Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

asma® kunststofftechnik pur

Diplomarbeit

Projektierung einer wandlungsfähigen PUR-Gießanlage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Associate Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl

E311 - Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften von

Hannes Fuger

0725391

Niederschrems 102

3943 Schrems

Wien, Weitra im Juli 2014

Diese Diplomarbeit widme ich meiner plötzlich verstorbenen Großmutter, Agnes Kowatsch. Neben meinen Eltern war sie bestimmt die Person die mein Leben am meisten geprägt hat.
Vor allem ihr ständiges Interesse an meiner Ausbildung war Ansporn und Motivation für den Abschluss meines Studiums.
Vielen Dank für alles!

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Aufgabenstellung **1**

2 Einführung **3**

2.1 Wandlungsfähigkeit 3

2.2 Projektierung 9

2.2.1 Projektplan 10

2.3 Abgrenzung und Aufbau der Diplomarbeit 12

3 Vorstudie **15**

3.1 Wandlungstreiber 15

3.2 Produktanalyse 18

3.2.1 Aluminiumkern 18

3.2.2 Haftvermittler 19

3.2.3 Polyurethanbeschichtung 19

3.2.4 Lager, Welle, Seegerringe 21

3.3 Prozessanalyse 22

3.3.1 Vorbehandlung 22

3.3.2 Ablüften und Vorheizen 23

3.3.3 Gießen 24

3.3.4 Bearbeitung/Montage 25

3.4 Modularisierung 26

3.4.1 Identifikation von Verantwortlichkeiten 26

3.4.2 Modellierung der Anlage 28

3.5 Anforderungen 29

4 Konzeptentwicklung **35**

4.1 Verkettung 35

4.1.1 Transfersystem 37

4.1.2 Mono Rail Transfer (MRT) 39

4.1.3 Werkstückträger 40

4.1.4 Auslegung 45

4.2 Integration von Prozessmodulen 53

4.2.1 Mechanischer Aufbau 53

4.2.2 Schnittstellen 56

4.2.3 Programmierung 57

4.3 Prozessmodule im Detail 71

4.3.1 Zuführungs- und Entnahmemodul 71

4.3.2 Trennmittelmodul 79

4.3.3 Tunnelofenmodul 82

4.3.4 Gießmodul 89

5 Zusammenfassung **97**

A Projektpläne **99**

B Roboterbefehle **103**

Literaturverzeichnis **105**

Kapitel 1

Motivation und Aufgabenstellung

Gerade in der Kunststoffindustrie geht der Trend zur Verlagerung der Fertigung in Niedriglohnländer. Der Kostendruck in der Produktion steigt stetig weiter. Um wettbewerbsfähig zu bleiben führt kein Weg an automatisierten Fertigungsanlagen vorbei. Dies gilt im Besonderen bei der Herstellung von Massenprodukten.
Es sind die Punkte Individualität, Qualität und neue Technologien, welche die Hochlohnländer im Rennen um neue Kundenaufträge hält. Im speziellen Fall der *Fa. Asma* werden eben diese Ziele verfolgt. Hauptgeschäft sind kundenspezifische Produkte mit angepassten Polyurethanzusammensetzungen für die jeweilige Anwendung. Daraus ergeben sich kleine bis mittlere Losgrößen.

PUR... Polyurethan

Ein größerer Auftrag zur Beschichtung von Rollen war Anlass den Produktionsprozess zu automatisieren. Um das betriebsinterne Wissen aufzubauen und um die eingesetzten Technologien, anpassen und erweitern zu können entschied sich die *Fa. Asma* eine eigene Automatisierungsabteilung zu gründen. Im Zuge dessen wurde auch die Möglichkeit geschaffen, eine Masterarbeit über die Projektierung einer automatischen Rollenbeschichtungsanlage zu verfassen.

Das eigentliche Ziel einer starren Anlage für die Produktion von Rollen geriet im Laufe der Entwicklungen immer mehr in den Hintergrund. Es wurde eine Vielzahl von Produkten gefunden, die ebenfalls für die Automatisierung geeignet wären. So wuchs der Wunsch nach einer wandlungsfähigen Gießanlage immer weiter. Bald stellte sich heraus, dass in Zukunft auch andere Produkte und Produktvarianten an der selben Anlage produziert werden sollen. Diese Diplomarbeit verfolgt eben dieses Ziel.

Kapitel 2

Einführung

Zu Beginn werden bezugnehmend auf den Titel der Diplomarbeit, „Projektierung einer wandlungsfähigen PUR-Gießmaschine“, die Begriffe Projektierung und Wandlungsfähigkeit im Detail erörtert. Neben der Theorie wird in diesem Kapitel auch der Projektplan dieser Arbeit vorgestellt. Am Ende dieses Abschnittes wird auf den Aufbau und Inhalt der nachfolgenden Kapitel eingegangen.

2.1 Wandlungsfähigkeit

Wettbewerbsvorteil durch Flexibilität

Seit der verstärkten Automatisierung der Fertigung, beginnend in den 1970er Jahren, verfolgen Unternehmen das Ziel der Veränderungsfähigkeit, um sich einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. Diese Veränderungsfähigkeit wurde früher vorwiegend mit dem Konzept der Flexibilität umgesetzt [1].
Unter Flexibilität versteht man in diesem Zusammenhang die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand, innerhalb der Grenzen eines vorgegebenen Flexibilitätskorridors, an geänderte Einflussfaktoren anzupassen [2].

Nun sind die von außen wirkenden Einflüsse sehr vielfältig. Prognosen über Richtung und Stärke der zukünftigen Entwicklungen lassen sich

nur schwer oder gar nicht erstellen (siehe Abbildung 2.1). Diese Tatsache macht ein Bestimmen des Flexibilitätskorridors zu einem schwierigen Unterfangen [3]. Bei einem zu breiten Korridor muss nicht benötigte Flexibilität kostenintensiv vorfinanziert werden. Wird der Korridor allerdings zu schmal gewählt, stößt das Produktionssystem schneller an die Grenzen und ist späteren Anforderungen nicht mehr gewachsen. Eine nachträgliche Anpassung ist nur eingeschränkt möglich und mit hohem Aufwand verbunden. Beide Szenarien führen zu einer Steigerung an Produktherstellungskosten und somit zu einem Wettbewerbsnachteil [2].

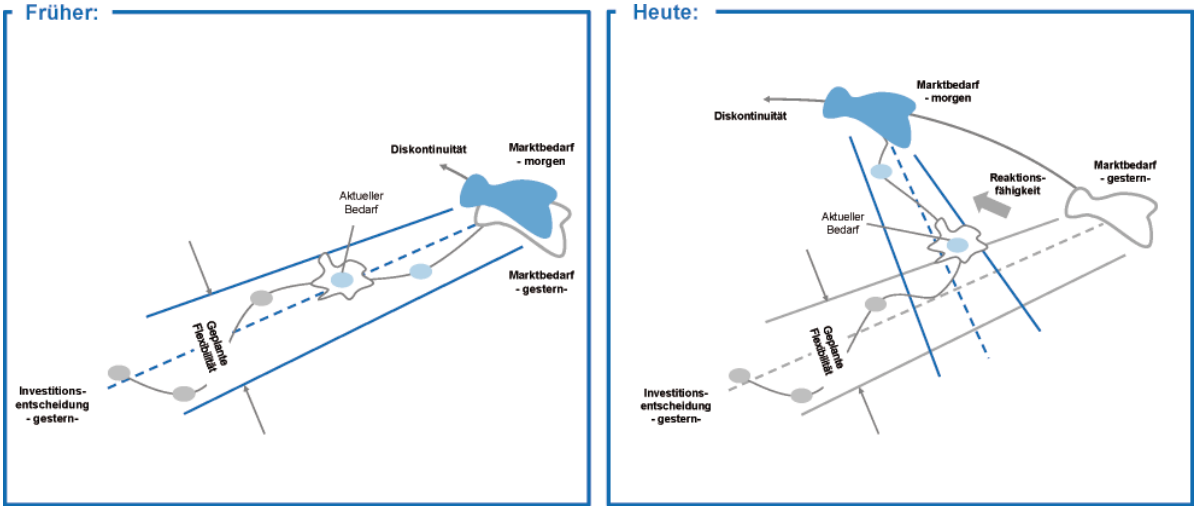


Abbildung 2.1: Wandlungsfähigkeit als Potential in einem turbulenten Umfeld (nach [4])

wandlungsfähige Produktionssysteme

Es lässt sich unschwer erkennen, dass Flexibilität alleine für die Anpassung eines Produktionssystems auf lange Sicht ungeeignet ist. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen sich Unternehmen auch außerhalb des Flexibiliätskorridors an die Veränderungen des stets wandelnden Umfeldes anpassen können. Dieser Umstand führt heute zu einem Paradigmenwechsel von einem flexiblen zu einem wandlungsfähigen Produktionssystem [5].

