll-Box mit vorne montiertem DisTag (siehe Kapitel 3.2.1 auf Seite 54) zu sehen, Abbildung 3.2(b) zeigt die geöffnete Box mit der Horde darin und in Abbildung 3.2(c) ist die vom Robotersystem zu manipulierende Horde links neben der Box.

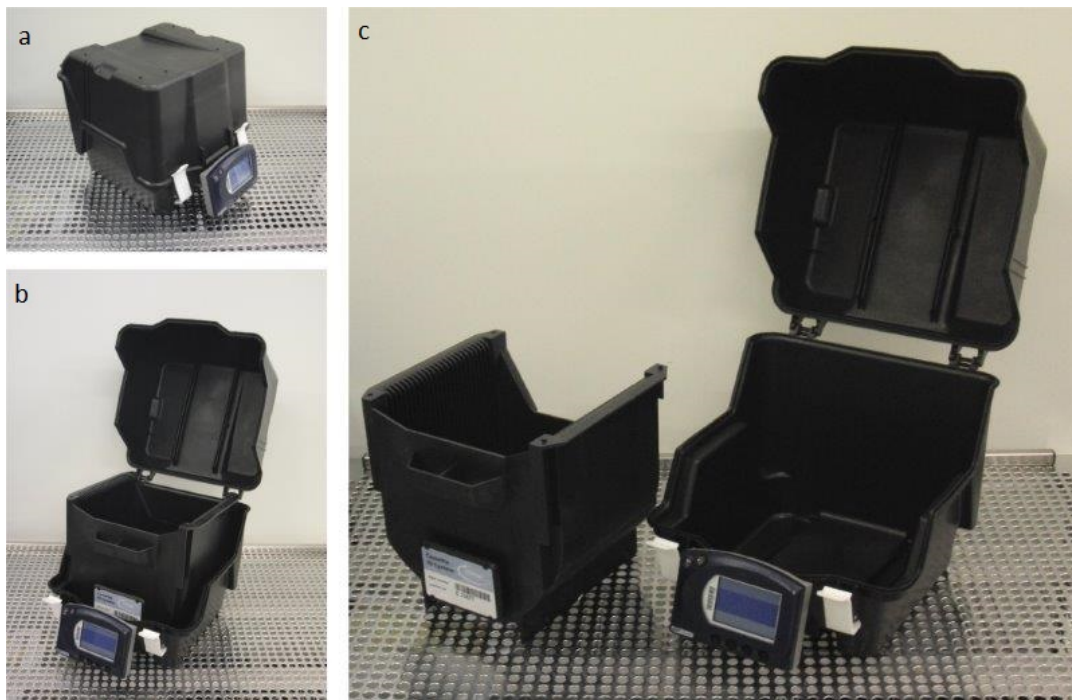


Abbildung 3.2: 8-Zoll-Box und Horde mit geschlossener Box (a), mit geöffneter Box (b), und mit entnommener Horde (c).

Zur Vollständigkeit finden sich in Abbildung 3.3 die Box und Horde für 4 Zoll und 6 Zoll mit einem DisTag zum Größenvergleich und ein Foup mit montiertem DisTag.

Ein Abwiegen einzelner Boxen, Horden, DisTags, Foups, Scheiben und Reticleboxen hat die folgenden in der Tabelle 3.1 verzeichneten Messwerte ergeben. Die für das Beladen der Maschine wichtigen Gewichte der Horden sind grau hinterlegt. Bei den Messwerten handelt es sich um Stichproben beziehungsweise Mittelwerte aus maximal fünf Stichproben. Daher kann es aufgrund von unterschiedlichen erfolgten Prozessen auf Scheiben und wegen Fertigungstoleranzen zu geringen Abweichungen kommen. Aus dem Gewichtsbereich einer Horde vom leeren Zustand bis zur vollen Horde mit

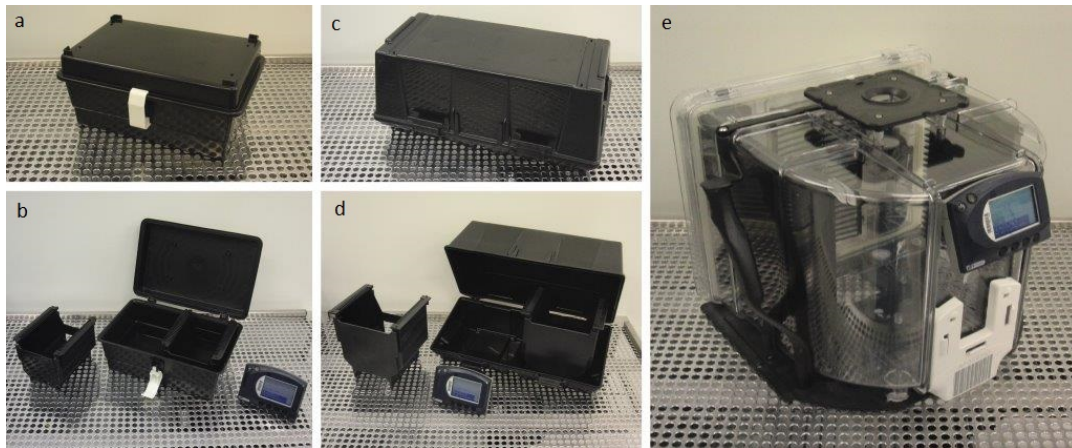


Abbildung 3.3: 4-Zoll-Box geschlossen (a) und geöffnet mit entnommener Horde und DisTag zum Größenvergleich (b), 6-Zoll-Box geschlossen (c) und geöffnet mit entnommener Horde und DisTag zum Größenvergleich(d) und ein 12-Zoll-Foup (e), wobei hier Box und Horde in einem Foup fix vereint sind.

Wafern mit Glasträgern zwischen 889 Gramm bis 3521 Gramm wird das mindestens handhabbare Gewicht des Roboterarms auf 3600 Gramm festgelegt. Hinzu kommt noch das Gewicht eines am Flansch des Roboterarms befestigten Greifers.

Eine 8-Zoll-Box hat grob die Abmessungen 270 x 270 x 250 Millimeter. Die 8-Zoll-Horde wird vom Operator am auf der Vorderseite befindlichen Hordengriff genommen. Auch für die maschinelle Handhabung kann dieser Griff verwendet werden. Weitere brauchbare Angriffspunkte für Greifer stellen die Konturen an der Kante zwischen vorderer und seitlicher Wand der Horde dar. Die Oberfläche der Horde ist wie die der Box aus reinraumtechnischen Gründen glatt. So wird die Box in Boxennestern beispielsweise mit einem Saugnapf mit Unterdruck geöffnet.

Typische Siliziumwafer in der Produktion bei Infineon haben eine Dicke von rund 350 Mikrometern. Dadurch bleibt eine für das Handling notwendige Stabilität erhalten. Schwieriger wird das Handling von sogenannten Dünnwafern, das eine generelle Hürde bei Automatisierungslösungen darstellt. Die auf unter 100 Mikrometer bis zu 40 Mikrometer Dicke heruntergeschliffenen Wafer brechen sehr leicht und sind anfällig für Waferbow, eine reversible Krümmung der gesamten Waferoberfläche. Vor allem das Handhaben von einzelnen Wafern (Single-Wafer-Handling) wird dadurch erschwert. Auch beim Bestücken der Anlagen mit Horden von je 25 Wafern sollten Dünnwafer, die weniger Erschütterungen standhalten, beachtet werden [Per09].

Tabelle 3.1: Durch Wiegen ermittelte Gewichtswerte von zukünftig durch ein Robotersystem handhabbaren Komponenten im Reinraum, wobei 8-Zoll-Horden als primär handzuhabende Komponenten fett gedruckt sind.

| Komponente | Gew. in g |
|---|-------------|
| 8"leere Horde | 889 |
| 8"Horde mit Glasträgern | 2136 |
| 8"Horde mit Wafern | 2245 |
| 8"Horde mit Dünnwafern | 1271 |
| 8"Horde mit Wafern (D-Sound) | 2154 |
| 8"Horde mit ungeschliffenen Wafern mit Glasträger | 3521 |
| 8"leere Box | 1032 |
| 8"leere Box mit Horde | 1919 |
| 8"leere Rückseitenbox | 1088 |
| 8"Box mit Horde und Glasträgern | 3202 |
| 8"Box mit Horde und Wafern mit Glasträgern (nicht geschliffen) | 4850 |
| 8"Box mit Horde und Wafern mit Glasträgern (geschl. 400 μm) | 4253 |
| 8"Box mit Horde und Wafern | 3481 |
| 8"Box mit Horde und Wafern (ohne DisTag) | 3177 |
| 8"Box mit Horde und Wafern (D-Sound) | 3313 |
| 8"Boxenclips | 9 |
| 8"Clips Rückseitenbox | 11 |
| 8"Dünnwafer (1 Stk) | 10 |
| 8"Reticle in Reticle-Box | 695 |
| 6"leere Box (für 2 Horden) | 896 |
| 6"leere Horde | 518 |
| 6"volle Box mit 2 Horden und Wafern | 3188 |
| 6"Horde mit Wafern | 1208 |
| 6"volle Doppel-Box mit 1 Horde und Wafern | 2286 |
| 6"volle Einfach-Box mit 1 Horde und Wafern | 1738 |
| 6"leere Einfachbox | 526 |
| 12"Foup leer | 5610 |
| 12"Rückseiten-Foup leer | 5050 |
| 12"Foup mit 1 Scheibe | 5908 |
| 12"Foup voll | 8712 |
| 12"Foup voll ohne DisTag | 8226 |
| DisTag neu (schwarz) | 234 |
| DisTag alt (blau) | 219 |

3.1.3 Anlagen

Bei den ungefähr 1330 Anlagen in der Produktion in Villach herrscht eine immense Typenvielfalt. Eine Vielzahl an unterschiedlichen Beladeschnittstellen, prozessierbaren Scheibendurchmessern und internen Softwareumsetzungen fordert universell einsetzbare Lösungen zur Beladung, die nicht speziell auf eine Maschine zugeschnitten sind.

Ein Robotersystem zur Beladung der Anlagen sollte auf die in der Halbleiterindustrie als Loadport bezeichneten Beladeschnittstellen angepasst sein. Ein Loadport an einer Anlage hat Arretierungspunkte durch die eine Horde bei manueller Beladung korrekt auf der Anlage platziert wird. Der Operator erkennt durch haptische Wahrnehmung, wenn sich die Horde durch eine einrastähnliche Rückmeldung an der korrekten Position befindet. Aufgabe des automatischen Beladesystems an der Anlage ist die exakte Positionierung der Horde am Loadport wie auch die Wiederaufnahme selbiger.



Abbildung 3.4: Beispielhafte Darstellung fünf unterschiedlicher Loadports; das obere Bild zeigt jeweils das leere Loadport und das untere Bild dasselbe Loadport mit einer mit Wafern gefüllten Horde beladen.

Um die Aufgabe beispielhaft darzustellen sind in Abbildung 3.4 fünf unterschiedliche Loadporttypen jeweils leer und mit darauf positionierter Horde gezeigt. Sie unterscheiden sich vor allem in Zugänglichkeit, Gestalt der Auflagefläche und Verschlussmechanismus. Die von einem Robotersystem zu erreichende Loadporthöhe der einzelnen Anlagen befindet sich bei typischen Anlagen zwischen 700 und 1250 Millimeter. Eine Untersuchung eines aussagekräftigen Teils der Loadports hat die relative Häufigkeitsverteilung in Abbildung 3.5 ergeben. Hierzu gilt zu sagen, dass die Ausrei-

ser unter 650 Millimetern und über 1250 Millimetern unter 0,5 Prozent liegen und so abgerundet wurden. Eine genauere Aufnahme der Loadportpositionen in Verbindung mit der Wahl eines passenden Roboterarms findet sich in Kapitel 4.3 auf Seite 72.

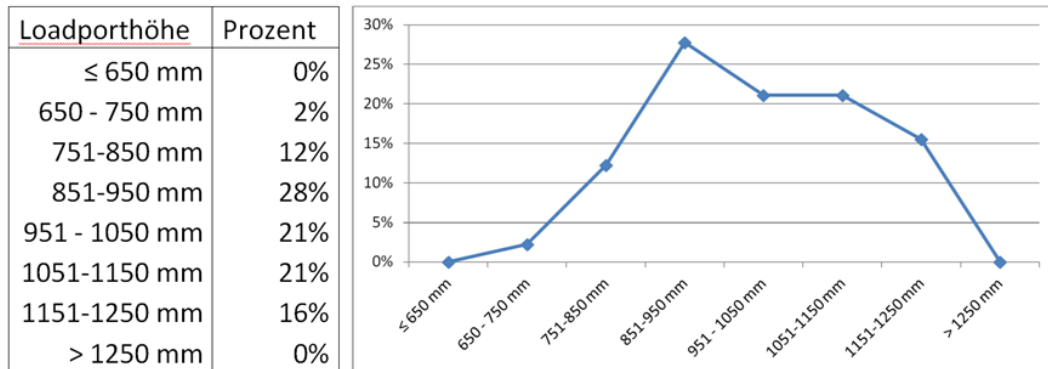


Abbildung 3.5: Relative Häufigkeitsverteilung der Loadporthöhen einer aussagekräftigen Auswahl an Loadports bei Infineon Villach.

Durch Alterung, Produktmixänderungen und Innovationen werden wie oben erwähnt alte Maschinen ausgeschieden und neue kommen hinzu. Eingesetzte Automatisierungslösungen sollten die Fähigkeit zur Anpassung an die veränderte Umgebung mitbringen und an neue Arten von Loadports adaptierbar sein.

Zu einem reibungslos ablaufenden Beladevorgang ist eine Kommunikation zwischen Robotersystem und Anlage nötig um während des Platzierens der Horde am Loadport gewisse Abläufe an der Anlage zu beeinflussen. Dazu zählen unter anderem das Sperren interner Roboterarme, seitlicher Verfahreinheiten, Lifte oder Dreheinheiten der Loadports sowie das Halten der Verschlussmechanismen in offener Position zur Vermeidung von möglichen Kollisionen.

3.1.4 Boxennester

Bei manueller Beladung der Anlagen wird das zuvor manuell angelieferte Los zu einem Tisch gebracht, die Box geöffnet, die Horde entnommen und diese dann am Loadport der Anlage platziert. Während des Prozessablaufes steht die leere Box auf einem dafür vorgesehenen Abstellplatz oder Regalplatz. Nach Prozessende wird die Horde entnommen, die Box geholt, die Horde in die Box gegeben und zum nächsten Prozess transportiert.

Bei automatisierter Beladung kommen aktuell Boxennester, auch Equipmentbuffer (EQB) genannt, zum Einsatz. In Abbildung 3.6(a) ist ein leerer EQB und in Abbil-



(a) Freier EQB.



(b) Besetzter EQB beim Öffnen einer Box.

Abbildung 3.6: Boxennester (= Equipmentbuffer, EQB) als Puffer zwischen Transport und automatisierter Beladung der Anlagen.

dung 3.6(b) ein EQB mit einer durch den Unterdruckhebel geöffneten Box gezeigt. Die Boxen werden in ein Boxennest gestellt und die Verschluss-Clips geöffnet. Der Boxendeckel bleibt jedoch verschlossen. Über RFID-Antennen erkennt das Boxennest das Los und gibt die Daten an das Leitsystem weiter. Sobald die Maschine mit diesem Los beladen wird, wird die Box im Boxennest mit einem Unterdruckarm geöffnet und das aktuell installierte iRobotics-System entnimmt die Horde zum Beladen. Hierbei gilt zwar nicht als verpflichtend, wird aber bevorzugt, wenn auch von einem zukünftigen Beladesystem die gleichen Greifer beziehungsweise Werkzeuge verwendet werden können wie vom aktuellen iRobotics-System. Die Boxen verbleiben nach dem Schließen während des Prozesses im Boxennest, werden nach Prozessende wieder geöffnet und die prozessierte Horde in der Box platziert. Nach dem Schließen der Box durch den Unterdruckarm werden vom Operator die Clips geschlossen und die Box zum nächsten Prozess transportiert. Ein neues Beladesystem sollte mit den vorhandenen EQBs kommunizieren können und Horden aus den vom EQB geöffneten Boxen entnehmen. Die Montagehöhe der aktuell installierten EQBs über dem Boden bewegt sich zwischen 600 und 760 Millimetern.

3.1.5 Genauigkeit und Toleranzen

Bei händischem Platzieren der Horde in der Box ist eine theoretische Ungenauigkeit von $\pm 5,0$ Millimetern möglich, da die Box so aufgebaut ist, dass die Horde automatisch in die richtige Position gleitet. Wird eine Horde von einem Roboter mit einem

Greifer gehandhabt ist zum problemlosen Ablauf eine höhere Präzision einzuhalten. Die Präzision betrifft primär die Genauigkeit mit der der Greifer zur Horde fährt und sie greift. Diese liegt bei den momentanen Greifersystemen bei einer Toleranz von $\pm 0,3-0,4$ Millimetern. Ein leicht ungenaues Greifen der Horde verschiebt diese um wenige Zehntel Millimeter, sodass sie nach Schließen des Greifers an der für den Greifer passenden Position steht. Beim maschinellen Abstellen der Horde in der Box wird durch den Aufbau der Box eine Toleranz nach links und rechts von maximal $\pm 1,0$ Millimetern akzeptiert. Bei einem mobilen Beladesystem ist beim Aufnehmen und Abstellen der Horde auf Loadport und Equipmentbuffer keinerlei Ungenauigkeit, die zu der bei händischem Platzieren auftretenden oben beschriebenen Art von Hineingleiten führt, erwünscht. Zur optimalen Handhabung der empfindlichen Wafer ist ein korrektes Positionieren mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,3$ Millimetern erforderlich.

3.1.6 Reinraumtauglichkeit

Die Halbleiterproduktion findet bei Infineon in Reinräumen, oft auch als Reinsträume bezeichnet, statt. Bei der Herstellung von Produkten mit immer kleiner werdenden Strukturgrößen ist es Ziel der Reinräume, Verunreinigungen von den Produkten fernzuhalten. Der Vergleich mit einem Menschenhaar von 40 bis 60 Mikrometer Dicke und der kleinsten mit bloßem Auge erkennbaren Größe von 10 bis 20 Mikrometer zeigt, dass die derzeit kleinsten Strukturen auf Wafern in Villach von weniger als 0,3 Mikrometern besonderen Schutz vor Verunreinigungen benötigen. Wird die Anzahl der Partikel der Größen 0,1 bis 5,0 Mikrometer pro Kubikfuß (entspricht ca. 30,5 x 30,5 x 30,5 cm) gemessen, erhält man bei reiner Gebirgsluft 100.000 Partikel pro Kubikfuß und in einem hochsterilen Operationssaal 20.000 Partikel pro Kubikfuß. Im Handlingsbereich der Scheibenfertigung befinden sich 1 bis 100 Partikel pro Kubikfuß. In der Tabelle 3.2 sind die genormten Luftreinheitsklassen laut dem bei Infineon üblichen U.S. Federal Standard 209E zu sehen. In der Industrie ist seit November 2001 die Norm DIN EN ISO 14644-1 laut Tabelle 3.3 üblich, in der die Partikelzahlenkonzentration pro Kubikmeter definiert werden. Zur leichteren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Standards mit unterschiedlichen Werten, bezogen auf unterschiedliche Luftvolumina, wird hier eine Vergleichstabelle erstellt. Um bei Gesprächen mit Auftraggebern, Partnern und Kunden von komparablen Werten auszugehen, wurden die Werte des U.S. Federal Standard 209E hier auf Kubikmeter bezogen und mit den ISO-Klassengrenzen in Tabelle 3.4 verglichen. Hierbei entsteht eine nahezu deviat-

Tabelle 3.2: Reinraumklassen nach dem bei Infineon aktuell üblichen **U. S. Federal Standard 209E**; Partikelzahlkonzentration $1/\text{ft}^3$ (pro Kubikfuß = ca. 30,5 x 30,5 x 30,5 cm).

| RR-Klasse | Klassengrenzen | | | | | |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0,1 μm | 0,2 μm | 0,3 μm | 0,5 μm | 1,0 μm | 5,0 μm |
| 1 | 35 | 7,5 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 350 | 75 | 30 | 10 | 2 | 0 |
| 100 | - | 750 | 300 | 100 | 20 | 0 |
| 1000 | - | - | - | 1.000 | 200 | 7 |
| 10000 | - | - | - | 10.000 | 2.000 | 70 |

onsfreie Gegenüberstellung. Neben der primären Einordnung der Partikel nach ihrer Größe werden diese auch nach Form, chemischer Zusammensetzung und nach ihren elektrischen und optischen Merkmalen unterschieden.

In Halle 13 im Scheibenprüffeld und in einem Teil der Halle 14 herrscht ein turbulenter Reinraum, wo die an der Reinraumdecke zugeführte Luft sich im Reinraum ohne weiter vorgegebene Richtung verteilt und die partikelreichere Luft durch dafür vorgesehene Öffnungen in den Wänden in Bodennähe den Reinraum wieder verlässt. Ein Teil der Halle 14 und die Produktionshallen 15 und 16 sind als laminarer Reinraum ausgeführt, wo die gereinigte Luft von Deckenfiltern geradlinig durch den Reinraum und den Boden mit vielen kleinen Öffnungen strömt. In Halle 16 beispielsweise findet bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 bis 0,5 Meter pro Sekunde 420 Mal pro Stunde ein Luftwechsel statt. Für ein mobiles Robotersystem gilt zu beachten, dass die Oberfläche durch die Art des Designs verwirbelungsarm gestaltet ist um Luftverwirbelungen und damit unerwünschte Partikelbewegungen im Reinraum zu verhindern.

Auch ein Überdruck gegenüber der Servicezone beziehungsweise Grauzone außerhalb des Reinraums von zwei Pascal, eine festgelegte Temperatur von 22 Grad Celsius mit einer meist maximalen Abweichung von ± 1 Grad Celsius und eine Luftfeuchte von 42 Prozent ± 5 Prozent ist im Reinraum gegeben. Viele Maschinen befinden sich zum Großteil in der kostengünstigeren Servicezone und nur Loadport und Maschineninneres erfüllen die Reinraumklasse.

Zu den vier größten Partikelquellen zählen die Umgebungsluft, der Mensch, Grundstoffe und das Equipment. Die zum Equipment zählenden Robotersysteme haben somit ein Pflichtenheft zu erfüllen, um für den Reinraum zugelassen zu werden. Ro-

Tabelle 3.3: Reinraumklassen nach **DIN EN ISO 14644-1** mit Partikelzahlkonzentration $1/\text{m}^3$ (pro Kubikmeter = 100 x 100 x 100 cm).

| RR-Klasse | Klassengrenzen | | | | | |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0,1 μm | 0,2 μm | 0,3 μm | 0,5 μm | 1,0 μm | 5,0 μm |
| ISO 1 | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ISO 2 | 100 | 24 | 10 | 4 | 0 | 0 |
| ISO 3 | 1.000 | 237 | 102 | 35 | 8 | 0 |
| ISO 4 | 10.000 | 2.370 | 1.020 | 352 | 83 | 0 |
| ISO 5 | 100.000 | 23.700 | 10.200 | 3.520 | 832 | 29 |
| ISO 6 | 1.000.000 | 237.000 | 102.000 | 35.200 | 8.320 | 293 |
| ISO 7 | - | - | - | 352.000 | 83.200 | 2.930 |
| ISO 8 | - | - | - | 3.520.000 | 832.000 | 29.300 |
| ISO 9 | - | - | - | 35.200.000 | 8.320.000 | 293.000 |

Tabelle 3.4: Reinraumklassen nach **U. S. Federal Standard 209E** umgerechnet auf Partikelzahlkonzentration $1/\text{m}^3$ (pro Kubikmeter = 100 x 100 x 100 cm) und ähnliche Klasse nach **DIN EN ISO 14644-1** dazugestellt.

| RR-Klasse | | Klassengrenzen | | | | | |
|-----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 209 | ISO (ca) | 0,1 μm | 0,2 μm | 0,3 μm | 0,5 μm | 1,0 μm | 5,0 μm |
| 1 | ISO 3 | 1.236 | 265 | 106 | 35 | 0 | 0 |
| 10 | ISO 4 | 12.360 | 2.649 | 1.059 | 353 | 71 | 0 |
| 100 | ISO 5 | - | 26.486 | 10.594 | 3.531 | 706 | 0 |
| 1000 | ISO 6 | - | - | - | 35.315 | 7.063 | 247 |
| 10000 | ISO 7 | - | - | - | 353.147 | 70.629 | 2.472 |

boter dürfen beispielsweise keinen Abrieb erzeugen. Der Leichtbauroboter von Kuka erzeugte bei jeder Bewegung eine nicht reinraumtaugliche Anzahl an Partikeln. Eine Lösungsmöglichkeit waren Schläuche im Roboter die Unterdruck erzeugen. Als entgültige Lösung wurde der Roboter auf einen speziellen Sockel gestellt, die Bodenplatte entfernt und stattdessen ein Ventilator am unteren Ende des Roboters eingebaut, der aus dem gesamten Roboter die Partikel absaugt und dadurch Unterdruck erzeugt. So wird der Austritt von Abrieb aus dem Roboter verhindert. Ein Druckdifferenzsensor überprüft die Funktionalität des Aufbaus. Außerdem darf der Roboter nicht über eine mit Scheiben gefüllte Horde greifen, da so Partikel zu den Scheiben gelangen können und der Laminarstrom gestört wird. Dadurch entsteht ein höheres Verunreinigungspotenzial der Scheiben.

Bei der Einbringung einer neuen Anlage in den Reinraum ist diese innen mit einer Folie verpackt. Um Feuchtigkeitsrückstände zu verhindern kommt darüber ein Trockenmittel. Darüber wird die Maschine mit einer Aluminiumfolie verschweißt und in einer Holzkiste angeliefert. Direkt vor dem Reinraumzugang wird die äußere Folie entfernt, sofort nach dem Eingang folgt die innere.

Ein bei Infineon im Reinraum zukünftig eingebrachtes System hat die Reinraumklasse 1-10 zu erfüllen. Die Reinraumabnahme erfolgt bei Infineon durch Experten der Firma Infineon. Zur Kontrolle der Reinraumtauglichkeit werden anfangs und danach monatlich VPD-Analysen (vapour phase decomposition) durchgeführt. Hierbei werden vorwiegend metallische Verunreinigungen am Wafer festgestellt. Eine Lokalisierung der Partikel wird durch eine TXRF-Analyse (Totalreflexionsröntgenfluoreszenzanalyse) möglich. Dadurch wird sichtbar, ob die Kontamination beispielsweise von einem Handler oder einem Chuck herrührt. Bei einer festgestellten Kontamination wird zuerst die Anlage gereinigt. Bringt das nicht die gewünschte Verbesserung, werden die Materialien kontrolliert. Löst sich beispielsweise bei beschichteten Anlagen die Beschichtung und kommt darunter das Metall zum Vorschein, entstehen Kontaminationsprobleme. Allgemein werden Partikelemissionen durch die Verwendung gewisser Materialien oder hochwertigeren beweglichen Teilen gering gehalten. Grenzwerte für die erlaubte Metallkontamination bei Infineon werden vor allem bei Al, Ca, Fe, Cu, Na, Ni festgelegt.

Vertiefende Informationen zu Infineon-spezifischen Reinraumbestimmungen finden sich in den anlagenbezogenen „Acceptance Criteria“-Dokumenten während weiteres allgemeines reinraumtechnisches Wissen in [GG12] zu finden ist. Know-how zur Umsetzung praxisbezogener Projekte im Reinraum steht in [GG09].

3.1.7 Schnittstellen zu anderen Systemen

Zur Vollautomatisierung der Fabrik ist ein Transportsystem notwendig. Dieses bringt die Wafer von Prozess zu Prozess. Auf einem solchen System können beispielsweise Boxennester mit je zwei Boxen, Boxen alleine oder nur die offenen Horden befördert werden. Durch eine darauf angepasste Umsetzung eines Lifts werden die Scheiben auf eine Höhe gebracht, von der aus das Robotersystem darauf zugreifen kann. Als Richtwert wird hier die Höhe der aktuell verbauten Boxennester angenommen. Unabhängig von der Art der Realisierung des Transportsystems hat das Robotersystem die Aufgabe, die Horde aus dem EQB bei einer Höhe von 600 bis 760 Millimetern über dem Boden aufzunehmen und am Loadport der Anlage zu platzieren. Sollten die Boxen transportiert werden, ist zu beachten, dass während des Transports die Boxenverschluss-Clips geöffnet sind oder eine geeignete Lösung zum Öffnen der Clips beim Boxennest implementiert wird. Wegen der Möglichkeit der zukünftigen Installation eines Überkopftransportsystems ist die maximale Höhe des mobilen Systems wie später in Kapitel 3.1.12 ab Seite 51 bestimmt auf 1800 Millimeter zu beschränken. Weitere Schnittstellen für ein mobiles Beladesystem können auch Operatoren, Umhorder oder Stocker, welche eine Form von Waferlagern bilden, sein.

3.1.8 Standardisierung

Allgemein hat für viele erfolgreiche Unternehmen mit mehreren Standorten eine fabriksübergreifende Standardisierung hohe Bedeutung. Die Umsetzung ist bei den einzelnen Untergruppen in der Fertigung oft ungeliebt, da maßgeschneiderte Speziallösungen bereits vorhanden sind und im Kleinen als die bessere Variante erscheinen. Wird jedoch ein Unternehmen als Ganzes betrachtet, werden die Vorteile der Angleichung der Abläufe und Maschinen sichtbar. Bessere Wartbarkeit, niedrigere Einkaufspreise durch größere Stückzahlen, Einsetzbarkeit des Know How der Mitarbeiter einer Abteilung oder eines Standortes auch in anderen Abteilungen und Standorten und dergleichen bewegen auch in der Halbleiterproduktion zu Standardisierung. Eine Vereinheitlichung der Prozesse im Reinraum wird auch von Kunden im Rahmen der japanischen Management-Philosophie 5S gewünscht und bei Audits inspiziert. Das Robotersystem sollte universell bei 8-Zoll-Maschinen einsetzbar sein und keinerlei anlagen- oder prozessspezifische Komponenten beinhalten, die nicht auf andere Anlagen übertragbar sind.

3.1.9 Geschwindigkeit

Bei der Betrachtung der Geschwindigkeit sind zwei verschiedene Sichtweisen zu betrachten. Einerseits muss das Robotersystem die Anlagen ausreichend schnell beladen können um nie zum Bottleneck im Gesamtprozess zu werden. Dementsprechend ist die Anzahl der verwendeten Robotereinheiten pro Bereich zu dimensionieren. Aus dieser Betrachtungsweise ist das System umso besser, je schneller die Bewegungsabläufe vollzogen werden und je rascher die Anlage be- und entladen wird. Andererseits werden die Scheiben und der umgebende laminare Luftstrom umso weniger beeinträchtigt, je langsamer das System arbeitet. So kommt es zu weniger Aufwirbelungen von Partikeln. Aus diesen zwei Randbedingungen ergibt sich eine empfehlenswerte maximale Transportgeschwindigkeit der Horde von 0,25 Meter pro Sekunde. Beschleunigen und Abbremsen der Horde beziehungsweise des gesamten Robotersystems soll nicht abrupt, sondern einer Rampenfunktion folgend geschehen. Nahe dem Aufnehmen und Abstellen der Horde bei Boxennest und Loadport ist die Geschwindigkeit zu verringern.

3.1.10 Vibrationen

Beim Transport von Wafern sind leichte Vibrationen aufgrund von Bodenunebenheiten unvermeidbar. Vom Robotersystem selbst verursachte Erschütterungen, Stöße oder Zitterbewegungen sind durch den anwendungsgerechten Aufbau von Rädern, Lagern, Antrieben und anderen mechanischen Komponenten zu unterbinden. Das typische beim Wafertransport auftretende Klimpern und Klappern ist unzutraglich. Dies gilt auch für den Fehlerfall, wo zusätzliches Rucken durch Neustarten eines Programmteils nicht zulässig ist. Vibrationsarmes Waferhandling stellt speziell bei Dünnwafern besondere Herausforderungen an ein Automatisierungssystem. Es ist eines der Ziele im EU-Projekt EPPL WP4 von Infineon Technologies. Daher sollten die vom Robotersystem verursachten Stoß- und Schwingungsbelastungen an der Horde 1,5 g nicht überschreiten.

3.1.11 Leitsystem

Ein Robotersystem in einer Halbleiterfabrik ist unabhängig vom Autonomitätsgrad über Softwareschnittstellen mit einem Leitsystem verbunden. Auch bei Infineon dient ein sogenanntes Manufacturing Execution System (MES) als übergeordnete Steuerungsebene. Das softwaretechnische Herz des Manufacturing Execution System (MES)

in der Produktion bei Infineon Villach stellt der Workstream dar. In dieser hierarchischen Datenbank sind die gesamten Maschinen, Lose, Arbeitspläne und Operationen abgebildet. Auf den Workstream direkt wird immer seltener zugegriffen. Mitarbeiter, die schon länger in der Produktion tätig sind, tendieren eher dazu die früher öfter aufgerufene Workstream-Oberfläche zu verwenden. Der Workstream hängt wie weitere Systeme des MES auf einem Tibco-Message-Bus der Firma Tibco in Kalifornien (USA). Anwendungen können sich zu gewissen ausgegebenen Events subscriben oder gezielt Informationen abfragen. Unter anderem zum MES gehören Systemkomponenten zur Erzeugung von Jobs auf Anlagen, zur Bestimmung des Weges zum nächsten Arbeitsschritt, zur Durchflussoptimierung, zur Bestimmung der Losabarbeitungsreihenfolge und für Rezeptvorgaben zur Einstellung von Zeiten oder Temperaturen bei Prozessen. Eine grafische Benutzeroberfläche für den Operator, in der die wichtigsten Systemkomponenten des MES abgebildet sind, erleichtert die manuelle Bedienung und bietet eine übersichtliche Arbeitssoftware für den täglichen Betrieb in der Linie. Diese Oberfläche wird als FabCockpit bezeichnet. Das Verbindungsglied vom Leitsystem zu im Reinraum befindlichen Anlagen, Robotern, Boxennestern und dergleichen stellen Kopplungsapplikationen auf Rechnern in der Linie dar. Sie sind über die in der Halbleiterindustrie verbreitete SECS-Schnittstelle (SEMI Equipment Communication Standard) verbunden. Abbildung 3.7 zeigt unter anderem diesen Zusammenhang.

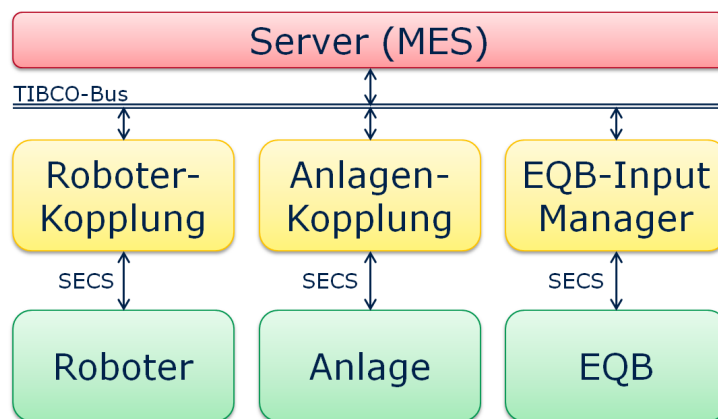


Abbildung 3.7: Schematischer Überblick über die Verbindung zwischen Leitsystem (MES) über Kopplung beziehungsweise Inputmanager zu den Komponenten im Reinraum.

3.1.12 Anforderungsübersicht

In Tabelle 3.5 finden sich die klar in Zahlen formulierten Anforderungen an einen mobilen Manipulator zusammengefasst. Der Inhalt der Spalte "Betroffenen Komponente des mobilen Beladesystems" findet sich jeweils in Abbildung 4.2 auf Seite 68 und im gleichnamigen Kapitel wieder.

Tabelle 3.5: Anforderungsübersicht.

| | <i>Limitierende Umgebung</i> | <i>Betroffene Komponente des mobilen Beladesystems</i> | <i>Anforderung</i> |
|--------------------------------|--|--|---|
| Räumliche Gegebenheiten | Unregelmäßige Konturen, Wände | Navigation | mögliche Erkennung und Verarbeitung |
| | Regale und Tische mit dünnen Beinen; vorstehende Komponenten | Navigation | Großflächige Hinderniserkennung in mehreren horizontalen Ebenen |
| | Veränderungen der Umgebung | Navigation | geringe Abänderungen im Reinraum |
| | Wegbreite | Shuttle (Breite) | max. 600 mm |
| | | Shuttle (Wendekreis) | max. 1200 mm |
| Reinraumhöhe | Shuttle und Gesamtsystem (Höhe) | max. 1800 mm | |
| Boxen und Horden | Gewicht Horde | Arm und Greifer (Traglast Roboterarm ohne Greifer) | mind. 3600 g |

Fortsetzung nächste Seite ...

3 Anforderungen und Umgebung

... Fortsetzung

| | <i>Limitierende Umgebung</i> | <i>Betroffene Komponente des mobilen Beladesystems</i> | <i>Anforderung</i> |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|
| Anlagen | Loadporthöhe | Shuttle, Arm und Greifer (Wirkbereich – Höhe) | 600 mm – 1350 mm |
| | Kommunikation Robotersystem – Anlage | Software (Schnittstelle zur Anlage) | geringe Abänderungen im Reinraum |
| Boxennester (EQBs) | Entnahme der Horde | Arm und Greifer | vorhandene Greifer verwendbar |
| | Boxennesthöhe | Shuttle, Arm und Greifer (Wirkbereich – Höhe) | 600 mm – 760 mm |
| | Kommunikation Robotersystem – EQB | Software (Schnittstelle zum EQB) | kabellos |
| Genauigkeit | Präzision beim Be- und Entladen | Präzision (Wiederholgenauigkeit) | 0,3 mm |
| Reinraumtauglichkeit | Reinraum | Reinraumtauglichkeit (Materialientauglichkeit für Reinraumklasse) | 1-10 |
| | Laminarer Luftstrom | Design, Reinraumtauglichkeit | verwirbelungsarm |
| Transportsystem | siehe Reinraumhöhe und Boxennesthöhe | | |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung

| | <i>Limitierende Umgebung</i> | <i>Betroffene Komponente des mobilen Beladesystems</i> | <i>Anforderung</i> |
|-------------------------|---|--|---------------------------------------|
| Standardisierung | Universelle Einsetzbarkeit bei 8-Zoll-Anlagen | Komponenten | nicht anlagen- oder prozessspezifisch |
| Geschwindigkeit | Produktschutz | Arm und Greifer (Roboterarmgeschwindigkeit mit Horde) | max. 0,25 m/s |
| | | Arm und Greifer (Roboterarmgeschwindigkeit ohne Horde) | max. 0,50 m/s |
| | | Arm und Greifer (Beschleunigung) | über Rampenfunktion |
| | | Arm und Greifer (Geschwindigkeitsverringerung) | nahe LP und EQB |
| Vibrationen | Produktschutz | Arm und Greifer (Stoß- und Schwingungsbelastungen) | $\leq 1,5$ g |
| Leitsystem | vorhandene Systeme | Software (Schnittstellen zum Leitsystem) | kabellos |

3.2 Schritte zur Umsetzung von Automatisierungslösungen

Um ganze Prozesse in einer teilweise manuellen Produktion zu automatisieren, genügt es nicht einen Roboter anzuschaffen und zu programmieren. Der gesamte Prozess muss an die neue Situation angepasst werden. Nachstehend werden wichtige Veränderungen

gen zur Umsetzung eines automatischen Ablaufes der Beladung und Entladung von Maschinen, sogenannte Enabler, diskutiert.

Maschinelle Kommunikation und Eingriff während des Prozesses Der Gesamtprozess muss maschinenverarbeitbar werden. Bei einem Ofen beispielsweise sollte das Boot nachdem es vor die Röhre gestellt wurde hineingefahren werden und die Maschine starten. Eine Kommunikation zwischen dem Roboter und dem Ofen sollte möglich sein. Allgemein sollten Maschinen Kommandos von außen verstehen und selbst Meldungen geben, wenn sie beispielsweise einen Prozessschritt abgeschlossen haben. Bei manchen älteren Maschinen stellt das eine schwer überwindbare Hürde dar, weil Firmen teilweise die Serviceunterstützung für gewisse Maschinen nach einer bestimmten Zeit nicht mehr zur Verfügung stellen. Gewisse P5000 Anlagen sind schon über 30 Jahre alt und die Rechner wegen speziellen Taktungen nicht durch neue zu ersetzen.

Bei dem iRobotics-System wird die Schnittstelle zur automatischen Kommunikation mit der Anlage durch den E23-Standard von SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International). Nähere Informationen dazu finden sich in Kapitel 5.9 auf Seite 128 (Software).

3.2.1 Paperless – eindeutige Zuordnung und Benennung der Boxen und Horden

Jedes Los hat ein Protokoll, in dem jeder zu durchlaufende Prozessschritt mit Operationsnummer, EPA-Nummer und Beschreibung des Prozesses eingetragen ist. Zu einer Operation gehören meist mehrere Unteroperationen, sogenannte EPAs, im Alltag oft auch als Rezept bezeichnet. Die ausgedruckte Version des Protokolls, Laufzettel genannt, wird auf der Box während der gesamten Produktionszeit mittransportiert und der Operator an der jeweiligen Maschine trägt Maschinenname, Datum, Scheibenanzahl und Unterschrift im Protokoll ein. Bei diesem Ablauf ist eine Automatisierung nicht möglich. Daher wurde 2000 ein Projekt für ein Indoor Positioning System (IPS) gestartet und 2002 in Versuchen ein Transponder an der Box befestigt um „paperless“, also ohne ausgedrucktes Protokoll operieren zu können. In Abbildung 3.8 ist die Funktion dieses LotTrack-Systems schematisch dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein sogenanntes DisTag (Display and Transponder Tags), das auf jeder Waferbox montiert ist, auf einem kleinen Bildschirm einen Ausschnitt des Protokolls anzeigt (Assist) und zur vollautomatischen Lokalisierung der Box innerhalb der mit Antennen ausgestatteten Reinräume verwendet werden kann (Locate). In Villach kommuniziert dieses BTS (Box Tracking System) über einen BTS-Server, der Signale über die Antennen

aussendet und über Funk auf der in Österreich freien Frequenz 868 MHz Antwort von dem jeweiligen DisTag bekommt. Die Koordinaten der Box können mit einer Genauigkeit von ± 30 cm bestimmt und im Userinterface FabViewer visualisiert und im FabCockpit angezeigt werden. Diese Systeme bekommen ihre Informationen vom MES (Manufacturing Execution System), welches die Informationen von der LotTrack Control Suite bekommt. Der NDS (Next Destination Server) berechnet den Weg zur nächsten verfügbaren Anlage [Dow05].

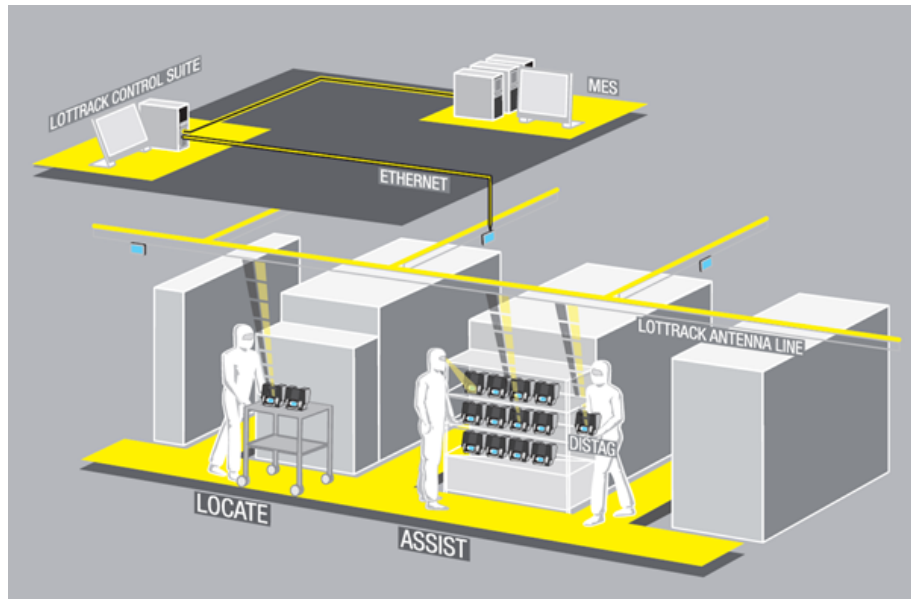


Abbildung 3.8: Lottrack-System stellt Informationen zum Los an der Box zur Verfügung (Assist) und dient zur vollautomatischen Lokalisierung der Box im Reinraum (Locate) [Int07].

In den Boxen befinden sich Horden, in denen die Wafer transportiert werden. Bei jedem Prozess wird die Horde aus der Box entnommen und auf ein dafür vorgesehenes Load-Port auf der Maschine gestellt. Über einen passiven Transponder auf der Horde mit einer zugewiesenen Horden-ID wird diese über eine am Load-Port montierte Antenne erkannt und die Maschine kennt so den zu prozessierenden Arbeitsschritt.

Zum momentanen Zeitpunkt sind nicht alle 8-Zoll-Lose mit diesem System ausgerüstet. Die 12-Zoll-Lose sind durchgehend mit DisTags ausgerüstet und der Foup kann nicht in Box und Horde getrennt werden, wodurch die Horden-ID nicht notwendig ist. Bei 6 Zoll gibt es bis auf seltene Versuche weder DisTag noch Horden-ID. Für eine automatische Beladung der Maschinen ist ein sogenannter Paperless-Prozess notwendig. Eine flächendeckende Umsetzung des BTS im Bereich der automatisierten

Prozesse ist unumgänglich.

Vor allem bei Losen, die nicht die allgemeinen in der Linie üblichen Prozesse durchlaufen fehlen zum aktuellen Zeitpunkt noch DisTags. Dazu zählen Scheiben, auf denen neue Produkte in der Entwicklungsphase getestet werden, die aber an denselben Anlagen wie sogenannte produktive Lose prozessiert werden. Sie werden als Entwicklungslose bezeichnet und oft für unterschiedliche Versuche an einzelnen Stellen in mehrere Lose aufgeteilt. Solche Splitlose, die nicht der Norm in der Linie entsprechen, sollten in Zukunft mit einem Experiment Management System verarbeitet werden. Auch Scheiben zur Anlagenkontrolle (Anko-Wafer), Scheiben zur Defektdichtemessung (DD-Wafer) und Scheiben zum Besetzen unbesetzter Randplätze bei Ofenprozessen (Füll-Wafer) werden bis auf sehr seltene Ausnahmen in Boxen ohne DisTag transportiert. Für eine Vollautomatisierung sollte jedes Los erkennbar sein. Das kann durch ein DisTag, aber theoretisch auch durch eine andere Erkennungsmethode sichergestellt werden. Aus Standardisierungsgründen (siehe Kapitel 3.1.8 auf Seite 48) ist ein DisTag empfehlenswert.