Die Produktion von heute soll neben der Flexibilität auch die Fähigkeit besitzen, schnell und mit geringem Aufwand an vollkommen neue Anforderungen außerhalb der Korridore adaptierbar zu sein [6]. Diese Fähigkeit,

Anpassungspotentiale im Bedarfsfall aktivieren zu können, wird als Wandlungsfähigkeit bezeichnet.

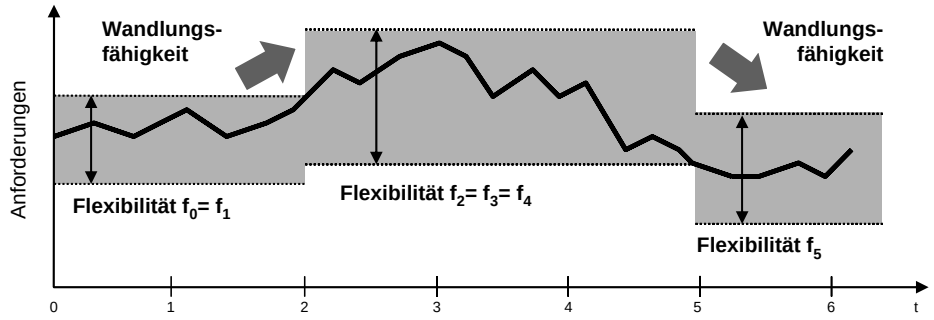


Abbildung 2.2: Wandlungsfähigkeit und Flexibilität eines Produktionssystems (nach [7])

Abbildung 2.2 verdeutlicht nochmals die Unterschiede zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Innerhalb des sogenannten Flexibilitätskorridors können Veränderungen bis zu einem bestimmten Grad aufgefangen werden.

Durch auftretende Wandlungstreiber besteht die Gefahr, dass der Flexibilitätskorridor den gestellten Anforderungen nicht mehr genügt. In diesem Fall muss sich das Produktionssystem wandeln, um neue Anforderungen bewältigen zu können[8].

Wandlungstreiber sind das Resultat interner bzw. externer Einflüsse (z.B neue Marktgegebenheiten, Technologien, oder Produkte)

Die Korridore können bei der Wandlung, je nach Anforderung, nach oben als auch nach unten verschoben werden. Wandlungsfähige Systeme besitzen daher keine festgelegten Grenzen und sind weitestgehend lösungsneutral. Die Freiräume für mögliche Veränderungen sollen jedoch bei der Projektierung berücksichtigt werden [9].

Daher ergibt sich neben der anforderungsorientierten Erweiterung auch die Möglichkeit der Rückbauoption. So wird beispielsweise die Möglichkeit geschaffen, den Automatisierungsgrad einer Anlage im Nachhinein zurückzunehmen, wenn äußere Bedingungen dies als sinnvoll erscheinen lassen [7].

Das Ziel ist allerdings keineswegs eine maximale Wandlungsfähigkeit anzustreben. Es ist anzunehmen, dass der Aufwand mit steigendem Grad dieser Fähigkeit nicht linear, sondern exponentiell steigen (siehe Abbil-

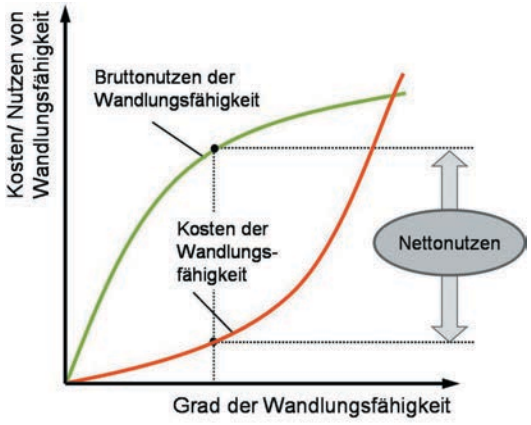


Abbildung 2.3: Kosten und Nutzen der Wandlungsfähigkeit (nach [10])

dung 2.3). Das Leitbild ist eine anforderungsgerechte Wandlungsfähigkeit, die auf realitätsnahen, hinreichend wahrscheinlichen Szenarien fußt. Das bedeutet das optimale Verhältnis zwischen Aufwand und angestrebten Nutzen zu finden [10].

Modularisierung als Befähiger

Produktionssysteme sind nicht von sich aus wandlungsfähig. Im Gegenteil, sie müssen über Funktionen und Eigenschaften verfügen, welche dies erst ermöglichen. Diese Funktionen und Eigenschaften werden als Wandlungsbefähiger bezeichnet und befähigen das Produktionssystem Wandlungsprozesse zu bewältigen [11]. Tabelle 2.1 zeigt eine Auswahl an Befähiger aus der Sicht verschiedener Autoren.

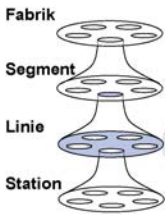


Abbildung 2.4: Ebenen eines Produktionssystem

Die Modularisierung wird in der Literatur als ein wesentlicher Befähiger für wandlungsfähige Systeme gesehen [12]. Während bei Produkten der Begriff Modul eine funktional abgegrenzte Einheit beschreibt, ist das Prinzip der Modularisierung im Kontext von Produktionssystemen auf verschiedenen Ebenen anwendbar [13]. Die Bildung von Modulen erfolgt dabei kaskadiert. Zum Beispiel besteht ein Linienmodul aus mehreren Arbeitsstationen.

Wandlungsbefähiger nach	Wiendahl et. al. 2007					Koren et al. 1999	Wulfsberg et al. 2008
Wandelbares System	Physisch			Logisch		für wandlungsfähige Produktionssysteme allgemein	
Wandlungsbefähiger	RFS	RMS	TRF	APPS	RPP		
Modularität	X	X	X	X		X	X
Skalierbarkeit	X	X	X	X			X
Konvertierbarkeit	X	X					
Kundenanpassbarkeit	X					X	
Mobilität		X	X				X
Automatisierbarkeit		X			X		
Universalität			X			X	X
Kompatibilität			X	X			X
Neutralität				X			X
Einstellbarkeit				X	X		
Erkennungsfähigkeit					X		
Entwicklungsfähigkeit					X		
Granularität					X		
Integrierbarkeit						X	
Diagnosefunktion						X	
Schnelligkeit						X	

Legende

RFS: Rekonfigurierbares Fertigungssystem

RMS: Rekonfigurierbares Montagesystem

TRF: Transformierbare Fabrik

APPS: Adaptive Produktionsplanung und -steuerung

RPP: Rekonfigurierbare Prozessplanung

Tabelle 2.1: Wandlungsbefähiger aus Sicht verschiedener Autoren (nach [11])

Durch die Abgrenzung von Modulen lassen sich eine Reihe von Vorteilen im Bezug auf eine gesteigerte Wandlungsfähigkeit finden. Zusammengefasst werden diese nach Schuh [10] in:

- Begrenzung des Änderungsaufwands auf einzelne Module bei Anpassung an unterschiedliche globale Anforderungen (beispielsweise bei Verlagerungen oder Produktveränderungen)
- Schrittweise Skalierbarkeit der Produktionskapazität bei Änderung des Produktionsvolumens über den Lebenszyklus durch Hinzufügen/Wegnahme von Modulen
- Anpassung des Systems an Produktionstechnologien und Automatisierungsgrad über den Lebenszyklus durch den Austausch von Modulen
- Wieder- und Weiterverwendbarkeit von Modulen

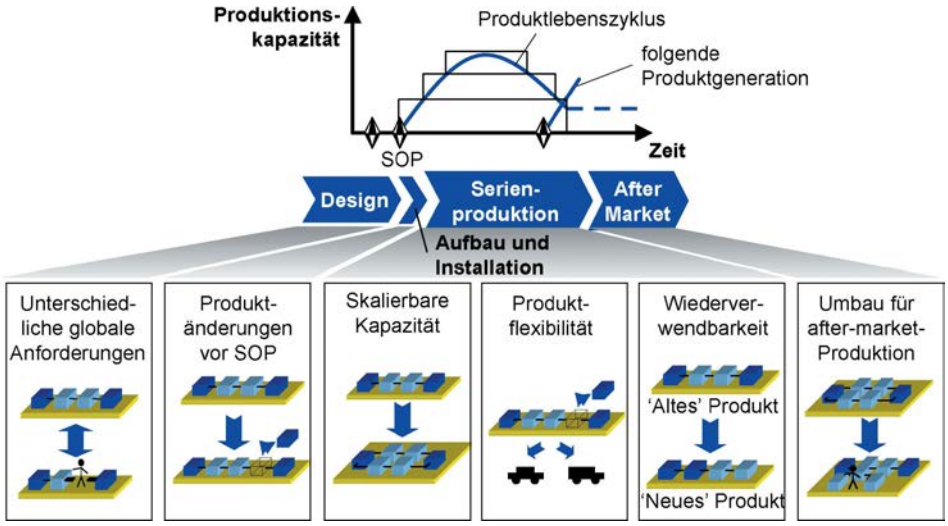


Abbildung 2.5: Übersicht über die Vorteile der Modularisierung (nach [10])

- Komplexitätsreduzierung während der Planungsphase durch Betrachtung der Module als *Black-boxes*

Diese Liste an Vorteilen bewegt heutige Unternehmen weg von starren und hin zu wandlungsfähigen Produktionssystemen. Als wichtigster Hebel wurde die Einführung von modularen, konfigurierbaren Einheiten identifiziert. Auch in dieser Arbeit soll die Anlage in einem vertretbaren Maß modular aufgebaut werden.

2.2 Projektierung

Es existieren eine Vielzahl von Vorgehensweisen um Ablaufpläne für die Projektierung von Anlagen zu erstellen. Eine Gemeinsamkeit aller Systematiken ist die Einteilung in größere Arbeitsabschnitte bzw. Phasen. Diese Arbeit nimmt sich das Phasenkonzept nach [14] als Grundlage (siehe Abbildung 2.6).

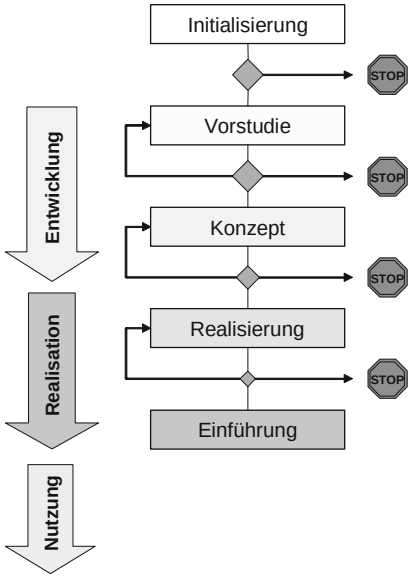


Abbildung 2.6: unterschiedliche Phasen eines Projektes (nach [14])

Der Prozess wird ausgehend von der Initialisierungsphase bis hin zur Einführung in fünf Phasen unterteilt, in denen jeweils bestimmte Aktivitäten ausgeführt werden. Das Ende jeder Phase ist als Meilenstein innerhalb des Projektes zu verstehen. Je nach Ergebnis der jeweiligen Phase kann an diesen Punkten auch ein Abbruch des Gesamtprojektes entschieden werden. Die Wahrscheinlichkeit (in Abbildung 2.6 durch die Größe der Rauten dargestellt) wird jedoch mit jeder Phase geringer.

In Kuster [14] werden die Aktivitäten und Ergebnisse der Phasen beschrieben. Die grundlegenden Erkenntnisse sind in den nachstehenden Punkten zusammengefasst.

Initialisierung: Die Initialisierungsphase beginnt mit der Formulierung einer neuen Idee. Bevor ein Projektauftrag erteilt wird, muss allerdings die Projektwürdigkeit geklärt werden. Dafür müssen die angestrebten Ziele, der Projektumfang und die daraus resultierende Wirtschaftlichkeit bestimmt werden.

Vorstudie: Die Vorstudienphase ist als Beginn der Entwicklung zu sehen. Ausgehend von einer Situationsanalyse werden in dieser Phase die Anforderungen strukturiert. Mit der Anforderungsliste als Grundlage wird im Zuge der Grobplanung ein Lösungsansatz bzw. Rahmenkonzept entworfen und dieses auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit überprüft.

Konzept: Aufbauend auf dem Rahmenkonzept der Vorstudienphase werden in dieser Phase unterschiedliche Lösungsvarianten erarbeitet und bewertet. Nach der Entscheidung einer Lösung muss diese im Detail geplant werden. Am Ende dieser Phase müssen ausführungsreife Pläne (Konstruktionspläne, Schaltpläne,...) definiert werden.

Realisierung: Die Realisierungsphase beschäftigt sich mit der Beschaffung und dem Aufbau der Anlage. Dazu müssen Sachmittel, personelle und finanzielle Mittel bereitgestellt werden. Ein Realisierungsplan kontrolliert den Ablauf von der Bestellung bis hin zur Montage, Installation und Programmierung.

Einführung: Mit der Einführungsphase wird auch die Dokumentation abgeschlossen. Bedienungsanleitung und Wartungspläne müssen an dieser Stelle vorliegen. Das Gesamtsystem wird im Dauerbetrieb getestet und auftretende Mängel werden behoben. Schlussendlich werden in dieser Phase die Maschinenbediener geschult. Ziel ist es, die Arbeit des Entwicklungs- und Realisierungsteams abzuschließen.

2.2.1 Projektplan

Die Erstellung des Projektplans beruht auf den zuvor beschriebenen Phasen. Eine genaue Planung aller Phasen zu Beginn des Projektes ge-

staltet sich aufgrund der fehlenden Erfahrung als sehr schwierig. Die Vollständigkeit des Projektplans wird im Laufe des Projektes erlangt. Anhang A.1 zeigt den resultierenden Projektplan in Form eines Gantt-Diagramms. Zu Beginn jeder Phase werden die einzelnen Arbeitspakete bestimmt und die gegenseitigen Relationen ermittelt und festgehalten.