3.2.2 Load-and-go

Zur Umsetzung einer vollständigen Automatisierung einer Anlage muss diese mit einer Antenne zur Erkennung der Horden-ID ausgestattet sein und der Prozess selbst muss ohne menschliches Einwirken starten können. Diese Fähigkeit wird oft als Equipment Integration bezeichnet. Unter dem Begriff Load-and-go versteht man den automatischen Prozessstart nach Positionieren der Horde beziehungsweise des Foups ohne weitere Einstellungen, Eingaben oder manuelles Drücken von Knöpfen wie „Start“ oder „ok“. Es wurde die Einteilung Load-and-Go, Load-and-Start, Drag-and-Drop und nicht automatisierbar getroffen. Load-and-Start bedeutet, dass der Operator nach dem Beladen der Anlage noch etwas einstellen oder bestätigen muss. Drag-and-Drop bedeutet, dass der Start der Maschine durch Ziehen des Los-Icons im Programm Fab-Cockpit in das Job-Controller-Fenster gestartet wird. Ziel ist es, all diese Maschinen auf die Möglichkeit von Load-and-Go mittels Horden-ID und Antenne an der Maschine umzubauen. Bei 8 Zoll sind die Lose zur Scheibenvorderseitenbearbeitung mit Horden-ID ausgestattet, die Lose zur Scheibenrückseitenbearbeitung besitzen jedoch keine RFID-Karte für die Horden-ID. Im Falle einer Automatisierung der Prozesse ist ein Nachrüsten der Anlagen und Horden notwendig.

3.2.3 Buttonless – Standardprozessablauf ohne menschliches Eingreifen

Die nächste Grundvoraussetzung stellt ein im funktionierenden Prozess automatischer Ablauf in der Maschine dar. Auch während des Prozesses sollte kein menschliches Eingreifen notwendig sein. Beispiele für manuelle Interaktion sind spezielle regelmäßige Prozessschritte, wie das händische Ausdrucken von Messwerten an der Maschine, das Eintragen von Messwerten auf Zetteln, das Ausfüllen von Logfiles, aber auch manuelle Tätigkeiten wie das Wechseln von Fotomasken bei Belichtungsmaschinen, das Wechseln der Nadelkarten oder das seltener vorkommende Erneuern der Folie beim Folieren der Wafer vor dem Zersägen. Vor allem Prozessergebnisse und Messwerte müssen zur Automatisierbarkeit von der Maschine automatisch ins Datennetz eingespielt werden. Auch dieser Punkt zählt zu Equipment Integration.

3.2.4 Populfreier Prozessablauf

Ein weiterer wichtiger Punkt zu Buttonless ist der populfreie Ablauf von Prozessen. Dadurch, dass der Operator vor Ort ist wird bei vielen Maschinen das unregelmäßige Beheben und Quittieren von Populfmeldungen akzeptiert. Der Operator hat hierbei einige Sonderschritte zusätzlich zum normalen Prozessablauf auszuführen. Hier sollte beginnend bei häufig vorkommenden Meldungen eine Ursachenerhebung und generelle Beseitigung bzw. Senkung der Auftrittswahrscheinlichkeit erfolgen.

Als Beispiel sind hier die Rasterelektronenmikroskop-Anlagen (REMs) zu erwähnen, bei denen häufig ein manuelles Einstellen der Alignment-Punkte notwendig ist, was durch Schreiben von verbesserten Rezepten zu einem großen Teil behebbar wäre. Auch wenn Schritte wie dieser mit kurzfristig erhöhtem Arbeitsaufwand verbunden sind, rentieren sie sich auf lange Sicht.

3.2.5 Anlagenspezifische Enabler

Die bisher diskutierten notwendigen Grundvoraussetzungen für eine automatisierte Beladung beziehen sich auf die gesamten in der Linie vorhandenen 8-Zoll-Anlagen. Es gilt aber auch anlagenspezifische Enabler zu betrachten.

Bei den Spinetcher-Anlagen in der Ätzung beispielsweise ist vor dem Ätzprozess eine Messung notwendig. Die meist übliche Reihenfolge der Prozessschritte ist die Ätzung eines Wafers, die darauffolgende Dickenmessung dieses Wafers auf einer anderen Maschine und eine aus diesem Messwert resultierende Ätzung der weiteren Wafer. Bei den Maschinen der Substratätzung ist ein sogenanntes ISIS-Messgerät mit in der Ätzanlage eingebaut. Diese nimmt nicht viel Platz in Anspruch und kann bei

den anderen Anlagen ebenfalls nachgerüstet werden, was die Automatisierung vereinfacht, den Prozess schneller macht und die Möglichkeit mehrerer Messungen, von beispielsweise jedem Wafer, bringt.

Ein weiterer bei Infineon üblicher Ablauf ist Run-to-Run (R2R). Hierbei findet zwischen der Bearbeitung einzelner Lose eine Messung statt. Aufgrund der Messergebnisse werden die Rezeptparameter des Prozesses angepasst. Anwendung findet R2R unter anderem zur Feinregelung der Temperatur von Heizstäben in einer Prozesskammer aufgrund von Abnützungserscheinungen an den Stäben. Diese Regelung der Prozessparameter und die softwaretechnischen und logistischen Abläufe dahinter müssen bei Automatisierungsumsetzungen beachtet werden.

Oft händisch durchgeführte Checks von Wafern unter Grünlicht, sowie manuelle Umhordevorgänge bei nasschemischen oder Ätzprozessen stellen ebenfalls anlagenspezifische Hürden für die automatisierte Beladung dar. Lösungen sollten im Idealfall vor der Einführung eines Beladesystems gefunden werden. Standardisierung der Zusatzaufgaben und Zusammenfassen mehrerer Teilschritte, meist als Clustern bezeichnet, gelten als sinnvolle Ansätze um anlagenspezifische Enabler automatisierbar zu machen.

3.3 Menschen, Normen und Gesetze

In diesem Kapitel soll auf die einzelnen Facetten der Kooperation von Mensch und Maschine eingegangen werden. Es geht um die Akzeptanz der Mitarbeiter für die im Reinraum installierten Roboter, um sicherheitstechnische Anforderungen an die installierten Systeme in der Zusammenarbeit Schulter-an-Schulter sowie um Normen und die rechtlichen Grundlagen.

3.3.1 Akzeptanz der Mitarbeiter für Roboter

Roboter werden von Menschen in der Produktion oftmals nicht gerne gesehen. Sie werden von einigen als kompliziert, emotionslos und unnötig empfunden. Vor allem aber fürchten viele Operatoren bei der Einbringung von Robotern um ihren Arbeitsplatz. Bei der Einführung der Stäubli-Roboter zur Beladung der Horizontalöfen wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Salzburg eine Akzeptanzanalyse durchgeführt. In der Ofentechnik wurden die neu installierten Roboter für das Handhaben von Wafern, Horden und Quarzbooten von den Mitarbeitern schnell akzeptiert und als angenehm empfunden. Grund dafür war, dass die Arbeiter die Maschinen als Arbeitserleichter-

rung und nicht als Konkurrenz empfanden. Das hohe Gewicht der Quarzboote und die heiße Umgebung nahe den Öfen waren triftige Gründe für die Umstellung. Die Leute hatten nicht das Gefühl, dass ihnen die Arbeit weggenommen wird, sondern sahen in der neuen Technologie eine Erleichterung, auch wenn für andere die Effizienzsteigerung von 25 Scheiben pro Boot auf 75 Scheiben durch höheres erlaubtes Gesamtgewicht zum Heben im Vordergrund stand.

Bei der Konstruktion der iRobotics wurde speziell auf das Design des Aufbaus geachtet um die Akzeptanz und Sympathie bei den Menschen zu steigern. Ein eigens beauftragter Industriedesigner erstellte ein farblich ansprechendes teilweise rundes Konzept. Akzeptanz für ein mobiles Beladesystem bei den Operatoren wird gefördert, wenn diese dadurch eindeutig entlastet werden. Beispielsweise ist ein gewisser Bereich in der Linie durch fünf Operatoren pro Schicht leicht zu bedienen. Ist einer krank, werden oft kurzfristig dieselben Tätigkeiten von vier Operatoren erledigt. Dabei entsteht nicht selten Hektik. In diesem Fall ist für sie ein mobiles Robotersystem eine willkommene Erleichterung, da es die Arbeit in der Linie erleichtert. Rückmeldungen von Operatoren, die bereits zum aktuellen Zeitpunkt mit schienengebundenen Robotersystemen zusammenarbeiten, haben gezeigt, dass sie sich bei Ausfällen und Wartungsarbeiten am Robotersystem auf den Wiedereinsatz der automatisierten Beladung freuen, da ihnen hierdurch gewisse Arbeitsschritte abgenommen werden und die Arbeit insgesamt angenehmer wird.

Des Weiteren steigt die Akzeptanz der Mitarbeiter für Beladesysteme, wenn diese stabil und zuverlässig arbeiten. Dabei gilt es nicht nur zu beachten, dass die Abläufe des Beladesystems von sich aus reibungslos funktionieren, sondern auch die Kooperation mit dem Menschen im Prozess bewusst eingebunden wird. So sollte das Shuttle des Beladesystems bei Erkennen eines Hindernisses in der Umgebung im zugrundeliegenden Programm nicht in eine Fehleroutine springen. Es genügt, wenn das System anhält und bei freiem Weg die Fahrt fortsetzt, ohne dass ein Operator auf einem Display Fehler quittiert. Ähnliches gilt für den Roboterarm und mögliches Eintreten des Menschen in verbotene Bereiche oder leichte Zusammenstöße. Der parallel arbeitende Operator bei Infineon ist umso zufriedener mit dem Robotersystem, je weniger außerplanmäßige Handgriffe dadurch für ihn notwendig werden.

3.3.2 Allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen und rechtliche Gegebenheiten

Hier soll die Sicherheit des Menschen behandelt werden. Die Sicherheit der Firma, der Anlage oder der Informationen wird hier bewusst nicht näher erörtert. Von dem angewendeten Robotersystem darf keine Gefahr für den Menschen ausgehen. Jede Maschine muss laut gesetzlichen Vorschriften der Mitte 2008 kundgemachten Maschinen-Sicherheitsverordnung – MSV 2010 genügen. Diese Verordnung regelt die gewerberechtlichen Anforderungen, die vom Hersteller (Inverkehrbringer) erfüllt werden müssen, wenn dieser eine Maschine mit einer CE-Kennzeichnung versehen will. Die CE-Plakette ist Voraussetzung dafür eine Maschine in Verkehr bringen zu dürfen.

Die MSV 2010 betrifft primär den Hersteller einer Maschine. Als Hersteller einer Maschine gilt auch, wer eine Maschine für den Eigengebrauch baut oder zusammenfügt. Beispielsweise gilt Infineon Technologies AG als Hersteller der iRobotics und ist somit verpflichtet die Erfüllung der notwendigen Anforderungen sicherzustellen. Laut §33 ASchG ist auch der Käufer bzw. Betreiber verpflichtet, nur Arbeitsmittel bereitzustellen, die im Fall von Maschinen der MSV 2010 genügen. Laut Gesetz wird eine Maschine prinzipiell durch folgende Eigenschaften definiert: Sie hat bewegliche Teile, wird durch Fremdenergie angetrieben und ist zur Verwendung bereit. Ist die Maschine nicht zur Verwendung bereit und erfüllt die Anforderungen der MSV 2010 nicht, handelt es sich um eine unvollständige Maschine. Außerdem gelten laut Gesetz auch auswechselbare Ausrüstungen wie Arbeitskörbe für einen Stapler, Sicherheitsbauteile wie Lichtschranken, Lastaufnahmemittel, Seile, Ketten und abnehmbare Gelenkwellen per Definition als Maschine.

Um eine Maschine rechtskonform in Verkehr bringen zu dürfen muss diese mit einer CE-Kennzeichnung versehen werden. Dazu müssen vorher die folgenden technischen Unterlagen vollständig erbracht werden: Eine allgemeine Beschreibung, eine Übersichtszeichnung mit Schaltplänen der Steuerkreise, eine vollständige Detailzeichnung mit Berechnungen und Versuchsergebnissen, Unterlagen der Risikobeurteilung, angewandte Normen und technische Spezifikationen, Ergebnisse von Prüfungen, eine Betriebsanleitung und Kopien der Konformitätserklärung eingebauter Produkte sind notwendig. Die Einhaltung der MSV 2010 wird jährlich durch die Arbeitsinspektion kontrolliert und vor allem bei außergewöhnlichen Vorkommnissen und Arbeitsverletzungen genau überprüft. Die Anforderungen an Arbeitsstätten werden im Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich in der Bundes-Arbeitsstättenverordnung (B-AStV) festgehalten. Laut § 18 *leges citatae* müssen Fluchtwege für höchstens 20

Personen eine nutzbare Mindestbreite von 1,0 Metern und für höchstens 120 Personen eine nutzbare Mindestbreite von 1,2 Metern aufweisen. Laut § 18 (5) B-AStV dürfen Fluchtwege in Fluchtrichtung für eine Länge von höchstens 2,0 Metern in unmittelbar nebeneinander liegende Abschnitte unterteilt werden, sofern die nutzbare Breite jedes einzelnen Abschnittes mindestens 0,8 Meter beträgt. Notausgänge müssen eine nutzbare Mindestbreite von 0,8 Metern für höchstens 20 Personen, 0,9 Metern für höchstens 40 Personen, 1,0 Metern für höchstens 60 Personen und 1,2 Metern für höchstens 120 Personen aufweisen. Für Verkehrswege genügen laut § 2 B-AStV als Durchgänge zwischen Lagerungen, Möbeln, Maschinen oder sonstigen Betriebseinrichtungen 0,6 Meter.

3.3.3 Mensch-Roboter-Kollaboration

Für einen mobilen Manipulator in Zusammenarbeit mit Menschen im selben Arbeitsraum ergeben sich zusätzlich zu den allgemeinen sicherheitstechnischen Anforderungen und rechtlichen Gegebenheiten wie der MSV spezifische Normen für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Für kollaborierende Roboter sind dabei vor allem die EN ISO 10218-1 [ASI12a] und prEN ISO 10218-2 [ASI12b], so wie die gerade in Arbeit befindliche ISO/TS 15066 von Bedeutung, in welchen die folgenden Punkte genauer definiert werden. Aufgrund des aktuell stattfindenden Übergangs der ersten beiden Normen hin zu letzterer werden an dieser Stelle der Arbeit zwar wichtige Themen besprochen, auf die Angabe genauer, teilweise noch nicht fixierter Zahlen und Grenzwerte wird jedoch verzichtet. Dazu wird auf die Originaldokumente der Normen verwiesen, wobei vom Deutschen Institut für Normung (DIN) die Projektlaufzeit für die Umsetzung der ISO/TS 15066 auf Januar 2013 bis Dezember 2014 festgelegt wurde. Für einen mobilen Beladeroboter bei Infineon sind vor allem folgende Punkte der prEN ISO 10218-2 von Interesse. In Kapitel 5.11.5.3 wird die Handführung des Roboterarms beschrieben, welche beispielsweise bei dem Roboterarm Kuka LBR iiwa durch integrierte Momentensensoren ermöglicht wird. Auch bei Handführung darf eine maximale Geschwindigkeit des Armes nicht überschritten werden. Kapitel 5.11.5.4 geht näher auf Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung im Roboterbetrieb allgemein ein und beschreibt autonome, automatische Abläufe innerhalb eines gemeinsamen Arbeitsraumes mit dem Menschen. Abhängig von Risiko und Entfernung werden reduzierte Geschwindigkeiten empfohlen, sichere Stopps bei Erreichen von verbotenen Zonen definiert und einzuhaltende Mindestabstände präsentiert. Informationen zu Kraft- und Leistungsbegrenzungen von Roboterarmen in Kollabo-

ration mit Menschen gibt Kapitel 5.11.5.5 und geht hierbei auch auf zusätzlichen Kollisionsschutz durch taktile Schutzeinrichtungen ein. Weitere in EN ISO 10218-1 behandelte Themen befassen sich unter anderem mit Kraftübertragungskomponenten, Energieausfall und Energieschwankung, Fehlfunktionen von Bauteilen, Schutz gegen unbeabsichtigte Betätigung, Zustandsanzeige, Kennzeichnung, „Single Point of Control“ d.h. ausschließliches Bedienen von einer Bedienstation aus, Stoppfunktionen des Roboters wie Not-Halt und Sicherheitshalt, Steuerung der Geschwindigkeit, und Betriebsarten wie „Automatik“ oder „Manuell mit reduzierter Geschwindigkeit“. Bei den Handbediengeräten wird unter anderem auf Bewegungssteuerung, Zustimmungseinrichtung, Not-Halt-Funktion am Handbediengerät, Auslösen des Automatikbetriebs, kabellose oder abnehmbare Programmierhandgeräte und auf Steuerung mehrerer Roboter eingegangen. Für den kollaborierenden Betrieb werden ein sicherheitsbewerteter überwachter Halt, Handführung, Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder Steuerung, Schutz bei Singularitäten und Achsbegrenzungen beschrieben. Es wird auf Bewegungen ohne Antriebsenergie und auf Verifizierung und Validierung von Sicherheitsanforderungen und Schutzmaßnahmen eingegangen. Eine Liste signifikanter Gefährdungen, von Anhaltezeiten und Anhaltewegen wird vorgestellt. In [DGU] werden Messergebnisse eines beispielhaften Stoßes durch einen Roboter am Oberarm präsentiert und analysiert und es wird eine Differenzierung der Schmerz-, Belastungs- und Verletzungskenngrößen und eine Bewertung der Einwirkungsdauer angesprochen. Die nun beschriebenen Punkte für eine Mensch-Roboter-Kooperation sind bei einer Umsetzung einer mobilen Beladeinheit bei Infineon zum Schutz der Operatoren im Reinraum generell zu betrachten. Vorhandene Normen bieten Unterstützung zur Erreichung von Vollständigkeit bei den betrachteten Gefährdungen und sicherheitstechnischen Lösungen. Bei Erscheinen einer öffentlichen Version der ISO/TS 15066 ist das Konzept des mobilen Manipulators bei Infineon auf Kompatibilität mit der Norm zu prüfen um eine vorhin angemerkte CE-Kennzeichnung zu erhalten und die Sicherheit der Operatoren im Umgang mit dem Robotersystem zu gewährleisten.

3.4 Wirtschaftliche Aspekte bei Automatisierung

Neben den bisher beschriebenen technischen und sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen für die Umsetzung eines mobilen Beladesystems spielen auch die wirtschaftlichen Aspekte eine entscheidende Rolle. Kosten und Risiken gilt es bei einer Realisierung genau zu betrachten.

3.4.1 Kosten

Ein nicht zu unterschätzender Faktor bei der Umsetzung von Robotersystemen und Automatisierungslösungen allgemein sind die einmaligen und laufenden Kosten. Das wichtigste Schlagwort ist dabei der Return on Invest (ROI) oder auf Deutsch Kapitalrendite. Dadurch wird bei einer Investition der Gewinn in Prozent des Umsatzes pro Kapitaleinsatz ermittelt. Die 1919 von Donaldson Brown eingeführte Kennzahl dient bei der Anschaffung von Automatisierungslösungen oft als Entscheidungsgrundlage ob und wie die geplanten Neuerungen umgesetzt werden.

Laut dem Lohnnebenkostenrechner des Bundesministeriums für Finanzen können die Kosten für einen Mitarbeiter in der Produktion grob berechnet werden. Die Wirtschaftsprüfungs- und Steuerberatungsgesellschaft Siart + Team Treuhand GmbH stellt eine Lohnnebenkostenberechnung zur Verfügung. Laut dieser entstehen für einen Mitarbeiter bei einem monatlichen Bruttogehalt von 1600 Euro in Kärnten Jahresgesamtkosten von gerundet 30.000 Euro. Hinzu kommen weitere Kosten wie Schichtzulagen oder die freiwillige Sonntagszulage. Zusammen mit laufenden Gehaltserhöhungen kann in der Halbleiterindustrie bei Schichtarbeit von Jahresgesamtkosten pro Mitarbeiter von 40.000 Euro ausgegangen werden.

Werden Kosten für neu installierte Systeme verglichen, ist es wesentlich, sich nicht nur auf einen Vergleich der entstehenden Investitionskosten zu beschränken. Es gilt die TCO (Total Cost of Ownership) zu betrachten. So relativieren sich beispielsweise höhere Kosten zur Einführung einer Hordenpositionierung mittels Kamera durch die später viel niedrigeren Kosten und weniger Personalaufwand zum Teachen der Robotersysteme. Durch einen höheren Automatisierungsgrad können die Produktionskosten dank kurzfristigen Investitionen langfristig gesenkt werden und die Wettbewerbsfähigkeit am Markt bleibt erhalten oder steigt.

3.4.2 Allgemeine Risikobewertung

Da es sich bei dem mobilen Manipulator um eine innovative, neuartige, in der Industrie noch nicht etablierte Aufgabenstellung handelt, finden sich auch unter den möglichen Zulieferfirmen hauptsächlich kleinere Unternehmen deren Produkte erst seit kurzer Zeit am Markt sind und die keine jahrzehntelange Erfahrung auf dem Gebiet nachweisen können. Bei Unternehmen wie diesen gilt es eine klare Risikobewertung zu erstellen, in der ein mögliches Ausfallen der Firma aufgrund von Geschäftsaufgabe oder Konkurs beachtet wird. Ein Rollout eines mobilen Robotergesamtsystems sollte durch Lieferunfähigkeit nicht beeinträchtigt werden. Um ein dadurch notwendiges

3 Anforderungen und Umgebung

Umsteigen auf ein anderes Produkt und die sich dadurch ergebenden Adaptions- und Neuentwicklungskosten zu verhindern, sollte ein Notfallplan erstellt werden. Dazu kann ein Dokument bei einem Notar hinterlegt werden, in dem detaillierte Pläne der Plattform und die notwendigen Rechte enthalten sind. So kann im Konkursfall von Infineon auf dieses Dokument zugegriffen werden und die Produktion der Plattform von einer anderen, von Infineon beauftragten Firma sichergestellt werden. Eine dazu notwendige Vereinbarung sollte im Vertragsabschluss mit einer Zulieferfirma für eine mobile Plattform mit einbezogen werden.

4 Der mobile Manipulator FIRE

Für eine Kombination der drei in Kapitel 1.2 ab Seite 2 präsentierten Automatisierungsoptionen zur Maschinenbeladung sind die Varianten der Roboterzelle und des schienenbasierten Systems bei Infineon umgesetzt und arbeiten erfolgreich und zuverlässig. Frei verfahrbare Einheiten sind aktuell bei Infineon an keinem der Standorte weltweit zur Beladung der Anlagen im Einsatz. Um auch Anlagen zu beladen, für welche der Einsatz der vorhandenen Systeme kosteneffizient nicht erzielbar ist, wird wie in der in Kapitel 1.2 präsentierten Zusammenstellung gezeigt, eine mobile Einheit entwickelt. Ein solches System wird im Sinne der Wiederverwendung erprobter Teile, Kosteneffizienz, Wartungs- und Bedienerfreundlichkeit nicht zu hundert Prozent neu entwickelt. Es wird bewusst großer Wert darauf gelegt möglichst viele vorhandene Komponenten direkt zu übernehmen oder für eine mobile Anwendung zu adaptieren.

Es soll nun gezeigt werden, dass der Übergang von einem System wie iRobotics zu einem zu hundert Prozent frei verfahrbaren System sehr fließend ist. Den aktuellen Stand bildet eine starre, fix verbaute gerade Führungsschiene mit Schleppkette. Durch eine Anbringung der Robotersteuerung in einem Schrank neben dem Shuttle kann das Shuttle schmaler, leichter und energiesparender werden. Momentan wird das durch einen Lichtwellenleiter verhindert, der zwischen Robotersteuerung und Roboter nur innerhalb einer maximalen Länge in die Schleppkette verbaut werden darf. Den nächsten Schritt Richtung größerer Variabilität und Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten im Reinraum stellt eine Schiene wie die jetzige mit Versatz durch Kurven oder mit der Möglichkeit eines U-Turns dar. Eine weitere Lösung, die sich zwischen die starre, formangepasste Schiene und den frei verfahrbaren Roboter einordnet ist ein schienengeführtes Robotersystem mit frei adaptierbaren, auswechselbaren Schienenelementen, die entlang der vorhandenen Maschinen verlegt werden und an denen sich ein mobiler Manipulator bewegen kann. Der nächste Sprung ist das Verwenden einer am Boden verklebten optisch oder magnetisch erkennbaren Linie als virtuelle Schiene für das mobile System. Soll aus einer optischen oder magnetischen Linie ein noch größerer Nutzen mit mehr Möglichkeiten gezogen werden, kann die Linie als Berandung einer erlaubten Bewegungsfläche für das frei verfahrbare System dienen.

4 Der mobile Manipulator FIRE

Schlussendlich gibt es die Möglichkeit eines absolut autonom agierenden Systems, das offensichtlich die technisch größten Herausforderungen aber die höchste Flexibilität bietet.

So ist eine stückweise Veränderung des iRobotics-Konzeptes zu einem mobilen System möglich und kann in Betracht gezogen werden. Welche Zwischenschritte von Infineon in der Produktion umgesetzt werden, ist von den entsprechenden Verantwortlichen zu entscheiden. Hier wird die wirtschaftlich und entwicklungstechnisch sinnvolle Methode der Gesamtumsetzung direkt hin zu einem frei verfahrbaren System präsentiert, wobei Ideen und Erfahrungen aus Lösungen wie iRobotics einfließen. Durch diese von Grund auf neue Entwicklung unter Einbezug von Bewährtem wird im Folgenden präsentiert.

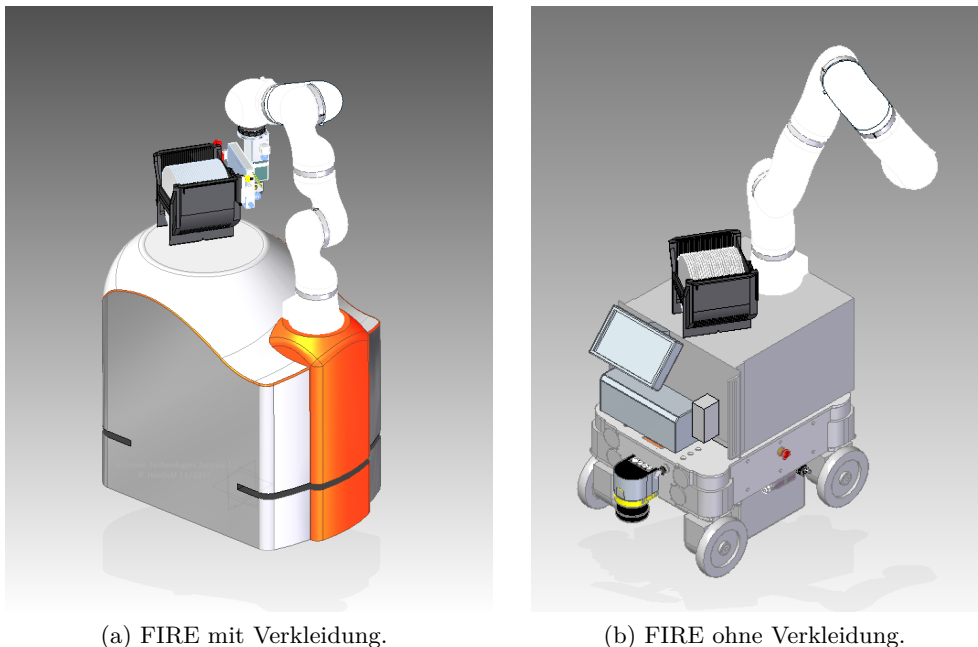


Abbildung 4.1: Basiskonzept für ein mobiles Beladesystem FIRE. Weitere Komponenten wie Sensorik oder Rahmenteile kommen noch hinzu.

Es wird nun auf die technische Umsetzung des mobilen Beladesystems eingegangen. Das hier beschriebene System wird FIRE genannt. Damit wird Factory Integrated Robotic Effector, oder im speziellen Fall bei Infineon Factory Infineon Robotic Effector gemeint. Um eine Identifizierungsmöglichkeit mit dem evaluierten mobilen Beladesystem zu bieten wird bereits an diesem Punkt der resultierende Designvorschlag vorweggenommen und in [Abbildung 4.1](#) dargestellt. [Abbildung 4.1\(a\)](#) zeigt den mo-

bilen Manipulator FIRE mit Verbau und Abbildung 4.1(b) einige Komponenten des Systems ohne Verbau. In Kapitel 6.2 auf Seite 144 wird genauer auf die designtechnischen Einzelheiten eingegangen. Abbildung 4.2 zeigt eine Übersicht, wie das System FIRE im Folgenden beschrieben wird. Über eine Zusammenstellung notwendiger Hardwarekomponenten wird in das System eingeführt. Auf ein Shuttle als Antriebseinheit, die notwendige Spannungsversorgung, Roboterarm mit Robotersteuerung, Teachpanel und Greifer wird eingegangen und Sicherheits Elemente, Sensorik und eine übergeordnete Steuereinheit werden präsentiert. Danach werden Funktionalitäten des Systems FIRE näher beschrieben. Für die Plattformnavigation werden Sensorsysteme vorgestellt, und auf Mapping, Lokalisierung, ein Bewegungsmodell und auf Pfadplanung eingegangen um kollisionsfrei von einer Position zur nächsten zu gelangen. Der in dem Prozessablauf wesentliche Stati-Check wird vorgestellt und analysiert. Daraufhin werden Möglichkeiten zur Erreichung der Präzision am Tool Center Point (TCP) des Roboterarms herausgearbeitet und bewertet. Es wird eine mögliche Systemkombination aus Navigationsmethoden, Präzisionstechniken und weiterer Sensorik präsentiert, mit der ein mobiles Beladesystem bei Infineon Villach und anderen Halbleiterproduktionsstandorten umgesetzt werden kann. Eine softwaretechnische Umsetzung wird beschrieben und die unerlässliche Reinraumtauglichkeit des Gesamtsystems diskutiert. Danach werden für eine Anwendung notwendige Punkte erläutert. Es wird auf den Prozessablauf beim Be- und Entladen, auf das Design des Systems, auf einen möglichen Einsatzort von FIRE als Anwendungsgebiet und auf Aufgaben während des Betriebs eingegangen. Nach der Behandlung der Kollaboration zwischen Mensch und Roboter und der Integration von aktuellen Produktionsphilosophien wird eine Differenzierung zu anderen Projekten vorgenommen und mögliche spätere Erweiterungen des Systems veranschaulicht. Schlussendlich wird ein denkbare Gesamtkonzept für das Jahr 2020 vorgestellt und ein Ausblick beschreibt mögliche zukünftige Entwicklungen. Auf die Komponenten von FIRE wird nun näher eingegangen, deren Daseinsberechtigung hinterfragt und ein Umsetzungsvorschlag gegeben.

4.1 Antriebseinheit

Eine frei verfahrbare Basis sollte aus Platzgründen im Reinraum aus einem holonomen Fahrwerk bestehen. Dadurch wird, im Gegensatz zu gewöhnlichen Antriebsmechanismen, eine omnidirektionale Bewegung ermöglicht. Ein so angetriebenes Vehikel kann sich nicht nur vorwärts und rückwärts, sondern auch seitlich und schräg fortbewegen, am Stand drehen oder während der Verfolgung einer fixen Trajektorie eine Drehung



Abbildung 4.2: Unterteilung der Beschreibung des Systems FIRE als Übersicht über den weiteren Aufbau der Arbeit; genauere Beschreibung zu Abbildung 1.1 auf Seite 5.

um die eigene Achse vollziehen und die Ausrichtung ändern. Zur Erreichung von holonomer Verfahrbarkeit gibt es eine Vielzahl an Lösungen, wie auch die Patente von Jonathan D. Rohrs des Massachusetts Institute of Technology (MIT) [Roh04] oder Chia-Wen Wu und Chi-Kuang Hwang [WH10] zeigen. Für das System bei Infineon kommen zwei verschiedene Umsetzungen der omnidirektionalen Verfahrbarkeit in Frage. Eine Variante sind sogenannte Allseitenräder (Mecanumräder, engl. Omniwheels), die eine Verfahrbarkeit in einer engen Umgebung durch Fortbewegung in alle möglichen Richtungen in der Ebene und Drehungen am Platz ermöglicht. Die zweite realistisch denkbare Möglichkeit der Umsetzung omnidirektionaler Verfahrbarkeit bieten sogenannte Fahr-Dreh-Module. Je zwei Motoren pro angetriebenem Rad ermöglichen sowohl den Antrieb des Rades als auch das Lenken dieses Rades durch motorgetriebenes Drehen um die vertikale Achse. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 4.3(a) ein Omniwheel und in Abbildung 4.3(b) ein Fahr-Dreh-Modul gezeigt.



(a) Omni-Wheel, auch als Mecanum-Rad bezeichnet [Mayc]. (b) Fahr-Dreh-Modul mit zwei Motoren [Maya].

Abbildung 4.3: Sinnvolle Varianten für einen omnidirektionalen Antrieb.

Im Zuge der Masterarbeit wurden Tests mit Mecanum-Rädern, Antrieben mit Motor links und rechts und Fahr-Dreh-Modulen durchgeführt und für den Reinraumbetrieb fiel die Entscheidung aufgrund von geringen Vibrationen beim Wafertransport und wenig Abrieb der Räder auf Fahr-Dreh-Module. Die in Kapitel 2.3.2 auf Seite 23 vorgestellte omnidirektional verfahrbare mobile Roboterplattform MPO-700 von Neobotix bildet eine brauchbare Basis für den mobilen Manipulator und deren Verwendung wird im weiteren Verlauf angenommen.

4.2 Spannungsversorgung

Eine große Herausforderung bei mobilen Systemen stellt die Spannungsversorgung dar. Zwei entscheidende Kenngrößen sind dabei die Bordspannung in Volt und die speicherbare elektrische Ladungsmenge in Amperestunden. Unterschiedliche Bordspannungen wie 24, 48 oder 72 Volt Gleichspannung sind möglich, wobei im System FIRE die Entscheidung auf 48 Volt fällt. Die speicherbare Ladungsmenge hängt unter anderem von der Größe des Akkumulators und vom Akkumulatortyp ab. Typische Werte bei mobilen Robotersystemen der hier gewünschten Größe betragen bei Blei-Gel-Batterien ungefähr 28 Amperestunden und bei Lithium-Ionen-Akkus zirka 55 Amperestunden. Durch diese Werte ergeben sich bei einem Gesamtsystem Akkulaufzeiten von ungefähr 4-8 Stunden, die grob der Ladezeit des Akkus entsprechen. Es werden nun unterschiedliche Möglichkeiten zur Ladung der Akkumulatoren analysiert.

- *Ladestation*

Die erste auf der Hand liegende Lösungsvariante zum Laden eines Akkumulators ist das Anstecken oder kontaktlose Laden an einer Ladestation. Diese Umsetzung ist prinzipiell sinnvoll, bringt aber bei einer Produktion rund um die Uhr an sieben Tagen die Woche den entscheidenden Nachteil mit sich, dass das mobile System bei dem oben erwähnten Verhältnis von Ladedauer zu Akkulaufzeit von ungefähr eins zu eins die Hälfte der Zeit an der Ladestation hängt und nicht produktiv eingesetzt werden kann. Aus dieser Problematik ergeben sich weitere nun vorgestellte Varianten zur Spannungsversorgung.

- *Andocken*

Eine Herangehensweise den Akku zu laden ist ein Andocken bei jeder Maschine, die bedient wird. Eine niedrigere Versorgungsspannung des Roboters und der Steuerung von bis zu 48 Volt und für den Menschen sichere Steckverbindungen sind in diesem Fall anzustreben. Ein Dockingadapter für eine Ladevorrichtung für den Akkumulator sollte mindestens an den zwei Längsseiten des mobilen Systems vorhanden sein um ein zusätzliches Rangieren vor dem Beladen zu vermeiden. Das Robotersystem kann bei jeder Maschine während des Beladevorgangs geladen werden und dort zum Laden auch weiter verweilen, solange er keinen neuen Auftrag erhält. Ein mechanisches Andocken an der Maschine erleichtert außerdem eine präzise Handhabung der Horde durch den Roboter. Bei dieser Lösung gilt es zu beachten, dass die gesamten Maschinen, an denen

ein Andocken geplant ist, mit der nötigen Spannungsversorgung ausgestattet werden müssen. Kosten und Aufwand dieser Lösung, sowie die Möglichkeit der Anbringung einer Spannungsversorgung aus der Maschine beziehungsweise an der Maschine sollten vor einer Umsetzung evaluiert werden.

- *Induktion*

Eleganter erfolgt der Ladevorgang über Induktion bei einer eigenen Ladestation oder direkt vor der Anlage. Für diese kontaktlose Lademöglichkeit muss das Vehikel eine gewisse Zeit vor der Anlage verharren. Hierbei gilt zu beachten, dass das mobile Beladesystem während eines solchen induktiven Ladevorganges anderen Robotersystemen sowie Menschen und Transportwagen im Weg stehen kann.

- *Superkondensatoren*

Eine ausgedehntere Variante des induktiven Ladens bietet die ständige induktive Ladung von sogenannten Superkondensatoren, auch Powercaps genannt. Sie werden zwischen Kondensatoren und Akkumulatoren eingeordnet, haben eine um den Faktor zehn niedrigere Energiedichte als Akkumulatoren, lassen sich dafür aber schnell und effizient über Induktion laden. Eine ständige induktive Lademöglichkeit bringt grobe Veränderungen am Reinraumboden mit sich und wird in Kapitel 5.1.2 auf Seite 82 im Rahmen einer induktiven Führung näher beschrieben.

- *Power Home*

Eine mögliche Umsetzungslösung wäre eine automatische Akkuwechselstation, an der dem Roboter das alte, verbrauchte Akkupack entnommen und eine neues frisch geladenes eingesetzt wird. Ein solches PH-System (Power Home) ermöglicht die kontinuierliche beinahe pausenlose Einsetzbarkeit des Roboters und so eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Ressource Roboter. Zur Realisierung muss der mobile Roboter die Fähigkeit besitzen die Strecke bis zum nächsten PH autonom zurückzulegen. Der Mobile Manipulator sollte rechtzeitig reagieren, sobald seine Batterien schwach werden und sich auf den Weg zum PH machen. Die mechanische Umsetzung eines solchen PH orientiert sich an der Akku-Wechsel-Lade, die von einem Menschen zum Wechseln des Akkus verwendet wird. Ähnlich dieser zwischen Vorder- und Hinterrädern seitlich herausziehbaren Lade kann ein automatisches System den Wechsel von einem bald leeren Akkumulator auf einen vollgeladenen vornehmen.

- *Power Vehicle*

Eine weitere denkbare Variante ist ein Power Vehicle (PV), das die Akkus vom Power Home zu den Robotern transportiert und sie dort übergibt. Dazu ist jedoch ein zusätzliches mobiles System notwendig. Der Beladeroboter muss rechtzeitig an das System bekanntgeben, wann sein Akku leer ist und das PV macht sich auf den Weg um dem Roboter eine neue Stromversorgung zu bringen. Außerdem ist eine Übergabe von einem zur Gesamtmasse der Roboter verhältnismäßig schweren Akkupack zu bewerkstelligen und das verbrauchte Akkupack wieder mitzunehmen. Vor allem der Tausch der Akkus vor Ort stellt eine im Vergleich zur PH-Lösung ohne PV hohe Komplexität dar.

Bei einer Evaluierung fiel die Entscheidung für dieses Konzept aus Kosten-, Effizienz- und Machbarkeitsgründen auf einen Akkutauch unter Verwendung eines PH. Wegen der längeren Akkulaufzeit werden Lithium-Ionen-Akkus Bleiakkus vorgezogen. Bei der Wahl eines Akkumulators gilt es zu beachten, dass die Batteriespannung auch bei Belastungsspitzen nicht zu stark einbricht und eine Mindestspannung, die eine fehlerfreie Funktionalität der versorgten Komponenten sicherstellt, immer gehalten wird. Beispielsweise sollten bei den Roboterarmen von Universal Robots auch bei einer Belastung von 1000 Watt bei einer Nennspannung von 24 Volt die für ein Netzteil an der Robotersteuerung mindestens notwendigen 19 Volt nicht unterschritten werden.

4.3 Roboterarm und Greifer

Der Roboterarm als Aktuator sollte einige in anderen Industrien untergeordnete Eigenschaften besitzen. Er sollte einen geringen Energieverbrauch haben. Geringes Roboterarmgewicht spart einerseits Energie bei der Fortbewegung des mobilen Systems und begünstigt die Stabilität beim Beladevorgang. Der Roboterarm muss aufgrund der reinraumtechnischen Rahmenbedingungen nicht für hohe Geschwindigkeiten gebaut sein und die maximale Traglast ist durch das Eigengewicht von Horde und Scheiben klar vorgegeben. Durch den gemeinsamen Arbeitsraum mit dem Menschen sollte der Arm durch interne und externe Sensoren den notwendigen Sicherheitsansprüchen genügen.

Als Roboterarm wird bei der Planung des FIRE der Leichtbauroboter LBR iiwa von Kuka verwendet. Durch sieben Achsen bringt der Arm die bei den engen Platzverhältnissen wichtige kinematische Redundanz, was ihn von anderen Roboterarmen wie dem UR5 von Universal Robots unterscheidet. Die nötige Sensitivität für das

Handhaben im selben Arbeitsbereich mit den Operatoren erhält er durch Momentensensoren in den einzelnen Gelenken und feinfühlig Kollisionserkennung. Dank der schlanken Bauweise benötigt er nur wenig Platz, was bei der durch die Reinraumumgebung vorgegebenen geringen Bewegungsfreiheit von Bedeutung ist. Die Leichtbauweise in Aluminium-Guss ermöglicht ein optimales Verhältnis von Eigengewicht zu Nenntraglast für die Montage auf einer mobilen Plattform.

Ein Aufbau zur Analyse der Erreichbarkeit der Loadports im Rahmen der Arbeit ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Für den Versuch wurde der Roboterarm LBR iiwa von Kuka und ein von Infineon entwickelter Backengreifer verwendet. Der Greifer des Roboters, allgemein als TCP bezeichnet, wurde in eine Pose gebracht, die der bei weitem häufigsten Greiferstellung bei der Maschinenbeladung entspricht. Daraufhin wurden die vom Montagepunkt des Roboterarms am weitesten entfernten Punkte unter Beibehaltung der Pose angefahren und aufgezeichnet.



Abbildung 4.4: Test am Roboterarm LBR iiwa zur Erfassung der Reichweite mit Horde am Greifer in der häufigsten Beladestellung.

Abbildung 4.5 verdeutlicht die Positionen der gemessenen Punkte. Der Roboterarm wurde auf einer für das mobile Beladesystem FIRE realistischen Höhe von 600 Millimetern montiert. Für die Auswertung wird eine Entfernung des Roboteranbaupunktes zur Anlagenfront von 400 Millimetern angenommen. Um für das Abstellen

der Horde am Loadport durch den Roboterarm aufeinander abgestimmte Messpositionen zu erzielen, wird am Roboter nicht der Endeffektor, sondern die Mitte des unteren Stegs der Horde als Messpunkt herangezogen. An dieser Stelle rastet die Horde am Loadport ein. Aus diesem Grund wurde nicht nur beim Roboterarm sondern auch bei der Vermessung der Loadports darauf geachtet, eben genau diesen Einrastpunkt zu vermessen.



Abbildung 4.5: Definition von Montagepunkt des Roboterarms, Messpunkt am Endeffektor des Roboterarms (am unteren Steg der Horde am Greifer) und Messpunkten an den Loadports.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.6 grafisch dargestellt. Sie beinhaltet die zuvor erläuterten Messpunkte, den Montagepunkt des Roboters in rot, die Reichweite des Roboterarmes bei unterschiedlichen Höhen in grün und die vermessenen Positionen der Loadports in blau. Der weiß hinterlegte Bereich stellt die Anlage dar. Die Anlagenfront wird durch eine orange Linie am Rand der Anlage gekennzeichnet. Auf den ersten Blick fallen Ausreiser bei den Loadportpositionen auf, welche durch den Roboterarm in der hier gewählten Position nicht erreichbar sind. Abbildung 4.7(a) relativiert diese Ausreiser, welche hauptsächlich die Positionen der Reticle-Beladung bei Belichteranlagen und die Beladung der nasschemischen Anlagen betreffen. Erstere sind in einem ersten Schritt nicht zur automatisierten Be-

ladung durch das hier vorgestellte mobile System vorgesehen. Weitere bedürfen spezieller Horden, welchen den bei den Prozessen verwendeten Chemikalien standhalten können und zum aktuellen Zeitpunkt ist eine Beladung durch FIRE ebenfalls nicht geplant. Weitere hoch gelegene Anlagen sind jene, welche auf Grund von reinraumtechnischen Anforderungen auf einem speziellen Podest stehen. Besonders tief liegen Loadports der Belichter. Ganz niedrige Geräte am unteren Ende der Darstellung stehen meist auf Tischen und deren Höhe ist somit variabel und im Anwendungsfall einfach auf ein mobiles Beladesystem anpassbar. Einen weiteren nennenswerten Fall bilden die Vertikalöfen, welche an einer einzelnen Anlage ein sehr breites Höhenpektrum abdecken und somit eine hohe Variabilität des Robotersystems fordern. Es ist zwar möglich, aber hier wird dringend davon abgeraten, ein und dieselbe Anlage durch unterschiedliche Robotersysteme zu beladen. Abbildung 4.7(b) zeigt noch einen gezoomten Ausschnitt, in dem sich ein Großteil der zu beladenden Loadports befindet. Für die hier gestellte Aufgabe bietet der LBR iiwa durch seine Reichweite und Möglichkeit der speziellen Positionierung des TCP auch bei Hindernissen eine zufriedenstellende Lösung.

Direkt mit dem Roboterarm verbunden sind die Robotersteuerung und das Teachpanel. Beide sind in einem Prototyp vor allem platztechnisch mit einzuplanen. Im speziellen Fall des LBR iiwa wäre das Weglassen des Teachpanels, hier als Smart-Pad bezeichnet, theoretisch möglich, aber mit einigen Veränderungen in Zusammenarbeit mit Kuka verbunden. So muss beispielsweise der am Smart-Pad integrierte Sicherheitskreis mit Not-Aus-Knopf an einer anderen Stelle am FIRE integriert werden und eine Ansteckvorrichtung für ein Teachpanel oder ein drahtlos operierendes Teachpanel umgesetzt werden. Das Ersetzen der gesamten Robotersteuerung, bei dem iiwa-Arm als Sunrise Cabinet bezeichnet, durch andere Komponenten wird von Kuka prinzipiell nicht unterstützt, wurde aber beim Vorgängermodell LBR 4+ in einem Projekt umgesetzt. Im in Kapitel 2.3.3 auf Seite 28 vorgestellten Robotersystem Care-O-bot 3 wurde die sperrige Robotersteuerung am Fraunhofer IPA aus ästhetischen Gründen durch eine Eigenkonstruktion ersetzt.