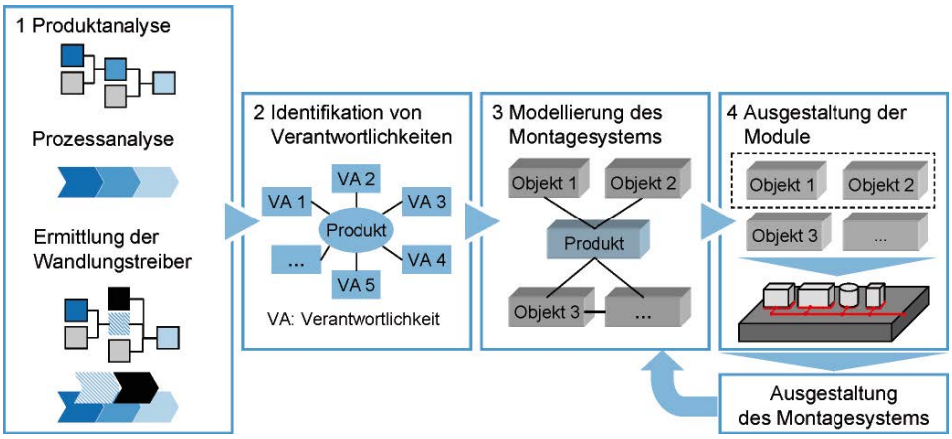


Abbildung 2.7: Methodik zur Modularisierung (nach [15])

Für die Vorstudie wurde eine spezielle Methodik zur Modularisierung verwendet. Die in Abbildung 2.7 ersichtliche Systematik geht von einer umfangreichen Produktanalyse aus. Am Ende dieses Verfahrens erhält man ein ausführliches Beschreibungsmodell des Gesamtsystems.
Aufgrund der vorangegangenen Modularisierung lässt sich bei der Konzeptionierung und Realisierung ein allgemeiner Ablauf für die Module finden. Der im Anhang A.2 gezeigte Projektplan ist nur im Groben für alle weiteren Module anwendbar. Die Arbeitspakete variieren im Detail für jedes einzelne Modul.

Beim gesamten Projektplan wurden die Module so untereinander verknüpft, dass nach der Beendigung einer Konzeptphase das nächste Modul in Angriff genommen werden kann.
Die letzte Phase, die Einführung, beinhaltet vorwiegend das Abschließen der Dokumentation (Bedienungsanleitung, Wartungsplan, etc.) und das Einschulen der Maschinenbediener.

2.3 Abgrenzung und Aufbau der Diplomarbeit

Im vorherigen Abschnitt wurde die Projektierung in seine einzelnen Phasen gegliedert. Neben der Initialisierung wurden die Begriffe Vorstudie, Konzept, Realisierung und Einführung erwähnt. Im Diagramm 2.1 lässt sich für jede dieser Phase der Verlauf von Einfluss der Entscheidungen, Wissen und Projektkosten ablesen.

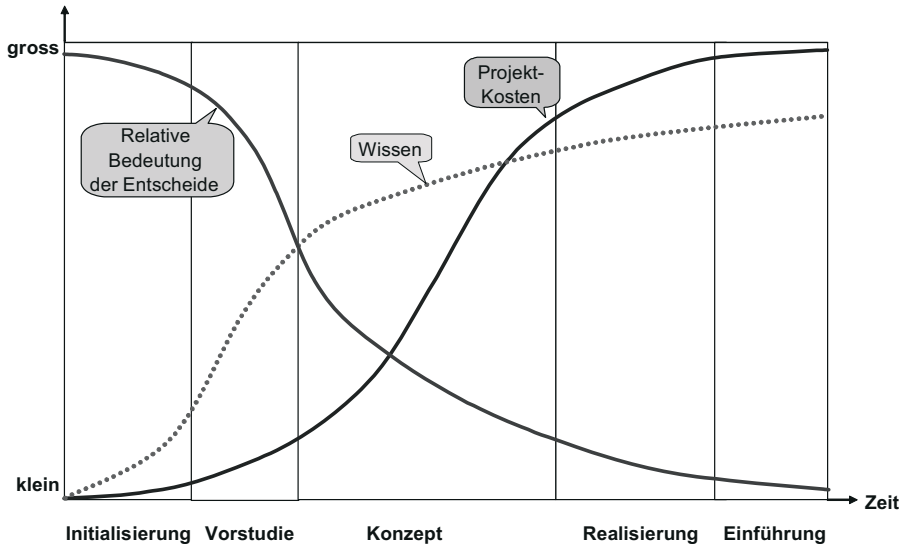


Diagramm 2.1: Tragweite von Wissen, Kosten und Risiko über den Projektverlauf (nach [14])

Vorstudie und Konzept stellen die Weichen eines Projekts

Ersichtlich wird aus Diagramm 2.1, dass die Vorstudienphase die Weichen für den weiteren Projektverlauf stellt. In dieser Phase wird sehr viel Wissen generiert. Indirekt proportional fällt die relative Bedeutung der Entscheidungen. Dieser Verlauf lässt sich, wenn auch abgeschwächt, über die Konzeptphase hinweg erkennen. Diese beiden Phasen (Vorstudie und Konzept) werden nach Kuster[14] als Entwicklung eines Projektes bezeichnet. Genau mit diesem Teilbereich, der Entwicklung, beschäftigt sich die vorliegende Diplomarbeit. Dementsprechend sind auch die Kapitel dieser Arbeit eingeteilt.

Im Kapitel der Vorstudie wird am Beispiel einer Exzenterrolle, der gesamte Prozessablauf des Beschichtens erörtert. Es wird gezeigt, dass der

gesamte Produktionsprozess aus den Arbeitsschritten Vorbehandlung, Gießen und Bearbeitung bzw. Montage besteht.
Die weiteren Betrachtungen im Kapitel der Konzeptentwicklung beschäftigen sich ausschließlich mit dem Gießprozess und der Konzeptionierung einer wandlungsfähigen Gießanlage. Dafür wird der Gießprozess in einzelne Module unterteilt.
Nach einer ausführlichen Beschreibung der Verkettung wird ein Standard für die Integration der Prozessmodule konzipiert. Am Ende werden die für die Gießanlage notwendigen Module vorgestellt.

Kapitel 3

Vorstudie

Exzenterrollen finden Anwendung in Rundwebmaschinen der *Fa. Starlinger*

Dieses Kapitel behandelt den Aufbau und die Entstehung des Produktes „Exzenterrolle“. Jedoch soll die vorliegende Gießanlage keine starre Produktionsanlage für ein einziges Produkt darstellen. Um weitere, ähnliche Produkte nicht von Beginn an auszuschließen, werden in diesem Kapitel auch die Wandlungstreiber ermittelt und ein vorläufiges Produktspektrum definiert.
Bei der Vorstudie werden bereits erste Anforderungen an die zu projektierende Anlage definiert. Um den Überblick der einzelnen Anforderungen nicht zu verlieren, werden diese im Randbereich des Textes festgehalten.

3.1 Wandlungstreiber

Für die Entwicklung einer Anlage ist es notwendig, so früh wie möglich die Wandlungstreiber, welche auf die Fertigungsanlage wirken, zu identifizieren. Um für einen späteren Wandel vorbereitet zu sein, müssen die Auswirkungen bereits in den Entwicklungsprozess miteinbezogen werden. Wandlungstreiber ergeben sich aus den diversen äußeren Einflüssen, die auf eine industrielle Fertigung wirken. Zur Ermittlung der relevanten Wandlungstreiber wird ein branchenunabhängiger und allgemeingültiger Wandlungstreiberkatalog erstellt (Abbildung 3.1 zeigt einen Auszug des Katalogs) [16].