Der Greifer dient zum direkten Handhaben der Horden und wird am Roboterarm montiert. Hierbei wird für das Konzept FIRE kein neues System konstruiert, sondern auf einen vorhandenen Greifer des Systems iRobotics zurückgegriffen. Es wird die zweite Greifergeneration, eine Kombination aus einem Drehmodul und einem Backengreifer verwendet. Durch das Drehmodul kommt zum Roboterarm ein weiterer Freiheitsgrad hinzu. Für eine detaillierte Beschreibung des Greifermoduls wird auf [Mör13] verwiesen. Für eine Umsetzung sind später Optimierungen des Mo-

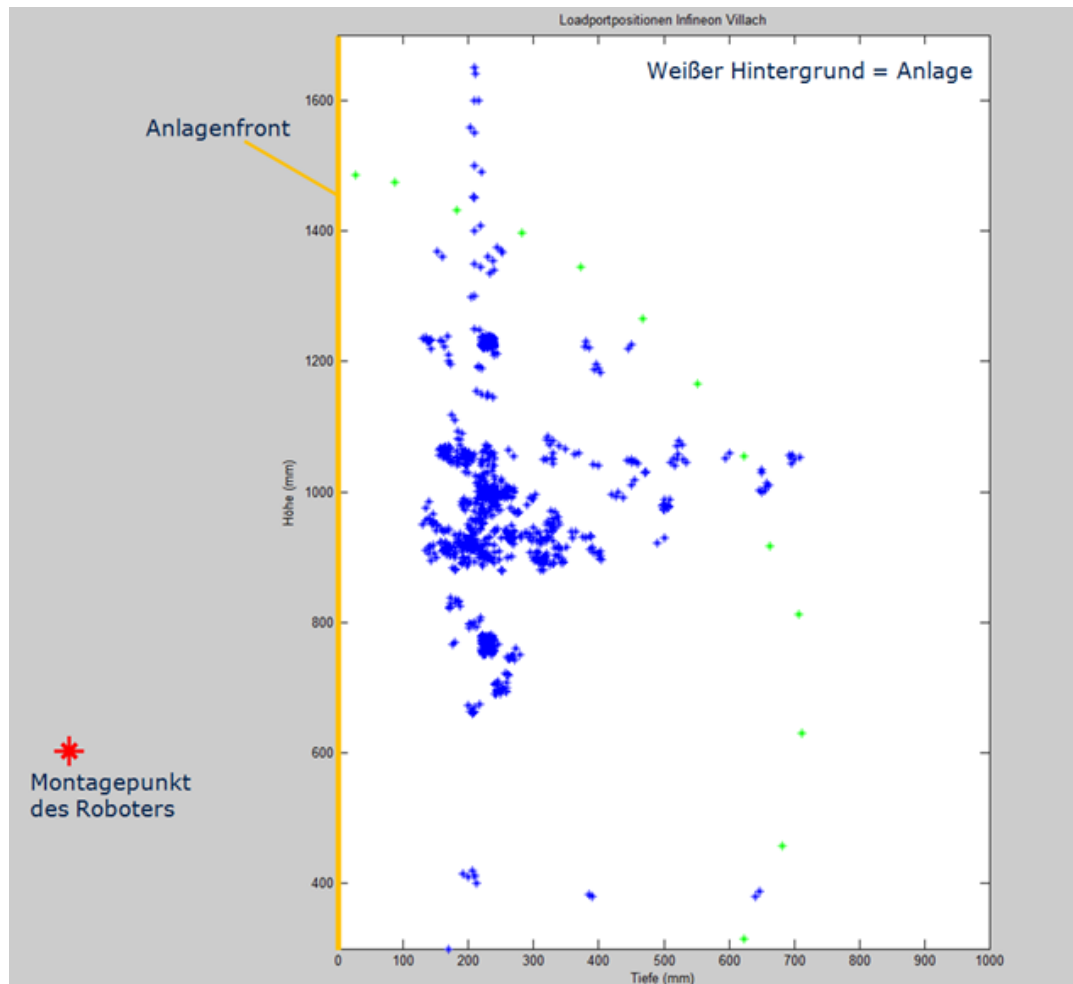


Abbildung 4.6: Positionen der Loadports in blau, wobei der weiße Hintergrund die Anlage darstellt und die Anlagenfront in orange eingezeichnet ist. Der Montagepunkt des Roboters ist in rot und die Reichweite des Robotersarms an der in Abbildung 4.5 gezeigten Stelle in grün dargestellt.

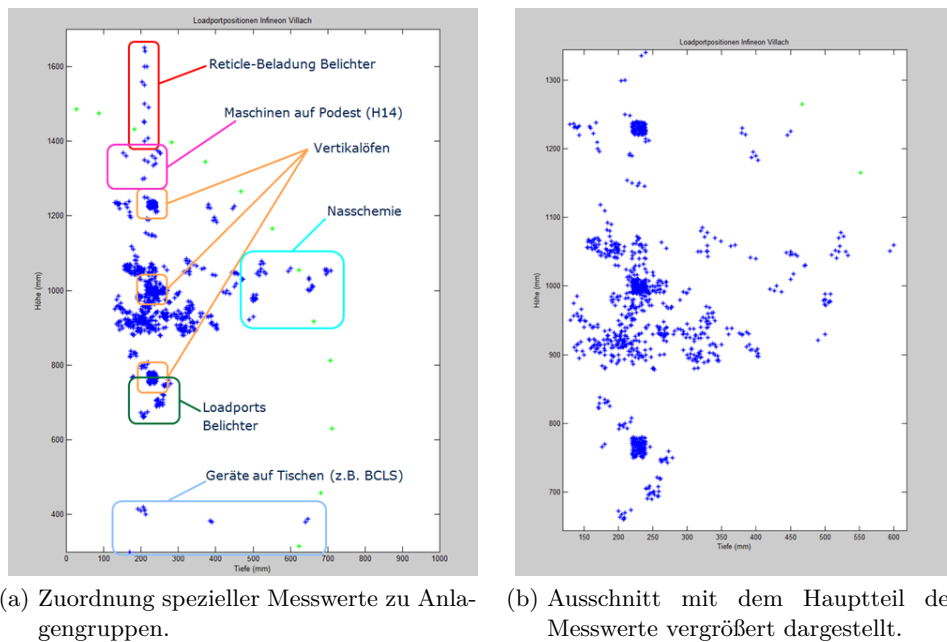


Abbildung 4.7: Details zu Messwerten von Höhe und Tiefe der Loadports bei Infineon Villach.

duls denkbar. Dazu zählen Veränderungen die zu geringerem Gewicht und geringere Greiferdicke führen, um leichter in Loadports zu kommen, oder Abwandlung der Schließmechanismen.

4.4 Sicherheitselemente

Jedes System mit automatisch bewegten Teilen in einer Fabrik benötigt gewisse Sicherheitselemente um die Gefährdung von Mitarbeitern so gering wie möglich zu halten. So ist auch am FIRE ein deutlich als solcher erkennbarer Not-Aus-Knopf angebracht, der vom Operator leicht zu erreichen ist. Da es sich um ein mobiles System handelt, ist ein Not-Aus-Knopf auch an einer fix im Raum angebrachten Stelle denkbar, um im Fehlerfall zu verhindern, dass der Operator dem Roboter nachlaufen muss, um dann den Not-Aus-Knopf zu erreichen. Auch eine Sicherheitsfernsteuerung mit den wichtigsten Funktionen und integriertem Not-Aus zum manuellen Entfernen des Roboters bei außergewöhnlichen Gefahrensituationen ist sinnvoll. So hat der Operator nach Freischalten die Möglichkeit den FIRE frei im Reinraum zu manövrieren, ohne direkt an der Plattform die spezifischen Fahr-Befehle eingeben zu müssen. Im

Fall einer Räumung einer Halle aufgrund von Gasalarm, Brand oder anderen Gefahren ist ein automatisch integrierter Befehl an alle betroffenen Robotereinheiten zweckmäßig, der diese dazu veranlasst unverzüglich an den Rand des betreffenden Ganges zu fahren und dort zu verharren, bis der Alarm wieder aufgehoben wurde. So ist ein sicheres Evakuieren der Operatoren im Ernstfall garantiert. Durch die Sicherheitskomponenten an Bord des mobilen Systems, wie speziell sicherheitszertifizierte Sensoren, eine Sicherheits-SPS und doppelte Verkabelung von sicherheitskritischen Komponenten zu Sicherheitsschnittstellen werden Fehlfunktionen des Systems nicht vollständig ausgeschlossen, deren Auftretswahrscheinlichkeit aber um ein Vielfaches minimiert.

4.5 Sensorik

Zur Erreichung der erforderlichen Sicherheit und allgemeinen Funktionsfähigkeit eines mobilen Beladesystems sind Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung notwendig. So kann das System abhängig von unterschiedlichen Sensoreingängen angepasst auf die Umgebungssituation reagieren. Bei mobilen Systemen gibt es dazu zwei diametrale Ansichten. Einerseits wird der weit verbreitete Lösungsweg vertreten, die gesamte Sensorik am Vehikel anzubringen. Dieses übernimmt dadurch auch die Verarbeitung und hat die notwendige Intelligenz. Die andere Herangehensweise befasst sich mit Sensorik verbaut in einer sogenannten intelligenten Umgebung oder „Smart Environment“. Die Simulation eines dazu verwendeten Sensornetzwerks wird in [AB12] genauer beschrieben. Für die Anwendung im Reinraum bei Infineon ist weder das eine noch das andere Extrem empfehlenswert und kosteneffizient umsetzbar. Eine Kombination durch Sensorik am Roboter, wie Lasersensoren oder Momentensensoren in den Gelenken des Roboterarms, und Sensorik in der Umgebung, wie ein Present-Sensor zur Hordenerkennung am Loadport oder die Verwendung des Box Tracking Systems zur groben Vehikelpositionierung, wird zur Umsetzung bei Infineon angeraten.

4.6 Steuereinheit

Die nun erwähnten Komponenten Antriebseinheit, Spannungsversorgung, Roboterarm mit Robotersteuerung und Teachpanel, Greifer, Sicherheitskomponenten und Sensorik bilden ein mobiles System, können aber nur erfolgreich zusammenarbeiten, wenn sie durch eine Steuereinheit vernetzt sind. Diese steuert den Arbeitsablauf des FIRE und kommuniziert über Schnittstellen zu einem Leitsystem und den einzelnen

Komponenten an Bord.

5 Funktionalitäten von FIRE

Im vorigen Kapitel wurden die einzelnen hardwaretechnischen Grundbestandteile des Konzepts FIRE erläutert. Um mit Hilfe dieser Zusammenstellung zu einem funktionierenden mobilen Beladesystem zu gelangen werden in diesem Kapitel Funktionalitäten des Systems FIRE genauer analysiert und beschrieben. Auf Sensordaten zur Plattformnavigation sowie Mapping, Lokalisierung, ein Bewegungsmodell und Pfadplanung, wie auch auf einen Stati-Check und Arm-Präzision wird eingegangen. Zur Positionierung der Horde wird eine mögliche Sensorkombination vorgestellt. Daraufhin werden benötigte softwaretechnische Komponenten und Reinraumtauglichkeit des FIRE analysiert.

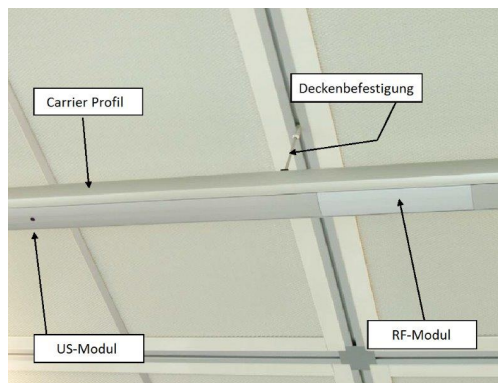
5.1 Sensordaten zur Plattform-Navigation

Es gilt nun eine genaue Positionierung des Endeffektors zu erzielen und eine Horde auf einem Loadport zu platzieren. Der hier dazu gefundene Lösungsansatz unterteilt diese Aufgabe in eine grobe Positionierung, die durch Navigation der verfahrbaren Einheit umgesetzt wird und eine Feinpositionierung die durch sensorgesteuerte, situationsangepasste Roboterarmbewegungen erzielt wird. Im Folgenden wird beginnend mit der Navigation auf diese technischen Kernpunkte eingegangen. Zur Positionsbestimmung und Wegfindung im Reinraum gibt es eine Reihe von Herangehensweisen, die nun erläutert und auf eine mögliche Anwendung am FIRE bei Infineon untersucht werden.

5.1.1 BTS – Box Tracking System

Für eine grobe Navigation von mobilen Robotern kann das in Kapitel 3.2.1 auf Seite 54 vorgestellte BTS verwendet werden. Die Montage eines DisTags am Roboter bringt dadurch eine maximale Positionsgenauigkeit von ± 300 Millimetern und eine weitgehend verlässliche Positionsgenauigkeit von ± 500 Millimetern. Eine weitere aber wesentlich leichter verbesserbare Ungenauigkeit wird durch den groben modulartigen Aufbau des FabViewers aus Bitmaps verursacht. Für ein Auffinden von Boxen durch

den Operator ist diese ungefähre Positionsangabe ausreichend, durch eine genauere Karte kann sowohl der Roboter als auch die Boxen sofern gewünscht genauer geortet werden. Für eine mobile Beladeinheit ist das BTS wegen der zu geringen Positionsgenauigkeit nicht zur Hauptnavigation einsetzbar. Bei einem Gewicht eines DisTags erster Generation von 219 Gramm oder eines DisTags zweiter Generation von 234 Gramm ist der Einsatz des Systems als zusätzliche Absicherung und zur Auffindung des Robotersystems im FabViewer für den Operator auf jeden Fall empfehlenswert und sollte bedacht werden. Eine vielversprechende Anwendung des BTS bei der Navigation des FIRE ist jedoch die Unterstützung einer umgesetzten Navigationslösung bei der Positionsbestimmung über weite Entfernungen. Bei Aufgaben wie der Bestimmung, in welchem Finger sich das mobile System gerade befindet, versagt eine Lasernavigation aufgrund der Ähnlichkeit der Finger oft. Hier spielt das BTS seine Stärken aus. An der Reinraumdecke montierte, in Abbildung 5.1(a) gezeigte Carrier-Profile erkennen über Ultraschall-Module die Position von DisTags und kommunizieren über RF-Module mit diesen. Statt der Verwendung von DisTags mit Anzeigemonitor wie sie auch in Abbildung 3.2 auf Seite 38 an der Box montiert zu sehen sind, können auch die etwas mehr als fingerdicken Lottrack-Module (siehe Abbildung 5.1(b)) am mobilen Roboter angebracht werden. Sie sind kleiner, leichter und kostengünstiger und ermöglichen ebenfalls eine Lokalisierung des FIRE-Systems mit der Genauigkeit des BTS.



(a) An der Reinraumdecke montierte Carrierprofile zur Kommunikation mit DisTags und Lokalisierung dieser über RF- und Ultraschall-Module [Inf].



(b) Lottrack-Modul ohne Anzeige, lokalisierbar über Carrierprofile [Inf].

Abbildung 5.1: Details zu Messwerten von Höhe und Tiefe der Loadports bei Infineon Villach.

Die Ausgabe der Koordinateninformationen erfolgt durch Messages die über den

TIBCO-Bus, einem generellen Bussystem das die Serverkomponenten bei Infineon verbindet, ausgesendet werden. Zum Erhalten der Position ist es erforderlich einen Listener zu programmieren, der sich zu Messages subscribt. Dieser kann auf alle DisTags hören und Positionen einzelner DisTag-IDs herausfiltern. So sind x- und y-Position gewisser Lottrack-Module im Intellion-Koordinatensystem ermittelbar. Über eine Koordinatentransformation sind diese Werte in der Hauptnavigation einbindbar.

Bei der Verwendung des BTS gilt es die Antennenabdeckung des Reinraumgebietes zu beachten. Aktuell ist der Großteil der Produktionsfläche mit dem System ausgestattet. In gewissen Randgebieten gibt es jedoch schwachen Empfang und es fehlt in kleinen Bereichen die Positionsinformation. Da es sich bei dem Lottrack-System für den FIRE nur um eine unterstützende Informationsquelle handelt können diese seltenen Informationsausfälle verkraftet werden. Im Sinne einer optimalen Projektumsetzung ist die Nachrüstung von Antennen in Randzonen jedoch zu empfehlen. Nähere Informationen dazu finden sich in [\[Spi13\]](#).

5.1.2 Induktive Führung

Eine induktive, im Boden verlegte Führungslinie wird seit den 1970er Jahren verwendet und gilt somit als ausgereifte Technik. Ein in der Führungslinie fließender elektrischer Wechselstrom bedingt ein Magnetfeld, das in einer in der mobilen Plattform verankerten Spule einen Strom induziert. Ein dazu verwendbares System mit Flach Pick-Up und die Herleitung aus einem herkömmlichen Transformator ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Das Contactless Power System (CPS) [\[Vah08\]](#) bietet die beschriebenen Funktionen.

Die in der Halle 16 durchgehend verlegten metallischen Bodenplatten behindern durch die magnetische Abschirmung jedoch die induktive Führung der verfahrbaren Einheit. Durch die hohe Permeabilität (Durchlässigkeit für magnetische Felder) der Bodenplatten wird das magnetische Feld oberhalb der Platten sehr stark gedämpft und eine induktive Führung des Systems nur schwer beziehungsweise mit groben Veränderungen am Reinraumboden möglich.

Des Weiteren wird durch einen fix im Boden verbauten Leiter als induktive Führung die durch das mobile System im Vergleich zum schienengeführten System erreichte Flexibilität und erleichterte Einbringung wieder aufgegeben. Ein solches System bringt nicht die notwendigen Vorteile, die eine Umsetzung rechtfertigen würden.

Ein in der Linie bei Infineon wichtiger Punkt ist die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Unter anderem durch hohe Arbeitsfrequenzen elektrischer Anlagen im

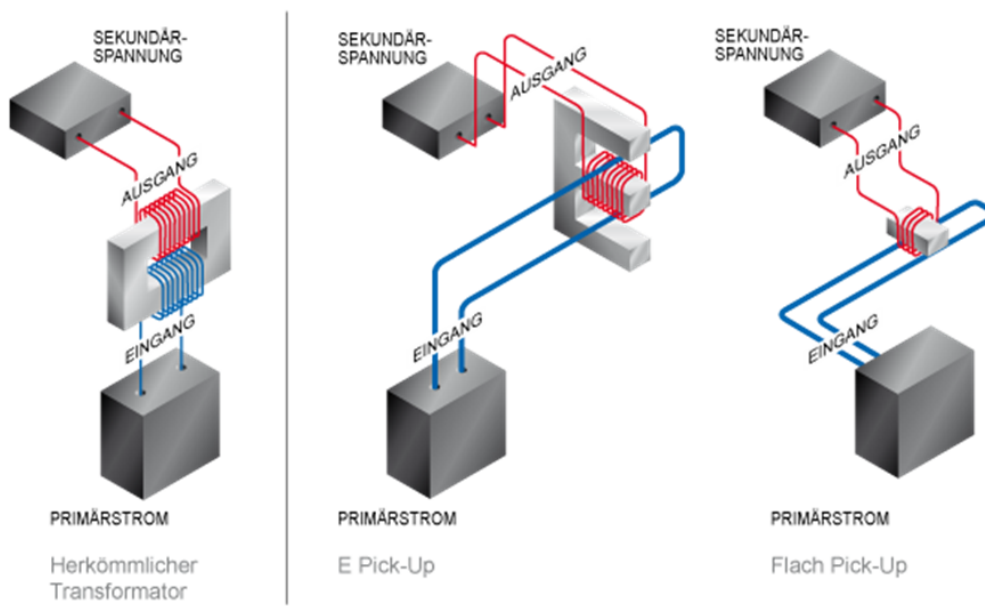


Abbildung 5.2: Herangehensweise bei induktiver Führung; Herleitung des beim Contactless Power System von Vahle verwendeten Flach Pick-ups aus einem herkömmlichen Transformator [Vah08].

Reinraum können durch eine induktive Führung hervorgerufene elektromagnetische Felder störend auf den reibungslosen Prozessablauf wirken. Vor allem bei Anlagen zur Messung geringer elektrischer Amplituden ist auf geringe elektrische und magnetische Feldstärken beziehungsweise Schirmung der elektromagnetischen Wellen zu achten. Allgemeine Informationen zu elektromagnetischer Schirmung finden sich in [Wol08].

5.1.3 Optische Führungslinie

Eine am Reinraumboden aufgeklebte schwarze oder schwarz-weiße Linie zur optischen Führung der mobilen Plattform wäre theoretisch denkbar. Für diese Arbeit durchgeführte Tests haben nur leichte Einflüsse durch tageszeit- und bereichsabhängige Helligkeitsunterschiede und Einreißen der Linie gezeigt. Die schlechtere Erkennbarkeit der aufgeklebten Linie am Reinraumboden durch zunehmende Verschmutzung wird wegen der Sauberkeitsanforderungen im Reinraum als untergeordnetes Problem betrachtet, sollte jedoch aufgrund zunehmender Partikelzahl von der Decke zum Boden trotzdem mit bedacht werden. Auch ein Wiederfinden der Linie nach unvorhergesehenem Verlassen wird als gelöst gesehen. Eine für die Industrie notwendige Zuverlässigkeit ist dadurch prinzipiell umsetzbar. Es gilt jedoch wie bei einer induktiven Führung, dass durch diese Lösung die Vorteile einer mobilen Plattform gegenüber einem schienengeführten System wieder verringert werden. So wird eine bei Infineon Dresden überlegte Kombination der optischen Führungslinie mit anderen Navigationsmechanismen denkbar. Da bei dem Dresdner Konzept eine Plattform mit zwei gemeinsam gelagerten, getrennt angetriebenen Vorderrädern und fix montierten Hinterrädern ähnlich einem PKW vorgesehen ist, kann eine am Boden aufgeklebte Linie als Anfahrtshilfe zur Maschine dienen. Die für eine gewisse Länge vor der Maschine angebrachte Linie wird vom Roboter gefunden und dieser kann dadurch so zur Maschine navigieren, dass das mobile System trotz eingeschränkter Fahrkinematik parallel zur Maschine zu stehen kommt. Aufgrund des in dieser Arbeit vorgesehenen omnidirektionalen Antriebs sind diese Linienstücke hier nicht vorgesehen. Eine weitere Anwendbarkeit optischer Führungslinien liegt in der Abgrenzung von Bereichen in denen sich der FIRE bewegen darf und in denen er sich nicht bewegen darf. Diese Linien sind primär zur Information für den Operator gedacht, könnten aber auch zusätzlich vom Roboter überwacht werden. Auf Bereiche wird in Unterpunkt 5.5.2 Go- und NoGo-Areas auf Seite 105 genauer eingegangen.

5.1.4 Odometrie

Eine bei mobilen Systemen verbreitete Orientierungsmöglichkeit bietet die odometrische Bestimmung des zurückgelegten Weges des Robotersystems. Während der Fortbewegung werden die Radumdrehungen zur Positionsbestimmung mitgezählt. Wegen der auftretenden Ungenauigkeiten, die mit zunehmendem zurückgelegten Weg steigen ist die Kombination mit einem weiteren System zur Navigation sinnvoll. Die folgenden Fehlerquellen bei der Positionsermittlung sind bei der Roboternavigation zu beachten.

- *Räder* – Geringe Unterschiede der Raddurchmesser, nicht perfekt runde Räder, ungenaue Messung der Raddurchmesser und im Laufe des Betriebs durch Abnutzung veränderte Beschaffenheit der Räder sorgen für Ungenauigkeiten.
- *Untergrund* – Unebenheiten im Boden, Durchrutschen und Schmutzpartikel erschweren die genaue Positionsbestimmung.
- *Mobile Plattform* – Fehlerhafte Messung von geometrischen Abständen der Plattform und leichte Veränderungen durch Verschleiß während des Betriebs erzeugen Abweichungen aufgrund der Plattform.
- *Kidnapped Robot* – Entstandene Fehler durch Anheben des Roboters oder temporären Ausfall von Komponenten werden weiter unten genauer beschrieben.

Trotz der beschriebenen bei odometrischer Positionsbestimmung auftretenden Abweichungen von der tatsächlichen Ist-Position des mobilen Systems bietet diese Variante vergleichsweise verlässliche Informationen bei geringem Kostenaufwand. Eine Einbindung bei dem System FIRE wird daher angedacht.

5.1.5 Lasersensoren

Eine vielversprechende Lösung der Navigationsaufgabe bieten rotierende Laserscanner. Diese auch als 2D-LIDAR, englisch Light Detection and Ranging, bezeichnete Methode verwendet einen über einen sich drehenden Spiegel abgelenkten Laserstrahl zur Messung der Entfernung zwischen dem Sensor und einem reflektierenden Objekt. Sie bieten eine vielfach erprobte Technik mit ausgereiften softwaretechnischen Modellen. Die Möglichkeit der Verwendung von Lasersensorik an einem mobilen Roboter wird durch das erfolgreiche Umsetzen der Lokalisierung eines Robotersystems untermauert. Im vom Verfasser dieser Arbeit durchgeführten Versuchsaufbau in Abbildung 5.3 wurde dazu ein Testbereich aufgebaut, innerhalb dessen, stellvertretend für jedes

mögliche mobile System, die Position eines Roboters des Typs Pioneer 3-DX während laufender Fortbewegung kontinuierlich ermittelt wird [HMM13]. Ebenfalls in Abbildung 5.3 zu sehen sind die Visualisierung des Programmkonzepts des Partikelfilters zur Anzeige der aktuellen Roboterposition (A) sowie die Darstellung der Lasersensordaten (B) und des zur Karte gehörenden Density-Fields (C). Auch bei einer Umsetzung der Navigation bei der mobilen Plattform MPO-700 von Neobotix kommen Partikelfilter sowie Kalmanfilter zum Einsatz. Tiefer gehende Erläuterungen zur Umsetzung eines solchen Systems enthält [TBF06], wo auch Möglichkeiten zur simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung (Simultaneous Localisation and Mapping; SLAM) präsentiert werden.

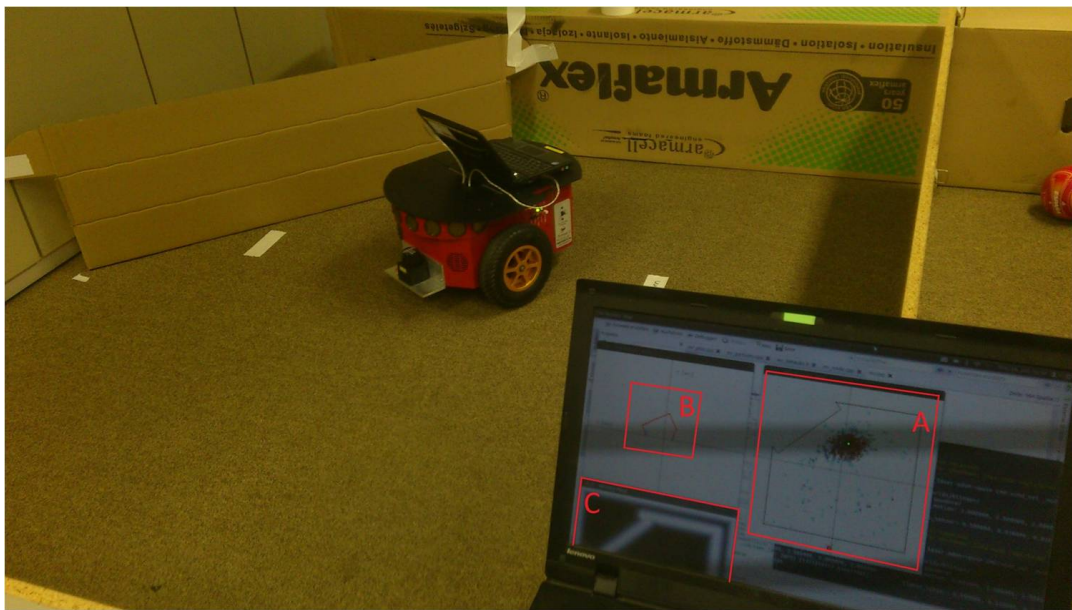


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau zur kontinuierlichen Ermittlung der Position eines mobilen Robotersystems durch Lasersensordaten in einer bekannten Umgebung; Visualisierung des Programmkonzepts des Partikelfilters zur Anzeige der aktuellen Roboterposition (A), Darstellung der Lasersensordaten (B) und des zur Karte gehörenden Density-Fields (C) [HMM13].

Als klare Einschränkung dieser Technik ist das Scannen des Lasers auf nur einer horizontalen Ebene in einer vorgegebenen Höhe zu sehen. Wie bereits im Kapitel 3.1.1 – Räumliche Gegebenheiten auf Seite 35 erwähnt, variiert das Aussehen der Reinraumumgebung abhängig vom Abstand zum Boden, sodass Lasersensoren, die nur in einer einzigen horizontalen Ebene scannen, ein unvollständiges Bild der Real-

tät liefern. Dadurch kann es beispielsweise vorkommen, dass der mobile Roboter an vorstehenden Objekten, die in der Scan-Ebene nicht vorhanden sind, anfährt. Diese Herausforderung führt zur nächsten Gruppe von Sensoren.

5.1.6 Ultraschall

Ultraschallsensoren bieten eine hilfreiche Ergänzung zu anderen Sensoren, sind hier aber durch ihre im Verhältnis zu anderen Sensoren hohe Ungenauigkeit für Präzisionsnavigation in der Halbleiterindustrie nicht als primäre Sensoren zur Navigation vorgesehen. Aufgrund des großen Öffnungswinkels von Ultraschallsensoren haben diese im Gegensatz zu Lasersensoren jedoch den Vorteil eines um ein Vielfaches größeren abtastbaren Bereichs. Für einen Großteil der technischen Anwendungen ist es wünschenswert den wie in Abbildung 5.4(a) abgebildeten Öffnungswinkel so gering wie möglich zu halten. Bei der Anwendung am FIRE kommt der von Natur aus große Winkel zu Gute. So bieten sie eine optimale Ergänzung zu Lasersensoren, die nur auf einer horizontalen Ebene im Raum abtasten und somit nur Hindernisse in dieser Ebene wahrnehmen. Durch Ultraschallsensoren ist eine gegenüber Kamerasystemen unvergleichlich kostengünstigere Lösung zur Vermeidung von Kollisionen des FIRE außerhalb der Lasersensorebene gegeben. Mögliche Ablenkungen und dadurch entstehende Verfälschungen der Messergebnisse spielen nur eine sehr geringe Rolle, da diese Sensoren als zusätzliche Absicherung zu beispielsweise Lasersensoren gedacht sind. Nach dem Vorbild von ultraschallbasierten Einparkhilfen bei Automobilen ist eine mögliche Rundumabdeckung des mobilen Systems zum Schutz vor Kollisionen erreichbar. Durch die gezielte Befestigung der Sensoren am Vehikel in einer leichten Schrägstellung, wie in Abbildung 5.4(b) gezeigt, wird der vom Sensor abdeckbare Bereich optimal ausgenutzt. Ein Visualisierungsbeispiel solcher Sensoren bietet Abbildung 5.4(c), wo ein Blick von oben auf das Vehikel mit den Sensoren rundum dargestellt wird, wobei rund um das Vehikel grüne Felder angeben, dass sich kein Hindernis im definierten Abstandsbereich befindet und rote Felder die Detektion eines Hindernisses anzeigen.

5.1.7 Infrarotsensoren

Eine weitere erwähnenswerte Sensortechnik zur Navigation bieten Infrarotsensoren. Sie befinden sich preislich in einer ähnlichen Kategorie wie Ultraschallsensoren und technisch meist zwischen Ultraschallsensoren und Lasersensoren. Gegenüber einer Kombination aus Lasersensoren und Ultraschallsensoren zur Navigation bieten Infra-

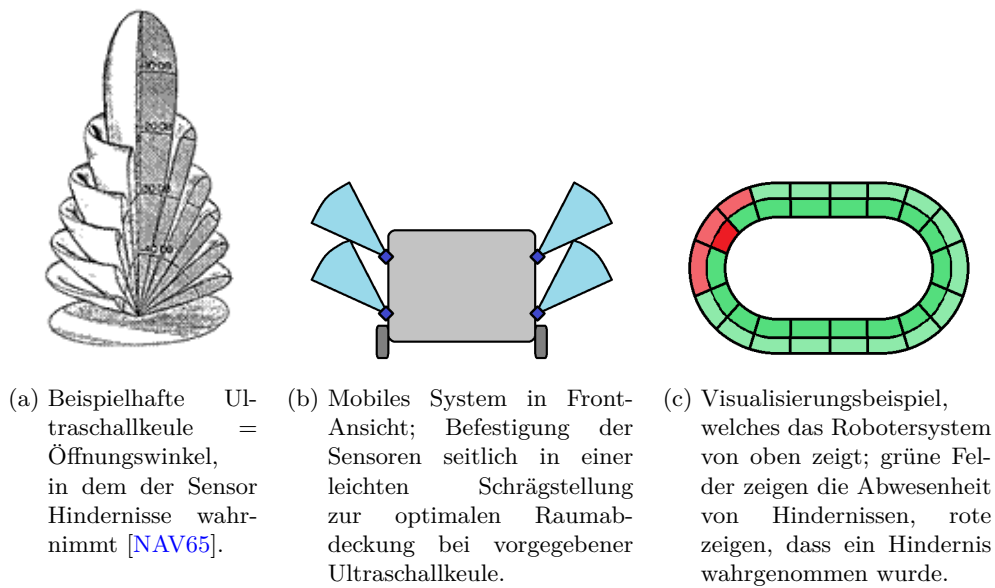





Abbildung 5.4: Ultraschallsensoren als Ergänzung zu anderen Sensoren.

rotsensoren eine kostengünstigere Alternativlösung. Wegen geringerer Genauigkeit, aus Qualitätsgründen, wegen unterschiedlichem Ansprechen auf Farbe und Material der detektierten Objekte und empfindlicher Reaktion auf Lichtquellen mit Infrarotanteil spielen Infrarotsensoren bei dem Konzept FIRE gegenüber Lasersensoren eine untergeordnete Rolle. Gegenüber Ultraschallsensoren haben sie den Nachteil eines geringeren Öffnungswinkels. Ein Vergleich von üblichen Öffnungswinkeln in Tabelle 5.1 erklärt die Verwendung einer Kombination aus Ultraschallsensoren für großflächiges ungenaues Erkennen und Lasersensoren für präzise Abstandsmessung.

Tabelle 5.1: Öffnungswinkel.

| <i>Ultraschallsensor</i> | <i>Infrarotsensor</i> | <i>Lasersensor</i> |
|---|---|---|
|  |  |  |
| > 30 Grad möglich | Durchschnittlich 5 Grad | Üblicherweise 0,5-1 Grad |

5.1.8 3D-Navigation

Eine dreidimensionale Navigation ist die in dieser Auswahl aufwändigste, jedoch in Hinblick auf Erkennung von Hindernissen und Vermeidung von Kollisionen aussichtsreichste Variante. Die Kombination von Daten einer optischen und einer Time-of-flight-Kamera ermöglichen eine vielversprechende Umsetzung, die in zukünftigen Projekten und Produkten sicherlich Anwendung finden wird, beim aktuellen Stand der Technik jedoch einen unverhältnismäßig hohen Aufwand und unrentable Kosten verursacht. Des Weiteren bietet dreidimensionale Sensorik im Gegensatz zu beispielsweise Lasersensorik aktuell keine gesetzliche Freigabe für Sicherheitsanwendungen, welche wegen Bewegungen im selben Arbeitsraum mit dem Menschen hier unerlässlich ist. Das für eine Kombination aus einer optischen und einer ToF-Kamera gesagte gilt auch für Stereokameras, die ebenfalls in Forschungsprojekten und in ein paar Jahren auch in der Industrie zum Einsatz kommen werden, momentan aber aus den genannten Gründen bewusst nicht in die nähere Auswahl kommen.

5.1.9 Berührungssensoren

Es besteht die Möglichkeit Berührungs- oder Touch-Sensoren in Form von sogenannten Bumpers zur Kollisionsvermeidung einzusetzen, was aber nicht als Alternative zur hier präsentierten Lösung der Kollisionsvermeidung mittels Ultraschallsensoren verwendet werden sollte. Jegliche Kollision eines mobilen Systems, welches im Reinraum Wafer handhabt, ist definitiv unerwünscht und daher nicht in eine Standardsicherheitssensorik integriert. Bumper sind jedoch als weitere Absicherung des Roboters gegen Kollisionen zusätzlich zu anderen angewendeten Sensoren denkbar.

5.1.10 Passives RFID

Auch die Verwendung von RFID (radio-frequency identification) kann zur Navigation des mobilen Roboters im Reinraum sinnvoll sein. Dazu werden passive RFID-Transponder am Boden montiert und mit einem am mobilen Roboter angebrachten Lesegerät, einer sogenannten RFID-Antenne, identifiziert. So kann bei Überfahren des RFID-Tags die im RFID-Tag hinterlegte Positionsinformation ausgelesen und im Navigationsalgorithmus verarbeitet werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung einer RFID-Positionsbestimmung ist ein sogenannter RFID-Teppich, der eine rasterförmige, flächendeckende Abdeckung des Reinraumbodens mit Transpondern vorsieht. Ein solcher „RFID-Carpet“ mit RFID-Komponenten und mobilen Systemen darüber wird in [SYS12] vorgestellt und ist in Abbildung 5.5 links in einem Plan des Reinraums

mit Hauptgang und Fingern schematisch dargestellt. Diese Umsetzung benötigt jedoch eine großflächige Abdeckung des Reinraumbodens mit RFID-Tags, was hohe Installationszeiten und –kosten bedingt.

Darum soll hier eine alternative Lösung angeführt werden. Statt einer kontinuierlichen Belegung des Bodens mit passiven RFID-Transpondern genügt eine Installation von RFID-Bereichsgrenzenlinien. Hierbei werden Transponder im Boden, wie in Abbildung 5.5 rechts zu sehen, nur an gewissen Stellen zur Abgrenzung von Bereichen angebracht. Durch zwei Reihen kann sowohl die Position als auch die Überschreitungsrichtung der Bereichsgrenze festgestellt werden. Ein solches System kann zur Grobpositionierung als Unterstützung eines Lasernavigationssystems eingesetzt werden und bietet eine Alternative zu einem IPS (Indoor Positioning System).

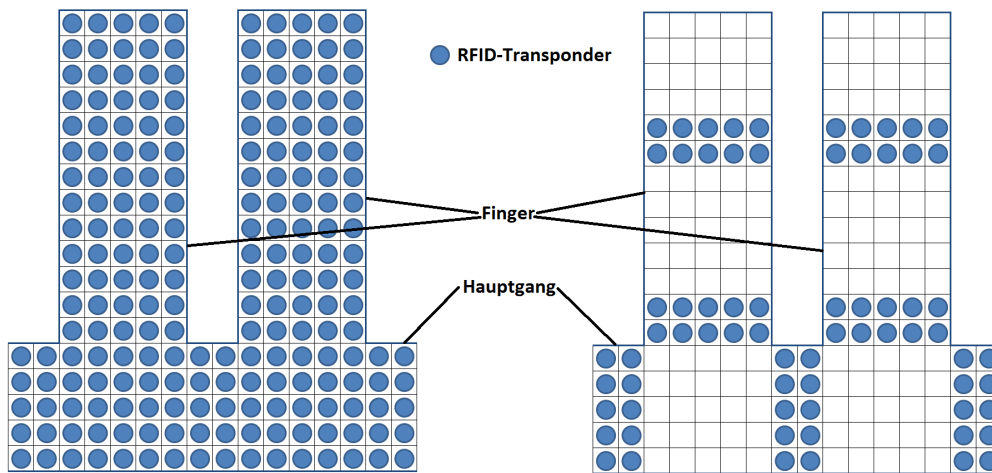


Abbildung 5.5: Positionsinformationen für den mobilen Roboter durch flächendeckende Abdeckung des Reinraumbodens mit RFID-Tags (links) beziehungsweise mit RFID-Tags an den Bereichsgrenzen (rechts).

5.1.11 Beacons

Für einen mobilen Roboter bietet sich zur Navigation auch die Möglichkeit der Orientierung an Beacons. Durch das Erkennen von mindestens 2 Reflektoren über direkten Sichtkontakt kann über die erhaltenen Entfernungsinformationen die aktuelle Position des Roboters bestimmt werden. Für diese Lösung ist jedoch das Anbringen von Reflektormarken an gewissen Stellen im Reinraum notwendig. Um ohne diese zusätzlichen Veränderungen an der Roboterumgebung auszukommen haben bereits im Jahr 1991 John J. Leonard und Hugh F. Durrant-Whyte einen Algorithmus für modell-

basierte Lokalisierung entwickelt, der auf dem Konzept von geometrischen Beacons basiert [LD91]. Unter Verwendung eines Extended Kalman Filters (EKF) werden Ähnlichkeiten zwischen beobachteten geometrischen Beacons und zuvor in einer Karte festgelegten Beacons ausgewertet. Ein System wie dieses ist jedoch nach aktuellem Stand der Technik noch nicht für serienreifen, industrietauglichen, zuverlässigen Ablauf in der Produktion geeignet. Daher bleibt derzeit die Orientierung an Beacons mit der Anbringung selbiger im Reinraum verbunden. Diesen Installationsaufwand gilt es bei der Auswahl einer Navigationstechnik zu bedenken. Ein Beispiel einer erfolgreichen Umsetzung von Navigation mittels Beacons im Reinraum bei Infineon bietet ein fahrerloses Transportfahrzeug bei Infineon Regensburg. Es fährt unter einem nur leicht abgeänderten Transportwagen, hebt ihn an und transportiert ihn zwischen zwei vordefinierten Stellen im Reinraum hin und her. Tests am System im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass bei einer überdurchschnittlich hohen Anzahl an Menschen in der direkten Umgebung des mobilen Transportsystems Orientierungsbaken verdeckt werden können, was zu einem Stillstand des Systems führt. Bei einer eventuellen Verwendung von Beacons für das System FIRE können gewisse Komponenten des in Deutschland eingesetzten Systems übernommen werden, eine bei Stillstand nötige Neuinitialisierung von Menschenhand sollte jedoch durch zusätzliche Intelligenz am System vermieden werden.

5.1.12 WLAN-Positionierung

Unter WLAN-Positionierung oder WiFi-based Positioning System (WPS) wird eine Ortung eines WLAN-Empfängers verstanden. Durch Ermittlung der Signalstärken einzelner WLAN-Router in der Umgebung, deren Position bekannt ist, ist es möglich die ungefähre Position des Empfängers zu erhalten. Hierbei handelt es sich um eine beispielsweise bei Smartphones aktuell beliebte Möglichkeit der Ortung, deren Genauigkeit jedoch meist auf einige Meter beschränkt ist. So kann ein System wie dieses als Unterstützung der Hauptnavigationssensorik herangezogen werden, ist aber zur alleinigen Positionsbestimmung nicht geeignet. Im Fall von Umsetzungsproblemen bei der Verwendung eines IPS kann dadurch zum Beispiel der Finger bestimmt werden, in dem sich das Robotersystem aufhält. Bei einem mobilen Beladesystem inhärente WLAN-Komponenten erfordern für diese Positionsbestimmung keine zusätzliche Hardware, was aus Kosten-, Zeit- und Aufwandsgründen für diese Variante spricht.

5.1.13 Positionskalibrierung

Im Laufe der Zeit kann es aus unterschiedlichsten Gründen zu leichten Abweichungen zwischen angenommener und tatsächlicher Position des FIRE-Systems kommen. Zur Kalibrierung der Shuttle-Position, zur Tilgung dieser Abweichungen und zur Anfangskalibrierung kann das in Kapitel 4.2 auf Seite 71 vorgestellte PH (Power Home) verwendet werden. Diese Akkuwechselstation kann parallel zur Positionskalibrierung genutzt werden. Dabei werden im Prozessablauf des Robotersystems keine zusätzlichen Zeiten und Wege benötigt.

5.1.14 SafetyEYE

Zur Vollständigkeit sei hier noch die Möglichkeit der Verwendung des SafetyEYE der Firma Pilz erwähnt. Dieses Produkt ermöglicht die sicherheitszertifizierte Überwachung von Warn- und Schutzbereichen durch ein System mit Überkopfmontage und ersetzt so mögliche Lichtgitter oder LIDAR-Scanner. Bei der Umsetzung des FIRE kommt dieses System nicht in die engere Wahl, da es bei einer Deckenmontage nicht den gesamten Arbeitsbereich des mobilen Beladesystems abdecken kann. Gegen eine Integration direkt am mobilen Robotersystem spricht die Größe des Gesamtsystems mit all seinen notwendigen Komponenten, wozu neben der Sensoreinheit auch eine 19 Zoll große Steuereinheit, „Evaluation Device“ genannt zählt, die von der Ausdehnung sogar die viel Platz einnehmenden Komponenten wie die Robotersteuerung des Arms oder die Steuerung der verfahrbaren Plattform übertrifft.

5.2 Mapping

Bewegt sich ein autonomes mobiles System wie FIRE in einem Arbeitsbereich, wird die Orientierung durch eine Karte unterstützt. Zum Erstellen einer solchen Karte gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Herangehensweisen, von denen drei für Infineon sinnvolle nun näher erläutert werden.

- *Vorgegebene Karten*

Die naheliegende Variante ist die Verwendung von vorhandenen Karten des Reinraums. Diese im Programm AutoCAD erstellten Karten werden regelmäßig aktualisiert und enthalten in einer Vielzahl von Layern unter anderem Hallengrundrisse, Finger, Anlagen oder auch Robotersysteme wie iRobotics. Auch das BTS als Indoor Positioning System hat einen eigenen Layer in diesem Plan.

Durch geeignete Koordinatentransformationen ist es möglich sämtliche eingehenden Positionsinformationen zu vereinen und in einer aus dem vorhandenen AutoCAD-Plan erstellten Karte darzustellen.

- *Mapping mit FIRE*

Eine vorgegebene Karte vereinfacht die autonome Fortbewegung des Roboters stark, vorausgesetzt die Karte stimmt zu einem großen Teil mit der Realität überein. Die bei Infineon erstellten Pläne des Reinraums werden aufgrund der oben angesprochenen durchschnittlich zehn bis zwanzig Anlagenrangierungen pro Monat in regelmäßigen Abständen von einem speziell dafür verantwortlichen Mitarbeiter auf dem neuesten Stand gehalten. Auch wenn die Hallenpläne aktuell sind und Einrichtungsgegenstände inkludieren, können sie von der Genauigkeit nicht an eine durch Lasermessung erstellte Karte herankommen. Eine Möglichkeit zur Erstellung einer solchen Karte bietet Mapping durch das System FIRE. Die zielführendste Variante ist das simultane Lokalisieren und Erstellen einer Karte (Simultaneous Localisation and Mapping, SLAM) unter Verwendung eines LIDAR-Sensors (Light Detection and Ranging). Da diese rotierenden Laserscanner zur Lokalisierung bereits fix am Robotersystem integriert sind wird dazu keine zusätzliche Hardware benötigt, es steigt jedoch die Komplexität der Software. Durch Scannen der Umgebung in einer Ebene wird eine zweidimensionale Karte erstellt. Ungenauigkeiten der Kartenerstellung ergeben sich durch Störeinflüsse, fehlerhafte Sensormesswerte und durch mit zunehmendem zurückgelegten Weg größer werdende Fehler aufgrund der Odometrie (vgl. Kapitel 5.1.4 auf Seite 85). Herausforderungen für die Kartenerstellung sind ähnlich aussehende Gebiete des Reinraums, die in der Software unterschieden werden müssen. Abhilfe schafft hier eine mit einbezogene übergeordnete Grobnavigation zur Unterstützung der Lasersensordaten. Allgemeine Schwierigkeiten ergeben sich bei der Kartenerstellung durch geschlossene Kreise in Gebäuden. Hierbei kommt der mobile Roboter von einer anderen Richtung zurück an eine bereits vermessene Stelle. Die Erkenntnis, dass der Roboter an dieser Stelle bereits gewesen ist, ist für das System schwer zu erlangen. Durch odometrische Unsicherheiten wird das noch zusätzlich erschwert. Abbildung 5.6 zeigt diesen Sachverhalt. In Abbildung 5.6 links ist der Idealfall dargestellt, wo die Karte perfekt erstellt und der geschlossene „Kreis“ erkannt wurde. In Abbildung 5.6 in der Mitte ist der reale Fall zu sehen. Das System erkennt von vorne herein nicht, dass es in bereits vermessenes Gebiet kommt und erstellt

weiter eine neue Karte. Eine automatische softwaretechnische Nachbearbeitung der Karte ist notwendig. Der Großteil des Reinraumgebietes ist jedoch wie in Abbildung 5.6 rechts mit Fingern aufgebaut, wodurch dieses Problem nicht auftritt. Trotzdem sollte die Erkennung von bereits befahrenem Gebiet im Falle der Verwendung von SLAM bei dem System FIRE mitbedacht werden. Vor allem in den älteren Hallen treten teilweise geschlossene Kreise im Reinraumgebiet auf.