Abbildung 3.1: Beispielhafter Wandlungstreiberkatalog (nach [16])

variierende Nachfragemenge

Betrachtet man die zu projektierende Gießanlage so lassen sich Einflüsse erkennen die vom Kunden und Markt ausgehen. Die Anlage wird mit neuen Produktvarianten und variierender Nachfragemenge konfrontiert. Bereits während der Konzeptionierung der Anlage wurde ersichtlich, welche Möglichkeiten durch den modularen Ansatz entstehen. Das eigentliche Ziel einer starren Fertigungslinie für die Produktion von Exzenterrollen wurde durch den Wunsch nach einer wandlungsfähigen Gießanlage immer mehr in den Hintergrund gedrängt. In Zukunft sollen auch andere Produkte und Produktvarianten auf der selben Anlage produziert werden. Dieser Umstand macht es notwendig, Freiräume zu definieren und Grenzen zu setzen. Daher werden neben den Exzenterrollen aktuell produzierte Produkte herangezogen und wie in Tabelle 3.1 ersichtlich in verschiedene Produktgruppen unterteilt.

verschiedene Produktgruppen

Ein fixer Bestandteil der Produktpalette sind Exzenterrollen in großer und kleiner Ausführung. Diese sollen ebenfalls bereits mit der Einführung der Gießanlage auch produziert werden können. Für den weiteren Lebenszyklus soll die Anlage auch für weitere Produktgruppen einsetzbar sein bzw. durch einen Wandel umgerüstet werden können. Die Unterteilung dieser Gruppen erfolgt im speziellen in Hinblick auf die Handhabbarkeit. So stellen Produkte mit definierten Greifpunkten (A, B, C) und Produkte ohne Greifpunkte (D) jeweils eine eigene Kategorie dar. Ein weiteres Kriterium ist die Komplexität der Gießformen. Der Grad der Komplexität wird

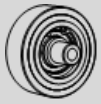
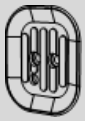
	Exzenterrolle groß	Exzenterrolle klein	Produktgruppe A	Produktgruppe B	Produktgruppe C	Produktgruppe D
Produktbeschreibung			rotationssym. Werkstücke mit definierten Greifpunkten	rotationssym. Werkstücke mit def. Greifpunkten und Hinterschneidung	allg. Werkstücke mit definierten Greifpunkten und Hinterschneidung	komplexe Werkstücke ohne Greifpunkte
Produktgröße	Ø50 x 20mm	Ø45 x 20mm	< Ø120 x 100mm	< Ø120 x 100mm	120 x 250 x 100mm	120 x 250 x 100mm
Produktgewicht	54g	33g	< 1500g	< 1500g	< 1500g	< 1500g
Größe der Gießform	Ø70 x 35mm	Ø70 x 35mm	< Ø150 x 120mm	< Ø150 x 120mm	150 x 300 x 120mm	150 x 300 x 120mm
Gewicht der Gießform	516g	741g	< 3000g	< 3000g	< 3000g	< 3000g
Komplexität der Gießform	einteilig	einteilig	einteilig	zweiteilig	zweiteilig	mehrteilig
Vertreter	Starlinger Rolle	Starlinger Rolle	Dichtungsringe	Seil und Laufrollen	Rechtecksauger	Einlegedichtungen
Abbildung						
Beschichtungsmaterial	Asmaprene C	Asmaprene C	Asmaprene D	Asmaprene C	Asmaprene D	Asmaprene C
Materialmenge	24 222 mm³	8 724 mm³	k.A	k.A	k.A	k.A
Fertigungskapazität	400 000 Stk/Jahr	100 000 Stk/Jahr	k.A	k.A	k.A	k.A
Gewünschte Taktzeit	12 s/Stück	12 s/Stück	k.A	k.A	k.A	k.A

Tabelle 3.1: Übersicht der relevanten Produktgruppen

vorrangig von der Geometrie des Werkstücks bestimmt. Je nachdem kommen einteilige (A), zweiteilige (B, C) oder mehrteilige (D) Gießformen zum Einsatz. Die Produktgruppen B und C unterscheiden sich im speziellen durch das Beschichtungsmaterial. Die PUR-Formulierungen *Asmaprene C* und *Asmaprene D* dürfen aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und daraus resultierenden unerwünschten Reaktionen nicht an der selben Gießmaschine verarbeitet werden.

Erweiterung durch Prozessmodule

Aufgrund der eben genannten Unterschiede zwischen den einzelnen Produktgruppen muss bei der weiteren Konzeptionierung eine einfache Änderung bestehender Prozessmodule und der Austausch bzw. die Erweiterung durch weitere Module berücksichtigt werden.

3.2 Produktanalyse

Hauptprodukt und Grundlage für die Auslegungen der Fertigungsanlage ist wie bereits erwähnt die Exzenterrolle. Stellvertretend für die verwandten Produktgruppen wird in den nächsten Punkten der Aufbau dieser Exzenterrolle gezeigt. Die wesentlichen Unterschiede zu den anderen Produkten liegen in der Geometrie und den verwendeten Materialien von Grundkörper, Haftvermittler und PUR.

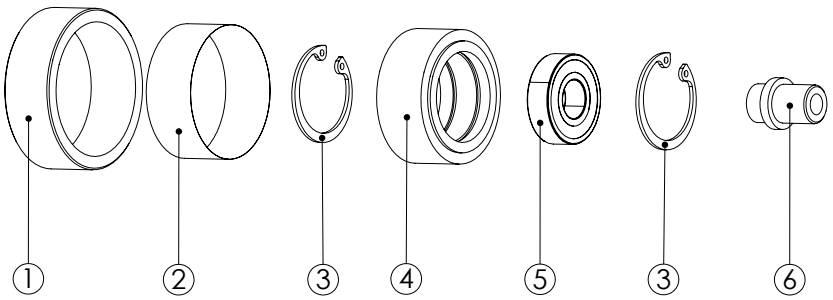


Abbildung 3.2: Explosionszeichnung der Exzenterrolle

Die Exzenterrolle wird momentan in zwei verschiedenen Produktvarianten produziert. So hat die größere Rolle einen Außendurchmesser von $\varnothing\,50\,\text{mm}$ und die kleiner Rolle $\varnothing\,40\,\text{mm}$. Um sich ein Bild über das Produkt und dessen Herstellung machen zu können, werden im Folgenden die einzelnen Bestandteile genauer betrachtet.

3.2.1 Aluminiumkern ④

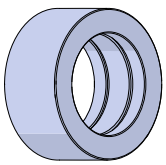


Abbildung 3.3: Aluminium-Rohling

Grundkörper für die Beschichtung und für weitere Anbauteile ist ein Aluminiumkern. Dieser Aluminiumkern wird in verschiedenen Durchmessern in Rollenpaketen bereitgestellt. Der Aluminiumring ist bereits mit Nuten für Lagersicherungsringe vorbereitet und auf die Außenmaße abgedreht. In Abbildung 3.4 ist der Grundkörper mit seinen endgültigen Abmessungen zu sehen. Die Konturen an beiden Seiten bekommt die Rolle nach dem Beschichten bei der Drehbearbeitung.

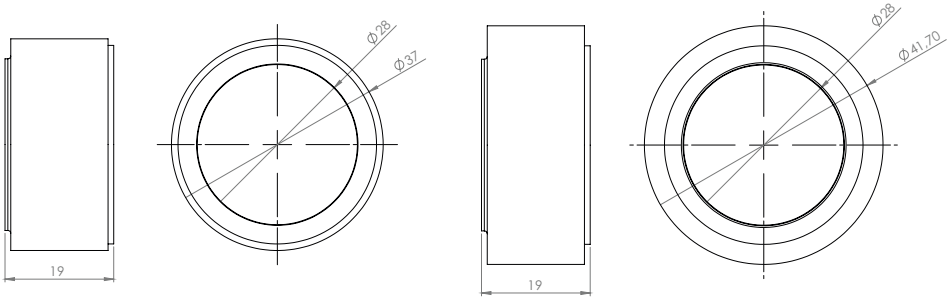


Abbildung 3.4: geometrische Unterschiede der kleinen und großen Aluminiumrolle

3.2.2 Haftvermittler ②

Um eine ausreichende Haftung zwischen Aluminiumkern und PUR-Beschichtung zu erreichen ist es wichtig, die Oberflächen von Fetten und Schmutz zu befreien. Außerdem ist es notwendig, die Aluminumoxidschicht zu entfernen. Um eine saubere Oberfläche zu erreichen, wird die Rolle mit einem Laser bearbeitet. Ein weiteres wichtiges Kriterium für eine gute Haftung ist eine spezielle Art von Kleber. In diesem Fall spricht man von einem Haftvermittler bzw. Haftsystem. Um ein Maximum an Haftung zu erzielen wird dieser Haftvermittler speziell auf die verwendeten Komponenten (Aluminiumkern und PUR) abgestimmt. Trotz einer Schichtdicke von nur $25 - 40\,\mu\mathrm{m}$ (Trockenschichtstärke) ist der Haftvermittler neben der Beschichtung ein wesentlicher Bestandteil.
Im Fall der Exzenterrolle wird das Haftsystem *Asmabond R* verwendet. Dieses Haftsystem wird für den Haftungsaufbau zwischen allen gängigen Metallen und allen PUR-Heißgießsystemen (*Asmaprene*) eingesetzt. Die Grundlage für die Anwendung dieses Haftsystems liegt in der mehrmals durchgeführten Bemusterung beim Kunden und verifizierten Vorteilen in der Anwendungsumgebung der Produkte.