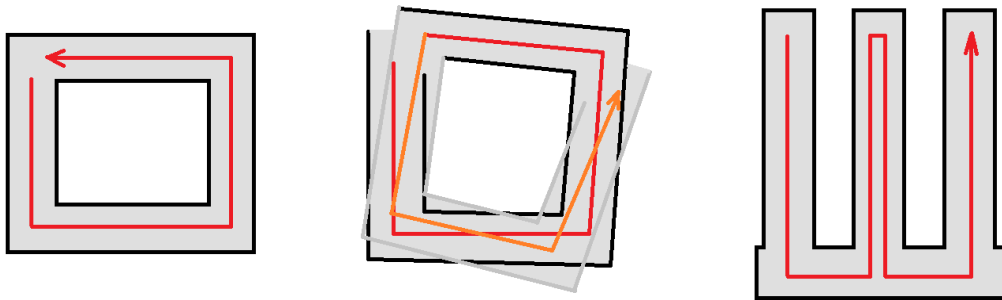


Abbildung 5.6: Herausforderung für die Wiedererkennung von bereits befahrenen Abschnitten beim Auftreten von geschlossenen "Kreisen" bei der Kartenerstellung; der Idealfall (links) und ein nicht optimaler, jedoch üblicher Realfall (Mitte); bei Fingern in Hallen kommt das Problem nicht zum Tragen (da keine geschlossenen Pfade).

- *Mapping mit Operator*

Ein Großteil der erwähnten Schwierigkeiten beim Mapping kann erschlagen werden, wenn das Mapping von einem Operator durchgeführt wird. Das stellt eine Mischung der beiden vorhergehenden Punkte dar. Ein Operator kann an gewissen klar definierten Stellen einen rotierenden Laserscanner platzieren, der die Umgebung scannt. Dieser Schritt wird an ein paar signifikanten Stellen wiederholt und eine Kartenerstellung ohne odometrische Unschärfe ist möglich. Auch wenn diese Variante verlockend erscheint, werden hier die ersten beiden Varianten empfohlen. Zu Beginn sollte für einen Prototypen eine vorgegebene Karte verwendet werden, die später in einer großflächigen Umsetzung in Form eines Rollouts im Reinraum durch eine SLAM-Lösung ersetzt wird. Die Zukunft bei mobilen Systemen deutet klar auf eine integrierte Kartenerstellung beziehungsweise Kartenaktualisierung hin. Mapping durch den Operator erfordert zusätzlichen regelmäßigen Aufwand der durch einen SLAM-Algorithmus in

Software umgesetzt werden sollte, um Personal, Kosten, Zeit und Aufwand zu sparen.

5.3 Lokalisierung

Unter Lokalisierung des Roboter-Systems wird die Bestimmung der Position in einer vorgegebenen Karte verstanden. Bei Lokalisierung wird zwischen Positions-Tracking und globaler Lokalisierung unterschieden. Die einfachere Variante, Positions-Tracking, bei der die Anfangsposition bekannt ist, wird bei Infineon soweit möglich globaler Lokalisierung mit unbekannter Anfangsposition vorgezogen. Dabei hilft eine Referenzierung an der Akkuwechselstation Power Home. Trotzdem sollte eine globale Lokalisierung unbedingt mit betrachtet werden. Einen triftigen Grund für globale Lokalisierbarkeit stellt auch das Kidnapped-Robot-Problem dar. In [TBF06] wird dies als Kidnappen und Teleportierung des Roboters an eine andere Stelle beschrieben. Dies tritt beispielsweise bei durchdrehen der Räder des Roboters oder andere nicht aufgezeichnete Bewegungen auf. Bei dem aktuell in der Linie eingesetzten Scitos-Roboter von Metralabs führte in seltenen Fällen ein bewusstes Aufheben und Verdrehen oder „Verstecken“ des Roboters durch rein odometrische Navigation zu Unmöglichkeit weiterer Navigation und Lokalisierung. Hierbei glaubt der Roboter zu wissen, wo er sich befindet, bewegt sich auf der Basis dieser falschen Annahmen und findet sich im Raum nicht mehr zurecht. In der Fähigkeit sich von Kidnapping aufgrund von Fehlern oder bewusster Beeinflussung zu erholen wird die Stärke eines Lokalisierungsalgorithmus gemessen.

Aus Informationen der Karte, den aktuellen Messwerten der Sensoren und aktuellen Ansteuerungsbefehlen an die Räder wird der Standort des Roboters in x-Koordinate, y-Koordinate und Winkel bestimmt. Bei dem hier vorgeschlagenen System Neobotix MPO-700 wird diese Aufgabe vom internen Bordrechner übernommen und liefert die Positionsdaten in Form von Variablen an die übergeordnete Steuerung. Über Koordinatentransformationen wird aus den erfassten Daten des Roboters auf die Position im Raum geschlossen. Dazu ist für das System FIRE aufgrund der möglichen Bewegung in einer zweidimensionalen Ebene eine Transformationsmatrix als Kombination der folgenden Matrizen (5.1) bis (5.4) notwendig.

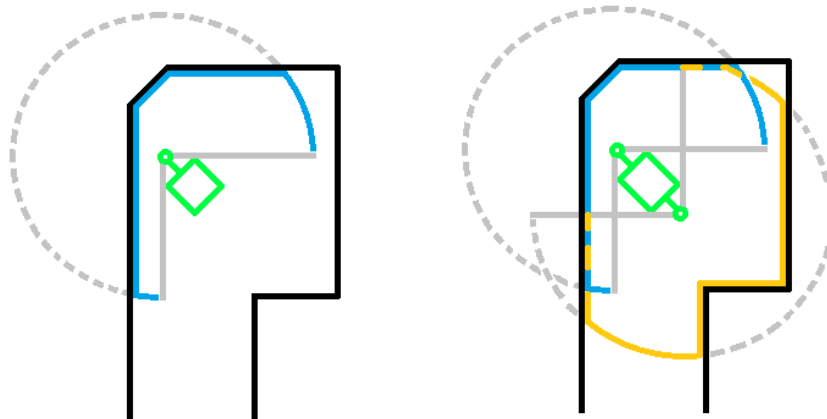
$$\text{Skalierungsmatrix } S = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$\text{Spiegelungsmatrix } M = \begin{pmatrix} 0 & m_x & 0 \\ m_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

$$\text{Rotationsmatrix } R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$\text{Translationsmatrix } T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Für die Lokalisierung des Roboters werden als Hauptsensoren die vorne und hinten am FIRE montierten Laser-LIDAR-Sensoren verwendet. Diese geben in einer möglichen hier untersuchten Variante Entfernungswerte in einem Winkelbereich von 270 Grad wieder. In Abbildung 5.7(a) ist ein Robotersystem mit einem Laserscanner und zugehörigem Messbereich am Ende eines Reinraumfingers dargestellt. Abbildung 5.7(b) zeigt denselben Sachverhalt mit 2 Laserscannern, die vorne und hinten am Shuttle montiert sind.

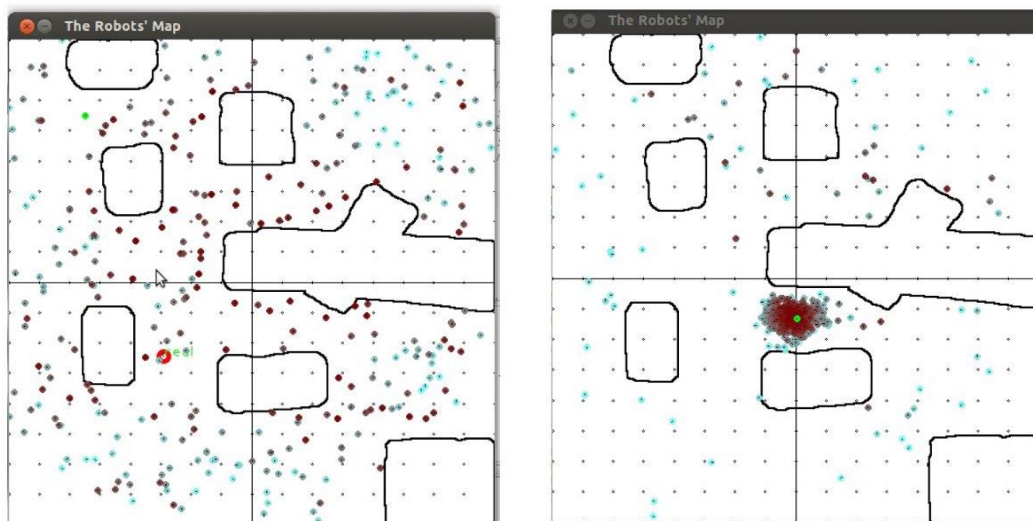


(a) Robotersystem mit einem Laserscanner und zugehörigem Messbereich.
 (b) Robotersystem mit zwei Laserscannern und zugehörigem Messbereich.

Abbildung 5.7: Robotersystem am Ende eines Reinraumfingers mit Messbereich der Laser-LIDAR-Sensoren.

Für das Projekt FIRE sollten diese Werte unter Verwendung von Wahrscheinlich-

keitsrechnung die Ermittlung der Position des Roboters im Reinraum ermöglichen. Die hier favorisierte Umsetzungsvariante ist ein sogenannter Partikelfilter. Hierbei werden, wie in der Simulation in Abbildung 5.8(a) dargestellt in Software virtuelle Roboter, Partikel genannt, über die gesamte Karte verteilt. Deren theoretische Lasersensoreingänge werden mit den tatsächlich gemessenen verglichen. Die Partikel, deren Sensordaten am wenigsten mit denen des echten Roboters übereinstimmen, werden entfernt und unter Verwendung einer Gauß-Verteilung nahe der Partikel mit der größten Übereinstimmung positioniert. Durch viele Iterationen im Programm entsteht so eine Partikelwolke rund um die tatsächliche Position des Roboters (siehe Abbildung 5.8(b)). Eine tatsächliche Anwendung dieser Lokalisierungsmethode an einem echten Robotersystem durch den Verfasser der Arbeit war bereits in Abbildung 5.3 auf Seite 86 zu sehen.



(a) Zu Beginn des Algorithmus werden virtuelle Roboter (Partikel) über die gesamte Karte verteilt [Hen13].
 (b) Nach einer endlichen Anzahl an Iterationen wird innerhalb kurzer Zeit die tatsächliche Position des mobilen Roboters gefunden (grüner Punkt umgeben von Punktwolke) [Hen13].

Abbildung 5.8: Partikelfilter zur Lokalisierung des mobilen Robotersystems in einer vorhandenen Karte.

Der Farbverlauf der einzelnen Partikel von hellblau zu rot zeigt zunehmende Übereinstimmung der Sensordaten der Partikel mit denen des echten Roboters. Der hellgrüne Punkt symbolisiert die durch den Partikelfilter ermittelte Position, die mit der tatsächlichen Position zu einer definierten Genauigkeit übereinstimmt. Ein gewisser

Prozentsatz der Partikel, in dieser Simulation zehn Prozent, wird weiterhin gleichverteilt über die gesamte Karte positioniert um das Kidnapped-Robot-Problem zu adressieren. Abbildung 5.9 zeigt in der Simulation, wie sich der Roboter von Kidnapping erholt. Die obere Punktwolke zeigt die Position des Roboters an der er sich laut normalem Programmablauf befinden sollte. Die untere Punktwolke zeigt, dass aus einem der willkürlich gleichverteilten Partikel die neue tatsächliche Position des Roboters gefunden wird.

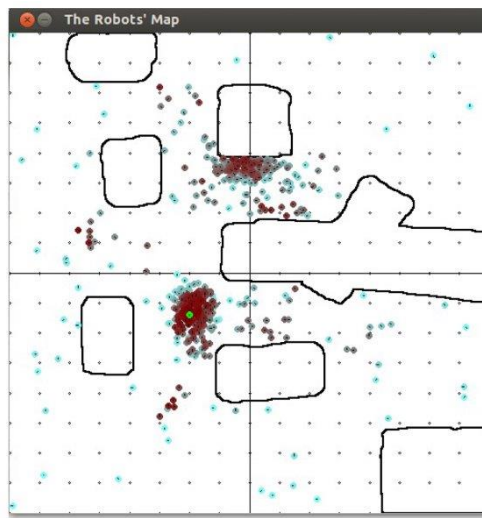


Abbildung 5.9: Roboter erholt sich von Kidnapping [Hen13].

Die Umsetzung der Verteilung der Partikel erfolgt in der Simulation unter Verwendung der Resampling-Methode „Stochastic Universal Filtering“. Es handelt sich hierbei um eine Variation der Roulette Wheel Selection. Stochastic Universal Filtering stellt sicher, dass die tatsächliche Auswahlhäufigkeit jedes Partikels mit der erwarteten übereinstimmt. Hat ein Partikel bei 100 Prozent Resampling eine Wahrscheinlichkeit von 7,5 Prozent und es werden 100 Partikel resampled, tritt dieses 7 oder 8 mal auf. Standard Roulette Wheel Selection gibt diese Garantie nicht. Die Umsetzung in diesem Beispiel ist in der Abbildung 5.10 zu sehen. Das Gewicht beziehungsweise die Größe der Werte q_1 bis q_{10} definieren die relative Übereinstimmung der Lasersensordaten der in der Karte definierten Partikel 1 bis 10 mit den tatsächlich vom Robotershuttle gemessenen. Die Gewichte werden sortiert und skaliert, sodass ihre Summe 1 ergibt. Es werden so lange neue Partikel aus einem vorhandenen erstellt, bis akt größer als die jeweilige $summe_q$ ist, dann wird die $summe_q$ erhöht und aus dem nächsten Partikel so viele neue erstellt, bis wieder akt größer als die jeweilige

summe_q ist. Das wird nur gemacht, wenn zu Beginn akt kleiner als summe_q ist und akt kleiner gleich 1 ist, d.h. das Ende des aufgebogenen Roulette-Rades noch nicht erreicht ist. ao bedeutet Anzahl Offspring und gibt an, wie viele neue Partikel erstellt werden. Beispielsweise wird in dieser schematischen Darstellung das Partikel mit dem Namen und Gewicht q_1 drei Mal mit einer vorgegebenen Gauß-Verteilung repliziert. Partikel q_2 erscheint danach zwei Mal nahe dem ursprünglichen Partikel q_2 auf der Karte. Partikel q_3 bis q_7 werden jeweils einmal wieder in der Karte vermerkt und Partikel q_8 bis q_{10} fallen heraus. Abhängig von der zufällig zwischen 0 und $1/\text{ao}$ gewählten Verschiebung v der Zeiger können alle Partikel q_1 bis q_{10} getroffen werden. Die Zeiger sind nicht zu verwechseln mit Zeigern im programmiertechnischen Sinn. Betrachtet man statt dem aufgebogenen Roulette-Wheel das originale runde, kann der Verschiebung v jede beliebige Zahl zugewiesen werden, da ein Kreis per Definition kein Ende hat. Daher rührt auch der Name Roulette Wheel Selection, von welcher der hier präsentierte Prozess Stochastic Universal Filtering abgeleitet ist.

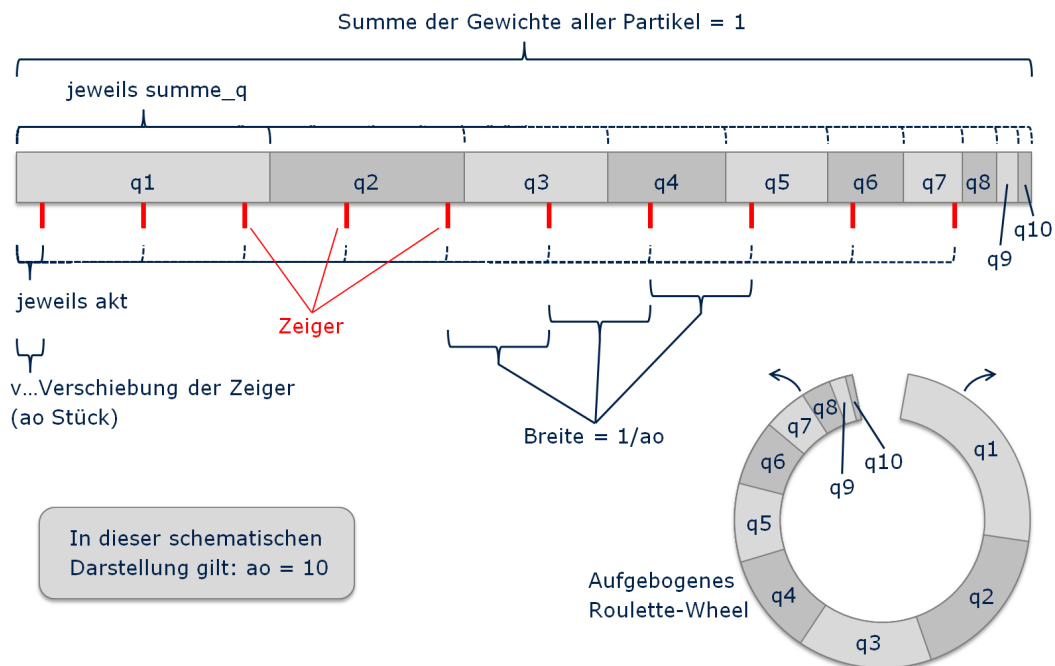


Abbildung 5.10: Funktionsweise von Stochastic Universal Filtering.

5.4 Bewegungsmodell

Die Bewegung des Robotershuttles im Reinraum ist prinzipiell mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Diese entsteht durch kleine Abweichungen bei Sensoren und Aktuatoren und ergibt einen Unterschied zwischen geplanter Fortbewegung und tatsächlich zurückgelegtem Weg. Je weiter sich das Shuttle fortbewegt, umso mehr steigt diese angesammelte Unsicherheit. Um die zukünftige Bewegung des Roboters für einen oben beschriebenen Partikelfilter vorausszusagen wird ein Bewegungsmodell (Motion Model) erstellt. In der Literatur, beispielsweise in [RG13] werden für mobile, in einer Ebene frei verfahrbare Roboter zwei verschiedene Bewegungsmodelle, das geschwindigkeitsbasierte und das odometriebasierte Bewegungsmodell, vorgestellt. Ersteres basiert auf der Tatsache, dass zur Fortbewegung eines mobilen Systems im Programm des Anwenders meist translatorische und rotatorische Geschwindigkeitsbefehle übergeben werden. Für einen Test wurde das geschwindigkeitsbasierte Bewegungsmodell implementiert. Es wird die zukünftige Pose, d.h. Position in der Ebene und Winkel, vorhergesagt. Sie ist abhängig vom aktuellen Zustand, vom Bewegungsbefehl und von der Zeitspanne, die in die Zukunft geblickt wird. Das umgesetzte Modell ist von einigen Parametern abhängig.

- *Anzahl der vorhergesagten Hypothesen*

Je mehr Samples verwendet werden, desto näher kommt die diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung einer kontinuierlichen. Mehrere Werte benötigen allerdings mehr Rechenzeit und bringen ab einer gewissen Anzahl keine signifikanten Vorteile mehr.



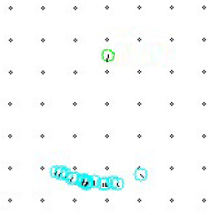


- *Zeitspanne, wie weit in die Zukunft geblickt wird*

Für das System FIRE wird eine Zeitspanne von zwei bis drei Sekunden vorgeschlagen. Ein weites Vorausblicken in die Zukunft ist sinnvoll, wenn sich Bewegungsbefehle kaum ändern. Wenn der mobile Roboter zum Beispiel viel Platz vor sich hat und hauptsächlich geradeaus fährt, kommt die Abschätzung der zukünftigen Pose des Roboters sehr nahe an die tatsächliche zukünftige Pose heran.

- *Error-Parameter*

Diese Robotershuttle-spezifischen Parameter modellieren die Genauigkeit des Shuttles. Sie werden umso größer, je ungenauer der Roboter ist. Tabelle 5.2 zeigt

Tabelle 5.2: Error-Parameter im Bewegungsmodell [Hen13].

| Parameter | Screenshot |
|--|--|
| Faktor vor der Geschwindigkeit beeinflusst die Varianz in x-Richtung |  |
| Faktor vor der Winkelgeschwindigkeit beeinflusst die Varianz beim Drehen |  |
| Faktor vor der Geschwindigkeit geht auf Abweichungen im Winkel beim Geradeausfahren ein |  |
| Faktor vor der Winkelgeschwindigkeit geht auf Abweichungen im Winkel beim Drehen ein |  |
| Zusammenstellung oben hervorgehobener Error-Parameter mit für das System FIRE realistischen Abweichungen zur besseren Sichtbarkeit mit dem Faktor 30 multipliziert |  |

in der Simulation in einer Testumgebung speziell hervorgehobene Errorparameter und eine übliche Zusammenstellung als Kombination dieser. Der einzelne grüne Punkt mit dem schwarzen Strich zeigt die aktuelle Position des mobilen Shuttles an und die türkise Punkte-Ansammlung zeigt mögliche zukünftige Positionen nach einer vorgegebenen Zeit.

5.5 Pfadplanung

Ist nun für die Navigation eine Karte vorhanden, die aktuelle Position des Shuttles in der Karte bekannt und ein Bewegungsmodell erstellt, gilt es nun einen geeigneten Pfad zwischen aktueller Pose und Zielpose zu finden. Ein Beispiel dazu bietet der in Abbildung 5.11 dargestellte zurückzulegende Weg in einem Finger bei einem typischen Entladeprozess bei Infineon. Das FIRE-Shuttle sollte automatisch den Pfad vom Startpunkt, wo eine Horde aus dem Loadport (LP) entnommen wurde zum Zielpunkt, wo die Horde in eine Box in einem Equipmentbuffer (EQB) gestellt wird, finden.

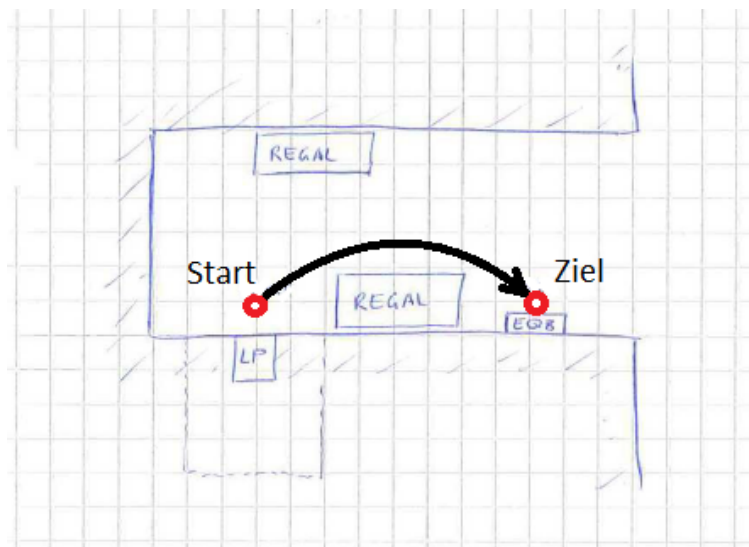


Abbildung 5.11: Aufgabenstellung: Zurückzulegender Weg bei einem typischen Entladeprozess.

Mit Daten der Geometrie und Kinematik des Robotersystems FIRE kann eine Pfadplanung erstellt werden. Zur Errechnung einer optimalen kollisionsfreien Trajektorie werden unterschiedliche Qualitätsmerkmale der Wegberechnung mit einbezogen. Erste Priorität bei der Bestimmung des Pfades hat die Minimalisierung der Verfahrzeit

des Shuttles. Unterschiedliche erlaubte Geschwindigkeiten, je nachdem ob sich eine leere Horde, eine volle Horde oder keine Horde am Greifer des Roboterarms befindet und durch welche Bereiche des Reinraums Teiltrajektorien führen, bestimmt den zeitoptimalen Weg. Weitere Kriterien für den bestmöglichen Weg zwischen Hordenaufnahme und Hordenpositionierung sind Minimierung der Länge der Bahn, der Rotation des Roboters und der Rechenzeit, die zur Ermittlung der Trajektorie benötigt wird. Nähere Informationen dazu finden sich in [Vin13]. Da nicht nur die unmittelbare Umgebung des FIRE-Shuttles sondern über die Karte der gesamte Arbeitsraum zwischen aktueller Position und Ziel bekannt ist wird eine globale Bahnplanung möglich. So kann auch das Wissen über Bereiche, die der Roboter nicht einsehen kann zur Ermittlung der optimalen Trajektorie verwendet werden. Auch der durch Sensoren am Shuttle am Startpunkt nicht wahrnehmbare Zielbereich hinter dem Regal wird in die Berechnung mit einbezogen.

5.5.1 Potentialfeld

Es existiert eine Reihe unterschiedlicher Möglichkeiten zur Pfadplanung. So kann beispielsweise der Arbeitsraum in Unterbereiche unterteilt werden, die als besetzt oder frei definiert werden. Eine solche in der mobilen Robotik als Occupancy Grid Map bezeichnete Karte mit fixen oder adaptiven Zellgrößen kann mit 2D- oder 3D-Suchbäumen durchlaufen werden. Weitere Pfadplanungsmöglichkeiten bieten Sichtbarkeitsgraphen oder Voronoi-Diagramme. Die für das System FIRE bei Infineon vielversprechendste Variante sind Potentialfelder. Abbildung 5.12 zeigt für die in Abbildung 5.11 dargestellte Aufgabe und Karte ein im Navigationsprogrammcode erstelltes Potentialfeld grafisch aufbereitet. Hierbei wird über der zweidimensionalen Karte ein Vektorfeld aufgespannt, dessen negativer Gradient an allen Stellen der zweidimensionalen Karte in Richtung des Ziels zeigt. Würde man am Startpunkt oder an jedem anderen freien Punkt im Plan eine Murmel auf dieses virtuelle Gradientenfeld legen, würde diese automatisch zum Zielpunkt rollen. Das linke obere Bild in Abbildung 5.12 zeigt ein Potentialfeld ohne Beachtung von Hindernissen. Es modelliert den leeren unverstellten Reinraumfinger. Das rechte obere Bild zeigt die Verarbeitung der Hindernisse, hier Reinraumregale, im Gradientenfeld. Durch Überlagerung dieser beiden Felder und Vermeidung lokaler Minima entsteht eine endgültige dreidimensionale Oberfläche zur Realisierung des idealen Pfades.

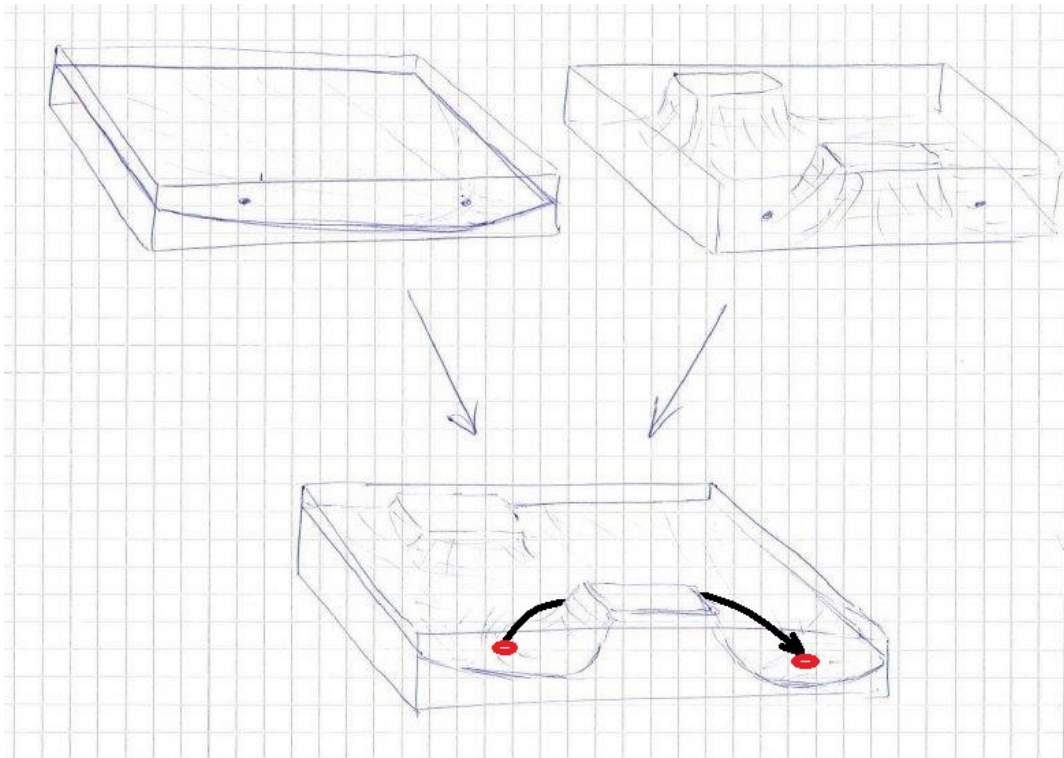


Abbildung 5.12: Ein Gradientenfeld zwischen Start- und Zielpunkt (links oben) in Verbindung mit einem zum Modellieren von Hindernissen (rechts oben) ergibt ein virtuelles Gradientenfeld nach dem das mobile Robotersystem zum Ziel gelangt. Der Roboter ist hierbei vergleichbar mit einer hinabrollenden Murmel.

5.5.2 Go- und NoGo-Areas

Eine mögliche Navigationsunterstützung bietet das Setzen von Bereichen in einer Karte, in denen sich das Robotersystem aufhalten darf, sogenannte Go-Areas und Bereiche, die das System nicht befahren sollte, als NoGo-Areas bezeichnet. Das Kartenmaterial kann von den vorhandenen AutoCAD-Plänen der Hallen bei Infineon mit der Wahl der passenden Layer übernommen werden. Im Arbeitsbereich werden dem Roboter einzelne Positionen übermittelt, die er durch Passieren von Go-Areas erreicht. Die momentan bei Infineon eingesetzten mobilen Scitos-Roboter verwenden unter anderem ein ähnliches System in Kombination mit Odometrie. Auch bei dem FIRE-System wird das Definieren von Bereichen geplant, weil durch geringen Aufwand viele Kollisionen mit unterschiedlichsten ortsfesten Hindernissen, wie der in Abbildung 3.1(b) auf Seite 37 beispielhaft erwähnten Tastatur von vorne herein verhindert werden können. Im Falle der Realisierung über Potentialfelder bringen Go-Areas keine Veränderung und NoGo-Areas eine additive Potentialerhöhung ähnlich der Modellierung eines Hindernisses in Abbildung 5.12 rechts oben.

5.5.3 Veränderliche Hindernisse

Ein klares Merkmal der Halbleiterproduktion bei Infineon allgemein und besonders am Standort in Österreich ist eine Vielzahl an variablen Objekten im Reinraum. Dazu zählen nicht nur Operatoren sondern auch Regale, Rollregale und Transportwagen, manchmal sogar Sessel oder Werkzeugkoffer. Die Verarbeitung dieser in der Position veränderlichen Hindernisse kann auf zwei verschiedene Varianten erfolgen. Entweder die Sensordaten werden unabhängig von den Potentialfeldern verarbeitet oder integriert. Hier wird bevorzugt, variable Hindernisse als überlagerte Gradientenfelder zu modellieren. Dadurch ergeben sich während der Shuttlebewegung zeitlich veränderliche Potentialfelder. Hier werden auch maximale Geschwindigkeiten veränderlicher Hindernisse betrachtet. Im Reinraum übliche Geschwindigkeiten werden in der Berechnung berücksichtigt, während Ausnahmefälle anders behandelt werden und nicht zur Optimierung der Pfadplanung herangezogen werden. Darunter werden Fälle wie das Flüchten eines Operators vor Feuer oder Gas verstanden, wo dieser läuft so schnell er kann. Hier treten andere Routinen in Kraft. Versuche während des Programmablaufes veränderlicher Potentialfelder wurden an der Testplattform Pioneer P3-DX, zu sehen in Abbildung 5.3 auf Seite 86, durchgeführt und die Umsetzungsmöglichkeit auf einer mobilen Roboterplattform vergleichbar mit dem FIRE-Shuttle gezeigt. Genauere Informationen zur möglichen Modellierung der Pfadplanung mobiler Roboter

in einer Umgebung mit veränderlichen Hindernissen bietet [Fah09].

5.5.4 Multiroboterbetrieb

Bei der Pfadplanung der FIRE-Systeme gilt es auch den Fall zu beachten, dass sich zwei dieser Systeme im Reinraum begegnen. Hierbei sollten die Roboter nicht kollidieren oder sichgegenseitig den Weg versperren. Eine klar nachvollziehbare Herangehensweise ist hierbei die Behandlung anderer Roboter als oben vorgestellte veränderliche Hindernisse. Als Basis wird dies als vernünftig gesehen, kann aber durch zusätzliche bekannte Informationen über den Roboter ausgebaut werden. Jeder Roboter erfährt seine aktuelle Position über das Leitsystem. So kennt das Leitsystem die Positionen aller im Reinraum befindlicher Roboter und kann diese als bekannte veränderliche Hindernisse im aktuellen Gradientenfeld einzelner Roboter einbinden. Die Pfadplanung kann schon vor Wahrnehmung eines anderen Roboters durch Sensoren durch Informationen des Leitsystems optimiert werden. Dabei bekannte Daten des Roboters wie räumliche Ausdehnung, aktuelle Geschwindigkeit und Ausrichtung im Reinraum zusätzlich im Gradientenfeld beachtet werden.

5.5.5 Sensoren im Reinraum

Zur Erfassung veränderlicher Hindernisse können zusätzlich zu am Roboter montierten Sensoren fix in den Reinraum integrierte Sensoren verwendet werden. Die ermöglicht eine globalere Wahrnehmung von beweglichen Hindernissen auch außerhalb des Sichtfeldes des mobilen FIRE-Systems. Beispiele dafür bieten Infrarotlichtschranken oder PIR-Sensoren (engl. Passive Infrared), auch als Bewegungsmelder bekannt. In der aktuell vorgeschlagenen Systemkombination sind weitere im Reinraum angebrachte Sensoren nicht mit einbezogen.

5.6 Stati-Check

Bei dem aktuellen Beladesystem iRobotics ist eine Kamera zur Erkennung gewisser Zustände montiert. Während der Beladung wird an fixen Stellen im Programmablauf überprüft, ob die Clips der Boxen vom Operator geöffnet wurden, ob sich eine Horde in der geöffneten Box im Boxennest befindet und ob sich eine Horde am Loadport befindet. Auch bei dem zukünftigen mobilen System FIRE sollen diese Zustände überprüft werden, um ein Fehlverhalten oder eine Kollision des Roboters zu verhindern. Um eine optimale Funktion dieses Systems zu gewährleisten, werden auftretende Feh-

ler bei der momentanen Lösung analysiert und in die Planung des FIRE eingebracht. Geringe Veränderungen der Lichtverhältnisse in der Linie verhindern bei der aktuell verwendeten Kamera bereits die korrekte Erkennung der Zustände. Vor allem das korrekte Unterscheiden von offenen und geschlossenen Clips funktioniert beispielsweise bei Neueinbringung einer Reinraumwand nicht mehr reibungslos und muss neu kalibriert werden. Eine bei dem mobilen System FIRE zukünftig verwendete Kamera soll resistenter gegenüber unterschiedlichen Lichtverhältnissen sein. Auch ein absichtliches oder unabsichtliches Anstoßen eines Operators an der Kamera kann das fehlerfreie Überprüfen der Zustände verhindern.

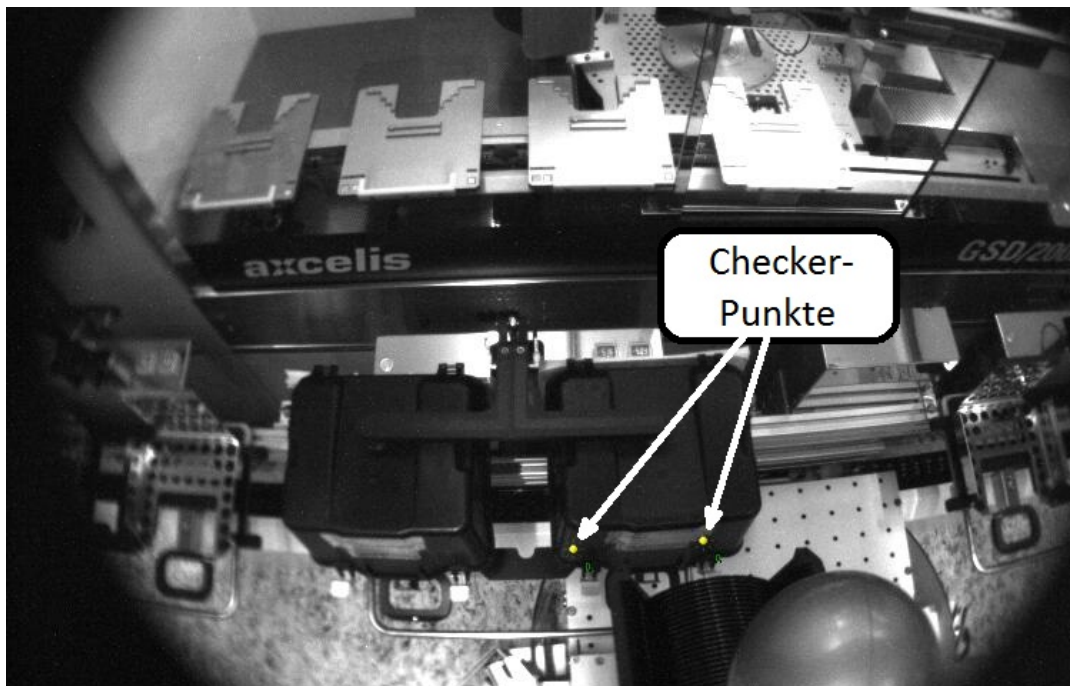


Abbildung 5.13: Blickfeld der aktuell verwendeten Checker-Kamera, wobei die Kamera und somit die hell eingezeichneten Kontrollpunkte im Bild um wenige Zentimeter nach oben und nach links verschoben sind. Es kann so nicht mehr verlässlich überprüft werden, ob die Clips der Box geöffnet sind [Inf].

Dieser Fall ist in Abbildung 5.13 zu sehen. In dem von der Kamera gelieferten Bild sind die hell eingezeichneten Kontrollpunkte um wenige Zentimeter nach oben und nach links verschoben und können den korrekten Status nicht mehr verlässlich ausgeben. Im Gegensatz zu dem fix an der Schiene gelagerten iRobotics-System beträgt die Wiederholgenauigkeit der Präzision des frei verfahrbaren Shuttles nicht

wenige Zehntel Millimeter sondern ungefähr 20 bis 30 Millimeter. Dadurch ist bei fixer Montage der Kamera am Shuttle die Verwendung der aktuellen Kamera ausgeschlossen. Eine Kamera mit Mustererkennung (Pattern Recognition) bietet hier eine vielversprechende Lösung. In Abbildung 5.14 sind die am iRobotics-System montierte Checker-Kamera und das hier vorgeschlagene Nachfolgemodell In-Sight 7000 gezeigt. Die in [Cog13] genauer beschriebene In-Sight Serie bietet neben Autofocus, integrierter Beleuchtung und einer Reihe unterschiedlicher Linsen die für die Anwendung bei FIRE wichtige Funktion zur Teilelokalisierung namens PatMax. Hier werden durch geometrisches Pattern Matching Teile oder Merkmale im Bildbereich der Kamera lokalisiert. Ohne sich auf bestimmte Grauwerte zu verlassen wird unter Verwendung von begrenzenden Kurven unabhängig von Pixelrastern nach ähnlichen Formen im Bild gesucht.



Abbildung 5.14: Am iRobotics-System montierte Checker-Kamera (links), vergrößert (Mitte) und ein Modell, welches Stati Check für ein mobiles Beladesystem übernehmen kann, sofern benötigt.

5.7 Arm-Präzision

Aufgabe des Systems FIRE ist das präzise Aufnehmen und Positionieren von Horden mit Wafern. Dazu muss der TCP eine Genauigkeit von 0,5 Millimetern erreichen. Bei einem im Verhältnis zum handzuhabenden Objekt fix montierten Roboterarm kann eine wiederholt durchzuführende Handlungsaufgabe einmal programmiert werden und der Roboterarm führt diese Bewegung immer wieder aus. Da bei dem System FIRE der Roboterarm jedoch auf einer mobilen Basis montiert ist und Horden außerhalb dieser Basis handhaben soll, ergibt sich eine Unsicherheit des Befestigungspunktes des Roboters, die eine Unsicherheit der TCP-Pose mit sich bringt. Diese in Abbildung

5.15 veranschaulichte Unsicherheit betrifft prinzipiell die Freiheitsgrade des mobilen Shuttles. Sie kann unter Beachtung in der Industrie üblicher Variablenbezeichnungen in die folgenden drei Komponenten unterteilt werden, wobei als Referenzsystem je nach Präzisionstechnik beispielsweise ein Teil der Anlage, ein Loadport oder ein EQB zu sehen ist.

- Δz gibt die Unsicherheit des Abstandes z zwischen dem mobilen System und einem fixen Referenzsystem an. Dieser Abstand wird hier im rechten Winkel zur seitlichen Begrenzung des Shuttles in der Mitte zwischen vorderem und hinterem Ende des Shuttles angenommen.
- Δx gibt den seitlichen Versatz des Shuttles in x -Richtung zu einem Referenzsystem im Verhältnis zu einem idealen Versatz von Null an.
- $\Delta\alpha$ bezeichnet die Abweichung von $\alpha = 90$ Grad dem gewünschten Winkel zwischen der gedachten Linie, die den Abstand z beschreibt und der horizontalen Achse des Referenzsystems (x -Achse). Der Winkel ist ein Maß für die Verdrehung des Shuttles und vergleichbar mit dem Azimut, Gier- oder yaw-Winkel.

Um von der durch Lasernavigation erreichbaren Genauigkeit von 30 Millimetern bis zu 20 Millimetern in z - und x -Koordinate und einer Winkelunsicherheit von $\pm 3,5$ Grad auf die notwendige Präzision bei der Feinpositionierung zu kommen gibt es unterschiedliche Herangehensweisen, die auf mechanischen und optischen Verfahren beruhen. Eine Übersicht der im Folgenden präsentierten Lösungen ist in Abbildung 5.16 zu sehen.

5.7.1 Andockvorrichtung

Eine bei der Spannungsversorgung in Kapitel 4.2 auf Seite 70 erwähnte Andockvorrichtung an einer Maschine schafft durch eine mechanische Verbindung auch eine höhere Präzision. Durch mechanisch geführte Annäherung mittels keilförmiger zueinander passender Gegenstücke, zupackender oder heranziehender Greifer oder anderen Varianten des Einrastens kann das Robotersystem fix mit der zu beladenden Anlage verbunden werden. Bei den unterschiedlichen Varianten gibt es jeweils die Möglichkeit die Intelligenz und den Aktuator entweder am Shuttle oder am der Andockvorrichtung anzubringen. Das Anbringen am Shuttle ist aufgrund der geringeren Anzahl an Shuttles verglichen mit der Anzahl der notwendigen Andockpunkte sinnvoller, bringt aber neue Systeme auf die mobile Beladeinheit, die Platz, Gewicht und Energie benötigen.

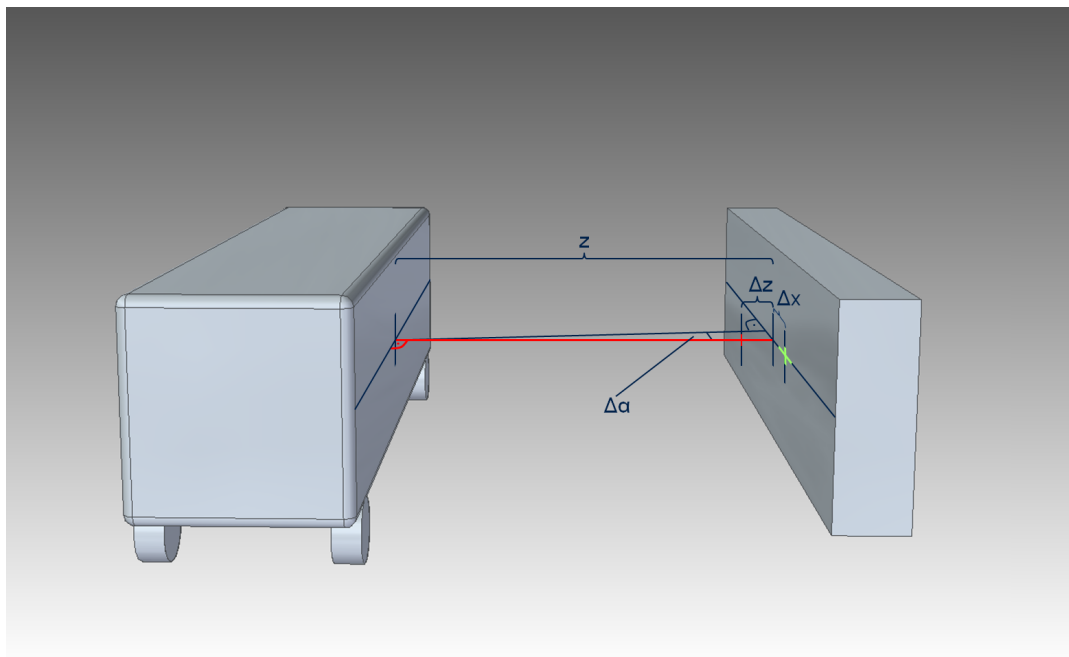


Abbildung 5.15: Notwendige Koordinaten für Präzision, ermittelt zwischen mobilem System (links) und Referenzsystem an der Wand (rechts).