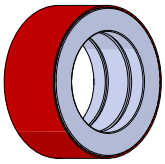


Abbildung 3.5: Rolle mit vorbehandelter Oberfläche

3.2.3 Polyurethanbeschichtung ①

Polyurethan entsteht durch die Polyaddition von Polyisocyanaten mit mehrwertigen Alkoholen, den Polyolen (siehe Abbildung 3.7).

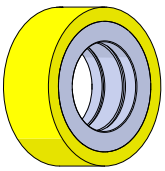


Abbildung 3.6: beschichtete Rolle

Polyisocyanate sind kurzkettig und stellen das Hartsegment im Polyurethan dar. Somit ergibt ein hoher Gehalt an Isocyanat in der Formulierung ein hartes Polyurethan. Polyole hingegen sind langkettig und stellen das Weichsegment dar. Für die Verbindung zwischen den Makromolekülen ist ein sogenannter „Kettenverlängerer“ zuständig.

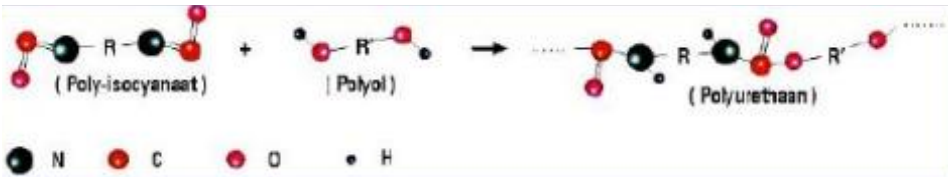


Abbildung 3.7: Polyaddition von Polyisocyanaten mit Polyolen (nach [17])

Abhängig vom gewünschten Polyurethan und dessen Eigenschaften können durch Kombination dieser Hauptbestandteile unzählige Kombinationen erreicht werden.

bei Heißgießsystemen liegt die Reaktionstemperatur bei $70 - 125°C$

Die Polyurethanbeschichtung der Exzenterrolle hat als Grundlage das Heißgießsystem *Asmaprene C*. Dieses Polyurethangießsystem zeichnet sich durch gute physikalische Eigenschaften, sehr gute dynamische Tragfähigkeit und höchste Abriebfestigkeit über den gesamten Härtebereich ($50°$ bis $95°$ Shore) aus. Die Einsatzgebiete für beschichtete Walzen, Rollen und Räder sind höchst verschleißbeanspruchte Anwendungen im Hinblick auf Abrieb- und Schnittfestigkeit. Aus dem Produktblatt des Heißgießsystems *Asmaprene* lässt sich eine Liste von Vorteilen entnehmen [18].

- ausgezeichnete Abriebfestigkeit
- sehr gute Schnitt- und Weiterreißfestigkeit
- sehr gute Beständigkeit gegenüber

  Hydrolyse,

  mineralische Öle und Fette,

  Lösemittel (wie Heptan, Toluol, Ethylacetat),

  Schalöle (in der Betonindustrie),

  UV-Einwirkung (sehr geringer Farbumschlag)

- sehr hohe dynamische Belastbarkeit
- sehr hohe Elastizität und Flexibilität
- sehr gute Haftung auf Metallen, CFK, GFK
- sehr geringer Druckverformungsrest (DVR)
- Einsatztemperatur im Dauergebrauch zwischen -35 und $+60°C$ (feucht), bis $+80°C$ (trocken), kurzfristig bis $+100°C$

3.2.4 Lager, Welle, Seegerringe ③ ⑤ ⑥

Im Endprodukt wird die Exzenterrolle mit einem Lager und einer Welle ausgeliefert. Die Position des Lagers wird mit zwei Seegerringen gesichert. Die Montage dieser Komponenten soll durch eine Bearbeitungs- und Montagelinie am Ende des Fertigungsablaufes realisiert werden. Zeichnungen und Typenbezeichnungen der drei Komponenten sind in Abbildung 3.9 ersichtlich.

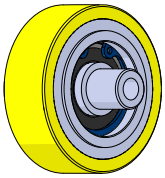


Abbildung 3.8: fertiggestellte Exzenterrolle

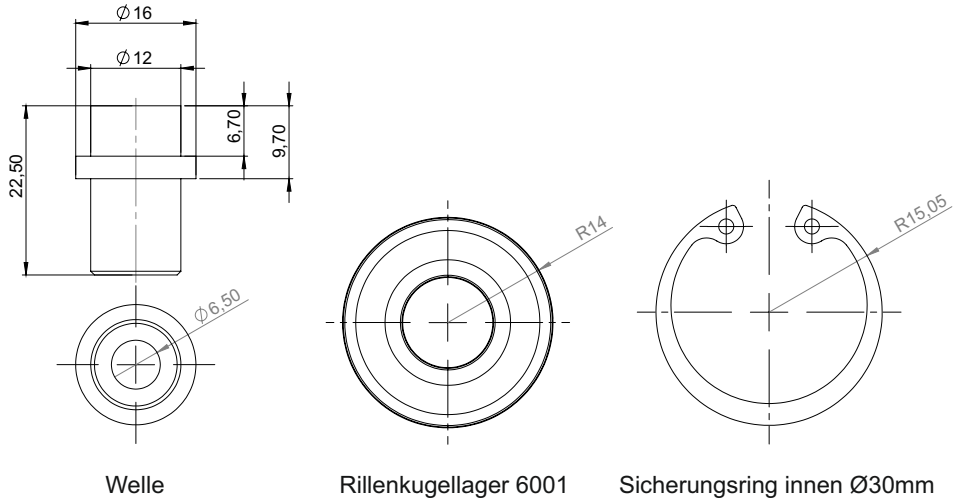


Abbildung 3.9: Details zu Lager, Welle und Seegerring

3.3 Prozessanalyse

Die Fertigung der Exzenterrolle unterteilt sich in drei Etappen. Die Aufteilung in Vorbehandlung, Gießen und Bearbeitung/Montage ergibt sich durch produktionsbedingte Liegezeiten. Die Zeitleiste in Abbildung 3.10 zeigt den Prozessablauf vom Aluminiumrohling bis hin zur Verpackung.

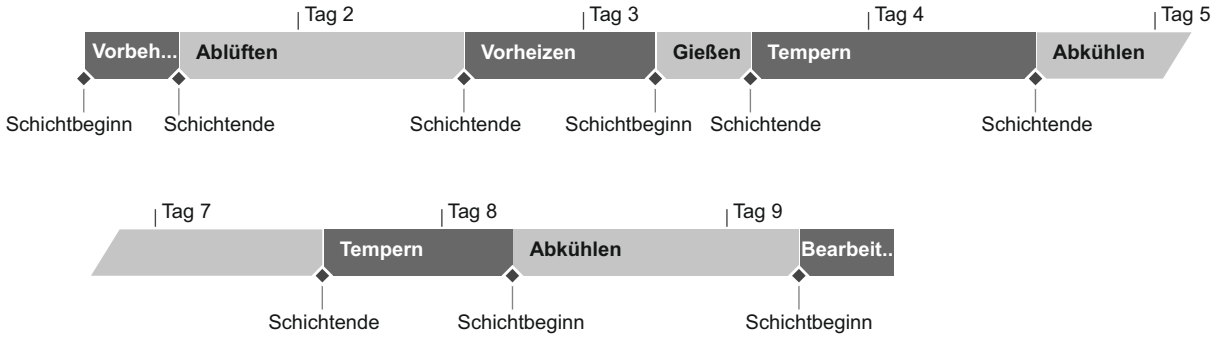


Abbildung 3.10: Darstellung des Produktionsablaufes anhand einer Zeitleiste

Zwischen den Fertigungsstufen, Vorbehandlung und Gießen, sind zum Beispiel zwei Tage für Ablüften und Vorheizen eingerechnet. Nach dem Gießen vergehen sechs Tage, bis das Polyurethan vollständig ausgehärtet ist und mit der Bearbeitung und Montage begonnen werden darf.
Der Vollständigkeit halber werden hier neben dem Gießprozess, der im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, auch die weiteren Prozessschritte, welche für die Herstellung der Exzenterrolle notwendig sind, betrachtet. Jedoch wird in diesem Kontext nur der Prozess des Gießens detaillierter beschrieben. Die sich aus der Beschreibung ergebenden Anforderungen an die Maschine werden am Rand der Seite festgehalten.