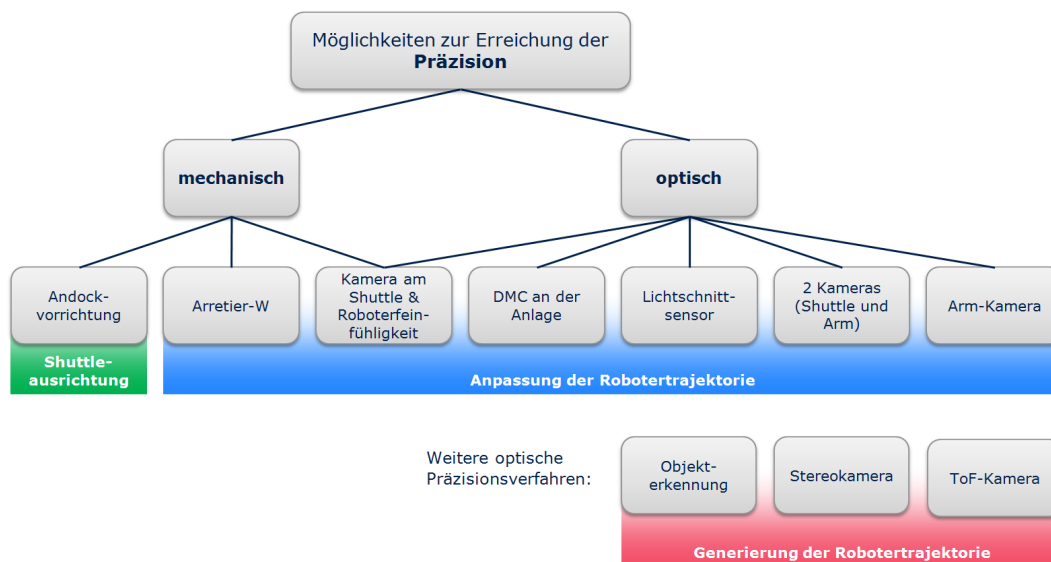


Abbildung 5.16: Übersicht über Varianten zur Erreichung der Präzision.

Auch wenn diese Lösungsmöglichkeit viele Vorteile bringt, werden andere Varianten bevorzugt. Das geschieht unter anderem aus reinraumtechnischen Gründen, wegen entstehender Vibrationen und wegen kosten- und aufwandsintensiver Installation von Andockmechanismen an allen Roboterhandhabungsplätzen wie Loadports und EQBs.

5.7.2 Einrasten durch Roboterfeinfühligkeit

Mit Ausnahme der erwähnten mechanischen Andockvorrichtung ist eine oben angesprochene Präzision von 0,5 Millimetern durch ein Ausrichten des Shuttles nicht, beziehungsweise nur unter extrem hohen, nicht rentablen Kosten erreichbar. Die begrenzten Möglichkeiten zur Erreichung der Genauigkeit durch Steuerung der Shuttlebewegung fordern neue Ansätze zur akkuraten Positionierung der Horde. Daraus ergibt sich die Möglichkeit der Anpassung der Robotertrajektorie zum Ausgleich der Restabweichung, um welche das Shuttle versetzt zum ideal anzufahrenden Punkt zu stehen kommt. Die Präzision des TCP wird so nicht durch aufwändige Veränderung der Shuttleposition, sondern durch Abänderung der programmierten Roboterarmbewegung aufgrund von unterschiedlichen Sensoreingängen erreicht. Eine Umsetzungsvariante dazu ist die Zusammenarbeit einer am Shuttle montierten Kamera mit im Roboterarm integrierter Feinfühligkeit. Aufbauend auf programmierten Roboterarmtrajektorien kann die Kamera die Position des Loadports grob ermitteln. Feinpositionierung erfolgt dann durch im Roboterarm integrierte Momentensensoren in Kombination mit dem von Kuka angebotenen automatischen feinfühligem Fügeprozess. Die haptische Wahrnehmung, durch die der Operator beim Beladen der Maschine das korrekte Einrasten der Horde an der Arretierung des Loadports feststellt, kann so auch vom mobilen Manipulator genutzt werden. Obwohl diese Technik kosteneffizient umsetzbar ist und bereits im Roboterarm enthaltene Sensoren verwendet, gibt es triftige Gründe, die gegen diese Sensorkombination zur Erreichung der Präzision sprechen. Neben Fehleranfälligkeit, steigender Komplexität aufgrund unterschiedlichster Ausprägungen von Loadports und Herausforderungen beim Aufnehmen der Horde ist vor allem der Produktschutz ein schlagendes Gegenargument. Vibrationen, Erschütterungen und Stöße gilt es bei produktiven Wafeln im Reinraum unbedingt zu vermeiden. Ein darauf aufbauendes System ist in Hinblick auf geringe Ausfallraten und hohe Ausbeute schwer zu argumentieren.

5.7.3 Arretier-W

Eine weitere jedoch rein mechanische Idee zur präzisen Positionierung, welche sich ebenfalls der im Roboterarm integrierten Momentensensoren bedient, bietet ein sogenanntes Arretier-W. Abbildung 5.17 zeigt schematisch eine am Roboterwerkzeug befestigbare w-förmige Komponente und dazugehörige an der Anlage befestigbare Pfeiler. Durch diese Form der Anpassung der Robotertrajektorie wird Präzision in den gewünschten Variablen Δz , Δx und $\Delta \alpha$ möglich. Bei Annäherung des Arretier-Ws an die Pfeiler treten bei Kontakt Momente auf, aus denen durch vollständiges Ineinanderschieben der Komponenten die relative 2D-Pose des TCP in Bezug auf die Pfeiler ermittelt werden kann. Ohne eine Horde mit Wafern am Robotergreifer erzeugt diese Variante keine unerwünschten Wafer-Vibrationen. Dies trifft bei der Hälfte der Präzisierungsvorgänge zu. Im Fall, dass sich eine Horde im Greifer befindet, kann diese auf einer dafür vorgesehenen Ablage am FIRE-Shuttle platziert werden. Eine vergleichbare Position wird als Home-Position bei Verfahren des Shuttles prinzipiell eingenommen. Bei einer Umsetzung sollten auch die Einflüsse dieser Form der Arretierung auf eine gleichzeitig am Greifer befindliche Horde geprüft werden. Da den messenden Kontakt für die Präzision nicht wie im vorigen Kapitel 5.7.2 die Horde, sondern das Arretier-W bildet, werden die auftretenden Erschütterungen der Scheiben hier als geringer eingestuft. Es sei noch angemerkt, dass die Montagepunkte von Arretier-W und Pfeiler natürlich auch vertauscht werden können, sodass die Pfeiler am Roboter-TCP und das Arretier-W an der Maschine befestigt wird.

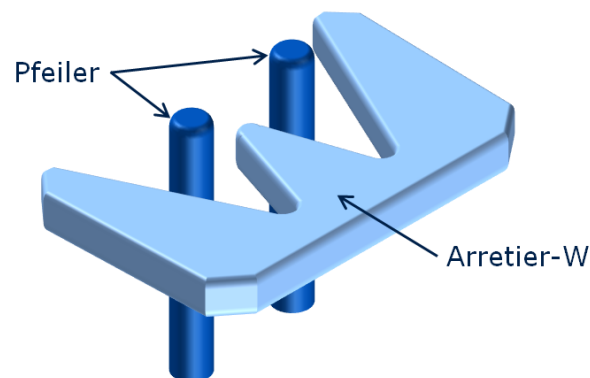


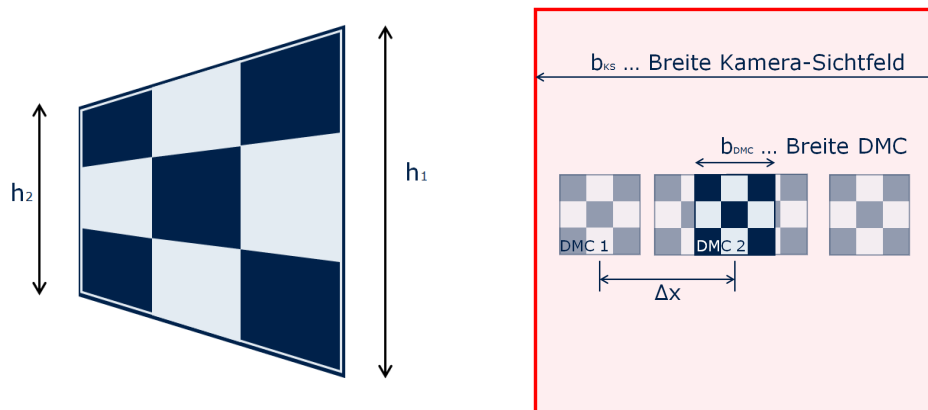
Abbildung 5.17: Arretier-W zur Präzisionserreichung.

5.7.4 Data Matrix Code

Eine weitere Möglichkeit zur Erreichung der erforderlichen Präzision ist die Platzierung eines sogenannten Data Matrix Codes (DMC), der an der Anlagenfront oder am Boden vor der Anlage angebracht ist. Außerdem kann aus dem Code gleichzeitig Information über den betreffenden Standort entnommen werden. Bei einer Anbringung eines DMC-Aufklebers am Reinraumboden ist die erwünschte Genauigkeit aufgrund der alltäglichen Abläufe in der Linie wegen Menschen, Transportwagen und anderen Abrieb und Verunreinigung erzeugenden Komponenten kaum erreichbar. Theoretisch ist ein an einer Anlage montierter DMC aber ausreichend zur Bestimmung der erforderlichen Variablen Δx , Δz und $\Delta \alpha$. Der seitliche Verschub zur Anlage Δx kann durch die Position des DMC im Sichtfeld der Kamera bestimmt werden. Die Entfernung von der Anlage Δz kann über die Größe des DMC ermittelt werden. Der Azimut, dargestellt durch $\Delta \alpha$, kann wie in Abbildung 5.18(a) beispielhaft durch einen Beispielcode mit neun Flächen gezeigt, über das Verhältnis der Seitenlängen h_1 und h_2 des DMC bestimmt werden. In der Theorie leuchtet diese Vorgehensweise ein, in der Praxis ergeben sich aber durch Einschränkungen der Auflösung von Kamerasystemen Verringerungen der erreichbaren Genauigkeit. Da zur Ermittlung von Δx Abweichungen der Position des Codes innerhalb des Blickfeldes der Kamera enthalten sein müssen, muss die Breite des Kamera-Sichtfeldes b_{KS} um einiges größer sein als die Breite des DMCs b_{DMC} . Dadurch wird der DMC nicht mit der tatsächlichen Kameraauflösung gelesen. Damit reduziert sich die Pixelzahl, die zur Ermittlung der Entfernung z über Bestimmung der Größe des DMC zur Verfügung steht, wie auch zur Winkelberechnung verwendet wird. Kameras zur zufriedenstellenden Ermittlung der Pose mit einer Genauigkeit von bereits erwähnten 0,5 Millimetern sind sehr teuer, groß und schwer und sind für diesen Einsatz nicht die optimale Lösung. Unterstützung eines DMC-Präzisions-Systems kann eine Kombination mit Lasersensoren zur punktuellen Abstandsmessung bieten.

5.7.5 Lichtschnittsensor

Eine vielversprechende Variante zur Ermittlung der exakten Pose bietet eine spezielle Gattung von Lasersensoren, sogenannte Lichtschnittsensoren (LSS). Die eigentlich vorgesehene Verwendung eines solchen LSS ist die Erstellung dreidimensionaler Modelle von Objekten. Ein LSS ermittelt unter Verwendung von Laserstrahlen entlang einer Linie die Abstandswerte zwischen Sensor und Zielobjekt. Durch scannendes überfahren des Objektes mit dem Sensor oder üblichere Montage des Sensors über



- (a) Ermittlung des Azimut $\Delta\alpha$ durch das Verhältnis von h_1 und h_2 .
- (b) Wegen Δx muss die Breite des Kamera-Sichtfeldes b_{KS} um einiges größer sein als die Breite des DMCs b_{DMC} . Für die Ermittlung von Δz wird eine hohe Kameraauflösung benötigt.

Abbildung 5.18: Data Matrix Code (DMC).

einem Förderband mit Objekten wird, wie in Abbildung 5.19 dargestellt, aus hintereinander aufgenommenen Arrays von Entfernungen ein dreidimensionales Modell des Objektes erzeugt.

Für die hier präsentierte Möglichkeit zur präzisen Ermittlung der Shuttleposition wird der LSS leicht zweckentfremdet und nicht zur Generierung von dreidimensionalen Modellen von Objekten verwendet. Er wird fix am Shuttle montiert und vermisst ein eigens dafür gefertigtes Gegenstück an der Anlage, wie in Abbildung 5.20 oben gezeigt. Das Gegenstück hat Abmessungen von ungefähr 200 x 40 x 20 Millimetern in Breite mal Höhe mal Tiefe und wird an der Maschine, neben der sich das Shuttle positioniert montiert. Es enthält in der Mitte eine Vertiefung um aussagekräftige und einfach zu interpretierende Distanzinformationen zu generieren. Die Ausgabe der Messung ist kein dreidimensionales Modell, sondern ein einfach zu verarbeitendes Array von Entfernungswerten, wodurch die Ermittlung der für die Präzision wichtigen Variablen Δx , Δz und $\Delta\alpha$ möglich wird. In der Abbildung 5.20 unten sind drei weitere mögliche Gegenstücke gezeigt.

Die Funktionsweise soll hier anhand vereinfachter Beispiele anschaulich erklärt werden. In Abbildung 5.21 sind Laserschnittsensoren mit Blick auf Gegenstücke in einer Ansicht von oben zu sehen. Im realen Fall sind diese LSS am FIRE-Shuttle und die Gegenstücke an den Anlagen montiert. Das erste (linkeste) Teilbild von Abbildung

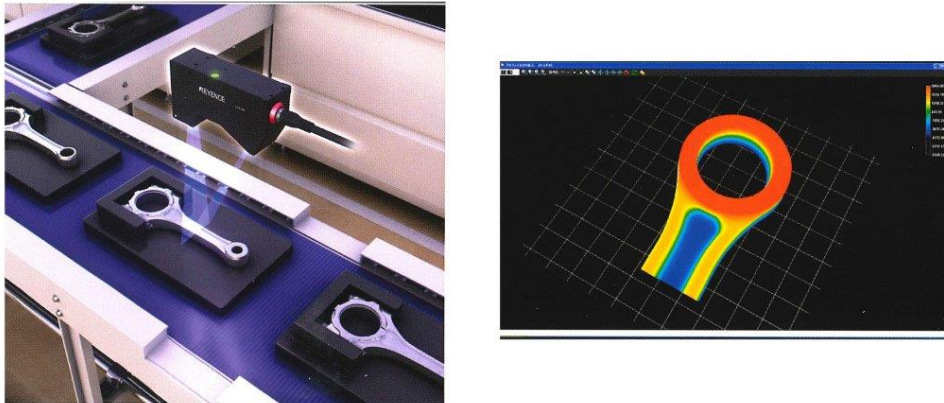


Abbildung 5.19: Übliche Verwendung eines Lichtschnittsensors, montiert über einem Förderband zur Erzeugung von dreidimensionalen Modellen [Key13].

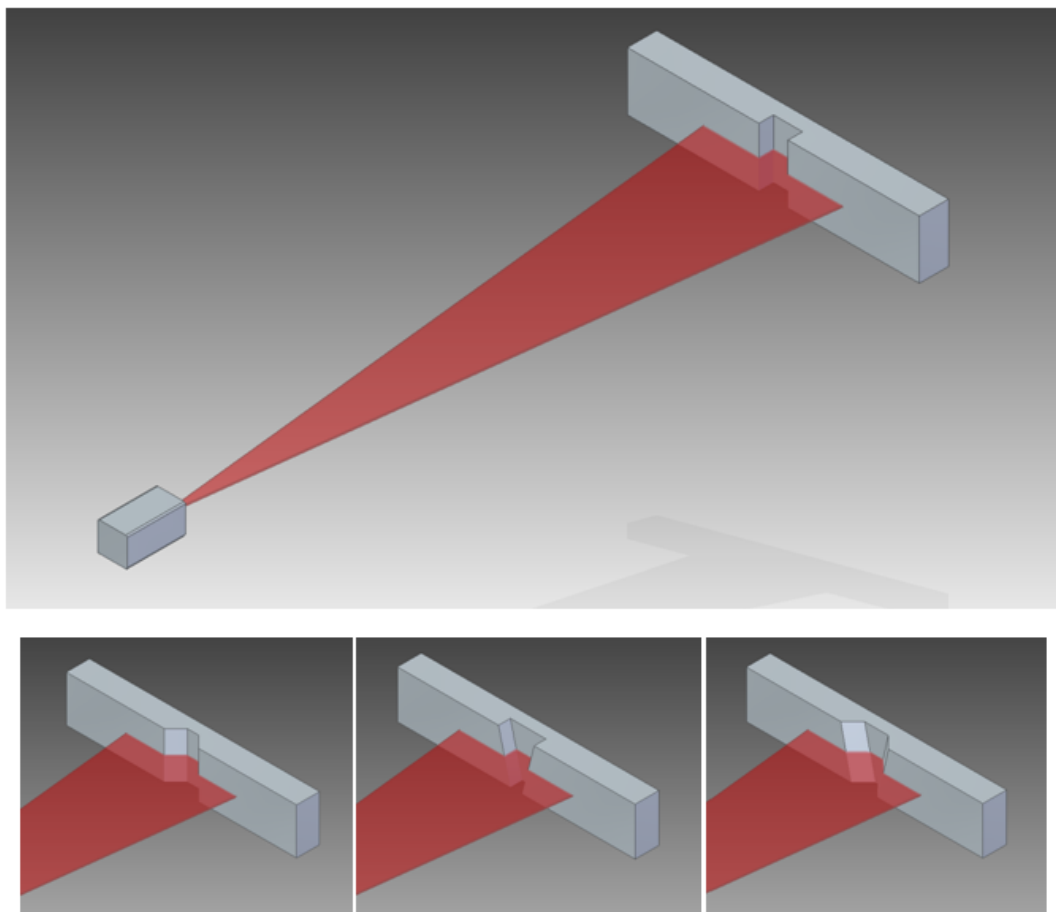


Abbildung 5.20: Prinzipskizze der Vermessung eines Gegenstückes durch einen Laserschnittsensor mit unterschiedlichen Gegenständen.

5.21 zeigt den optimalen Fall, bei dem das Shuttle durch die Lasernavigation exakt vor der Anlage positioniert wurde. In diesem einfachen Beispiel mit zehn Messwerten des LSS ergeben sich die unter dem Bild gezeigten Werte. Im zweiten Teilbild wird ein Versatz des Shuttles in x-Richtung dargestellt, aus dem eine Verschiebung der größeren Entfernungen darstellenden höheren Werte folgt. Rückt der LSS näher an das Gegenstück, ändert sich Δz . Dadurch werden, wie im dritten Teilbild zu sehen, die gemessenen Entfernungswerte allgemein kleiner und die Aussparung in der Mitte des Gegenstücks wird als breiter wahrgenommen. Eine Verdrehung des LSS gegenüber dem Gegenstück ergibt die im vierten (rechtsten) Teilbild dargestellte Abfolge von abfallenden Werten.

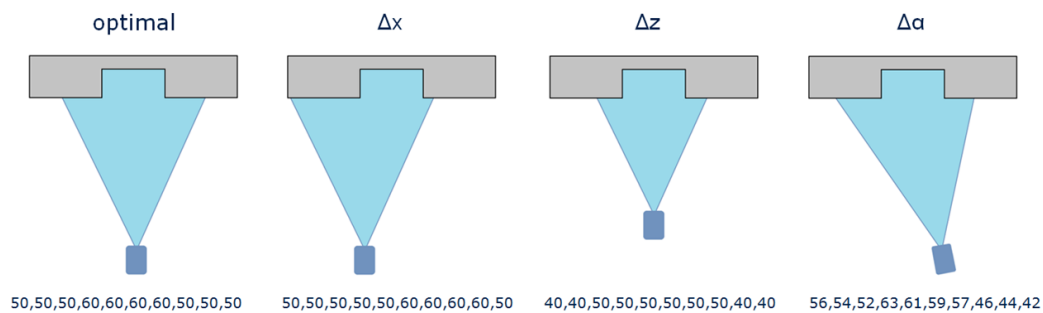


Abbildung 5.21: Funktionsweise des präsentierten Konzepts; Laserschnittsensoren mit Blick auf Gegenstücke in einer Ansicht von oben; darunter als einfaches Beispiel jeweils zehn äquidistante gemessene Entfernungswerte.

Bei der Verwendung eines solchen LSS gibt es eine Reihe an Kennzahlen der Sensoren, die entscheidend für die Auswahl sind. Für die hier angestrebte Verwendung sind vor allem der Messbereich in x- und z-Achse sowie die Wiederholgenauigkeit in x- und z-Achse wichtig. Untergeordnete Rolle spielt hier unter anderem die Geschwindigkeit. Erreichbare 64.000 Profile pro Sekunde sind hier aufgrund einer Momentaufnahme anstatt 3D-Scan eindeutig nicht notwendig. Eine optimale Lösung bietet beispielsweise der LJ-V7300 von Keyence. Der Messbereich von 155 bis 445 Millimetern in z-Richtung eignet sich hervorragend für eine Anwendung an unterschiedlichen Anlagen, bei denen unterschiedliche Abstände gefordert sind. Eine in diesem Bereich aufgespannte Laserlinie von 110 bis 240 Millimetern bietet ein für die Verhältnisse passendes System. Die Wiederholgenauigkeit dieses Sensors von 5 Mikrometern in der z-Achse und 60 Mikrometern in der x-Achse ermöglichen es, dass die Sensorunsicher-

heit einen verhältnismäßig kleinen Beitrag zur Gesamtunsicherheit der TCP-Position von FIRE beiträgt. Gesamtabmessungen des Sensors von 173 x 88 x 57 Millimetern sind für den mobilen Manipulator absolut akzeptabel. Eine weitere Möglichkeit bietet der LPS 36HI/EN von Leuze, welcher in Abbildung 5.22(a) zu sehen ist und in Abbildung 5.22(b) in die CAD-Grafik eingebunden wurde.

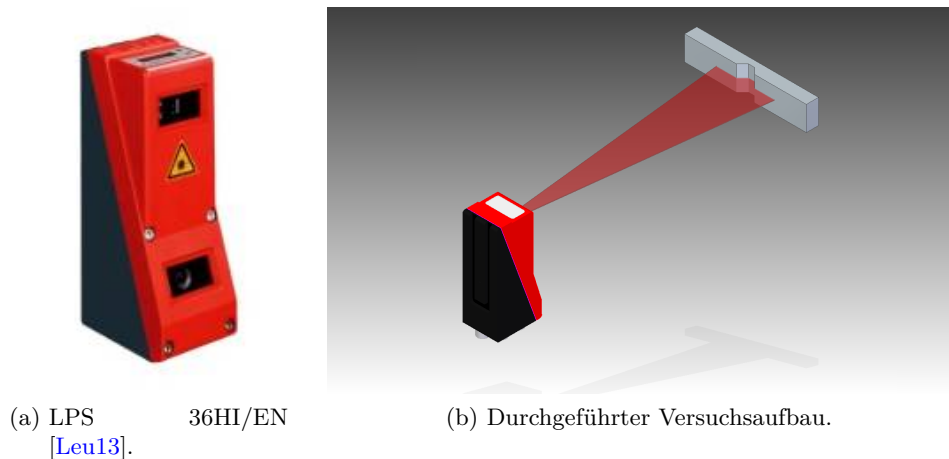


Abbildung 5.22: Für Testaufbauten im Rahmen der Arbeit verwendeter Sensor LPS 36HI/EN von Leuze.

Dieser Sensor wurde auch für einen Testaufbau im Rahmen dieser Arbeit verwendet. In Abbildung 5.23 (a) ist dieser dazu aus Aluminiumprofilen und Platten zusammengeschrubte Testaufbau zu sehen. Er enthält einen auf einer in x -, z - und α -Freiheitsgrad variablen Basis montierten Roboterarm des Typs LBR iiwa mit einem Backengreifer. Damit direkt verbunden wurde der LSS von Leuze montiert, welcher die Verschiebung des Roboterarmes zu einem Loadport und einem Boxennest aufnimmt. Die fix programmierte Roboterarmtrajektorie soll aufgrund der eingehenden Daten laufend adaptiert werden. Abbildung 5.23 (b) zeigt den Aufbau aus einer Perspektive, bei welcher auch das hier verwendete vom Laser angestrahlte Gegenstück für den LSS zu sehen ist. Die Montage unter dem Boxennest erlaubt einen ständigen Sichtkontakt zwischen Sensor und Gegenstück während des gesamten Beladevorgangs. Abbildung 5.23 (c) verdeutlicht die aktuelle Verschiebung der Robotergrundplatte durch ein 300 mm langes neben der Platte positioniertes Lineal. Abbildung 5.23 (d) zeigt die Kombination aus LSS und Gegenstück zur besseren Anschaulichkeit von schräg unten und in Abbildung 5.23 (e) ist der Aufbau aus LSS und Gegenstück ebenfalls aus der Nähe zu sehen.

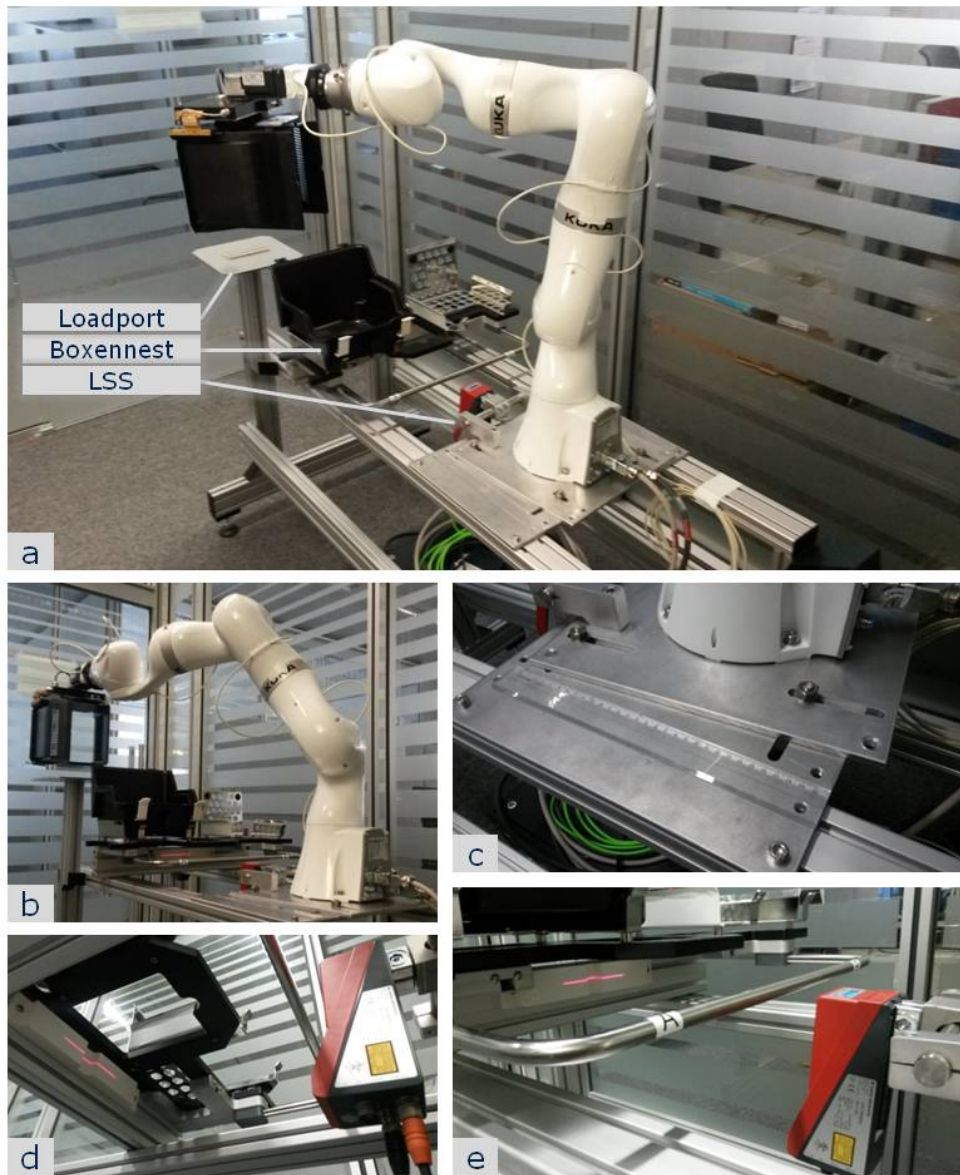


Abbildung 5.23: Versuchsaufbau Lichtschnittsensor mit verschiebbar gelagertem Roboterarm mit Laserschnittsensor (LSS), einem Boxennest (EQB) und einem Loadport in Teilbild (a). Teilbild (b) zeigt den Blick des LSS auf das unter dem EQB montierte Gegenstück, Teilbild (c) zeigt die aktuelle Verschiebung der Roboter-Montageplattform neben einem 30-cm-Lineal, Teilbild (d) und (e) zeigen die Sicht des LSS auf das Gegenstück genauer.

Die Funktionsweise der Grundplatte wird in Abbildung 5.24 schematisch näher erläutert. Durch das Design mit jeweils vier Langlöchern in der oberen und unteren Platte wird die Beweglichkeit des Roboterarms in den drei gewünschten Freiheitsgraden ermöglicht und ein vor der Anlage und den Boxennestern stehendes mobiles Beladesystem kann mit einfachen Mitteln nachgebildet werden. Sollte das System für Arretier- und Programmieraufgaben wieder exakt vor der Anlage positioniert werden, können die beiden Platten durch die in Abbildung 5.24 grün gekennzeichneten Löcher fixiert werden.

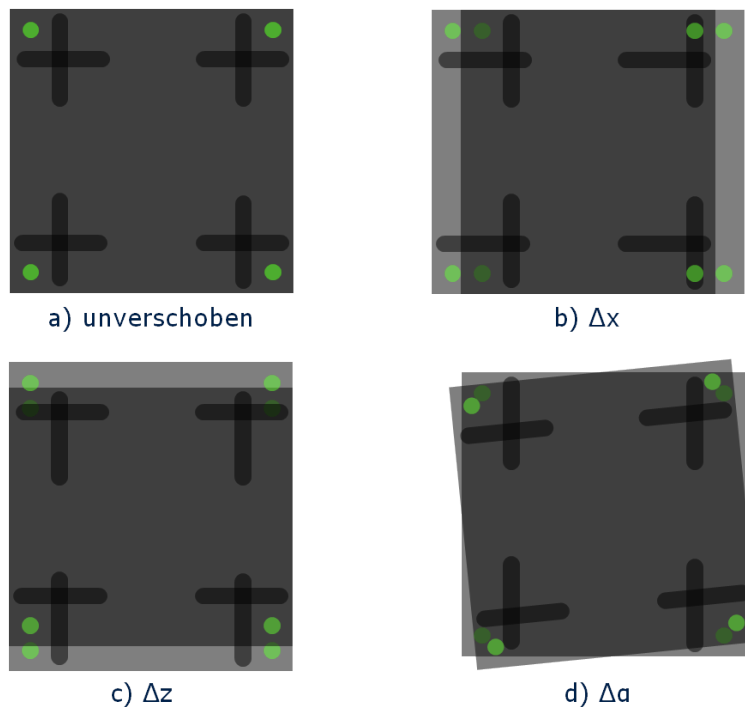


Abbildung 5.24: Funktionsweise der zweiteiligen verschiebbaren Grundplatte mit Langlöchern.

Zur Auswertung der Daten des Lichtschnittsensors gibt es wie auch in [YS11] und [Sch05] beschrieben mehrere zielführende Varianten, von denen die drei Algorithmen Strip-Tree-Segmentierung, polynomiale Regression und Hough-Transformation hier als am vielversprechendsten eingeordnet werden. Letztere wurde zur Auswertung der Messwerte in diesem Aufbau verwendet. Mithilfe der Hough-Transformation können in einer Abbildung Linien gefunden werden. Für einen abgeschlossenen Originalbereich wird jeder dort aufgenommene Messwert in den Hough-Raum übertragen. Hierbei wird jeder Messpunkt im Originalbereich zu einer Linie im Hough-Bereich.

Diese Linien werden über einem Raster addiert und die Punkte im Hough-Raum, an denen diese addierten Linien lokale Maxima bilden gefunden. Die Punkte der Maxima im Hough-Bereich werden nach einer Rücktransformation wieder zu Linien im Originalbereich. Ziel dieser Arbeit soll es jedoch nicht sein den Algorithmus der Hough-Transformation bis ins Detail zu erklären, sondern es wird gezeigt, dass diese Methode einen sowohl schnellen als auch verlässlichen Weg zur Erkennung und Vermessung des Gegenstücks dieser Aufgabe bietet. Genauer beschrieben wird dieser Algorithmus beispielsweise in [YS11].

Abbildung 5.25 zeigt die Ergebnisse der Anwendung mit realen gemessenen Werten unter Verwendung des zuvor erwähnten Sensors LPS 36HI/EN von Leuze und des in Abbildung 5.22(b) auf Seite 117 vorgestellten hierzu angefertigten Gegenstücks. In Abbildung 5.25 (a) sind die aufgenommenen Messwerte im Originalbereich zu sehen. Abbildung 5.25 (b) stellt die gemessenen Punkte als Linien im Hough-Bereich dar. Die Addition dieser Linien über einem Raster ist in Abbildung 5.25 (c) dreidimensional dargestellt. Die lokalen Maxima sind in Abbildung 5.25 (d) zu sehen. Die aus diesen Punkten rücktransformierten Linien sind in Abbildung 5.25 (e) dargestellt. Anhand der hier eingezeichneten Schnittpunkte können die benötigten Variablen Δx , Δz und $\Delta \alpha$ ermittelt werden.

5.7.6 Zwei-Kamera-Bildverarbeitung

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von zwei Kameras zur Erreichung der notwendigen Präzision. Von der Ferne kann mit einer möglicherweise dafür hochwertigeren Statische-Kamera die Abweichung der Loadportposition grob herausgefunden werden. Unter Verwendung dieser Daten kann der Roboterarm die angepasste Trajektorie bis kurz vor dem Loadport abfahren. Dort wird durch eine im Werkzeug des Arms integrierte Kamera ein Data Matrix Code oder eine andere Arretierungseinrichtung wie ein Kreuz am Loadport erkannt und so die Feinpositionierung umgesetzt. Diese Variante ähnelt der Umsetzung mit den internen Momentensensoren, mit dem Unterschied, dass zur abschließenden Feinpositionierung nicht die Roboter-internen Sensoren, sondern eine zweite Kamera verwendet wird. Kosten, Gewicht und Platzverbrauch der Kamera am Roboterflansch sollten beachtet werden.

5.7.7 Arm-Kamera

Aus der im vorigen Punkt präsentierten Möglichkeit der Verwendung von zwei Kameras leitet sich die vereinfachende Version einer einzigen am Roboterarm montierten

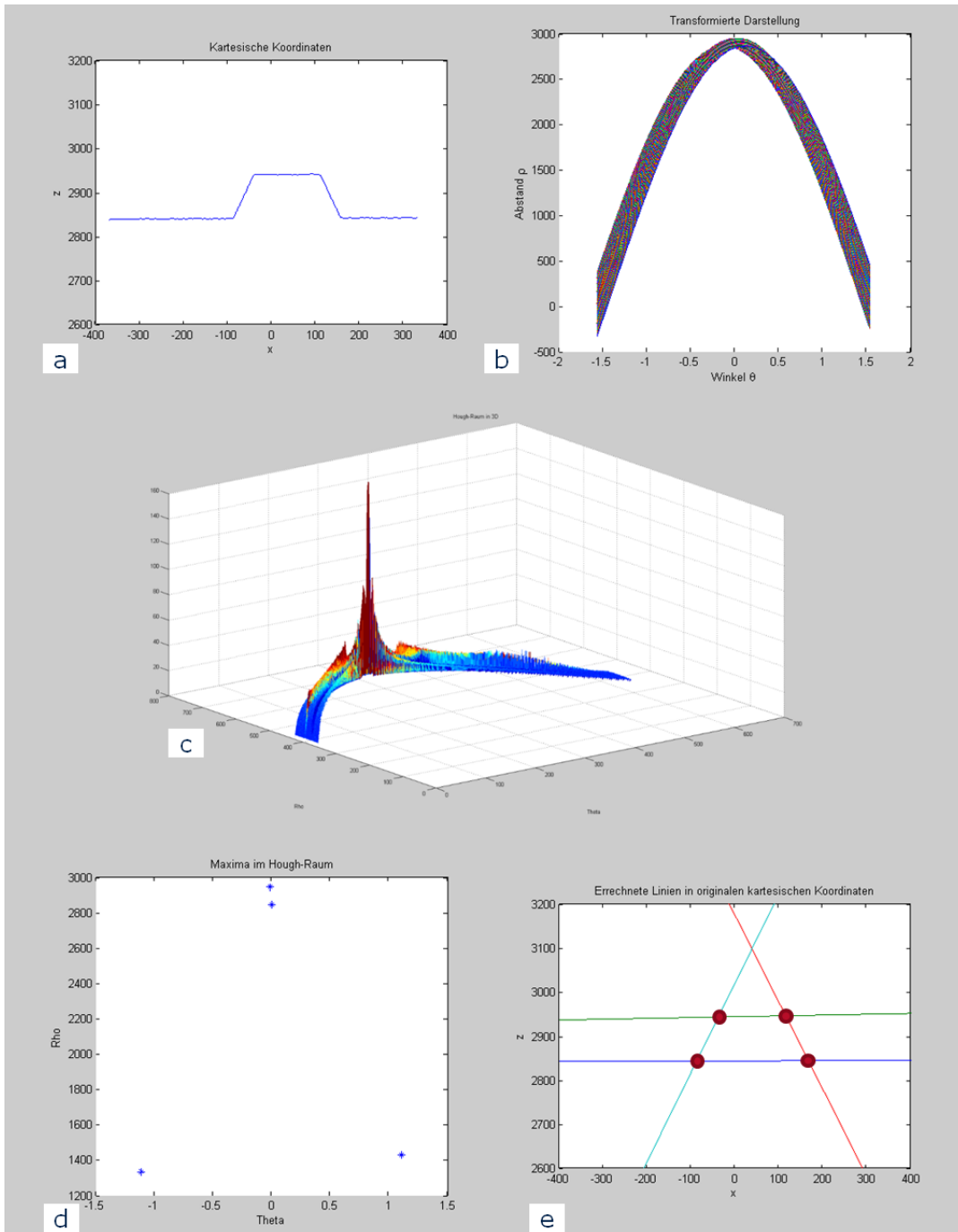


Abbildung 5.25: Houghtransformation: originale Messwerte (a), transformierte Messwerte (b), Addition der aus den Messpunkten erhaltenen Linien (c), Maxima im Hough-Raum (d) und zu Linien rücktransformierte Maxima mit Schnittpunkten (e).

Kamera ab. Die Ausrichtung kann wie in Kapitel 5.7.6 auf Seite 120 mit nur einer Arm-Kamera umgesetzt werden. Bei Anwendung einer am Roboterarm im Werkzeug integrierten Kamera gilt es die maximal erlaubte Traglast des Roboterarmes und die Position der Befestigung am Werkzeug zu beachten. Vor allem letztere stellt sich aufgrund der speziell vorgeschriebenen Ausrichtung der transportierten Horde und der engen Platzverhältnisse in vielen Loadports als schwierig heraus.

5.7.8 Objekterkennung

Die bisher präsentierten Lösungsvarianten für präzises Handhaben und Positionieren von Waferhorden beziehen sich auf Ausrichtung des Shuttles oder Anpassung der vorher programmierten Robotertrajektorie durch Verwendung unterschiedlicher Sensoren. Eine weitere um einiges kompliziertere aber trotzdem überlegenswerte Variante ist die Generierung der gesamten Robotertrajektorie aufgrund von Sensoreingängen. Bei einer solchen Umsetzung der Präzision wird ein anlagenspezifisches Programmieren des Roboters überflüssig. Unter Verwendung einer 2D-Kamera mit Objekterkennungssoftware kann die Position der Horde und weiterer Objekte im Raum bestimmt werden und die Bewegungsabläufe des Roboterarms generiert werden. Eine rein auf Objekterkennung mittels 2D-Kamera basierende Objekterkennung zum Handhaben ist Thema vieler Forschungseinrichtungen, wird aber hier für den effizienten Einsatz im industriellen Umfeld als aktuell nicht verlässlich umsetzbar angesehen. Zukünftige Verbesserungen auf dem Gebiet der Bildverarbeitung werden diese Möglichkeit auch für die Industrie eröffnen, liegen aber zeitlich außerhalb einer realisierbaren Projektumsetzung.

5.7.9 Stereokamera

Werden statt einer einzelnen Kamera zwei Kameras verwendet, ergeben sich neue Möglichkeiten der Bildverarbeitung. Ein durch Stereo-Sehen ermitteltes dreidimensionales Bild der Reinraumumgebung kann zur korrekten Positionierung des TCP und Handhaben der Horden verwendet werden. Diese Variante ist zwar verlässlicher, wird aber hier zum aktuellen Zeitpunkt ebenfalls als noch nicht industrietauglich in der Halbleiterproduktion bei Infineon einsetzbar eingestuft.

5.7.10 Time-of-Flight-Kamera

Eine weitere Möglichkeit zur dreidimensionalen Erfassung der Umgebung bieten Time-of-Flight Kameras. Diese ermitteln über die Zeit die Licht benötigt, um vom Sensor

zum Messobjekt und zurück zu gelangen, die Entfernung zum Objekt. Es wird eine Punktwolke von Entfernungen im Sichtfeld des Sensors zurückgegeben. Bei der Verwendung dieser scannerlosen Technik der dreidimensionalen Umgebungswahrnehmung wird jedoch keine Farbinformation erhalten. Eine Kombination aus einer optischen Farbkamera und einer Time-of-Flight-Kamera ermöglicht es, ein dreidimensionales Abbild der Umgebung zu kreieren. Eine solche Umsetzung ist technisch möglich und wird zukünftig industriell zum Einsatz kommen.

5.8 Systemkombination zur TCP-Positionierung

Aus der Evaluierung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur Positionierung des Tool Center Points (TCP) geht als Lösung für den mobilen Manipulator, wie in Abbildung 5.26 zu sehen, neben einer Reihe unterstützender Sensoren eine Kombination von Indoor Positioning System (IPS), Lasernavigation und einer Armausrichtung durch einen Laserschnittsensor hervor. Das IPS gibt unter Verwendung des BTS eine Grobpositionierung von ± 500 Millimetern mit Absolutwerten zurück und vermittelt den ungefähren Aufenthaltsort des FIRE im Bereich der gesamten Hallen des Reinraums. Diese Aufgabe kann von der Lasernavigation nicht erfüllt werden. Mit den Rotoscans und dem dahinter ablaufenden Programm ist dafür eine feinere Positionierung mit einer Genauigkeit von mindestens ± 20 Millimetern und die Information des Winkels zwischen System und Umgebung gegeben. Die Feinpositionierung des TCP erfolgt durch Bestimmen der Position des FIRE durch einen Laserschnittsensor und Anpassung der Roboterarmtrajektorie. Unterstützend wirken Techniken wie Go- und No-Go-Areas, Odometrie oder Ultraschallsensoren.

Tabelle 5.3 zeigt eine Zusammenstellung der ermittelten möglichen Umsetzungsvarianten für Sensorsysteme für ein FIRE-System. Die zuvor bearbeiteten Themen werden zusammengefasst und es wird angegeben ob eine Umsetzung des vorgestellten Themas im System FIRE geplant ist. In einer kurzen Bemerkung werden komprimiert Informationen zu dem Thema gegeben. Genauer wurde darauf bereits in den entsprechenden vorhergehenden Kapiteln eingegangen.

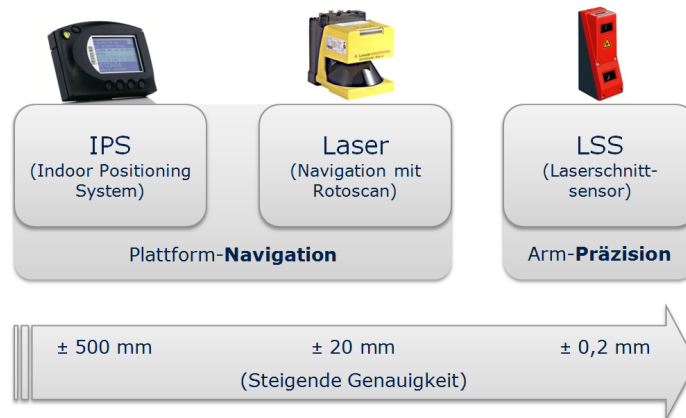


Abbildung 5.26: Sensorkombination zur Positionierung des TCP beziehungsweise der Horde.

Tabelle 5.3: Zusammenfassung - Sensorsysteme für FIRE.

| <i>Thema</i> | <i>geplant</i> | <i>Bemerkung</i> |
|--|----------------|---|
| Sensorsysteme zur Plattformnavigation | | |
| BTS – Box Tracking System | ja | Grobpositionierung von ± 500 Millimetern |
| Induktive Führung | nein | EMV, geringe Flexibilität, magnetische Abschirmung durch Bodenbeschaffenheit |
| Optische Führungslinien | nein | Wegen omnidirektionalem Antrieb sind Linienstücke hier nicht vorgesehen. |
| Odometrie | ja | vergleichsweise verlässliche Informationen bei geringem Kostenaufwand |
| Lasersensoren | ja | Basisnavigation – vielfach erprobte Technik mit ausgereiften softwaretechnischen Modellen |
| Ultraschall | ja | Ergänzung zu anderen Sensoren; zur Vermeidung von Kollisionen des FIRE außerhalb der Lasersensorebene |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung

| <i>Thema</i> | <i>geplant</i> | <i>Bemerkung</i> |
|-----------------------|----------------|---|
| Infrarotsensoren | nein | Nachteile gegenüber Laser- und Ultraschallsensoren in den gewünschten Anwendungsfällen |
| 3D-Navigation | nein | zukünftig interessant, aktuell keine gesetzliche Freigabe für Sicherheitsanwendungen, teuer und komplex |
| Berührungssensoren | ja | als Zusatzabsicherung vor Kollisionen |
| Passives RFID | nein | aufwändige Alternative zu IPS (Box Tracking System) |
| Beacons | nein | hoher Reinraumadaptionaufwand, theoretisch aber denkbar |
| WLAN-Positionierung | nein | mögliche Alternative zu IPS |
| Positionskalibrierung | ja | bei PH (Power Home) |
| SafetyEYE | nein | Abdeckung des gesamten Arbeitsbereichs des mobilen Beladesystems nur mit hohem Aufwand möglich |
| Mapping | | |
| Vorgegebene Karten | ja | vorhanden in AutoCAD und regelmäßig aktualisiert |
| Mapping mit FIRE | ja | höhere Genauigkeit als bei vorhandenen Karten möglich |
| Mapping mit Operator | nein | zusätzlicher Personal- und Zeitaufwand nicht erwünscht |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung

| <i>Thema</i> | <i>geplant</i> | <i>Bemerkung</i> |
|--|----------------|---|
| Lokalisierung | | |
| Positionstracking | ja | präferierte Lokalisierungsvariante |
| Globale Lokalisierung | ja | unter anderem wegen dem Kidnapped-Robot-Problem |
| Partikelfilter | ja | Lokalisierungsalgorithmus |
| Bewegungsmodell | | |
| Geschwindigkeits- oder odometrie-basiert | ja | zukünftige Roboterpose – bestimmte Anzahl vorhergesagter Hypothesen mit Error-Parametern |
| Pfadplanung | | |
| Potentialfeld | ja | vielversprechende, getestete Pfadplanung |
| Go- und NoGo-Areas | ja | Einschränkung erlaubter Aufenthaltsbereiche für FIRE |
| Veränderliche Hindernisse | ja | müssen mit modelliert werden |
| Multiroboterbetrieb | ja | wird bei der Einbringung von mehr als einem System notwendig; ähnlich veränderlichen Hindernissen |
| Sensoren im Reiraum | nein | globale Wahrnehmung von beweglichen Hindernissen auch außerhalb des Sichtfeldes des mobilen FIRE |
| Stati-Check | | |
| Checker-Kamera | nein | Technik der aktuell eingesetzten Kamera entspricht nicht den Anforderungen |
| In-Sight 7000 | ja | Erfüllt notwendige Anforderungen |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung

| <i>Thema</i> | <i>geplant</i> | <i>Bemerkung</i> |
|--|----------------|--|
| Mustererkennung (Pattern Recognition) | ja | notwendig aufgrund variabler Shuttleposition vor der Anlage |
| Arm-Präzision | | |
| Andockvorrichtung | nein | reinraumtechnische Gründe, Vibrationen, kosten- und aufwandsintensive Installation von Andockmechanismen |
| Einrasten durch Roboterfeinfühligkeit | nein | Produktschutz, Vermeidung von Vibrationen, Erschütterungen und Stößen |
| Arretier-W | nein | mechanisches Ausrichten durch Momentensensoren theoretisch denkbar, aber bessere Lösung vorhanden |
| Data Matrix Code | nein | teure Kamerasysteme und Kombination mit Lasersensoren notwendig |
| Lichtschnittsensor | ja | für FIRE vorgeschlagene Lösung zur Umsetzung der Arm-Präzision |
| Zwei-Kamera-Bildverarbeitung | nein | Kosten und Platzverbrauch der Kamera am Roboterflansch zu beachten |
| Arm-Kamera | nein | Kosten und Platzverbrauch der Kamera am Roboterflansch zu beachten |
| Objekterkennung | nein | für den effizienten Einsatz im industriellen Umfeld als aktuell nicht verlässlich umsetzbar angesehen |
| Stereokamera | nein | noch nicht industrietauglich in der Halbleiterproduktion bei Infineon einsetzbar eingestuft |
| Time-of-Flight-Kamera | nein | Kombination aus einer optischen Farbkamera und einer Time-of Flight-Kamera zukünftig denkbar |

5.9 Software

Konzepte für Hardwarekomponenten des FIRE und der Weg zur Erreichung der notwendigen Präzision wurden nun gefunden. Um dem mobilen System nun Leben einzuhauchen werden hier für das Gesamtsystem zuverlässige, echtzeitfähige, industrietaugliche softwaretechnische Komponenten und Schnittstellen analysiert. Lösungsstrategien für das Leitsystem, MM-interne Abläufe und Schnittstellen werden präsentiert.