3.3.1 Vorbehandlung

in der manuellen Fertigung werden die Rohlinge durch Sandstrahlen gereinigt

In den vorangegangenen Erläuterungen wurde bereits erwähnt, dass die Oberfläche des Aluminiumkerns für die nachfolgende Bearbeitung fett- und schmutzfrei sein muss. Um das zu erreichen, wird die Oberfläche über den gesamten Umfang hinweg durch einen Faserlaser mit einer Lasernennleistung von 40 Watt bearbeitet.

Durch zwei galvanometrisch angetriebene Spiegel wird der Laserstrahl so abgelenkt, dass ein flächendeckendes Bearbeiten ermöglicht wird (Abbildung 3.11). Für das Abtragen einer hauchdünnen Schicht bzw. für das Reinigen des Grundkörpers ist es somit nicht notwendig mit dem Laserkopf zu verfahren.

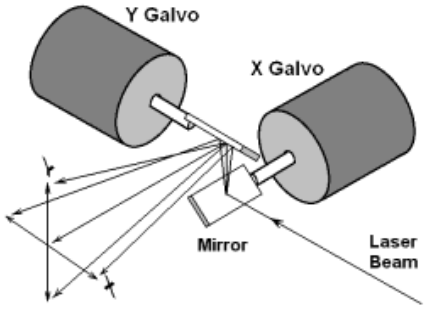


Abbildung 3.11: Funktionsweise der Umlenkung des Laserstrahls (nach [19])

Der Begriff „Vorbehandlung“ als solcher bezeichnet alle Vorbereitungen, die für das Gießen getroffen werden müssen. Somit beinhaltet diese Produktionslinie neben der Reinigung auch das Auftragen des Haftvermittlers. Im Fall der Exzenterrolle wird das Haftsystem (*Asmabond R*) gleichmäßig aufgesprüht.

3.3.2 Ablüften und Vorheizen

Die im Haftvermittler enthalten Lösungsmittel benötigen ausreichend Zeit um sich zu verflüchtigen. Bevor weitere Fertigungsschritte durchgeführt werden können, müssen die frisch besprühten Kerne „ablüften“. Nach der Vorbehandlung ist somit eine Liegezeit von mindestens 24 Stunden einzuhalten. Bei zu kurz gehaltenen Liegezeiten wird, aufgrund des noch vorhandenen Lösungsmittels, das Haftungsergebnis negativ beeinflusst.
Bevor die unbeschichteten Rollen auf der Gießanlage gegossen werden, muss das Haftvermittlersystem aktiviert werden. Diese Aktivierung wird erreicht, indem der Haftvermittler auf $110°C$ bis maximal $120°C$ erhitzt wird.

3.3.3 Gießen

Prozesstemperatur einhalten

Nach dem Aktivieren des Haftvermittlersystems muss darauf geachtet werden, dass der Temperaturbereich von $110-120°C$ nicht verlassen wird. Eine zu starke Abkühlung des Aluminiumkerns würde zu Haftungsfehler und einem unbrauchbaren Produkt führen. Um das zu vermeiden, müssen unter anderem Pufferplätze, Transportstrecken und Gussformen ständig beheizt werden und die geforderte Temperatur aufrecht gehalten werden.

automatisches Bestücken

Die vorgeheizten Rollengrundkörper werden nacheinander in vorgesehene Gießformen eingelegt. Dies soll in Zukunft vollautomatisch über ein geeignetes *Handling* geschehen.

Trennmittel auftragen

Vor dem Bestücken müssen die Gießformen mit Trennmittel vorbehandelt werden. Dies ist unbedingt notwendig um die beschichteten Rollen zerstörungsfrei entformen zu können. Jedoch ist darauf zu achten, dass die Gießform keinen zu großen Trennmittelfilm aufweist, da sonst Trennmittel auf die Haftvermittlerfläche gelangen kann und somit Haftungsfehler auftreten.

Gießform manuell reinigen

Nach mehrmaligem Verwenden der selben Gießform kommt es zu einer Ablagerung am Rand der Form. Bevor mit dem Gießprozess begonnen werden darf, muss darauf geachtet werden, dass alle Verunreinigungen entfernt sind.

einteilige Gießform ausreichend

Speziell für diese Anlage kommt eine Hochdruckgießmaschine zum Einsatz. Diese hat im Vergleich zu den gängigen und kostengünstigeren Niederdruckgießmaschinen den großen Vorteil das Material im Grammbereich genau dosieren zu können. Ein damit verbundener Vorteil, der Gießmaschine sei schon an dieser Stelle erwähnt: Die genaue Bereitstellung des Materials macht einen Deckel für die Gießform der Exzenterrolle überflüssig.
Das Gießen reduziert sich somit auf die Aufgabe einem, vom Mischkopf ausgehenden, drucklosen Strahl den Weg in die Gießform vorzugeben. In

der Gießform soll das Material den Aluminiumkern umfließen. Allerdings verläuft das flüssige PUR zu langsam, um diesen Vorgang ohne relative Bewegung des Mischkopfes und der Gießform zu ermöglichen. Bei einem punktuellen Ansetzen des Mischkopfes über der Gießform kommt es zum Überlaufen der Gießform. Ein beweglicher Mischkopf würde dieses Problem lösen. Ein verfahrbarer Mischkopf hätte zudem den großen Vorteil für verschiedenste Produktgeometrien einsetzbar zu sein.

verfahrbarer Mischkopf

Nach Abschluss des Gießprozesses bleiben die Exzenterrollen für ca. 10 min. in der Form bis sie entformt werden dürfen. In dieser Zeit soll natürlich kein Produktionsstop notwendig sein. Ein beheizter Puffer mit ausreichendem Fassungsvermögen für die nachfolgenden Rollen ist dementsprechend notwendig.

beheizter Puffer

Im letzten Prozessschritt wird die fertig beschichtete Rolle entformt. Dies soll nach Vorbild des Bestückens ebenfalls vollautomatisch erfolgen. Außerdem ist nach der erfolgreichen Entformung sicherzustellen, dass die Rollen keine ungeplante Abkühlung erfahren.

automatisches Entformen

3.3.4 Bearbeitung/Montage

Sechs Tage nach dem Gießen und einer umfangreichen Wärmebehandlung hat das Polyurethan die endgültigen Eigenschaften erlangt. Die Exzenterrolle wird nun auf beiden Seiten bearbeitet. Außerdem wird jede Rolle auf Abscherung getestet. Wird dieser Haftungstest bestanden, werden die zuvor beschriebenen Komponenten Lager, Welle und Seegerringe montiert.

Die Exzenterrolle ist mit Beendigung dieses Schrittes fertig für Verpackung und Versand.

3.4 Modularisierung

Wie aus den ersten Abschnitten ersichtlich, ist es ein primäres Ziel dieser Diplomarbeit eine Gießanlage zu konzipieren, die im vertretbaren Maß wandlungsfähig ist. Diese Wandlungsfähigkeit soll durch die Modularisierung in einzelne Elemente erreicht werden. Eine Methodik zur Modularisierung wird in Abbildung 3.12 gezeigt.