5.9.1 Der FIRE Workspace Manager

Werden die Anlagen statt von Operatoren von Robotern be- und entladen, werden im Leitsystem und auf der Kopplungsebene neue Systemkomponenten erforderlich. Zu den in Kapitel 3.1.11 auf Seite 49 vorgestellten Komponenten kommt ein an die Umsetzung bei den schienengeführten iRobotics-Systemen angelehnte Serverapplikation hinzu. Die hier als FWSM (FIRE Workspace Manager) vorgestellte Umsetzung dient zur Abfrage von prozessrelevanten Informationen von den einzelnen Serverkomponenten und zur Koordination der Abläufe des mobilen Manipulators. Vom FWSM werden die benötigten Informationen für den mobilen Manipulator an die Roboterkopplung weitergegeben und von dieser roboterspezifisch aufbereitet und weitergegeben. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 5.27.

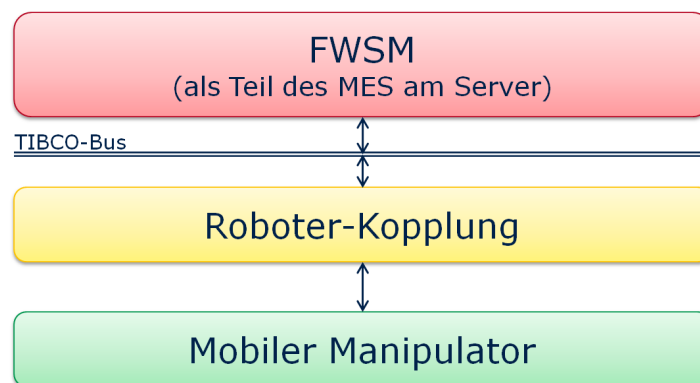


Abbildung 5.27: FWSM (FIRE Workspace Manager) zur Abfrage von prozessrelevanten Informationen von den einzelnen Serverkomponenten und zur Koordination der Abläufe des mobilen Manipulators.

Eine Prioritätenliste bestimmt die Reihenfolge der Be- und Entladevorgänge des frei verfahrbaren Systems:

1. Bediene die gleiche Anlage nochmal, weil der Roboter schon dort in der Nähe ist. Natürlich wird die Anlage nur beladen, wenn ein Job für die jeweilige Anlage vorhanden ist.
2. Bediene Standby-Anlagen vor Nicht-Standby-Anlagen. Eine leere Anlage hat Vorrang gegenüber einer, bei der schon Lose in Bearbeitung sind. Beispielsweise wird eine Anlage, bei der kein Loadport von drei besetzt ist, einer, bei der eines von drei besetzt ist, vorgezogen.
3. Bevorzuge einen Beladevorgang gegenüber einem Entladevorgang (load before unload).
4. Beachte eine Prioritätenliste der Anlagenreihung. Eine Anlage die für denselben Prozess weniger Zeit benötigt, weil sie neuer oder einfach anders ausgeführt ist wird zuerst beladen. Im Mattson-Finger wird eine Liste wie diese angewendet. Gleiche Prozesse auf unterschiedlichen Anlagen laufen hier unterschiedlich schnell.
5. Lade immer die zweite Horde eines 50er-Loses vor anderen.
6. Beachte zu einer Anlage hinterlegte optimierte Beladeabfolgen. Zur Umsetzung dieses Punktes müssten diese optimierten Beladeabfolgen in einem Teil des Leitsystems hinterlegt werden. Ein generelles, hypothetisches, einfaches Beispiel zur Verständniserleichterung wird im Folgenden beschrieben. Es gebe, wie in Abbildung 5.28 gezeigt, zu einer Anlage nur ein Beladeport, von dem aus die Anlage die gesamte Horde weitertransportiert, aber Prozessvariante A und B in der Anlage. Brauchen die Varianten A und B gleich lange, ist es sinnvoll abwechselnd ein Los für Prozess A und eines für B auf die Anlage zu stellen, um diese optimal auszulasten. Würde der Prozess B nur halb so lange brauchen, wäre eine Abfolge von einem Los für A, dann zwei Losen für B, dann wieder einem Los von A und so weiter sinnvoll. Besonderen Vorteil würden diese optimierten Beladeabfolgen vor allem bei Anlagen in der Nasschemie bringen.
7. Berücksichtige die Dispatch-Position. Der Dispatcher ist ein eigener Teil des MES, wo eine allgemeine Prioritätenliste zur Abarbeitung der Lose hinterlegt ist. Dadurch, dass die Dispatch-Position erst so weit unten in der allgemeinen Prioritätenliste angeordnet ist, wurde die zu beladende Anlage bereits ausgewählt. Es kann nicht aus allen vorhandenen Losen der Dispatchliste, sondern nur aus den auf EQBs platzierten gewählt werden.

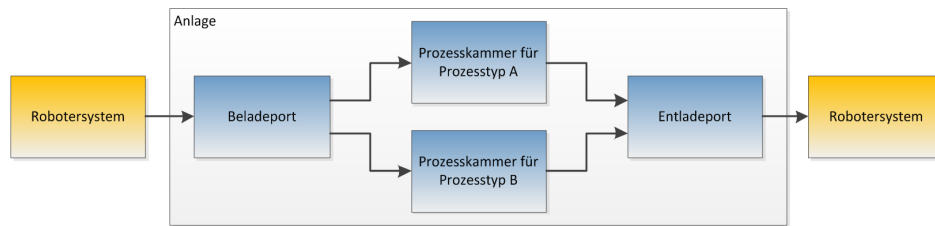


Abbildung 5.28: Optimierte Beladeabfolge bei Mehrkammeranlagen (Abbildung zu Punkt 6).

8. Nehme die Horde mit dem niedrigeren EQB-Buchstaben, wenn die Dispatch-Position gleich ist, was nur bei zwei Horden eines 50er-Loses passieren kann. Alles andere sollte schon vorher bestimmt sein, da unterschiedliche Lose immer unterschiedliche Dispatch-Positionen haben.

5.9.2 Datenübertragung

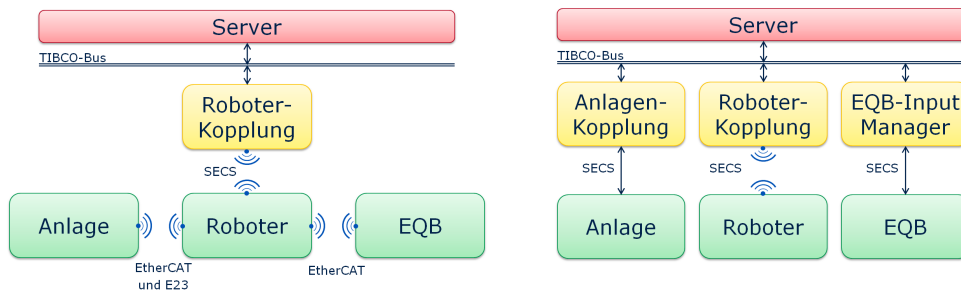
Ein in der Produktion eingesetztes mobiles Beladesystem mag auf den ersten Blick autark erscheinen, wird aber für eine erfolgreiche Integration in die Abläufe der Fabrik über unterschiedliche Schnittstellen mit den umgebenden Systemen verbunden. Zur Übertragung von Informationen von Leitsystem, Equipmentbuffer und Anlage zum Robotersystem können bei einer frei verfahrbaren Einheit nicht, wie bisher bei iRobotics üblich, kabelgebundene Verbindungen bestehen. Die bei fahrerlosen Transportsystemen etablierte Kommunikation über WLAN ist auch für den mobilen Manipulator empfehlenswert. Dabei gilt es zu beachten, dass zum momentanen Zeitpunkt die WLAN-Router in der Linie fast ausschließlich im Grauraum montiert sind und daher in gewissen Bereichen des Reinraums nur eine schwache WLAN-Verbindung herrscht. Da diese im normalen Betrieb nur selten genutzt wird, wird die Signalstärke als ausreichend erachtet. Dadurch ist mit der Einbringung von mobilen Systemen eine Erhöhung der WLAN-Router-Dichte in den betreffenden Bereichen sinnvoll.

Für ein reibungsfreies Funktionieren des frei verfahrbaren Systems ist eine Kommunikation vom Robotersystem nach außen zu den folgenden Systemen von Nöten:

- Die Kommunikation zur Roboterkopplung kann wie bei anderen Systemen über die in der Halbleiterindustrie bewährte Schnittstelle SECS erfolgen. Die Roboterkopplung hat hauptsächlich die Aufgabe allgemein gehaltene Informationen des FWSM im Leitsystem für jeden Roboter spezifisch aufzubereiten und die

spezifischen Informationen eines speziellen Roboters in allgemein gültige, für alle Roboter gleiche und für den FWSM verständliche Kodierung zu übersetzen.

- Die Kommunikation zum Equipmentbuffer läuft bei schienengebundenen Systemen direkt über EtherCAT.
- Die Kommunikation zur Anlage wird bei schienengebundenen Systemen über E23-Kabelverbindung zur Anlage geführt.



(a) WLAN-Module in allen beteiligten Komponenten. (b) Beschränkung der kabellosen Kommunikation auf den Weg zwischen mobiler Einheit und Leitsystem.

Abbildung 5.29: Ersetzen von Kabelverbindungen durch Funkübertragung.

Diese momentan als Kabelverbindungen ausgeführten Kommunikationswege müssen durch Funkübertragungen ersetzt werden. Es wäre durch das Einbauen von WLAN-Modulen in alle erwähnten beteiligten Komponenten, wie in der schematischen Darstellung in [Abbildung 5.29\(a\)](#), möglich, wäre jedoch mit hohem Aufwand und Kosten verbunden. Einfacher ist, die kabellose Kommunikation auf den Weg von mobiler Einheit zu Leitsystem zu reduzieren ([Abbildung 5.29\(b\)](#)) und die koordinierende Logik in einen oben präsentierten FWSM zu integrieren. Dieser kann über WLAN beispielsweise EQB-Zustände an das Robotersystem weitergeben oder erhält vom Robotersystem Befehle zum Sperren des Anlagenloadports während der Beladung und leitet sie an die Anlage weiter. So kann für eine Kommunikation zum EQB über den TIBCO-Bus der existierende Equipmentbuffer-Inputmanager angesprochen werden, der über SECS die Informationen weiter an den EQB leitet. Die Kommunikation zur Anlage, die beispielsweise zum Blockieren des Schließens von Loadporttüren während der Beladung über EtherCAT und weiter über E23 abläuft, kann über den TIBCO-Bus zur ohnehin vorhandenen Anlagenkopplung und weiter über SECS zur Anlage erfolgen.

So kann die Kommunikation über WLAN auf die Partner Robotershuttle und Roboterkopplung reduziert und der zusätzliche Installationsaufwand minimiert werden.

5.9.3 Systeminterner Aufbau

Nach der Behandlung der Kommunikation des Robotersystems nach außen sollen hier nun die Verbindungen und Zusammenhänge der internen Komponenten des Systems schematisch dargestellt werden. Eine grobe Übersicht bietet Abbildung 5.30. Die hier vorgestellte Zusammenstellung von Komponenten sieht einen Industrie-PC (IPC) als zentrale Steuereinheit am Shuttle vor. Über ein Beckhoff-Feldbussystem werden über EtherCAT Roboterarmsteuerung, Sensoren, die Neobotix-Plattform und der Greifer angesteuert. Der IPC kommuniziert wie zuvor beschrieben über eine SECS-Schnittstelle weiter zur Roboterkopplung und über den TIBCO-Bus zu den weiteren Komponenten im Reinraum und den Serverapplikationen.

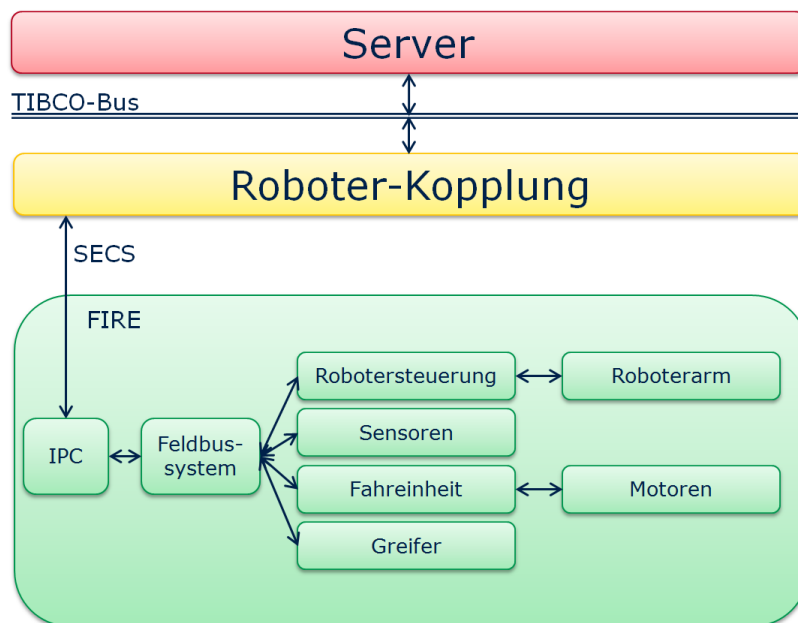


Abbildung 5.30: Grobe Übersicht der internen Komponenten des FIRE-Systems.

Eine detaillierte Präsentation der Shuttle-internen Zusammenhänge zeigt Abbildung 5.31. Die Verbindungen innerhalb des am linken Rand abgebildeten IPCs laufen über ein ADS-Interface. Daran hängen unter anderem ein SECS-Treiber, die Twin-CAT Automatisierungssoftware von Beckhoff, welche im Echtzeitlayer läuft und die Visualisierung für Bedienung und Darstellung der Systemzustände auf einem Display

am Robotersystem FIRE. Am IPC laufen noch weitere Programme zur Steuerung, Inbetriebnahme und Fehlersuche bei Komponenten wie der Stati-Check-Smart-Cam oder der Fahreinheit. So können über das Programm PlatformCtrl von Neobotix beispielsweise Karten der Umgebung und die zugehörige Pfadplanung eingesehen werden. Über eine Netzwerkkarte ist der IPC mit einem offenen Feldbussystem verbunden. Über eine Profibus-Masterklemme werden der Robotersteuerung die auszuführenden Roboterjobs übermittelt. In Cell wird in der Robotersteuerung von Kuka das passende Unterprogramm des übermittelten Roboterjobs ausgeführt und die notwendigen Befehle an den Roboterarm weitergeleitet. An einer sogenannten HANcompact Schnittstelle wird im Falle von Kuka die Verbindung hergestellt. Das Teachpanel des Roboters wird an der Robotersteuerung angeschlossen. Das Werkzeug des Roboterarms wird über CANopen beziehungsweise über CAN angesprochen. Ein EtherCAT-CAN-Modul am Feldbussystem ermöglicht die Kommunikation mit den Werkzeugkomponenten Drehmodul und Greifer mit Untermodulen wie dem Present-Sensor für den Drehwinkel oder Horden-Present-Sensor und Positionssensor. Die Fahreinheit des mobilen Systems FIRE wird über einen EtherCAT-zu-Ethernet-Adapter angebunden. Die dabei verhältnismäßig geringe erreichbare Geschwindigkeit wegen eines Teils der Verbindung über EtherCAT stört in diesem Fall nicht, da Navigation und Pfadplanung direkt in der Fahreinheit umgesetzt werden und nur steuernde und informative Kommunikation zwischen der Automatisierungssoftware TwinCAT und der Fahreinheit besteht. Auch die notwendige Sicherheits-SPS und die Motorsteuerung für die acht Motoren mit eingebauten odometrischen Sensoren befindet sich in der Fahreinheit. Über eine Sicherheits-SPS am Feldbussystem, wie die TwinSAFE-PLC von Beckhoff, werden Sicherheitsfunktionen, Not-Aus-Knöpfe, Schutztürüberwachung und Sicherheitssensoren einfach angewählt und verknüpft. An Eingangs- und Ausgangsklemmen am Feldbussystem hängen der Unterdrucksensor für die Absaugung des Roboters zum Erhalt der Reinraumtauglichkeit, die Absaugung selbst, Ampeln zur Statusanzeige des gesamten FIRE-Systems und die Smart-Cam, welche für den Stati-Check im Normalbetrieb über I/O-Verbindungen zu gewissen Anfragen true oder false zurückliefert. Nur für Inbetriebnahme und Fehlerbehebung wird die Ethernet-Verbindung der Kamera zu einem EtherCAT-zu-Ethernet-Adapter und weiter zu einem Smart-Cam-Programm am IPC genutzt. Sicherheitsrelevante Komponenten des FIRE kommunizieren über Safety-Eingangs- und Safety-Ausgangsklemmen mit der Automatisierungssoftware. Darunter befinden sich die Robotersteuerung, der Not-Aus-Knopf, Türsensoren, Home-Position-Sensoren, welche anzeigen, dass sich der Roboterarm in Ausgangsstellung befindet und Ultraschallsensoren. Auch die im System

an der Fahrereinheit integrierten Rotoscans schicken über I/Os true oder false zurück, je nachdem ob sich ein Hindernis in den definierten Warnfeldern und Schutzfeldern befindet. Der Lichtschnittsensor (LSS) ist über ein dafür vorgesehenes Steuergerät über Ethernet mit dem Feldbusssystem verbunden. Durch den großen Datenspeicher im Steuergerät müssen nicht die gesamten Sensorinformationen an die Automatisierungssoftware weitergeleitet werden, sondern nur zu vordefinierten Zeiten wird ein Abbild der Sensordaten weitergeleitet, was den Kommunikationsaufwand um einige Zehnerpotenzen reduziert. Auch Spannungsversorgung und eine Akkulade zum Akkutausch sind über ein EP-Modul mit dem EtherCAT-Bus verbunden um Informationen wie den Öffnungszustand der Akkulade oder den Ladezustand des Akkumulators an TwinCAT weiterzugeben.

5.9.4 Fernwartung vom Büro/ von zu Hause aus

Für ein Beladesystem wie FIRE ist zur Fehlerdiagnose und Wartung ein Zugriff auf die Systeme über VPN sinnvoll. So können mit dem System vertraute Personen im Fehlerfall über einen Remote-Zugriff gemeinsam mit einem Operator vor Ort das Problem beheben. Dies kann vom Büro aus geschehen, ohne dass sich der Betreffende in der Schleuse den Reinraumzugang anziehen muss um direkt vor Ort zu sein. Des Weiteren können zur Wartung, Inbetriebnahme und Umsetzung von Updates Personen mitwirken, die nicht am Standort Infineon Villach arbeiten und es werden somit mit einer Anreise verbundene Kosten und Umstände vermieden. Außerdem kann hierbei eine Rufbereitschaft eingerichtet werden, mittels derer sich mit dem Roboter vertraute Personen im Fehlerfall auch außerhalb der normalen Dienstzeiten nach einem Anruf über einen Remotezugriff am Roboter einwählen können. So wird bei kleineren Störungen mithilfe eines Operators vor Ort eine sofortige Fehlerbehebung rund um die Uhr möglich.

5.9.5 Security

Dadurch, dass der FIRE über kabellose Kommunikation mit den umgebenden Systemen verbunden ist, besteht prinzipiell auch die Möglichkeit bewusster schadhafter Angriffe auf das System. Security und Safety sind beim mobilen Beladesystem durch den mit dem Operator geteilten Arbeitsraum direkt miteinander verknüpft. Aufgrund der Entfernung zwischen den Produktionshallen und dem Ende des Firmengeländes ist ein Angriff von außerhalb des Firmengeländes kaum möglich. Ein Eindringen in das System durch eigene Mitarbeiter ist insofern unwahrscheinlich als es leichtere Me-

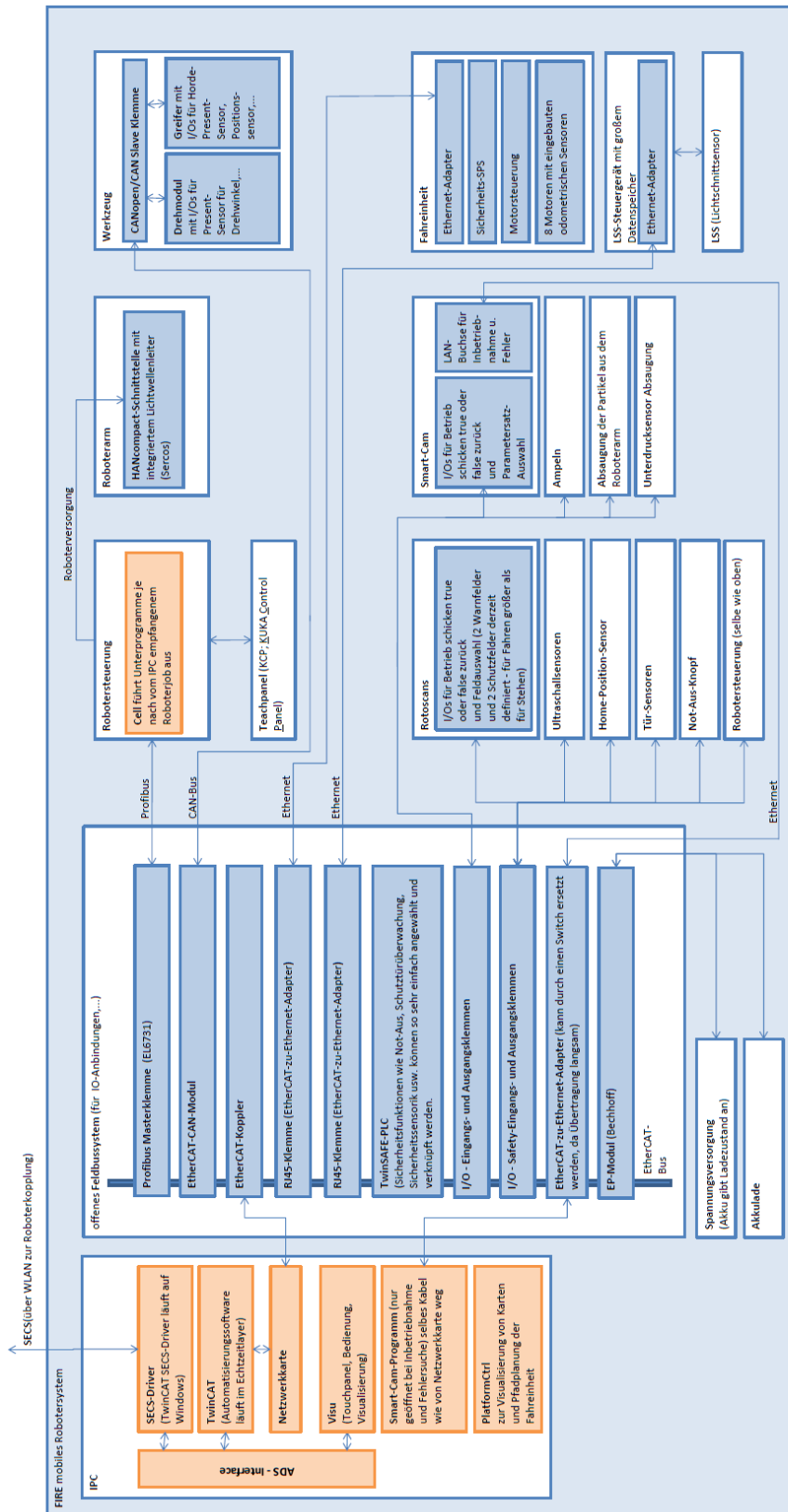


Abbildung 5.31: Übersicht der internen Komponenten des FIRE-Systems. 135

thoden gibt dem System Schaden zuzufügen und ein gewisser Level an Know-How von Nöten ist. Das Gesamtrisiko eines vorsätzlichen Angriffs auf das System wird als sehr gering angesehen, wenn auch die Möglichkeit nicht zu hundert Prozent ausgeschlossen werden kann.

5.10 Reinraumtauglichkeit

Das hier beschriebene Waferhorden-Handhabungssystem FIRE ist für den ausschließlichen Einsatz im Reinraum gedacht. Zum Produktschutz und verlässlichen Erhalt der optimalen Reinraumbedingungen muss das System eine Reihe von zusätzlichen Anforderungen entsprechen. Infineonintern gibt es dazu eigene Richtlinien, deren Erfüllung bei der Einbringung von neuen Systemen im Reinraum genau überprüft und protokolliert werden. Eine Übersicht über notwendige Eigenschaften von FIRE, Maßnahmen zur Erreichung dieser und Messungen zur Überprüfung werden an dieser Stelle vorgestellt.

5.10.1 Eigenschaften und Maßnahmen für den Reinraumbetrieb

Oberflächenstruktur und Benetzbarkeit der Außenhülle sollten für effiziente Reinigbarkeit und Desinfizierbarkeit optimiert werden. Bei Materialien, deren Eigenschaften nicht den erforderlichen Reinheitsansprüchen genügen bietet eine Reihe unterschiedlicher Oberflächenbeschichtungsverfahren Möglichkeiten zur Adaption.

Die Oberfläche des FIRE sollte eine ausreichende mechanische Beständigkeit aufweisen. Weder durch mögliches Anstreifen eines Operators noch durch reinigendes Wischen oder Reiben mit dafür vorgesehenen Tüchern sollte das Material verändert werden oder Abrieb erzeugen.

Ein nicht zu unterschätzender Punkt ist biologische und chemische Beständigkeit der Materialoberflächen. Zur Verhinderung des Etablierens von Pilzen und Bakterien auf den Oberflächen des Systems sollten die verwendeten Materialien für Mikroorganismen keine Nahrungsquelle bieten. Unter chemischer Beständigkeit wird die Widerstandsfähigkeit der verarbeiteten Werkstoffe gegen jegliche im Reinraum bei Infineon verwendeten Desinfektions- und Reinigungsmittel verstanden. Deren Anwendung darf keine Veränderungen an den Materialoberflächen hervorrufen und das Angreifen oder Zerstören der verarbeiteten Werkstoffe soll nicht möglich sein.

Eine wichtige Eigenschaft verwendeter Werkstoffe, vor allem im Außenbereich des Robotersystems ist die Korrosionsbeständigkeit. Durch Auftreten von Korrosion blei-

ben Partikel leichter haften, Reinigungsmaßnahmen bringen nicht den gewünschten Erfolg. Als metallische Werkstoffe werden hier daher hoch legierte, nicht rostende Edelstähle bevorzugt.

Bei der Konstruktion des FIRE sollten auch die elektrostatischen Eigenschaften des Systems beachtet werden. Durch die beweglichen Teile des Systems, wie Roboterarm und Fahrdrehmodule mit Rädern, sowie durch mechanische Reinigung können sich Oberflächen elektrostatisch aufladen. Um die Gefahr einer dadurch entstehenden Kontamination, sowie auch die Möglichkeit von Produktschäden aufgrund von plötzlichen Entladungen auszuschließen, dürfen sich verwendete Materialien nicht elektrostatisch aufladen können. Zur Klassifizierung werden Werte von Oberflächenwiderstand, Durchgangswiderstand und Erdableitwiderstand ermittelt und mit den zulässigen Grenzwerten verglichen. Nähere Informationen dazu finden sich in [DIN98].

Neben den Materialeigenschaften zählt das Sicherstellen optimaler Strömungsverhältnisse wie Geschwindigkeit, Richtung oder Turbulenzgrad zu den Grundanforderungen an ein mobiles Beladesystem. Vor allem durch das geometrische Design von FIRE wird auf minimale Luftverwirbelungen Bedacht genommen. Die Grundform des Systems ist, wie in Abbildung 5.32 (a) und (b) gezeigt, durch Rundungen an der Oberseite statt einer ebenen Fläche so gestaltet, dass Turbulenzen stark minimiert werden. Glatte Oberflächen ohne vorstehende Kanten und eine geringe Anzahl von Stoßstellen und Fugen optimieren das System FIRE für den Reinraumeinsatz. Des Weiteren wird bewusst darauf geachtet, dass das System keine „Töpfe“ beinhaltet in denen sich, wie in Abbildung 5.32 (c) zu sehen, durch Blockieren der Strömung Partikel ablagern können. Durch das bewusste Einsetzen von Löchern in der Oberfläche wird der Strömungsverlauf der Luft durch teilweise Führung durch das Vehikel optimiert, wie Abbildung 5.32 (d) zeigt. Durch die Form des Gesamtkonzepts wird sichergestellt, dass selbst bei der teils unvermeidbaren Entstehung von Partikeln diese auf möglichst direktem Weg Richtung Boden abgesaugt werden und so keine Bedrohung für die Produktqualität mehr darstellen.

5.10.2 Messungen zur Sicherstellung der Reinraumtauglichkeit

Zur Verifizierung der Nützlichkeit der zuvor definierten Eigenschaften und Maßnahmen für den Reinraumbetrieb werden nach Einbringung in den Reinraum vor produktivem Einsatz spezielle Messungen zur Sicherstellung der Reinraumtauglichkeit durchgeführt. Auch während des laufenden Betriebs sollten diese messtechnischen Arbeiten in vorher definierten Zeitintervallen wiederholt werden. Zur Vorgehensweise

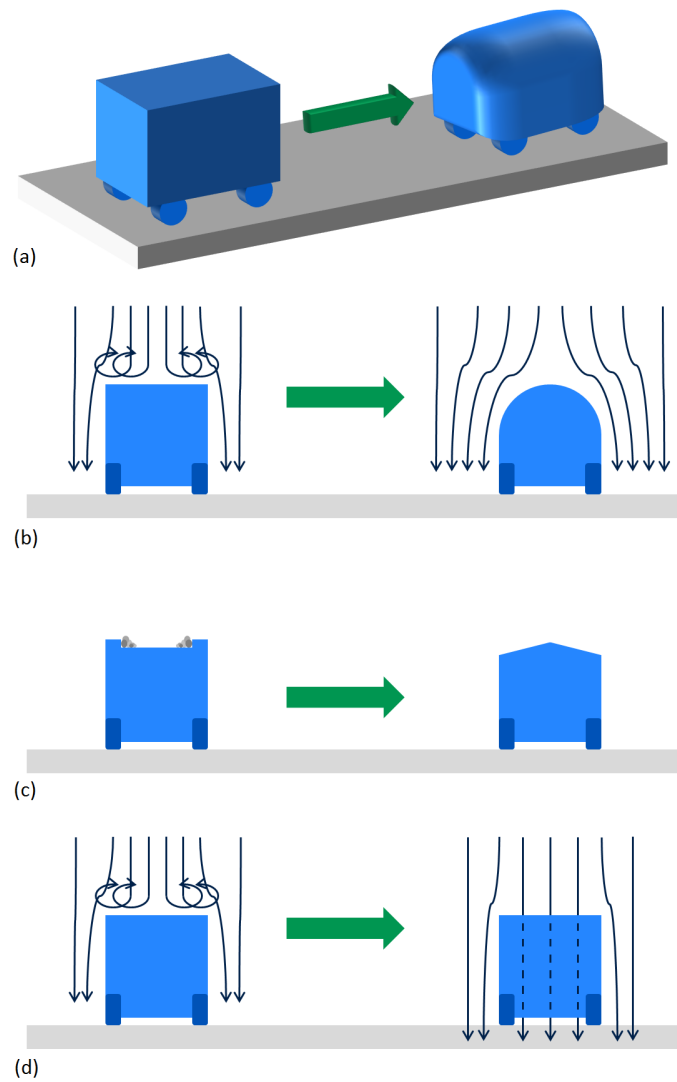


Abbildung 5.32: Geometrisches Design von FIRE für optimale Strömungsverhältnisse wie Geschwindigkeit, Richtung oder Turbulenzgrad. Rundungen an der Oberseite zur Minimierung von Turbulenzen (a) und (b), Vermeidung von „Töpfen“ in denen sich Partikel ablagern können (c) und teilweise Führung des Strömungsverlaufs durch das Vehikel (d).

bei der Durchführung der Messungen kann eine Reihe von Normen und Richtlinien herangezogen werden, unter anderem [VDI03], [DIN00], [Bal96], [Env04]. Von Bedeutung sind Messungen der Luftgeschwindigkeit und des Luftvolumenstroms. Parallelität und Strömungsrichtung können unter Verwendung von Nebelmaschinen sichtbar gemacht werden. Zur Messung der Reinheitsklasse wird mit Partikelmessgeräten die Anzahl von Partikeln einer gewissen Größe in einem Bereich bestimmt. Üblicherweise werden Laserpartikelzähler oder Kondensationspartikelzähler verwendet. Zur Messung der Partikelablagerungen, welche mit den Partikelzählern für Luftmessungen nicht bestimmt werden können, werden entweder die Partikelablagerungen auf einer vergleichbaren Ersatzoberfläche gemessen oder die Partikel von der zu messenden Oberfläche abgeschieden und im folgenden Schritt gemessen. Bei der zweiten Variante werden die Partikel durch Abwischen, Absaugen oder Abheben mit einer Klebefolie von der Oberfläche abgetrennt und erst danach unter dem Mikroskop analysiert und gezählt. Zur Verhinderung von elektrostatischer Aufladung wird die Bodenleitfähigkeit mit Widerstandsmessgerät und Dreipunkt-Sonde gemessen. Zur Gewährleistung der Richtigkeit der Messungen sind Messgeräte allgemein zu eichen, zu kalibrieren und regelmäßigen Funktionstests zu unterziehen. Auch im laufenden Betrieb werden in vorgegebenen Intervallen wie bei anderen Komponenten im Reinraum sogenannte Defektdichte-Messungen durchgeführt, um die Reinraumtauglichkeit sicherzustellen.

6 Anwendung von FIRE

In den vorherigen Kapiteln 4 ab Seite 65 und 5 ab Seite 80 wurde auf Komponenten und Funktionalitäten des Systems FIRE eingegangen. Darauf aufbauend soll nun eine tatsächliche Umsetzung von FIRE mit den damit verbundenen Aufgaben besprochen werden. Bei dem mobilen Beladesystem handelt es sich um eine Neuentwicklung, deren Notwendigkeit und Vorteile verglichen mit vorhandenen Systemen nun klar untermauert werden. Der Vergleich zu manueller Beladung wurde bereits öfter, vor allem in Kapitel 1 ab Seite 1 und in Kapitel 3 ab Seite 35, erläutert und zeigt überzeugend die Wirksamkeit von Automatisierung in der Produktion einer Halbleiterfabrik.

Verglichen mit schienengeführten Systemen sind mobile Lösungen ohne große Veränderungen einfacher im Reinraum integrierbar. Kurze Rüstzeiten der Roboter und der Maschinen bei Roboter-Neueinbringung sprechen deutlich für Mobilität. Ein frei verfahrbares System kommt mit einem viel größeren Spektrum der räumlichen Anforderungen in der Linie zurecht. Unregelmäßige Anlagenfronten, kurze Finger, Gänge mit Knicken, rechtwinkelige Wegverläufe und enge Gänge machen die Anwendung eines mobilen Systems sinnvoll. Wird eine Anlagenfront durch ein Regal unterbrochen, stellt das Umfahren kein unüberwindbares Hindernis dar. Des Weiteren ist es möglich, Anlagen auf beiden Seiten eines Fingers mit nur einem System zu beladen. Schichtgruppenunabhängiger, vorhersagbarer Durchsatz bei Maschinen wird möglich und eine detaillierte Auslastungsanalyse kann erstellt werden.

Vorteile ergeben sich aber nicht nur durch das neue System selbst, sondern auch indirekt. Es entsteht so als Grundvoraussetzung für die Einführung eines mobilen Manipulators mehr Ordnung und Übersichtlichkeit in der Produktion. Abläufe werden standardisiert und fehlerresistenter gemacht. Diese Veränderungen sind nicht nur für die Einführung des Beladesystems, sondern für den gesamten Produktionsprozess von großem Wert. Der Vorteil liegt darin, dass diese Ordnung mit beispielsweise fix vorgegebenen Bahnen für mobile Systeme auch nachhaltig eingehalten wird, weil sie, um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren, eingehalten werden muss. Lange gewünschte Optimierungen im Produktionsablauf, deren Umsetzung oft wegen Aufgaben höherer Priorität hinausgezögert wurden, gewinnen durch Einführung eines

mobilen Beladesystems an Bedeutung und werden umgesetzt. So wird das in Kapitel 3.2.3 auf Seite 57 angesprochene Ausdrucken von Zetteln mit Messergebnissen an Maschinen in der Linie einer Datenübertragung zum Server weichen und so Partikelzahlen reduzieren.

Frei verfahrbare Systeme in der Produktion bilden durch technologischen Fortschritt auf dem Gebiet der mobilen Robotik zunehmend die Grundlage für wirtschaftliche und flexible Automatisierungslösungen. Gleichmäßige Fahrweise senkt die Hektik und bringt bei gleichem Durchsatz strukturiertere, überschaubarere Atmosphäre in die Produktion.

Bei aktuell durchschnittlich zehn bis zwanzig Anlagenrangierungen pro Monat im Reinraum muss bei der Überflurschienenkonstruktion der momentan installierten iRobotics-Systeme die mobile Beladeeinheit mit Roboter, Shuttle und Antriebsteil und die gesamte Schiene abmontiert und danach wieder montiert werden. Bei vorkommenden minimalen Zeiträumen von oft einer Woche von Ausbau bis darauffolgendem Wiedereinbau wird der Roboter in dieser Zeitspanne nicht verwendet. Darüber hinaus erfordert es einen Lagerplatz für die ausgebauten Systeme, zusätzlichen Koordinationsaufwand zwischen den Anlagenrangierverantwortlichen und den Roboterverantwortlichen und die Arbeitszeit derer die das System abbauen, zwischenlagern und wieder einbauen. Ein mobiles Beladesystem fährt einfach zur Seite. Es kann während dieser Zeit an einer anderen stark ausgelasteten Maschine als Unterstützung eingesetzt werden.

6.1 Prozessablauf beim Be- und Entladen

Der Materialfluss funktioniert bei der Be- und Entladung von Maschinen in einer Halbleiterfabrik nicht nach dem Fließlinienbetrieb, sondern nach dem Taxibetrieb [Ull11]. Das bedeutet, die einzelnen Anlagen und Equipmentbuffer (EQB) werden nicht nach einer fix vorgegeben Reihenfolge angefahren, sondern das Leitsystem bestimmt die Abfolge der Stationen. Abbildung 6.1 stellt in einem Materialflussdiagramm Quellen und Senken der Warenströme dar. Die transportierte Ware sind mit Wafern gefüllte Horden. Das linke Teilbild zeigt ein mögliches Fließlinienmodell und das rechte Teilbild das bei Infineon zur Anwendung kommende Taximodell. Bei den folgenden Ausführungen gilt zu beachten, dass Equipmentbuffer zukünftig möglicherweise anders ausgeführt werden, um an neue Gegebenheiten wie boxenloses Handling angepasst zu sein.

Der Beladeprozess kann in einige logische Unterpunkte gegliedert werden:

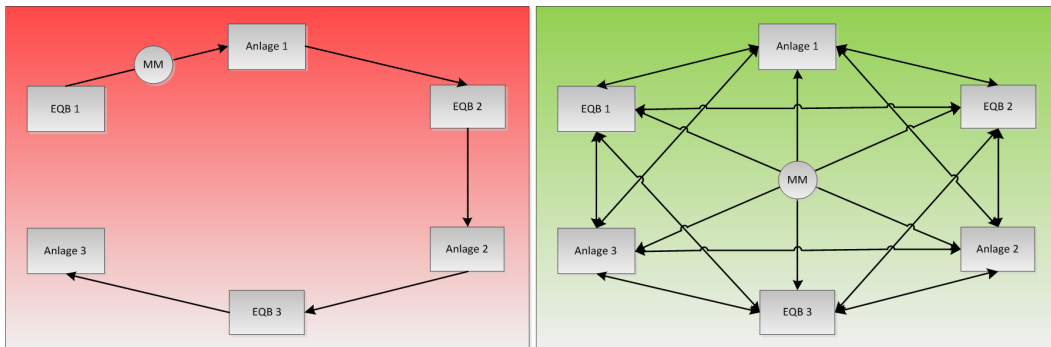


Abbildung 6.1: Der Materialfluss bei der Be- und Entladung der Maschinen funktioniert nicht im Fließlinienbetrieb (links), sondern im Taxibetrieb (rechts).

1. Erhält der mobile Manipulator vom Leitsystem, also vom FWSM über die Kopplung des FIRE, einen Beladebefehl werden ihm gewisse Parameter wie Load oder Unload, EQB-Identifikationsnummer, Anlage und Anlagenloadport übergeben.
2. Der FIRE bewegt sich daraufhin zum angegebenen Equipmentbuffer, wo die Ankunft über einen Present-Sensor vermerkt wird. Eine präzise Ausrichtung des Roboters erfolgt durch ein laserbasiertes System. Versperrt ein Hindernis den Weg, versucht der FIRE es zu umfahren oder wartet sonst bis das Hindernis entfernt wurde und setzt danach seinen Weg fort.
3. Beim EQB überprüft der FIRE durch die integrierte Kamera, ob eine Box vorhanden ist und ob die Clips der Box geöffnet sind. Daraufhin wird die betreffende Box durch die am EQB integrierte Ventilinsel über einen pneumatischen Boxenöffner und einen Zylinder für den FIRE geöffnet. Ein Enlagensensor und ein Vakuumsensor überprüfen den korrekten Ablauf.
4. Mittels der Kamera wird bei der geöffneten Box überprüft, ob sich eine Horde in der Box befindet.
5. Der Roboterarm fährt bis zu einem Abstand von zirka zehn Millimetern knapp vor die Horde und richtet sich an der Horde aus. Danach nimmt der Greifer die Horde auf, das korrekte Greifen wird durch einen Sensor am Greifer überprüft und der Roboterarm verfährt in eine sichere Position für den Transport (Home Position) die auch während des gesamten Transports durch einen Present-Sensor überwacht wird.

6. Der FIRE gibt an den EQB den Befehl zum Schließen der Box.
7. Der FIRE verfährt zur Anlage, die beladen werden soll.
8. Bei der Anlage erhält der FIRE durch eine Messung mittels Laserschnittsensor eine Feinausrichtung. Mit dem Kamerasystem wird überprüft ob das zu beladende Loadport offen und frei ist.
9. Der FIRE platziert die Horde an der geteachten Position und öffnet den Greifer. Danach fährt der Roboterarm wieder in die Home-Position.
10. Der FIRE gibt eine Meldung an den FWSM über die erfolgreiche Abarbeitung des Beladeprozesses.
11. Bis zum nächsten Auftrag bleibt der FIRE bei der Anlage oder begibt sich an einen Ort, wo er die Abläufe in der Linie minimal beeinflusst.

Momentan ist bei den iRobotics-Systemen jede Anlage genau einem Roboter zugeordnet. Von einem Roboter können jedoch mehrere Anlagen bedient werden (siehe Abbildung 6.2). Bei einer mobilen Beladeeinheit ist es aufgrund der neu gegebenen Flexibilität sinnvoll, dass unterschiedliche Roboter dieselbe Anlage bedienen dürfen. Durch geringen Mehraufwand bei der Zuweisung von Roboter und Anlage erhöht sich das Maß an Variabilität und auslastungsangepasster Auftragsabwicklung des Roboters stark.

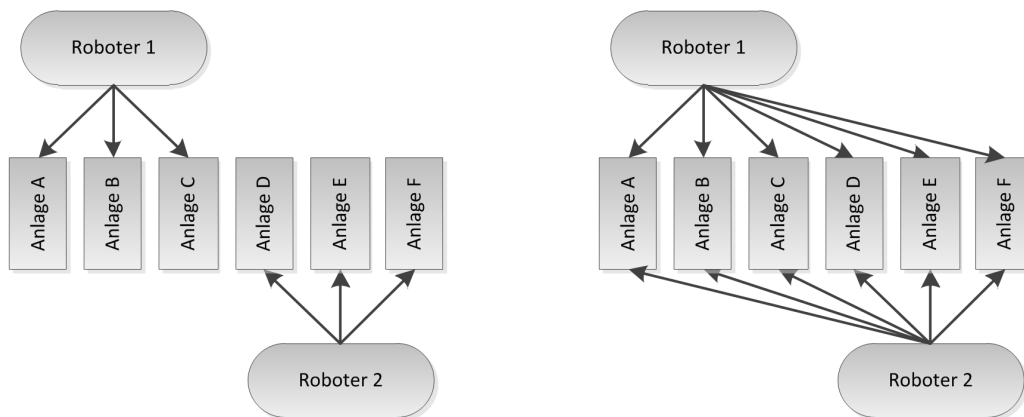


Abbildung 6.2: Zuordnung jeder Anlage zu einem Roboter beim iRobotics-System (links) und Flexibilitätssteigerung bei FIRE, da jeder Roboter jede Anlage bestücken kann (rechts).

6.2 Design

Bei dem mobilen Beladesystem FIRE sind nicht nur die technischen Fähigkeiten sondern auch das dazugehörige Design wichtig. Bei dem in Abbildung 6.3 präsentierten Designvorschlag werden die Ausdehnungen der Komponenten betrachtet und aufgrund von technischen, reinraumspezifischen und optischen Gründen eine optimale Lösung gesucht. Abbildung 6.5 verdeutlicht in einer Ansicht von oben die Wahl des Grundrisses durch Darstellung der Ausdehnung der gewählten Verfahreinheit MPO-700 von Neobotix, der Lasersensoren vorne und hinten und der darüber montierten Robotersteuerung von Kuka. Weiters ist der eingezeichnete Wendekreis des FIRE wegen der geringen Platzverhältnisse im Reinraum so klein wie möglich gehalten. In der Darstellung von oben in Abbildung 6.4(a) ist weiters deutlich zu sehen, dass durch die Abmessungen des Shuttles und des Roboters und geschickte Schrägpositionierung der Horde in Home-Position der gesamte Arm mit Greifer und Horde innerhalb des Grundrisses der Plattform Platz findet, was für kollisionsfreie Navigation von großer Bedeutung ist. Die Umsetzung der zur Erreichung der Reinraumtauglichkeit in Abbildung 5.32 auf Seite 138 angesprochenen Bauform ist in Abbildung 6.4(b) zu sehen. Zu dieser Abbildung ist auch zu bemerken, dass die Montagehöhe des Roboterarms bewusst so niedrig wie möglich gewählt wurde um dem Gesamtsystem Stabilität zu verleihen. Restriktionen hierbei waren die Abmessungen der internen Komponenten sowie der gewünschte Arbeitsbereich von FIRE.

Prinzipiell ist der Reinraumboden sauber zu halten und jegliche frei herumstehende und herumliegende Teile sind nicht erlaubt. Trotzdem kommt es selten vor, dass beispielsweise ein Reinraumstift unbemerkt hinunterfällt und am Boden liegen bleibt. Der Mobile Manipulator sollte mit einer nach unten reichenden Verkleidung konstruiert sein um herumliegenden Kleinigkeiten keine Angriffspunkte zu geben.

6.3 Anwendungsgebiet

Bei der Vorstellung des FIRE-Beladesystems wurde bisher auf Eigenschaften des Systems selbst und die direkte Umgebung Bedacht genommen. Hier soll nun genauer auf notwendige Anpassungen am Roboterarbeitsraum und auf einen speziellen Anwendungsbereich in der Linie eingegangen werden.



Abbildung 6.3: Designvorschlag FIRE.

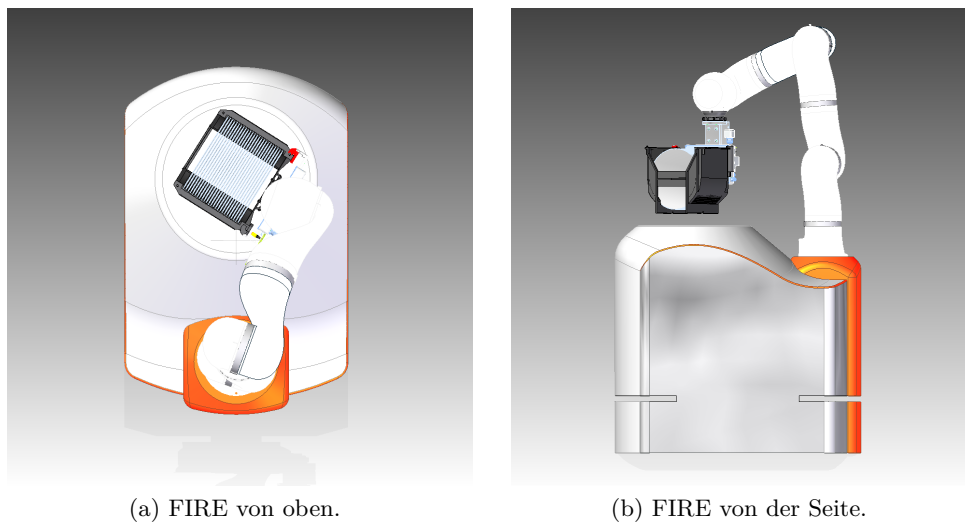


Abbildung 6.4: Designvorschlag Details.

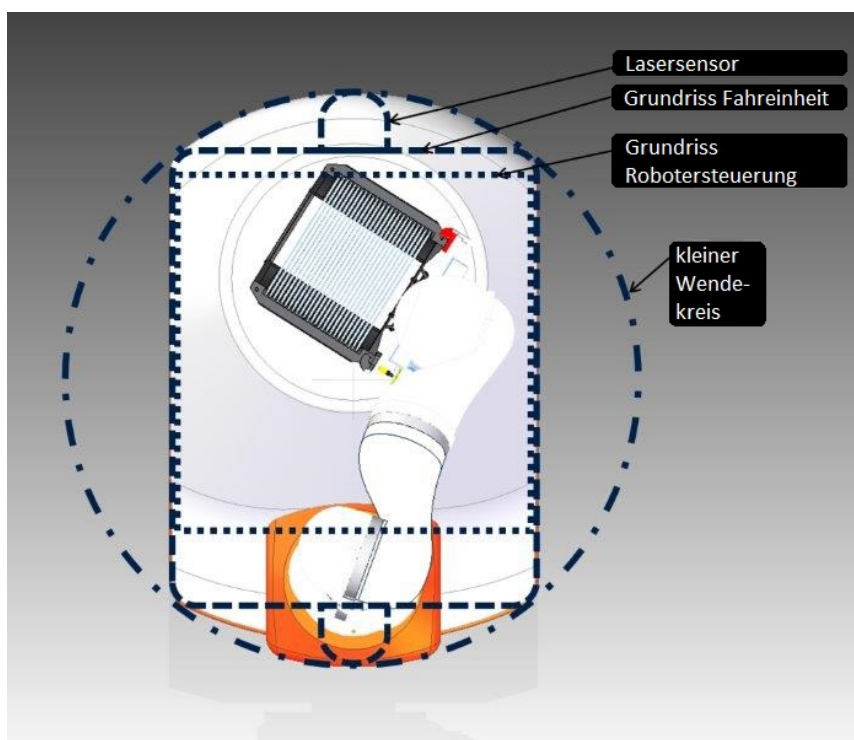


Abbildung 6.5: Designvorschlag Grundriss.

6.3.1 Anpassungen am Roboter-Arbeitsraum

Bei der Konstruktion des Robotersystems wird darauf geachtet, die Veränderungen der Umgebung, in der sich das System bewegt, so gering wie möglich zu halten. Dennoch sind aus kosten-, aufwands- und effizienztechnischen Gründen geringe Anpassungen des Arbeitsraumes um den Roboter empfehlenswert. Diese meist einmaligen Einbringungsarbeiten werden hier aufgezählt.

- Bodenmarkierungen zur Unterteilung in Bereiche
Eine Maßnahme, die zur Sicherheit und Produktivität beiträgt ist das Anbringen von Markierungen am Boden, die freie Fahrtstrecken für den mobilen Manipulator kennzeichnen. Innerhalb dieser hat der Roboter Vorrang und keinerlei wegversperrende Objekte wie Regale für Wafer, Tische, Stühle oder Mülleimer dürfen in diesem Bereich stehen. Denkbar wäre auch eine Unterteilung des übrigen Bereichs in einen Teil in dem sich der Roboter bewegen darf und einen Teil, den der Roboter nicht befährt. Für eine erste Umsetzung spielt diese weitere Aufteilung jedoch eine untergeordnete Rolle.
- Gegenstück für Laserschnittsensor
- WLAN-Router (mögliche Erweiterungen)
- Indoor-Positioning-System-Antennen (mögliche Erweiterungen)
- Boxennester für Bereiche, in denen vorher keine Robotersysteme installiert waren

Bei Verwendung anderer Systemkomponenten als der in Kapitel 5.8 ab Seite 123 erwähnten, werden zusätzliche Änderungen an der aktuellen Reinraumumgebung notwendig:

- Anlagen-Andockstationen
- Orientierungsmarken
- RFID-Module im Boden

6.3.2 Vertikalöfen als spezieller Anwendungsbereich

Als Einsatzort für FIRE kann prinzipiell jede Anlage für 8-Zoll-Operationen in den Fingern der Hallen 13 bis 16 herangezogen werden. Abhängig von einer Reihe von

Faktoren wie Durchsatz der Maschinen, Fortschritt der Umsetzung der Enabler (siehe Kapitel 3.2 ab Seite 53) und Zugänglichkeit erweist sich die Aufgabe der automatisierten Beladung als unterschiedlich schwer. Darum sollte hier der Bereich der Vertikalöfen in Halle 16, dargestellt in der aktuellen Situation in Abbildung 6.6, als erster möglicher Einsatzort für einen Prototypen herangezogen werden. Aufgrund der Kürze des Fingers in Kombination mit den Beladetaktzeiten rentiert sich an dieser Stelle kein schienenbasiertes System. Der Bereich stellt eine optimale Testumgebung für erste produktive Versuche im Reinraum dar, weil er kein Durchgang zu anderen Bereichen ist und nur an einer Stelle, in der Abbildung rechts, von Operatoren betreten werden kann. Abbildung 6.6 zeigt die aktuell vorhandene Umgebung, wobei zur besseren Übersichtlichkeit durch Anlagen, Reinraumeinrichtung und Wände fix besetzte Reinraumfläche in rot gekennzeichnet ist. Die grüne Fläche gibt den freien Reinraumbereich an und die weißen Bereiche markieren den aktuell durch Regale und Tische verstellten Bereich.

Das FIRE-System kann in einem Test gegenüberliegende Anlagen in diesem Finger bedienen. Abbildung 6.7 zeigt einen möglichen Anwendungsfall mit zwei FIRE-Systemen, bei den Anlagen eingezeichneten Loadports und vor den Anlagen platzierten Equipment-Buffern. Hierbei sei erwähnt, dass die Position der Loadports dem aktuellen Zustand im Reinraum zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit entspricht und sich in Zukunft ändern kann. Die Anzahl und Position der Equipmentbuffer ist hier symbolisch eingezeichnet und bedarf bei einer Umsetzung einer Kapazitäts- und Auslastungsanalyse sowohl der in diesem Finger befindlichen Anlagen als auch des mobilen Beladesystems.

Abbildung 6.8 beschreibt eine zukünftig mögliche Variante unter Verwendung eines Überkopftransportsystems. Bei einem solchen Transportsystem können die Waferhorden ohne umgebende Boxen transportiert werden. An einem Lift können die Horden auf eine für das Robotersystem passende Höhe gebracht werden. Diese entspricht der aktuellen Höhe der EQBs und Loadports. Unter einem Schutz zum Erhalt der Laminarströmung können ankommende Horden auf vorhandene, vom Roboterarm erreichbare Horden-Buffer (HB) befördert werden. Von dort würde in diesem Fall die Aufnahme und Weiterverteilung auf die Loadports durch das FIRE-System erfolgen. Nach Prozessende kann das FIRE-System die Horde mit prozessierten Scheiben wieder auf einem HB zum Weitertransport am Transportsystem platzieren. Da die HBs nach Entnahme der Horde wieder für neue Horden frei sind und nicht wie bei den Equipment-Buffern während der gesamten Prozesszeit die leere Box am Buffer verbleibt, werden weitaus weniger HBs als EQBs für den gleichen Durchsatz an den

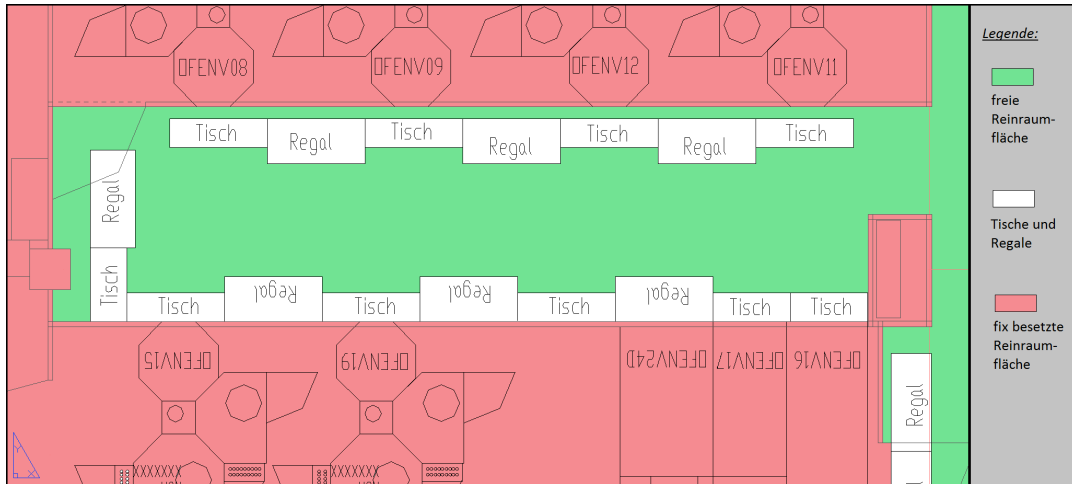


Abbildung 6.6: Vertikalofen-Finger als möglicher Einsatzort.

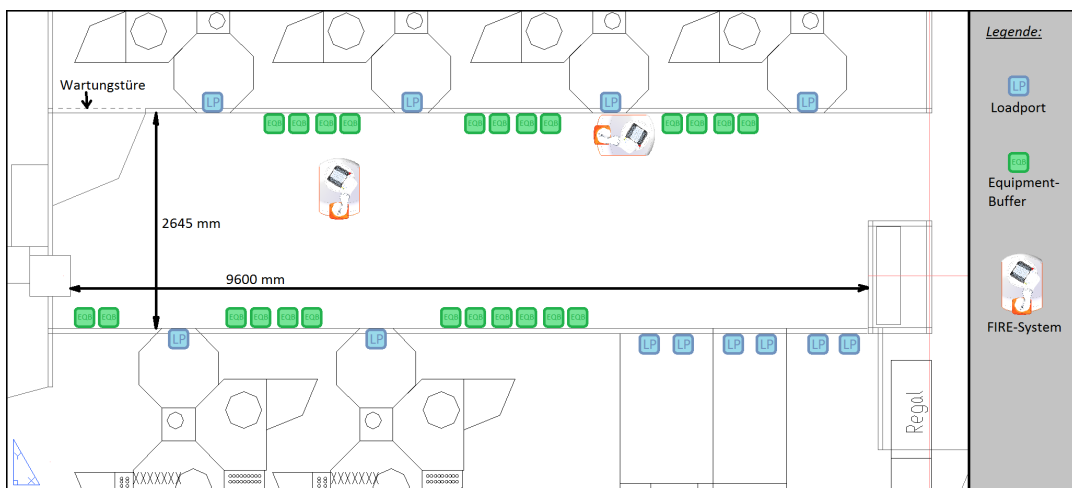


Abbildung 6.7: Möglicher Anwendungsfall mit zwei FIRE-Systemen und EQBs.

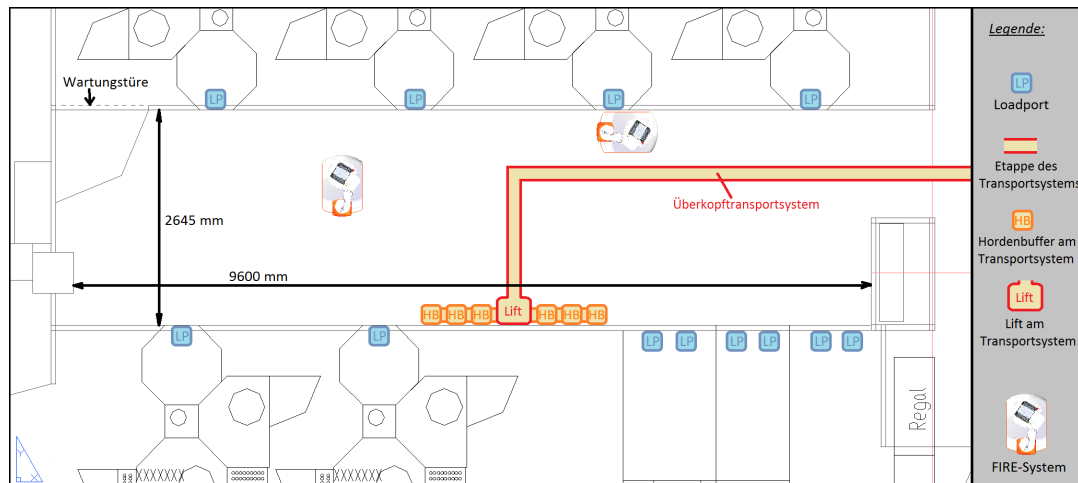


Abbildung 6.8: Variante unter Verwendung eines Überkopfrtransportsystems.

Maschinen benötigt.

Der soeben beschriebene Bereich der Vertikalöfen bietet sich als erster wirklicher Einsatzort an. Für anfängliche Tests im Reinraum wird hier ein abgeschlossener Bereich vorgeschlagen, in dem vorerst eine Anlage beladen wird. Auch dies sollte am Beginn mit nicht produktiven Wafern, sogenannten Dummy-Wafern getestet werden. Nach erfolgreichem Dauertest mit Dummywafern sollte an dieser abgegrenzten Anlage ein Test mit produktiven Wafern stattfinden. Erst wenn auch dieser erfolgreich durchlaufen ist, wird eine Umsetzung von mobiler Beladung durch FIRE für einen Bereich mit mehreren Anlagen vorgeschlagen. Prädestiniert für Versuche sind nicht fix im Reinraum verbaute, sondern am Reinraumboden stehende Anlagen mit guter Zugänglichkeit und Loadports ohne komplizierten Verschlussmechanismus. Weiters werden Sonderbereiche wie die Gelblicht-Finger der Lithographie nicht als erster Versuchsplatz empfohlen. Eine für erste Tests durch Anlagenform und -größe, sowie Höhe, Zugänglichkeit und Anordnung der Loadports hier befürwortete Anlagenart ist in Abbildung 6.9 zu sehen.

6.4 Aufgaben während des Roboterbetriebs

Zusätzlich zur Aufgaben vor der Einbringung und einmaligen Tätigkeiten bei der Einbringung der FIRE-Systeme in der Linie fallen später während des Prozessablaufes Aufgaben an. Eine Zusammenstellung notwendiger Tätigkeiten im Laufe des Betriebs der Roboter zeigt die folgenden durchzuführenden manuellen Handgriffe auf.



Abbildung 6.9: Für erste Tests durch Anlagenform und -größe, sowie Höhe, Zugänglichkeit und Anordnung der Loadports empfohlener Anlagenstil.

- *Nachteachen*

Zwei bis drei Wochen nach der ersten Installation der Roboter bei Öffnen ist beispielsweise ein Nachteachen der feinen Positionen erforderlich. Danach arbeitet der Roboter für lange Zeit fast problemlos. Bei iRobotics-Systemen wird ein Nachteachen bei Entfernen und Wiedereinbringen der Robotersysteme aufgrund von Anlagenrangierungen notwendig. Bei einem FIRE wird sowohl bei kontaktlosem Ausrichten an der Maschine als auch bei einer Umsetzung mit Andockmechanismus bei leichten Veränderungen der Gegebenheiten im Reinraum ebenfalls ein Nachteachen der anzufahrenden Positionen notwendig. Wird eine Positionierung der Horden über ein Kamerasystem gewählt entfällt dieser Schritt vollkommen.

- *Reinigung*

Jede in den Reinraum eingebrachte Anlage, jedes Werkstück, jedes Gerät und jeder Gegenstand muss in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Zum Erhalt der erforderlichen Reinraumtauglichkeit gilt es daher auch einen Plan für das mobile Beladesystem zu erstellen, nach dem das System in vorgegebenen Intervallen gereinigt wird.

- *Wartung*

In regelmäßigen Intervallen finden bei im Reinraum eingebrachten Systemen Überprüfungen als Kontrolle der Funktionsfähigkeit der Komponenten statt. Diese als „Scheduled Downtime“ bezeichneten Phasen sind in den Prozessabläufen verankert und von Anfang an mitbedacht. Dazu zählen beispielsweise Softwareupdates. Unerwünscht aber trotzdem schwer vermeidbar sind außerplanmäßige Wartungen, sogenannte „Unscheduled Downtime“ aufgrund von Systemfehlern, Fehlern von außen, wie Stromausfällen, oder wegen Fehlbedienung des Systems. Auch diese unwillkommenen Unterbrechungen im Prozessablauf werden bei guter Planung bis zu einem gewissen Grad mit einberechnet.

6.5 Kollaboration mit dem Menschen

Da das System FIRE im Reinraum in ständiger Zusammenarbeit mit dem Menschen agiert gilt es zwei entscheidende Punkte zu beachten. Die absolute Sicherheit des Operators im Reinraum muss zu jeder Zeit gegeben sein. Zu einem reibungslosen Funktionieren des Systems trägt aber auch eine optimierte Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine bei. Darauf soll nun näher eingegangen werden.

6.5.1 Sicherheit des Menschen

Um die Sicherheit von Menschen bei Robotersystemen zu gewährleisten, arbeiten diese meist in abgeschlossenen Zellen, zu denen der Mensch während des Betriebs des Roboters keinen Zutritt hat. Betritt der Mensch beispielsweise diesen Bereich durch eine Türe mit Sicherheitsschalter, löst dieser aus und das automatisierte System kommt zum Stillstand. Bei den Platzverhältnissen im Reinraum und der Anforderung der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine im selben Arbeitsraum „Schulter an Schulter“ ist diese klare Abgrenzung zwischen Mensch und Maschine nicht mehr möglich und neue Herausforderungen an Lösungen zur Sicherheit des Menschen entstehen.

Die Basis der Sicherheitstechnik bilden die Rotationslaserscanner und Ultraschallsensoren, die eine virtuelle Hülle um das gesamte FIRE-System legen. Sobald ein Hindernis, in diesem Fall ein Mensch, in diesen Bereich gelangt, erfolgt eine geeignete Reaktion des Systems. Trotzdem werden zusätzlich die im Roboterarm integrierten Momenten- und Geschwindigkeitssensoren dazu verwendet Kollisionen zu erkennen und sofortige Maßnahmen einzuleiten. Eine weitere zusätzliche überlegenswerte Möglichkeit bietet ein „Sensitive Skin“, wodurch in die Oberfläche des Shuttles be-

ziehungsweise des Roboterarms flächige Berührungssensoren integriert sind, die den Menschen additiv schützen können. Die Verwendung von Kamerasystemen zur Erreichung der Sicherheit ist in der Industrie bis auf wenige Ausnahmen nicht umgesetzt und für dieses System nicht geplant. Es gibt verschiedene Reaktionen auf Kontakte wobei hier Kontakte bei Berührungssensoren als tatsächliche Kollisionen und bei berührunglosen Sensoren als Eintritte von Hindernissen in Warn- und Sicherheitszonen von Sensoren verstanden werden.

1. Der Roboter bleibt bei Kontakt stehen.
2. Der Roboter fährt bei Kontakt zurück.
3. Der Roboter sieht einen Kontakt voraus und bleibt stehen.
4. Der Roboter sieht einen Kontakt voraus, und findet einen Weg um das Hindernis dadurch, dass er seinen erlaubten Arbeitsraum und die Zielposition des TCP (Tool Center Point) kennt.

Ziel des Systems FIRE ist der Umgang mit Kontakten laut Punkt 4, sollte dies nicht möglich sein kann er weiter auf Punkt 3 und danach auf 2 und 1 zurückgreifen. Zur Sicherheit des Menschen kann auch ein Blinksignal ähnlich einer Warnblinkanlage bei Verfahren des FIRE beitragen. Ein anderes Thema, das ebenfalls zur Sicherheit des Menschen zählt ist das Vermeiden der Verwendung von gesundheitschädlichen Materialien im gesamten Aufbau des Systems.

6.5.2 Human Machine Interface

Die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (HMI; Human Machine Interface) bilden zum aktuellen Zeitpunkt bei den Anlagen und Roboterlösungen bei Infineon hauptsächlich Monitor, Maus, Tastatur, einzelne Knöpfe Ampeln und Warntöne. Bei einem Mobilmanipulator kann zusätzlich mehr auf der emotionalen Ebene mit dem Operator kommuniziert werden. Die Interaktion sollte weggehend von Maschinencode und technisch komplizierten grafischen Benutzeroberflächen mehr an menschliche Denkmuster angepasst werden und für den Operator sympathisch umgesetzt sein. Der Mensch reagiert beispielsweise auf am Display angezeigte Augen, die die Situation des Roboters widerspiegeln anders, als auf eine Fehlermeldung in Schwarz weiß „Error 78945AY“. Intuitive Bedienbarkeit und damit verbundene kurze Einarbeitungszeiten sparen Kosten und Aufwand, erzeugen Wohlwollen der Operator gegenüber den mobilen Systemen und reduzieren menschliche Fehler bei der Bedienung. Auch Ampeln,

Töne und Geräusche können zum Einsatz kommen. Prinzipiell sollte das System FIRE so konstruiert sein, dass Prozessschritte des Robotersystems klar verständlich sind und Bedienungsfehler durch den Aufbau gar nicht erst möglich sind. Vor falscher Bedienung kann auch das im Reinraum bei Infineon verwendete e-Sign bewahren. Dabei meldet sich der Operator mit einem im Reinraumanzug im Arm integrierten, personalisierten Chip am FIRE an, bevor er Eingaben tätigt. Durch Identifikation der Operator die in den Prozessablauf eingreifen sinkt die Wahrscheinlichkeit von Fehlbedienungen und Operatoren sind konzentrierter und gewissenhafter bei der Bedienung. Sicherheitskritische Anwendungen, wie das Entfernen aus einem Gefahrenbereich sollten jedoch immer schnell und einfach ohne e-Sign-Identifizierung möglich sein. Ein solches rasches Entfernen kann durch Griffe ähnlich denen eines Einkaufswagens eines Supermarktes oder denen eines Rasenmähers mit Zustimmschalter dienen. So kann ein Robotersystem im Gefahrenfall schnell und sicher an eine andere Position bewegt werden. Dies liegt näher an der menschlichen Intuition als eine ebenfalls verwendbare Fernsteuerung.

6.6 Integration von aktuellen Produktionsphilosophien

Bei der Entwicklung eines mobilen Manipulators gilt es zu berücksichtigen, dass ein neuer Bestandteil in den Produktionsablauf eingebracht wird. Technische Machbarkeit ist eine Grundvoraussetzung, es sollten aber auch allgemeine Produktionsphilosophien beachtet werden. Einige wichtige Faktoren in der Produktion seien im Folgenden erwähnt.

- *Qualität*

In der Halbleiterproduktion allgemein spielt Qualität eine große Rolle. Beginnend mit dem CEO von Infineon hat Qualität einen hohen Stellenwert. Kontrollierte und stabile Abläufe nicht nur für die später angestrebte Volumenproduktion, sondern bereits in der Entwicklungs- und Ramp-Up-Phase von FIRE ermöglichen verlässliche Vorhersage und Erreichen der gewünschten Qualität. Die hohe Priorität der Qualität bei Infineon zeigen Leitsprüche wie: „In case of doubt, decide for quality!“, „We live a Zero Defect Culture!“ oder „Qualität geht uns alle an!“. Ein mit Qualität verknüpftes Thema ist die FMEA (siehe weiter unten in der Aufzählung). Nähere Informationen zum Qualitätsmanagement-System bei Infineon finden sich in [Woe13].

- *Effizienz und Effektivität*

Die Entwicklung eines mobilen Beladesystems für Infineon hat neben dem klar ersichtlichen Ziel des erfolgreichen Hordenhandlings auch die Aufgabe zum langfristigen Unternehmenserfolg beizutragen. Dadurch kommt es nicht nur auf die Umsetzung, sondern auch auf Effizienz und Effektivität an. Laut [Sta09] wird unter Effizienz verstanden, die Dinge richtig zu tun. Für FIRE bedeutet dies, das definierte Ziel des mobilen Beladeautomaten optimal mit geringstem Mitteleinsatz zu erreichen. Darauf wurde bei der bisherigen Beschreibung des Systems speziell Wert gelegt. Effektivität bedeutet, die richtigen Dinge zu tun. Bei FIRE beschreibt Effektivität, inwieweit der gewählte Ansatz zur Erfüllung der Be- und Entladeaufgaben geeignet ist. Hierbei sei auf Kapitel 1.2 auf Seite 2 verwiesen, wo das FIRE-System bewusst nicht für alle Bereiche des Reinraums angedacht wird. Die unterschiedlichen Möglichkeiten Roboterzelle, schienenbasiertes System und frei verfahrbare Einheit werden verglichen und klar passenden Einsatzgebieten im Reinraum zugeteilt, um die Effektivität der jeweiligen Systeme zu maximieren.

- *Lean Production*

Eine für die Umsetzung des FIRE unbedingt zu beachtende Produktionsphilosophie ist das von Toyota entwickelte Konzept der Lean Production. Es wird beschrieben als „doing more with less“ [Den07]. Die Kunden, in diesem Fall die Vorgesetzten bei Infineon, sollten ein perfektioniertes System erhalten, während weniger Zeit, weniger Platz, weniger Personal, weniger Roboter und weniger Materialien eingesetzt werden. Diese optimierte Ressourcenausnutzung erhöht den Profitrahmen ohne Einbußen in der Qualität des finalen Beladesystems.

- *Product-Lifecycle-Management*

Unter Product-Lifecycle-Management (PLM) wird die Integration der gesamten während des Produktlebenszyklus anfallenden Informationen verstanden. Nach [ES09] werden im Product-Lifecycle-Management die gesamten Schritte von der Produktentwicklung über die Produktherstellung bis zum Betrieb und Recycling zusammengefasst. Für die Einführung einer neuen innovativen Lösung wie FIRE ist vor allem der Change-Management-Ansatz als Teil von PLM von Bedeutung. Hier wird unter anderem die Akzeptanz der Mitarbeiter, Anwender und Führungskräfte als entscheidender Erfolgsfaktor bei der Implementierung eines Veränderungsprozesses gesehen. Diesen zwischenmenschlichen Prozessen soll auch bei dem neuen mobilen Beladesystem zusätzlich zu technischen Her-

ausforderungen Aufmerksamkeit geschenkt werden.

- *Material Control System*

Ein Material Control System (MCS) bietet die Möglichkeit Beladesysteme, Transportmechanismen und Puffer abzubilden und zu koordinieren. Es bildet einen wichtigen Bestandteil der Intralogistik sowohl innerhalb von Fingern als auch über die gesamte Produktion hinweg gesehen. Es unterstützt bei der flexiblen, effizienten Gestaltung von Produktionsabläufen und wird als fertiges, adaptierbares System von Firmen angeboten.

- *Methods-Time Measurement*

Methods-Time Measurement (MTM) befasst sich mit einer von Beginn an optimalen Prozessablaufplanung nach standardisierten Regeln. Für die Produktgestaltung eines mobilen Manipulators ist ein Vorgehen nach dem MTM-Planungskonzept für eine tatsächliche Umsetzung erfolgsversprechend. Nähere Informationen auch zu Prozessplanung in der digitalen Fabrik finden sich in [\[Bri10\]](#).

- *Lastenheft und Pflichtenheft*

Unter einem Lastenheft wird eine ausformulierte Zusammenstellung der Aufgaben, die für einen erfolgreichen Projektabschluss notwendig sind, verstanden. Für eine Projektumsetzung bei Infineon bildet es einen fixen Bestandteil. Für Ausschreibungen wird für externe Firmen ein eigenes Pflichtenheft erstellt. Die Unterscheidung zwischen Lastenheft als Sammlung von Anforderungen und dem vertraglich geregelten Pflichtenheft mit einer Liste tatsächlich umzusetzender Aufgaben ist klar definiert und bei einer Realisierung zu beachten. Weiterführende Informationen dazu finden sich in [\[Ker08\]](#).

- *Poka Yoke*

Als Poka Yoke wird eine vom Japaner Shigeo Shingo beim Toyota-Produktionssystem entworfene Produktionsphilosophie bezeichnet. Zur Fehlerfreiheit bei Prozessen an denen Menschen beteiligt sind werden die Abläufe so gestaltet, dass durch das Design des Prozesses menschliche Fehler ausgeschlossen oder sofort aufgedeckt werden. Übersetzt heißt das japanische Wort „poka“ soviel wie unglücklicher Fehler und „yokeren“ bedeutet vermeiden. Weiteres dazu und Hinweise zur deutschen Übersetzung des Werkes von Shigeo Shingo befinden sich in [\[Son13\]](#).

- *Industrie 4.0*

Im Hinblick auf zukünftige Ideen und Konzepte die in der Bezeichnung Industrie 4.0 zusammengefasst werden ist eine mögliche direkte Kommunikation der mobilen Einheiten untereinander zur Abstimmung der Beladevorgänge und Weitergabe von wichtigen Informationen denkbar. Trotzdem ist für eine erste Implementierung des FIRE eine zentrale Steuerung vom Leitsystem (MES) und dem darin vorgesehenen FWSM kostengünstiger und einfacher umzusetzen und passt besser in die vorhandene Softwarelandschaft.

- *Feasibility Study*

Die im Folgenden kurz angerissene Feasibility Study (Machbarkeitsstudie) gibt einen kurzen Überblick über die tatsächliche Umsetzbarkeit des mobilen Manipulators und gibt notwendige Schritte an um das Projekt zu realisieren. Die technische Machbarkeit wurde im Laufe der Arbeit erklärt. Zur Überprüfung der wirtschaftlichen Machbarkeit sind neben den vom Unternehmen geplanten Ausgaben für Forschung und Entwicklung beziehungsweise Automatisierung wie in Kapitel 3.4.1 auf Seite 63 erläutert Return on Invest (ROI) und Total Cost of Ownership (TCO) wichtige Faktoren. Organisatorische und zeitliche Umsetzung liegen in der Entscheidungskraft der zuständigen Führungskräfte. Grund-Ressourcen für das Projekt sind zu einem Teil in Form von Produkten und Software, zum anderen Teil in Form von anbietenden Firmen für Spezialanfertigungen vorhanden. Als Beispiel für weitere ist die Mechatronic GmbH zu nennen, die schon bei dem iRobotics-System mechanische Komponenten und Testumgebungen zur Verfügung gestellt hat.

- *FMEA*

FMEA bedeutet Failure Mode and Effects Analysis und ist ein wichtiges Instrument zur Qualitätssicherung bei Infineon. Zur Vorbeugung, Erkennung und Vermeidung von Fehlern sind neben der Design-FMEA und der System-FMEA vor allem die Prozess-FMEA wichtig. Hier werden potenzielle Fehlerklassen nach Prozessen und möglichen Folgen gelistet. Schwere, Auftrittswahrscheinlichkeit und Erkennbarkeit der Fehler werden bewertet und präventive Methoden zur Fehlervermeidung beschrieben. Wird die vorhandene Analyse bei einem speziellen Fehlerfall als unzureichend bewertet, werden Handlungsschritte zur Verbesserung, verantwortliche Personen und ein Fertigstellungsdatum der Änderungen bestimmt, die nachträglich überprüft und in die FMEA eingetragen werden. Ein

Beispiel für einen möglichen Fehlerfall beim Beladeprozess durch den FIRE sei hier gegeben: Bei dem Prozess „Beladen“ kann die Fehlerklasse „Clips vergessen zu öffnen“ auftreten. Durch die am FIRE integrierte Kamera erkennt das Robotersystem, dass die Boxenclips vom Operator nicht geöffnet wurden und ein Fehlverhalten des FIRE wird verhindert. Als mögliche Folge wird angegeben, dass die Box von den pneumatischen Boxenöffnern nicht geöffnet werden kann, der FIRE auf den Zustand „Pause“ geht und ein Eingriff des Operators zum Öffnen der Clips notwendig ist. Zur Fehlererkennung leuchtet die Ampel des FIRE rot und am Bedienmonitor wird der Fehler mit einer Lösungshilfe angezeigt. Beschreibungen wie diese werden stichwortartig in einer übersichtlichen Tabelle zusammengefasst und verbessern die Zuverlässigkeit und Qualität des mobilen Manipulators.

- *Kaizen*

Innovationsschritte alleine genügen nicht um ein verlässliches System zu kreieren. Wie bereits das System iRobotics gezeigt hat zählt ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) zu den essentiellen Bestandteilen des Erfolgs eines Systems. Das stetige Optimieren der Details, wie spezieller Programmabläufe, Greifertyp oder verwendeter Sensoren in der Sicherheitstechnik sind nur einige Beispiele konstruktiver Umsetzung dieser Philosophie bei den bestehenden Robotersystemen von Infineon. Auch bei dem hier präsentierten FIRE wird kein Anspruch auf Abgeschlossenheit des Gesamtprojekts erhoben. Im Gegenteil sollten Personen, die mit dem Konzept zukünftig in Kontakt kommen, zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess angeregt werden. Robert Maurer bezeichnet in [Mau04] Kaizen in Kombination mit Innovation als die zwei wichtigsten Strategien zur Erreichung nachhaltig erfolgreicher Veränderung. Innovation erfordert radikale Veränderung während Kaizen in kleinen Schritten zur Optimierung führt.

6.7 Differenzierung

Bei der Beschreibung des mobilen Beladesystems FIRE wurde im Laufe dieser Arbeit eine Reihe von Fähigkeiten, Aufgaben und Eigenschaften erwähnt. Hier soll nun auch klar definiert werden, welche Aufgaben das Robotersystem nicht hat und wie es sich von evaluierten Beladesystemen an anderen Standorten von Infineon abhebt. Die folgende Aufzählung umreißt Aufgaben, die nicht in den Bereich des hier vorge-

schlagenen FIRE-Systems fallen.

- Der mobile Roboter ersetzt kein Transportsystem. Ein Förderband oder vehikelbasiertes Schienensystem für den Überkopftransport ist durch mobile Fahrzeuge bei dem wenigen vorhandenen Platz und dem hohen Durchsatz der Maschinen nicht sinnvoll auszutauschen.
- Der mobile Roboter ersetzt nicht einen Lift, der die Box oder Horde von einem Überkopftransportsystem auf eine passende Höhe für Mensch und Roboter zum Beladen der Maschine herablässt und nach dem Entladen wieder hinauffährt.
- Des Weiteren ist der hier vorgestellte Beladeautomat klar auf das Handhaben von 8-Zoll-Horden beschränkt. Ein Bewegen von 6- und 12-Zoll-Horden ist mit dem aktuellen System nicht vorgesehen, kann aber theoretisch in zukünftigen Versionen umgesetzt werden. Das Handhaben von 4-Zoll-Horden ist aufgrund des extrem niedrigen
- Das System FIRE ist auf das Greifen von Horden ausgelegt und somit in dem hier präsentierten Umfang nicht für Single-Wafer-Handling oder das Handhaben von anderen Gegenständen im Reinraum, wie Fotomasken oder Nadelkarten gedacht, wenngleich dies für zukünftige Anwendungen nicht ausgeschlossen wird.

Auch eine Differenzierung zu evaluierten Beladesystemen an anderen Infineon-Standorten soll hier angeführt werden. Im Gegensatz zu den in Deutschland in Entwicklung befindlichen System Omnirob der Firma Kuka mit einer Diagonale der mobilen Einheit von ungefähr 140 Zentimetern ist das hier angestrebte System mit Plattformabmessungen von rund 70 mal 50 Zentimetern zirka halb so groß und dadurch für die geringen Abmessungen der Räumlichkeiten bei Infineon am Standort Villach geeignet. Statt Mecanum-Rädern, die wie oben beschrieben bei Bewegungen der Plattform verhältnismäßig stärkere Vibrationen hervorrufen, werden bei dem hier präsentierten mobilen Manipulator Fahr-Dreh-Module als omnidirektionale Antriebe verwendet, wodurch, wie bereits erwähnt, odometrische Bestimmung des zurückgelegten Weges möglich wird.

6.8 Mögliche Erweiterungen

Im Laufe der Arbeit wurde eine Übersicht über eine mögliche Umsetzungslösung des mobilen Be- und Entladesystems FIRE gegeben. Es soll an dieser Stelle aber betont

werden, dass dies nicht die einzig mögliche Antwort auf die bei Infineon gestellten Anforderungen ist und es eine Reihe von möglichen zukünftigen Erweiterungen, Varianten und Abänderungen gibt. Da es sich bei FIRE um ein abgeschlossenes, aktuell kosten-, ressourcen- und zeiteffizient umsetzbares Projekt handelt, werden diese Möglichkeiten in einen Realisierungsvorschlag nicht miteinbezogen. Zur Vollständigkeit und als Anregung für zukünftige Projekte findet sich hier eine Zusammenstellung.

- *Hordentransport*

Für zukünftige Applikationen ist auch der Transport von Horden innerhalb eines gewissen Bereichs, wie beispielsweise eines Fingers denkbar. Dabei kann das Aufgabengebiet des FIRE dahingehend erweitert werden, dass in kurzen Fingern oder an für ein Transportsystem schwer erreichbaren Gebieten im Reinraum die Grenze zwischen Transportsystem und Beladesystem verschoben wird. An diesen Stellen ist eine Ansammlung von Boxennestern am Fingeranfang oder eine ähnliche für diesen Fall angepasste Übergabestation denkbar.

- *Transport von Foups und 8-Zoll-Horden*

Das hier vorgestellte System FIRE ist für den das Be- und Entladen von 8-Zoll-Maschinen gedacht. Bei einer Erweiterung auf weitere Scheibendurchmesser liegen die damit verbundenen Herausforderungen an unterschiedlichen Komponenten des Prozessablaufs. Für eine Beladung von 12-Zoll-Anlagen muss das gesamte System FIRE für mehr als doppelt so hohe Traglasten ausgelegt sein. So erhöht sich das aktuell maximal handzuhabende Gewicht von 3600 Gramm auf 9000 bis 10000 Gramm. Eine solche Erweiterung zieht tiefgreifende Veränderungen an den mechanischen Komponenten des Systems nach sich. Beispielsweise kann statt dem LBR iiwa 7 R800 mit einer Nenntaglast von 7 Kilogramm der LBR iiwa 14 R820 mit einer Nenntaglast von 14 Kilogramm verwendet werden. Da mit 25 Wafern gefüllte 6-Zoll-Horden leichter sind als mit 25 Wafern gefüllte 8-Zoll-Horden, fallen die mechanischen Änderungen für eine Erweiterung bezogen auf das gesamte automatisierte Beladesystems kaum ins Gewicht. Lediglich am Greifer sind dabei Anpassungen notwendig. Eine erhebliche Rolle bei einer Erweiterung des Systems auf den nächst kleineren Scheibendurchmesser spielen jedoch die notwendigen und bei 6 Zoll kaum umgesetzten, für 8 Zoll bereits in Kapitel 3.2 ab Seite 53 detailliert ausgearbeiteten Enabler, d.h. Schritte zur Umsetzung von Automatisierungslösungen. Prozessabläufe wie Load-and-Go sind bei diesen Anlagen wegen fehlender Horden-ID-Kärtchen nur bei einem

verschwindend geringen Testanteil erprobt. So kann zusammenfassend gesagt werden, dass zur Erreichung eines höheren Automatisierungsgrades diese Erweiterungen zweckmäßig sind, momentan aber vor allem aus Zeit-, Aufwands- und Kostengründen die Integration in ein erstes FIRE-Beladesystem nicht empfehlenswert ist.

- *Teachen durch manuelle Führung*

Durch die im Roboter LBR iiwa von Kuka verbauten Momenten- und Positionssensoren in den Gelenken ergibt sich gegenüber herkömmlichen Roboterarmen eine Vielzahl an neuen Möglichkeiten. So wird auch ein Teachen durch manuelle Führung des Roboters realisierbar. Tests am LBR iiwa im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass ein Mensch den Roboterarm in die gewünschte Stellung bringen kann und der Roboter danach die eingelernte Pose wieder anfährt. Ein bewusst einfach gestaltetes Erlernen der Posen des Roboterarmes ist bei einem mobilen System wie FIRE zielführend. Mit einer simpel gehaltenen Benutzeroberfläche mit wenigen Buttons wie beispielsweise „Loadport-Pose speichern“, „EQB-Pose speichern“ und „Zwischenpunkt speichern“ wird das Erlernen der Posen auch für weniger technikaffine Menschen möglich und Bedienungsfehler reduziert. Der Bediener bringt den Roboter in die Zielpose oder in eine Pose, die am Weg dorthin von der Robotertrajektorie eingeschlossen werden soll und betätigt den Button.

- *Synchrone Shuttle- und Armbewegung*

Im hier vorgestellten System FIRE sind Bewegungen des Shuttles zeitlich klar von Bewegungen des Roboterarms getrennt. Hiermit wird eine Redundanz der möglichen Bewegungsabläufe durch Fortbewegung und Roboterarm verhindert. Außerdem wird eine genaue Bewegung des TCP durch Adaption der Trajektorie aufgrund von Sensordaten des Laserschnittsensors ermöglicht. Dieser gibt jedoch erst nach Erreichen der finalen Position des Shuttles vor der Anlage die korrekten Daten zur Anpassung der Armbewegung. Zur Prozesszeitoptimierung kann in späteren Versionen der erste Teil der Armbewegung theoretisch schon durchgeführt werden, während das Shuttle noch in Bewegung ist und der zweite Teil der Armbewegung sensorgesteuert adaptiert werden. Hierbei muss jedoch auch die Erfordernis einer kollisionsfreien Robotertrajektorie beachtet werden, welche bei simultaner Arm- und Shuttlebewegung schwerer zu erreichen ist. Aufgrund der erwähnten Herausforderungen werden die Bewegungsabläufe von

Roboterarm und Shuttle in der aktuell vorgestellten Version bewusst klar getrennt.

- *Adaptive Räderposition*

Bei dem aktuellen System ist die Position der Fahr-Dreh-Module fix. Je nach Gewicht der Beladung, Ausladung des Roboterarms und Fortbewegungsgeschwindigkeit könnte die Position der Räder in einer zukünftigen Version veränderbar sein um die Grundfläche und Standfestigkeit einerseits zu erhöhen oder die Grundfläche zu verringern um den Gesamtaufbau schmäler zu machen und weniger Platz im Reinraum einzunehmen.

- *Laser-LIDAR-Sensoren an den Shuttle-Ecken*

Statt wie aktuell vorgeschlagen vorne und hinten mittig am Shuttle können die Lasersensoren für die Navigation für eine bessere Abdeckung der wahrzunehmenden Umgebung an zwei gegenüberliegenden Ecken des FIRE-Shuttles montiert werden. Diese Variante kann je nach Art der Verbauung die Basisfläche und den Wendekreis des Systems erhöhen.

- *Sprachsteuerung*

Zu leichterem, für den Menschen natürlicherer Bedienbarkeit des Robotersystems sollte eine zukünftig mögliche Sprachsteuerung nicht ausgeschlossen werden. Nach einem Ansprechen mit „Fire hallo“ kann das FIRE-System auf den Menschen hören und weiteren Befehlen folgen, bis man „Fire danke“ oder „Fire Ende“ sagt. Dazu wird vorgeschlagen, dass jeder Befehl mit „Fire“ beginnen sollte. Zum Anhalten des Roboters ohne Notaus wäre auch „Fire Stopp“ denkbar. In einer ersten Umsetzung eines komplexen mobilen Beladesystems im Reinraum hat eine Sprachsteuerung nicht oberste Priorität und der Nutzen sollte klar hinterfragt werden. Daher wird dieser Punkt unter möglichen Erweiterungen erwähnt. Aus Gründen der Vollständigkeit soll in der Arbeit nicht darauf verzichtet werden. Außerdem gilt es die teilweise laute Umgebung in der Halbleiterproduktion zu beachten, aus der die menschliche Stimme herausgefiltert werden muss.

- *Intelligente Equipmentbuffer*

Zukünftige Puffer zwischen Transport und Beladeroboter müssen nicht exakt den aktuell vorhandenen Lösungen entsprechen. Sensoraufgaben welche aktuell durch eine Checker-Kamera erfüllt werden, können zukünftig durch einfachere

Sensoren gelöst werden. Hierbei wird von einer fehleranfälligen, helligkeitssensitiven Kameralösung am Robotersystem auf Sensoren direkt am EQB übergegangen. So werden Überprüfungsaufgaben, ob die Boxenclips offen sind, ob die Box offen ist oder ob sich eine Horde in der Box befindet anders aufgebaut. Des Weiteren sind Puffersysteme möglich, welche statt Boxen alleine Horden puffern. Bei einem boxenlosen Transportsystem, welches Horden transportiert, ist das gesamte Puffersystem abzuändern und die Komplexität des Puffers sinkt.

- *Vermessungsfahrzeug*

Das beschriebene FIRE-System orientiert sich an einer durch den Menschen vorgegebenen Karte. Das beinhaltet den Aufwand der Kartenerstellung und Pflege für einen Mitarbeiter. Bei einem zukünftigen Einsatz von mehreren FIRE-Einheiten rentiert sich ein frei verfahrbares System zur dreidimensionalen Erfassung der Umgebung. Dies kann wie bei dem Projekt Kurt3D der Universität Osnabrück durch einen schwenkbaren LIDAR-Scanner auf einem mobilen System umgesetzt werden. Aus den dreidimensionalen Daten kann eine zweidimensionale Karte mit für FIRE erlaubten Zonen erstellt werden. Ein auf einem frei verfahrbaren System montierter um eine horizontale Achse schwenkbarer Rotationslaserscanner wie dieser ist aufwendiger als der standardmäßig fix verbaute LIDAR-Scanner. Dadurch entstehen drei verschiedene Varianten der Anwendung eines solchen Systems. Die umfangreichste und zugleich teuerste Variante ist die Ausrüstung jedes FIRE-Systems mit einem schwenkbaren Laserscanner. Billiger ist es, nur einen FIRE mit dem System auszustatten der bei Bedarf unterschiedliche Gebiete des Reinraums dreidimensional erfasst. Dabei bleiben jedoch weitere Komponenten der Roboterplattform ungenutzt. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich die Möglichkeit der Konstruktion eines eigenen mobilen Vermessungsroboters. Ein solcher kann auch weitere allgemein an vielen Stellen in der Linie durchzuführende Aufgaben übernehmen. Luftdruck-, Temperatur- oder Partikelzahlenmessungen können von einem System wie diesem parallel durchgeführt werden.

- *Integration von Bodenunebenheiten bei der Präzision*

Zur Erreichung der notwendigen Präzision des TCP wurde die mögliche Abweichung der Shuttlepose in Kapitel 5.7 auf Seite 108 in drei verschiedene Komponenten unterteilt. Diese Beschränkung auf Deviationen in Δz , Δx und $\Delta \alpha$ reicht bei idealen Bedingungen aus um die Horde exakt zu positionieren. Unter diesen

idealen Bedingungen wird ein unveränderlicher, perfekt flacher Reinraumboden angenommen, der bei dem Shuttle keinerlei Abweichungen der folgenden in Abbildung 6.10 zusätzlich zu Abbildung 5.15 auf Seite 110 orange eingezeichneten Komponenten hervorrufen kann.

- Δy gibt die Unsicherheit in der Höhe zwischen dem mobilen System und einem fixen Referenzsystem an.
- $\Delta\beta$ gibt unter Verwendung der üblichen Beschreibung der Orientierung bei mobilen Systemen (Roll-Nick-Gier-Winkel; engl. Roll-pitch-yaw angle) den Rollwinkel des Shuttles an. Er bezeichnet in das Maß der Drehung um die Längsachse des Shuttles.
- $\Delta\gamma$ gibt die Ausprägung des Nickwinkels (pitch) an und beschreibt das Maß der Drehung des Shuttles um die Querachse.

Auf Grund von Bodenunebenheiten, Verschmutzungen, Fertigungsunterschieden von Bodenplatten, Kanten zwischen Bodenplatten, unerwünscht herumliegenden kleinen Gegenständen und dergleichen herrschen im Reinraum nicht immer ideale Bedingungen und es werden zur vollständigen Beschreibung der Pose statt der bisher drei Variablen für Bewegungen im zweidimensionalen Raum insgesamt sechs Variablen (Δx , Δy , Δz , $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$) zur Beschreibung erforderlich. Die angesprochenen möglichen Abweichungen sollten für das Erreichen der korrekten Pose des TCP entweder durch passende Sensoren erkannt und im Programm mit verarbeitet werden oder als zusätzliche statistische Unsicherheit modelliert werden.

- *Komponentenbauweise*

Zusätzlich zu der Beladung von Anlagen sind in der Linie noch einige weitere Aufgaben, wie Sondertransporte zusätzlich zu einem Transportsystem, Reticle-Transport, zuvor erwähnte Messungen und dergleichen durchzuführen. Dies ist einer der Gründe weshalb eine Komponentenbauweise des FIRE-Systems von Bedeutung ist. Einfach aufgebaute Schnittstellen sowohl zwischen den einzelnen mechanischen Komponenten als auch zwischen den kooperierenden Softwareteilen des Systems erleichtern das Austauschen einzelner Komponenten. Ein modularer Aufbau kann sich unter anderem in Teile wie die Basisverfahreinheit, den Roboter mit Zubehör wie Robotersteuerung und Teachpanel oder einen Steuereinheitsblock untergliedern. Diese Module wären leicht als Ganzes austauschbar, im Fehlerfall unter den Robotersystemen wechselbar und zur

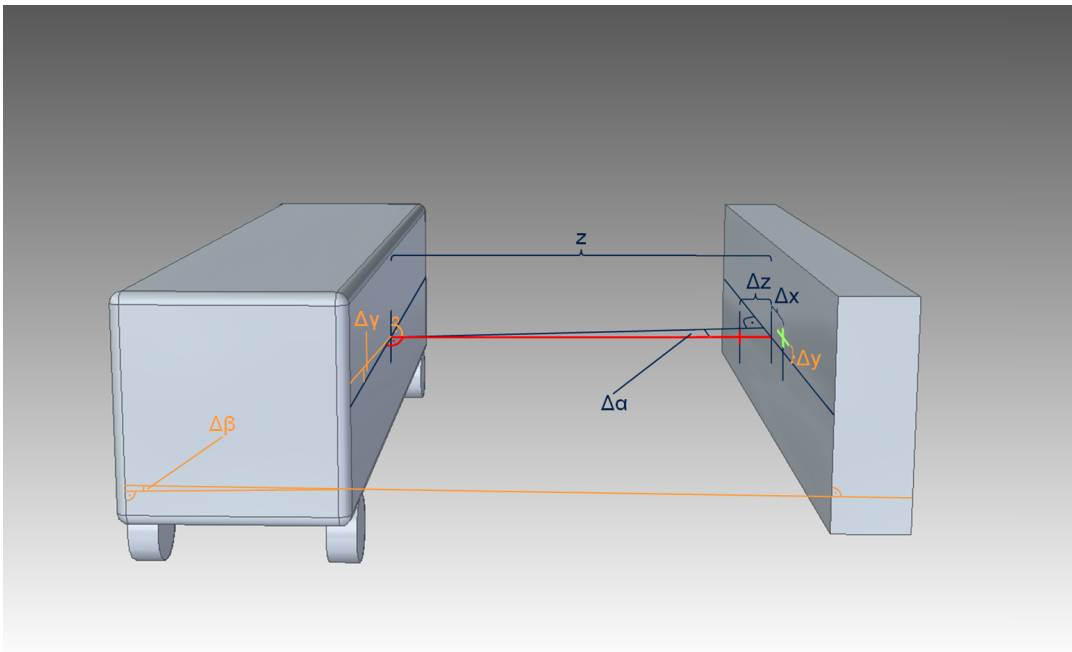


Abbildung 6.10: Vollständige Beschreibung der Roboterpose durch sechs Variablen ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$) durch Integration von Bodenebenen bei der Präzision.

Abänderung des Robotergesamtsystem zu beispielsweise einem zuvor erwähnten 3D-Scan-Roboter könnte das Roboterarmmodul gegen ein Scanmodul getauscht werden.

- *Slim-Version*

Dadurch, dass es sich bei dem hier vorgestellten Robotersystem um einen ersten Prototypen und eine Machbarkeitsstudie handelt wird als Ziel primär auf eine funktionierende Umsetzung geachtet. Dabei wird aber beispielsweise stillschweigend hingenommen, dass am System drei große Steuereinheiten verbaut sind. Die mobile Neobotix-Plattform enthält einen Bordrechner, der verwendete Roboterarm eine Steuereinheit und als generelle Steuerung ist ein dritter Rechner am System verbaut. Verzichtet man bei der Konstruktion des Systems auf die oben erwähnte Komponentenbauweise wäre hier eine Zusammenfassung in einer einzelnen Steuerung möglich. Außerdem könnte durch Überbrückung des Not-Aus-Knopfes am Teachpanel durch einen Not-Aus-Knopf am Shuttle direkt auf das ständige Mitführen des Panels verzichtet werden. Dies bringt einerseits eine Gewichts- und Platzersparnis am Shuttle, andererseits aber auch die Möglichkeit dasselbe Teachpanel an mehreren Robotersteuerungen anzuschließen. Zur Erstellung einer Slim-Version sollten die gesamten Komponenten des Systems durchgegangen werden und an jeder Stelle hinterfragt werden, wie der entsprechende Teil einfacher oder sparsamer realisiert werden kann oder ob er überhaupt weggelassen werden kann. Beispielsweise reichen theoretisch nur zwei der vier angetriebenen Fahr-Dreh-Module der Plattform benötigt. In einem Test kann ermittelt werden ob bei einem System mit zwei gegenüber oder nebeneinander montierten angetriebenen Rädern die erreichte Kraft und Genauigkeit der Bewegung ausreicht. Slim-Versionen sollten vor einer ersten produktiven Umsetzung klar evaluiert werden um mögliche Verbesserungspotentiale nicht von Haus aus zu verwerfen.

- *Low-Cost-Variante*

Ähnlich einer Slim-Version des mobilen Manipulators ist es auch sinnvoll eine Variante zu ermitteln, die die geringst möglichen Kosten verursacht. Dabei sollte reduzierter Wert auf Optimierungsgebiete wie Platzbedarf oder Qualität gelegt werden um die kostengünstigste Variante zu ermitteln. Nach unabhängigen Evaluierungen wie der Slim-Version oder der Low-Cost-Variante fließen diese in die tatsächliche Umsetzung des FIRE-Systems ein.

- *Liftersatz bei Boxless*

Bei Verwendung eines Boxless-Transportsystems müssen die Horden von dem Transportsystem durch einen Lift auf die Höhe der Boxennester gebracht werden. Es kann aber auch ein FIRE-System ohne Verwendung eines Lifts durch eine zusätzliche senkrechte Linearachse so erweitert werden, dass es die Horden direkt vom Transportsystem aufnimmt. Eine Prinzipskizze dazu findet sich in Abbildung 6.11. Auch eine RFID-Antenne am Roboterflansch zur Erkennung unterschiedlicher Horden ist in dem Fall denkbar.

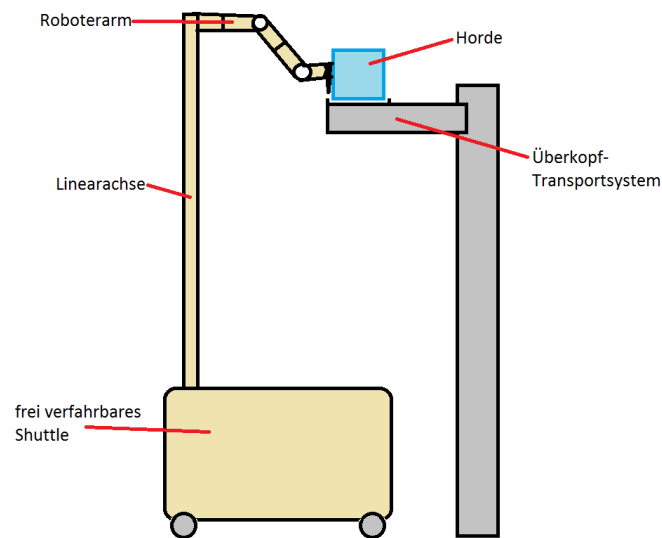


Abbildung 6.11: Prinzipskizze: Mögliches Robotersystem mit zusätzlicher Linearachse zur direkten Entnahme von Horden vom Transportsystem ohne Lift.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In den bisherigen Kapiteln wurde auf Basis von vorhandenen Systemen und einer Vielzahl an Anforderungen das mobile Beladekonzept FIRE für die Halbleiterindustrie erarbeitet. Um der Aufgabe eines autonomen, frei verfahrbaren Robotersystems zur Handhabung von Waferhorden für den 24-Stunden-Betrieb in der Produktion im Reinraum im selben Arbeitsraum mit Menschen gerecht zu werden, wurde wie folgt vorgegangen. Die aktuellen Prozesse im Reinraum, sowie Robotersysteme bei Infineon wurden untersucht und Angebote am Robotik-Markt auf Anwendungstauglichkeit geprüft. Es wurden Anforderungen an ein Robotersystem analysiert und hierbei räumliche Gegebenheiten, Transportboxen, Horden, Scheiben, Anlagen, Boxennester, Genauigkeit und Toleranzen, Reinraumauglichkeit, Schnittstellen zu anderen Systemen, Standardisierung, Geschwindigkeit, Vibrationen und eine Anbindung an ein Leitsystem untersucht. Es wurde auf Menschen, Normen, Gesetze und wirtschaftliche Aspekte bei Automatisierungslösungen eingegangen.

Auf dieser Basis wurde das System FIRE vorgestellt und dessen Hauptkomponenten Antriebseinheit, Spannungsversorgung, Roboterarm und Greifer, Sicherheitselemente, Sensorik und Steuereinheit behandelt. Um den erwähnten Komponenten Leben einzuhauchen wurden daraufhin Funktionalitäten des Systems ausgearbeitet und Vorschläge und Lösungswege zur Erreichung der zuvor ermittelten Anforderungen gegeben. Dieser Teil beschäftigte sich mit Sensorsystemen zur Plattformnavigation, Mapping, Lokalisierung, dem Bewegungsmodell, Pfadplanung, Stati-Check und der ausführlichen Erarbeitung der Präzisionserreichung. Eine mögliche Systemkombination zur Hordenpositionierung wurde vorgeschlagen und ein Konzept zum Zusammenspiel integrierter Softwarekomponenten erarbeitet. Daraufhin befasste sich die Arbeit mit der Erreichung der für das System essentiellen Reinraumauglichkeit. Abschließend wurde der Fokus auf die tatsächliche Anwendung des Systems FIRE gelegt. Der nötige Prozessablauf beim Be- und Entladen von Anlagen, sowie ein möglichst ansprechendes Design auf Basis der zuvor ausgearbeiteten Restriktionen wurden erstellt. Anhand eines konkreten Anwendungsgebietes wurde der Einsatz im Reinraum geplant. Aufgaben während des Roboterbetriebs, Kollaboration mit dem Menschen, Integration

von aktuellen Produktionsphilosophien, Differenzierung und mögliche Erweiterungen bildeten ebenfalls Kernpunkte dieses Teils. Inhalt der Arbeit stellte somit eine umfassende Beschäftigung mit dem Thema mobiler Handhabung in Kombination mit der Erarbeitung eines abgeschlossenen, umsetzbaren Konzepts für den Halbleiterhersteller Infineon Technologies AG dar.

7.1 Gesamtkonzept 2020

Bei Infineon intern wird ein mögliches Konzept erstellt, wie die Produktion am Standort Villach im Jahr 2020 aussehen kann. Die notwendigen Schritte in diese Richtung werden präsentiert und die Vor- und Nachteile im Vergleich zum aktuellen Stand der Produktion evaluiert. Bei einer Umsetzung des FIRE-Systems sollte weiter in die Zukunft gedacht werden und mögliche weitere Evolutionsschritte durch innovative Lösungen bereits vor dem ersten produktiven Einsatz getätigt werden. Auch bizarr und schwer realisierbar erscheinende Ideen sollten auf Umsetzbarkeit geprüft werden. Zu den Stärken von Infineon Technologies am Standort Villach zählen unter anderem hohe Flexibilität und eine überdurchschnittlich breite Produktpalette. Die unterschiedlichen, oft in Kleinstserien produzierten Produkttypen besitzen unterschiedliche Prozessabläufe. Durch eine Automatisierung sollte die Möglichkeit schnell auf sich ändernde Märkte, wechselnde Kundenwünsche und neue Produkte zu reagieren nicht nur erhalten bleiben sondern sogar verstärkt werden. Flexible Automatisierung unter Einbindung mobiler FIRE-Systeme in das Gesamtkonzept der Produktionsautomatisierung ermöglicht entscheidende Vorteile und schnelle Anpassung an rasch wechselnde Kundenwünsche.

7.2 Robotik-Zukunft

Die Robotik-Zukunft allgemein geht in Richtung Vollautomatisierung in der Industrie sowie zunehmender Automatisierung im öffentlichen und privaten Bereich. Es gilt daher nicht nur rechtzeitig am Stand der Zeit zu bleiben sondern im Idealfall Vorreiter in Automatisierungsfragen zu sein um auch in einigen Jahren konkurrenzfähig und erfolgreich zu sein. Fortschritte in der Akkumulatorentwicklung werden mobile Systeme effizienter machen. Durch höhere Energiedichten werden kleinere, leistungstärkere Akkus möglich werden. Dank leichten Steigerungen im Ladewirkungsgrad wird die Effizienz steigen. Vor allem die maschinelle Wahrnehmung der Umgebung wird große Fortschritte machen. Aktuelle Roboterlösungen funktionieren meist nur in

kontrollierten, abgeschlossenen, vom Menschen getrennten Umgebungen. Einen ersten Schritt in Richtung Mensch-Maschine-Zusammenarbeit im selben Arbeitsraum setzt das Projekt iRobotics. Durch leistungsfähigere Perzeption werden Robotersysteme wie dieses und autonome Systeme wie FIRE möglich gemacht und in den nächsten Jahren billiger, sicherer und häufiger werden. Feinfühligere Kollisionserkennung und Momentensensoren in Roboterarmen werden Roboterabläufe im selben Arbeitsraum mit dem Menschen zusätzlich zu den Fortschritten in der Perzeption sicherer machen. Schritt für Schritt werden dadurch aktuell hauptsächlich in der Produktion in Fabriken eingesetzte Roboter mehr und mehr für die Zusammenarbeit mit dem Menschen geeignet sein und mehr das Privatleben der Menschen begleiten. Beginnend mit der Fabriksautomatisierung werden im Straßenverkehr, im Haushalt und in öffentlichen Einrichtungen mehr und mehr automatisierte Systeme Einzug halten und die Vernetzung, Kommunikation und Interaktion dieser wird um ein Vielfaches steigen. Das System FIRE soll ein Schritt in Richtung dieser Zukunft sein und Infineon Technologies AG als innovatives Unternehmen eine Vorreiterrolle in der Fabriksautomatisierung und Automatisierung allgemein einräumen.

A Literatur

- [Aal] Universität Aalborg. *Little Helper*. URL: <http://robotics-automation.aau.dk/> (besucht am 22.05.2014).
- [AB12] Michael Arndt und Karsten Berns. *Mobile Robots in Smart Environments: The Current Situation*. Kaiserslautern, Deutschland: Universität Kaiserslautern, 2012.
- [ABB] ABB. *Frida - Dual-arm concept robot*. URL: <http://www.abb.com/cawp/abbzh254/8657f5e05ede6ac5c1257861002c8ed2.aspx> (besucht am 22.05.2014).
- [Ade13] Adept. *Datenblatt Adept Lynx*. Dortmund, Deutschland, 2013.
- [ASI12a] ASI. *ÖNORM EN ISO 10218-1*. Austrian Standards Institute/ Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2012.
- [ASI12b] ASI. *ÖNORM EN ISO 10218-2*. Austrian Standards Institute/ Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2012.
- [Bal96] National Environmental Bureau of Balancing NEBB. *Procedural Standards for Certified Testing of Cleanrooms*. 1996.
- [Bic] Antonio Bicchi. *Phriends*. URL: http://www.phriends.eu/press_kit.htm (besucht am 22.05.2014).
- [Bri10] Bernd Britzke. *MTM in einer globalisierten Wirtschaft*. München, Deutschland: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag, 2010.
- [Cog13] Cognex. *In-Sight® 7000 Series Vision System*. Cognex Corporation, 2013.
- [Den07] Pascal Dennis. *Lean Production Simplified*. New York: Productivity Press, 2007.
- [DGU] DGU. *Kollaborierende Roboter*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung - Fachausschuss Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau.

A Literatur

- [DIN00] DIN. *DIN EN ISO 14644, Teil 1 - Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Klassifizierung der Luftreinheit*. ISO/TC209/Deutsches Institut für Normung, 2000.
- [DIN98] DIN. *DIN IEC 61340 - Elektrostatik - Festgelegte Messverfahren für spezifische Anwendungen des elektrischen Widerstands*. Deutsches Institut für Normung, 1998.
- [Dow05] Tim Dowd. *Flawless Manufacturing with RFID Technology*. Infineon Technologies AG, 2005.
- [Env04] Institute for Environmental Sciences IES. *IES-RP-CC006.3 - Testing Cleanrooms*. 2004.
- [ES09] Martin Eigner und Ralph Stelzer. *Product Lifecycle Management*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [Fah09] Farbod Fahimi. *Autonomous Robots; Modeling, Path Planning and Control*. New York: Springer Verlag, 2009.
- [FZIa] Forschungszentrum Informatik FZI. *HoLLiE – The Assistance Robot*. URL: <http://www.fzi.de/en/forschung/projekte/hollie/> (besucht am 22.05.2014).
- [FZIb] Forschungszentrum Informatik FZI. *viEMA*. URL: http://www.viema.org/static_pages/images/viema_zelle.jpg (besucht am 22.05.2014).
- [GG09] Lothar Gail und Udo Gommel. *Projektplanung Reinraumtechnik*. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: Hüthing, 2009.
- [GG12] Lothar Gail und Udo Gommel. *Reinraumtechnik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [Hau07] Matthias Haun. *Handbuch Robotik - Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2007.
- [Hen13] Peter Henöckl. *Robotik und Bildverarbeitung - E4,5*. TU Wien, ACIN, 2013.
- [HMM13] Peter Henöckl, David Madl und Gilbert Markum. *Lokalisation am Pioneer P3-DX*. Wien, 2013.
- [IFF] Dirk Mahler/ Fraunhofer IFF. *Lisa - Assistenzroboter in Laboren von Life-Science-Unternehmen*. URL: <http://www.lisa-roboter.de/bilder.htm> (besucht am 22.05.2014).

- [Inf] Infineon. »Abbildungen von Infineon Technologies AG«. Villach, Regensburg, Dresden.
- [Int07] Intellion. *Lottrack - Smart Automation for Semiconductor Fabs*. Intellion AG, 2007.
- [IPAA] Fraunhofer IPA. *Care-O-bot*. URL: <http://www.care-o-bot.de/de/care-o-bot-3/download/images.html> (besucht am 22.05.2014).
- [IPAb] Fraunhofer IPA. *DESIRE (Deutsche Servicerobotik Initiative)*. URL: <http://www.service-robotik-initiative.de/> (besucht am 22.05.2014).
- [Kat+06] Dov Katz u. a. *The UMass Mobile Manipulator UMan: An Experimental Platform for Autonomous Mobile Manipulation*. Boston Massachusetts USA, 2006.
- [Ker08] Harold Kerzner. *Projektmanagement - Ein systemorientierter Ansatz zur Planung und Steuerung*. Heidelberg: Redline, 2008.
- [Key13] Keyence. *Produktfolder Lasersensoren*. 2013.
- [Kha] O. Khatib. *Stanford Robotic Manipulation Group, robotics.Stanford.EDU/groups/manips/projects*.
- [Kuk10] Kuka. *Leichtbauroboter 4+ Spezifikation*. Augsburg: Kuka Roboter GmbH, 16. Apr. 2010.
- [Lam+14] Lara Lammer u. a. *Mutual Care: How older adults react when they should help their care robot*. Third International Symposium on New Frontiers in Human Robot Interaction - AISB 2014, 2014.
- [LD91] John J. Leonard und Hugh F. Durrant-Whyte. *Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons*. IEEE, 1991.
- [Leu13] Leuze. *LPS - Line Profile Sensor - Technische Beschreibung*. Owen, Deutschland: Leuze electronic GmbH + Co. KG, 2013.
- [Mau04] Robert Maurer. *One Small Step Can Change Your Life: The Kaizen Way*. New York: Workman Publishing Company, Inc., 2004.
- [Maya] Till May. *Fahr-Dreh-Modul Datenblatt*. Neobotix GmbH.
- [Mayb] Till May. *MM-800 Datenblatt*. Neobotix GmbH.
- [Mayc] Till May. *MPO-500 Datenblatt*. Neobotix GmbH.
- [Mayd] Till May. *MPO-700 Datenblatt*. Neobotix GmbH.

A Literatur

- [Met12] Metralabs. *Features Flyer Scitos G5*. Ilmenau, Deutschland, 2012.
- [Mör13] Christopher Mörtl. *Bachelorarbeit: Analyse und Optimierung eines automatischen Anlagenbeladungssystems für die Halbleiterindustrie*. Villach, Jan. 2013.
- [NAV65] NAVSHIPS. *Introduction to Sonar Technology*. Bureau of Ships, Dept. of the Navy, 1965.
- [Neo] Neobotix. *MPO-700*. URL: <http://www.neobotix-roboter.de/omnidirektionaler-roboter-mpo-700.html> (besucht am 22.05.2014).
- [Per09] Marco Pertl. *EMag - Infineon Austria gewinnt Kärntner Innovations- und Forschungspreis mit Dünnwafel-Technologie*. Infineon Technologies AG, 2009.
- [RG13] Jitendra R. Raol und Ajith K. Gopal. *Mobile Intelligent Autonomous Systems*. CRC Press, 2013.
- [Roh04] Jonathan D. Rohrs. US 6,810,976 B2 (USA). 2004.
- [Rom] Università di Roma "La Sapienza" UNIROMA1 UR1. *SAPHARI - Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction*. URL: <http://www.saphari.eu/> (besucht am 22.05.2014).
- [RR] rethink robotics RR. *Baxter - A unique robot with unique features*. URL: <http://www.rethinkrobotics.com/products/baxter/> (besucht am 22.05.2014).
- [Sch05] Wolfgang Schulz. *Anwendung und Vergleich von Algorithmen zur sicherheitsgerichteten Auswertung von 2D Laserscanner-Entfernungsdaten*. Bonn: Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg, 17. Feb. 2005.
- [Son13] Jochen Peter Sondermann. *Poka Yoke*. München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [Spi13] Andreas Spitaler. *BTS-Antennen Abdeckung - Bestand und Ausbau*. Villach, 2013.
- [Sta09] Susann Staats. *Metriken zur Messung von Effizienz und Effektivität von Konfigurationsmanagement- und Qualitätsmanagementverfahren*. Bremen: Europäischer Hochschulverlag, 2009.

- [SYS12] Ali Asghar Nazari Shirehjini, Abdulsalam Yassine und Shervin Shirmohammadi. *An RFID-Based Position and Orientation Measurement System for Mobile Objects in Intelligent Environments*. IEEE Instrumentation und Measurement Society, 2012.
- [TBF06] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard und Dieter Fox. *Probabilistic Robotics*. USA: The MIT Press (Massachusetts Institute of Technology), 2006.
- [Tec] Karlsruher Institut für Technologie KIT. *Armar*. URL: <http://his.anthropomatik.kit.edu/241.php> (besucht am 22.05.2014).
- [TUW] ACIN TUWien. *Hobbit*. URL: http://hobbit.acin.tuwien.ac.at/hobbit_image.html (besucht am 22.05.2014).
- [Ull11] Günter Ullrich. *Fahrerlose Transportsysteme*. Vieweg+Teubner, 2011.
- [UO] Universität Osnabrück UO. *Project Kurt3D*. URL: <http://www.inf.uos.de/kbs/KURT3D.html> (besucht am 22.05.2014).
- [Vah08] Vahle. *Contactless Power System*. Kamen, Deutschland: Vahle-Gruppe, 2008.
- [VDI03] VDI. *VDI 2083, Blatt 1 - Reinraumtechnik - Grundlagen, Definitionen und Festlegungen von Reinheitsklassen*. Verein Deutscher Ingenieure, 2003.
- [Vin13] Markus Vincze. *Fachvertiefung - Robotik und Bildverarbeitung - Navigation*. Wien: ACIN TU Wien, 2013.
- [WH10] Chia-Wen Wu und Chi-Kuang Hwang. US 2010/0243342 A1 (USA). 2010.
- [Woe13] Horst Woerschling. *Process Manual Quality Management*. München: Infineon Technologie AG, 2013.
- [Wol08] Hans A. Wolfspurger. *Elektromagnetische Schirmung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [YS11] Alper Yilmaz und Mubarak Shah. *Hough Transform Lecture-18*. UCF, 2011.
- [Zim12] Uwe Zimmermann. *Vorhabensbeschreibung Isabel*. Augsburg: Kuka Laboratories GmbH, Okt. 2012.

B Anhang

B.1 Danksagung

Die Umsetzung dieser Arbeit wurde entscheidend durch die engagierte, freundliche Mithilfe einer Reihe von Personen sowohl Infineon-intern als auch extern und von Unternehmen, Institutionen und Universitäten ermöglicht. Eine Auswahl tatkräftiger Unterstützer, welche in persönlichen Gesprächen wertvolle Beiträge geleistet haben, sei hier in Tabelle B.1 in alphabetischer Reihenfolge gegeben.

Tabelle B.1: Danke für Unterstützung in persönlichen Gesprächen.

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|--|--|
| Roland | Ambrosch | Informationen und Ideen im Gespräch gemeinsam mit Peter Reisner | ProAutomation - CEO |
| Michael | Arnold | Feedback und Ideen zum Konzept FIRE | Managing Director Peergroup Automation |
| Manuel | Aspernig | Anregungen zum Gesamtkonzept | Fa. Mechatronic |
| Ridha | Azaiz | kreative Beispiele zu mobilen Roboterlösungen | Solarbrush Service Robots |
| Martin | Bachlechner | reichhaltige Informationen und Einblicke in die Automatisierung bei Infineon Dresden | CTO Roth & Rau Ortner GmbH |
| Thomas | Bauer | Erfahrungsaustausch und Beispiele zu mobilen Systemen | Infineon Regensburg |
| Uwe | Behn | Konzeptevorschläge für mobile Systeme | Adept |
| Reinhard | Berger | Informationen und Erfahrungen zu Software | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|--|
| Rodney | Brooks | Ideenaustausch zur Präzisions- erreichung im persönlichen Ge- spräch | Prof. am MIT/ rethink robotics |
| Alexander | Bubeck | Informationen und Beispiele zu mobilen Handlingsystemen im Gespräch am Fraunhofer IPA | Fraunhofer IPA; Projektleiter Roboter- und Assistenzsysteme |
| Petra | Darnhofer | Unterstützung bei NDAs und Geschäftlichem | Infineon Villach |
| Walter | De Brouwer | Informationen und Ideen | Scanadu NASA Ames Research Park, USA |
| Christina | DeLuca | Unterstützung bei Projektpla- nung und Veröffentlichung | Infineon Villach |
| Christian | Denninger | viele nützliche Vorschläge als FTS-Verantwortlicher in Regens- burg | Infineon Regens- burg |
| Rüdiger | Dillmann | Informationen zu mobiler und humanoider Robotik | KIT - Institute for Anthro- pomatics, Insti- tutsleitung |
| Gernot | Domes | Informationen zu Produktionsab- läufen | Infineon Villach |
| Andreas | Dorer | mehrmalige Unterstützung bei Automatisierungsthemen und Softwareintegration | Fa. Hella |
| Christian | Dorfer | Unterstützung durch Informatio- nen zum Ist-Zustand bei Infineon Villach | Infineon Villach |
| Christian | Doujak | Unterstützung bei Hallenplänen | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|--------------------|
| Lisa | Ebner | gute Zusammenarbeit, Hilfe bei Messungen im Reinraum und weitere Unterstützung als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |
| Rainer | Eiselmeier | Informationen und Vorschläge zu 3D-Kamerasystemen | Fa. Haratech |
| Hans Peter | Fischer | Einbringung nützlicher Erfahrungen als ehemaliger Projektleiter iRobotics | Infineon Villach |
| Gerhard | Frieser | Unterstützung durch richtungsweisende Informationen und Anregungen zum Inhalt der Arbeit | Infineon Villach |
| Oliver | Gaind | gemeinsame Tests am Roboterarm UR5 von Universal Robots | FJMayer GmbH |
| Bianca | Ganser | gute Zusammenarbeit, Ermöglichung und Förderung der Arbeit als direkte Vorgesetzte und Betreuerin | Infineon Villach |
| Michael | Gerung | Zur-Verfügung-stellen von LBR-Robotern wie iiwa für Tests mit persönlicher Einführung | Fa. Kuka |
| Henrik | Gommel | nützliche Informationen | Fraunhofer Austria |
| Manfred | Graf | Mithilfe bei dem Einbringungsort für FIRE | Infineon Villach |
| Manfred | Grilz | Unterstützung in derselben Abteilung | Infineon Villach |
| Christian | Großegger | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |
| Horst | Hainzl | Unterstützung in Sicherheitsfragen | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|---|
| Andreas | Henöckl | wertvolle Beiträge zur Arbeit | Vater |
| Erich | Hoffelner | Anregungen und Fertigung von Metallteilen für den Testaufbau | Infineon Villach |
| Stefan | Hofmann | Einblicke und Beispiele zu mobilen Systemen | Fa. Hella |
| Uta | Hofmann | Unterstützung durch Informationen und Unterlagen | Infineon Villach |
| Andy | Howson | Beispiele zu mobilen Systemen und Stromversorgung | iCart - The Automation Group |
| Stephan | Hummel | Diskussion zu Herausforderungen mobiler Beladesysteme | Först Intralogistik |
| Benedikt | Janßen | Informationen und aktuelle Einblicke zu Roboterarmen und Automatisierungssystemen | Fa. Schunk |
| Noland | Katter | Diskussion zu Navigation und Mensch-Maschine-Kooperation | Fa. Anybots, CA |
| Peter | Koch | Erklärungen und Beschreibungen von Waferhandlingsystemen | Infineon Dresden |
| Matthias | Koffler | Unterstützung als Teammitglied bei iRobotics | Infineon Villach |
| Wolfgang | Kohlweihs | Unterstützung bei Fragen zur Reinraumtauglichkeit | Infineon Villach |
| Konstantin | Konrad | Einblicke und Feedback zum System FIRE | Projektleiter Produktions-IT Abteilung Reinst- und Mikroproduktion, Fraunhofer IPA |
| Rudolf | Konrad | Unterstützung durch Informationen und Weitervermittlung | Infineon Villach |
| Michael | Lanzner | Wissen und Anregungen zum BTS/ IPS | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|---|
| Franz | Liegl | Unterstützung bei Automatisierungsthemen und Teilefertigung | Fa. Mechatronic |
| Richard | Lippe | Unterstützung als Automatisierungsverantwortlicher bei Infineon Villach | Infineon Villach |
| Christian | Maier | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |
| Wolfgang | Malcher | Unterstützung bei Roboterthemen | Fa. Kuka |
| Florian | Martin | Wissenswertes zu Bildverarbeitung und Kamerasystemen für FIRE | Fa. Schmachtl |
| Johann | Massoner | Hilfe bei Projektplanung und als wertvoller „Advocatus Diaboli“ | Infineon Villach |
| Till | May | Informationen, gemeinsame Hardwaretests und Konzepte zu mobilen Plattformen | Fa. Neobotix; Geschäftsführer |
| Walter | Melchior | Unterstützung durch Informationen und Anregungen zu Serverkomponenten des MES | Infineon Villach |
| Reiner | Moll | Feedback und Anmerkungen zu FIRE | Director Automotive Electronics Semiconductor Plant Reutlingen, BOSCH |
| Christopher | Mörzl | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|--|
| Martin | Moser | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |
| Werner | Müller | Führung und Unterstützung durch Informationen zu Automatisierung und Enablern | Infineon Villach |
| Kai | Pfeiffer | Informationen und Anregungen zu mobilen Robotersystemen, Plattformen und Sensorik | Fraunhofer IPA; Gruppenleiter Robotersysteme |
| Matthias | Plasch | Informationen und Beispiele zu mobilen Manipulatoren | Fa. Profaktor; Robotik und Adaptive Systeme |
| Hans-Dieter | Preiml | Unterstützung durch Informationen und Ideen zu Anlagen, Prozessen und Produkten | Infineon Villach |
| Christian | Preschern | Unterstützung durch Informationen zu Softwarekomponenten des MES und Kopplungen | Infineon Villach |
| Michael | Primessnig | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |
| Thomas | Reisinger | Fürsprache, Anregungen und Feedback zum System FIRE | CTO Infineon Villach |
| Peter | Reisner | Unterstützung bei Automatisierungsthemen als Spezialist für Sondermaschinenbau | Infineon Villach |
| Klaus | Sandtner | Beistand bei innovativen Ideen | Infineon Villach |
| Patrick | Scharf | gute Zusammenarbeit und viele nützliche Einblicke als iRobotics-Teammitglied | Infineon Villach |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|---|------------------------------------|
| Andreas | Schaufler | Einladung und Informationen zu Sicherheitslösungen und Sensorik | Fa. Schmachtl |
| Astrid | Scherzer | Informationen und Einblicke zu BTS und Abläufen im Reinraum | Infineon Villach |
| Martin | Scheuchenspflug | Informationen und Leihgabe zu Data-Matrix-Code und Laserschnittsensor | Fa. Schmachtl |
| Germar | Schneider | Unterstützung bei Automatisierungsthemen | Infineon Dresden |
| Phillip | Seibald | Informationen und Beispiele zu Sensorik bei mobilen Systemen | Fa. Keyence |
| Johannes | Sturm | Fabriksführung und Erklärungen zu Funktion und Umsetzung von Automatisierungslösungen | Infineon Dresden |
| Berndt | Tropper | Informationen und Unterlagen zu Projektplanung | Infineon Villach |
| Hans | Truppe | Förderung der Arbeit als Vorgesetzter | Infineon Villach |
| Rafael | Ubl | Unterstützung durch Informationen zu Abläufen bei mobiler Beladung | Infineon Villach |
| Josef | Unterweger | Hilfe bei CAD-Zeichnungen | Infineon Villach |
| Daniel | Valtiner | Unterstützung bei Automatisierungsthemen | Infineon Villach |
| Heinz | Veitschegger | Unterstützung durch Informationen und Schulung | Infineon Villach |
| Markus | Vincze | Ermöglichung der Arbeit und Unterstützung als universitärer Betreuer | TU Wien, ACIN |
| Florian | Vohr | Informationen, Präsentation und Erklärungen zu mobilen Robotersystemen | Fa. Neobotix; Head of Construction |

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung - Unterstützung in persönlichen Gesprächen

| Vorname | Nachname | Danke für... | Zuordnung |
|----------------|-----------------|--|--------------------------------|
| Florian | Walchshäusel | Persönliche Schulung und Beratung zum LBR iiwa | Fa. Kuka |
| Günther | Wellenzohn | Förderung von innovativen Ideen | Infineon Villach |
| Chris | Wilkins | Unterstützung und kreative Anregungen für Automatisierung von Prozessen | SpaceX, Washington DC |
| Walter | Wohlkinger | Einblicke und Beispiele zu mobilen Systemen | Blue Danube Robotics, CEO |
| Johannes | Wößner | Unterstützung bei Roboterthemen | Fraunhofer IPA, Robotersysteme |
| Michael | Zillich | Einblicke und Beispiele zu mobilen Systemen | Blue Danube Robotics, CTO |
| Günther | Zirzmeier | Führung und Erklärung der Fabriksautomatisierung bei Infineon Regensburg | Infineon Regensburg |

Dank gilt auch Harald Heinrich von Infineon Dresden und Stefan Spreitzer von Infineon Regensburg für wichtige Beiträge zu mobilen Systemen über E-Mail, sowie Ricardo Kressin von der Fachhochschule Stralsund für informative Telefongespräche und Unterlagen. Auch meinen Studienkollegen möchte ich für ihre Unterstützung danken. Last but not least möchte ich meinen Eltern für die jahrelange Unterstützung bis zur Erreichung der Arbeit danken.

B.2 Worterklärungen

| | |
|------|--|
| Boot | hitze- und chemikalienbeständige Halterung für ca. 75 Wafer auf der diese in den Ofen gelangen. |
| Box | In einer Box befindet sich bei 8 Zoll eine Horde mit bis zu 25 Wafern und bei 6 Zoll eine oder zwei Horden mit ebenfalls 25 Wafern. Die Box wird zum Transport der Wafer zwischen den Maschinen verwendet. Auf ihr ist im Fall von 8 Zoll Scheiben meist ein DisTag befestigt. |

| | |
|---------------|--|
| CAD | Computer Aided Design – rechnerunterstütztes konstruieren von dreidimensionalen Komponenten |
| Chuck | Halterung an der der Wafer in Maschinen bei Prozessen beispielsweise durch Unterdruck fixiert wird |
| DisTag | bei Intellion mit Infineon entwickeltes Display and Transponder Tag, das auf einem kleinen Bildschirm einen Ausschnitt des Protokolls anzeigt und zur vollautomatischen Lokalisierung der Box innerhalb der mit Antennen ausgerüsteten Reinräume verwendet werden kann. |
| Dispatchliste | Liste welche Lose an der betreffenden Anlage gefahren werden sollen |
| Dünnwafer | (=Dünnscheiben) bezeichnet man Wafer unter einer Waferdicke von 200 Mikrometern. In der Leistungshalbleiterherstellung bei Infineon sind geringe Verluste wichtig. Je dünner der Wafer geschliffen wurde, desto geringer ist der Energieverbrauch des fertigen Chips. Der Vergleich mit der Dicke eines Menschenhaares von üblicherweise 40 bis 80 Mikrometern erklärt, dass Dünnwafer bei einem Durchmesser von 200 Millimetern (8 Zoll) und besonders bei 300 Millimetern (12 Zoll) leicht brechen und spezielle Handhabung erfordern. |
| EPA | Einzelprozessanweisung; eine Operation im Protokoll der abzuarbeitenden Prozessschritte ist meist in einzelne EPAs mit EPA-Nummer unterteilt |
| EQB | Equipment-Buffer – Zwischenlager-Schnittstelle für Waferboxen, wo diese automatisch geöffnet werden und die Horden für die Entnahme durch das Robotersystem bereitgestellt werden |

| | |
|------------|--|
| FabCockpit | grafische Benutzeroberfläche an den einzelnen Maschinen mit Dispatchliste für Aufgaben wie das An- und Abmelden von Losen, Suchen von Losen, oder Status-einstellungen an Maschinen, die die Daten des Workstream und weiterer Programme übersichtlich anzeigt und leicht verarbeitbar macht. |
| Finger | Seitengang im Reinraum der meist ähnliche Maschinen enthält |
| Fotomaske | Projektionsvorlage zur fotolithographischen Strukturierung mittels der gewisse Teile des zuvor aufgetragenen Fotolacks durch Belichtung entfernt werden. Diese belichteten, von Fotolack befreiten Gebiete am Wafer werden danach bei einem Ätzzvorgang abgetragen. Je nach gewünschter Struktur an einem Layer am Wafer sind unterschiedliche Fotomasken notwendig, die bei unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Produkten an einer Maschine angeliefert, gewechselt und wieder abgeliefert und gelagert werden müssen. |
| Foup | Front Opening Unified Pod oder Front Opening Universal Pod; Waferbox für 25 Scheiben der Größe 12 Zoll in die die Horde automatisch integriert ist |
| Grauraum | Bereich im Reinraum zwischen den Fingern in den viele Anlagenrückseiten hineinstehen, in dem eine niedrigere Reinraumklasse herrscht, wo aber wie im Reinraum Reinraumkleidungspflicht herrscht (in manchen Hallen als Servicezone oder Weißzone bezeichnet) |
| Handler | Greifer zum Handhaben von Wafern |
| HB | Horden-Buffer – ein mit dem Equipment-Buffer (EQB) vergleichbare Zwischenlager-Schnittstelle für Horden, welche in Kapitel 0 erwähnt wird |
| Horde | 25 Scheiben finden in einer Horde Platz. Bei der Beladung einer Maschine wird die Horde auf dem Beladeport der Maschine platziert. Beim Transport von Wafern befindet sich die Horde in einer Box. |

B Anhang

| | |
|-------------|--|
| iRobotics | Schienengeführte Roboter zur Be- und Entladung von Anlagen |
| Laufzettel | Ringblock aus Reinraumpapier auf dem die zu durchlaufenden Prozesse eines Loses festgehalten sind und Datum, Maschine, Scheibenzahl und Unterschrift des Operators bei jedem Prozess eingetragen werden, sofern es sich nicht um ein Paperless-Los handelt |
| LIDAR | Light Detection and Ranging – Methode verwendet einen über einen sich drehenden Spiegel abgelenkten Laserstrahl zur Messung der Entfernung zwischen dem Sensor und einem reflektierenden Objekt |
| Linie | andere Bezeichnung für Reinraum |
| Loadport | Beladepoint einer Maschine, auf dem eine Horde mit Wafern vom Operator oder vom Roboter platziert wird, und von dort aus die Maschine die weiteren Bearbeitungsschritte übernimmt |
| Load-and-go | automatisches Starten eines Prozesses auf einer Maschine durch Erkennung der Horden-ID des Loses |
| MES | Das Manufacturing Execution System ist das übergeordnete Leitsystem bei Infineon und bei Produktionsabläufen in der Industrie allgemein. |
| Ofen | Maschine mit mehreren horizontalen oder vertikalen Ofenrohren für beispielsweise Oxidationsprozesse und Temperung |
| Operator | Mitarbeiter im Reinraum |
| Pinzette | siehe Vakuumpinzette Reticle englische Bezeichnung für Fotomaske, in der Literatur und Praxis teilweise als Synonym, teilweise zur Unterscheidung des Aufbaus als Differenzierung zur Fotomaske gemeint |
| Rucksack | andere Bezeichnung für Shuttle |
| SECS | SEMI Equipment Communication Standard |

| | |
|-------------------|---|
| SEMI | Semiconductor Equipment and Materials International, internationaler Branchenverband führender Halbleiterhersteller |
| Shuttle | verfahrbare Einheit des iRobotics-Systems, die auf der Schiene montiert wird und auf der der Roboterarm befestigt ist. |
| TCP | Tool Center Point – örtliche Pose des Werkzeugs am Ende des Roboterarms |
| Tibco-Message-Bus | Bus der Firma Tibco in Kalifornien (USA), welcher bei Infineon die Serverebene inklusive dem MES mit der Kopplungsebene verbindet (nähere Informationen dazu finden sich in Kapitel 0) |
| Umhorder | Für gewisse Prozesse wie beispielsweise in der Naschemie sind Horden aus anderen Materialien notwendig, die den verwendeten Chemikalien wie Schwefelsäure standhalten. Dies ist ein Grund die Wafer in eine andere Horde zu geben. Um diesen Vorgang nicht händisch durch Schütten oder mit einer Vakuumpinzette durchführen zu müssen gibt es einen Umhorder, der die Wafer in eine andere Horde manövriert. |
| Vakuumpinzette | Werkzeug zum manuellen Handhabung von Wafern |