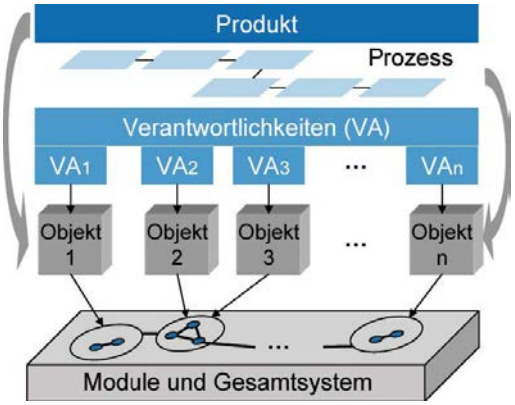


Abbildung 3.12: Modellierung ausgehend von der Produkt und Prozessbeschreibung (nach [15])

Startpunkt der Methodik ist die Analyse des Produktes. Dieser Punkt wurde bereits im ersten Abschnitt der Diplomarbeit behandelt.
Es wurden das Produkt und seine Bestandteile vorgestellt und der genaue Prozess erörtert. Außerdem wurden die Wandlungstreiber (Stückzahl- und Variantentreiber) erfasst, welche die Anforderungen an notwendige Wandlungsfähigkeit definieren.
Im zweiten Schritt wird die Identifikation und Beschreibung von Verantwortlichkeiten vorgenommen. Zu beachten ist hier, dass nur mehr der Gießprozess betrachtet wird. Die Prozesse der Vorbehandlung und der Bearbeitung/Montage sind nicht Teil dieses Projektes.

3.4.1 Identifikation von Verantwortlichkeiten

Die Beschreibung einer Verantwortlichkeit setzt sich aus dem beteiligten Gegenstand und einem aktiven Verb zusammen (z.B. Werkstückträger

bestücken)[20] . Als Grundlage für die Ermittlung der Verantwortlichkeiten dient hier die Prozessbeschreibung aus Abschnitt 3.3.
Auf diese Art erhält man eine Beschreibung der Aufgaben, welche die Anlage bewältigen muss. Die Zerlegung in einzelne Arbeitsschritte erfolgt solange bis ein geeigneter Detaillierungsgrad erreicht wird. Die Liste der Verantwortlichkeiten ist gemeinsam mit den Objekten, die im nächsten Schritt ermittelt werden, in Tabelle 3.2 zu sehen.

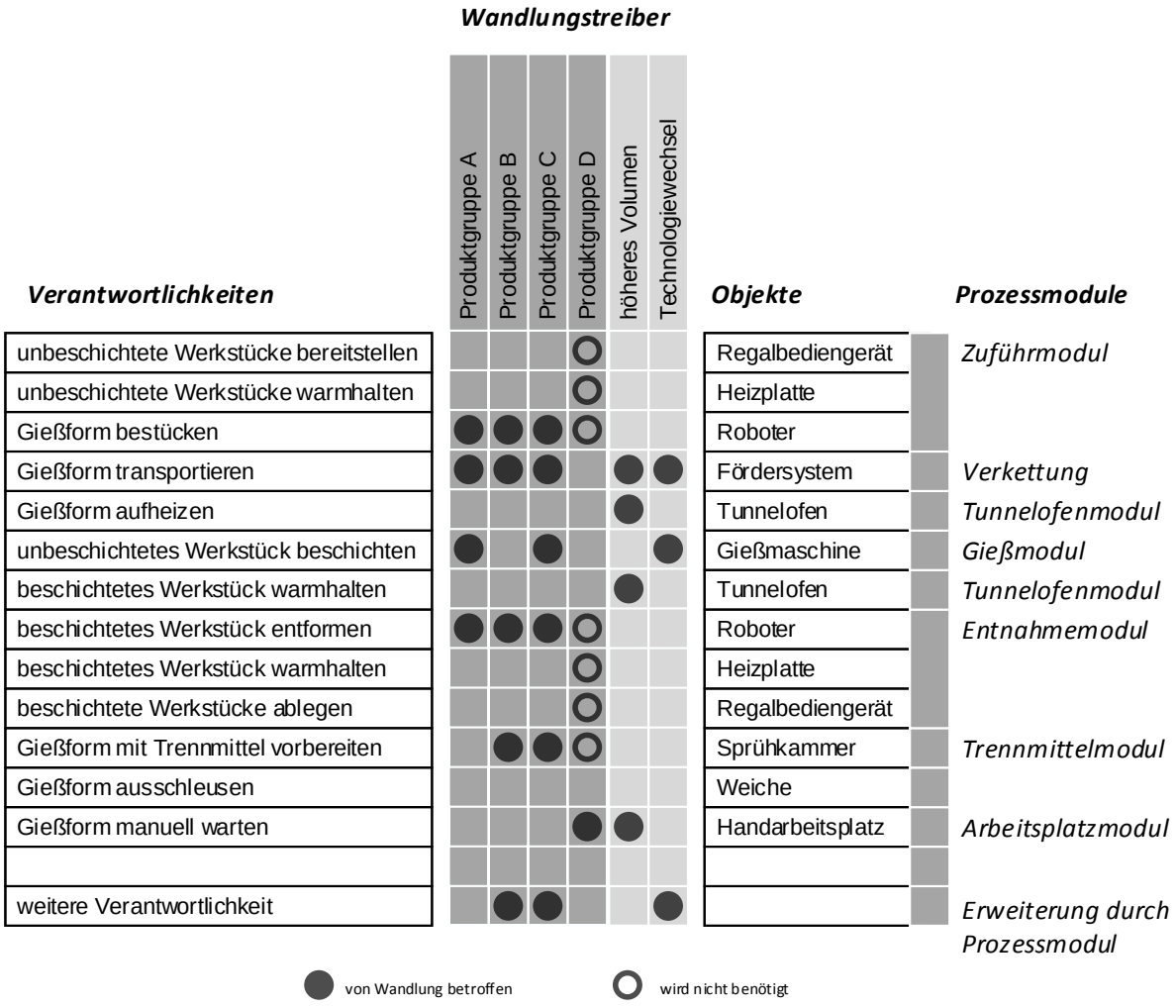


Tabelle 3.2: Produktionsstrukturmatrix mit Verantwortlichkeiten und Einteilung der Prozessmodule

3.4.2 Modellierung der Anlage

Wird der Modularisierungsansatz aus Abbildung 3.12 strikt weiterverfolgt, kann bereits das Produktionssystem aus Objekten modelliert werden. Dabei bekommt jedes Objekt eine Verantwortlichkeit zugewiesen und ist somit für eine abgegrenzte Fertigungsaufgabe zuständig. Außerdem wird festgestellt, in welchem Maße die zuvor ermittelten Wandlungstreiber Auswirkungen auf das einzelne Objekt haben. Dies lässt sich am besten anhand einer Produktionsstrukturmatrix, wie in Tabelle 3.2 dargestellt, zeigen. Als Endresultat erhält man einen Überblick über alle Objekte, die von der Wandlung betroffen sind. Andererseits werden jene Objekte bestimmt, die ausreichend flexibel sind und als fester Anlagenbestandteil gelten.

Produktionsstrukturmatrix (PSM)

Neben diesem Ergebnis lässt sich bereits hier eine sinnvolle Zuordnung der Objekte in einzelne Prozessmodule treffen.

Einteilung in Prozessmodule

Die Objekte Regalbediengerät, Heiztisch und Roboter bilden eine Einheit und werden unter den Begriff Zuführungsmodul zusammengefasst. Ähnlich ist es auch beim Prozessmodul der Verkettung. Dieses besteht aus dem Fördersystem und der Weiche. Dem Trennmittelmodul, Gießmodul, Tunnelofenmodul und Arbeitsplatzmodul ist nur ein Objekt zugeordnet. Durch die Einführung einer neuen Produktgruppe kann die Liste durch weitere Verantwortlichkeiten erweitert werden. Bei den Produktgruppen B und C wäre das zum Beispiel das „Zusammenstellen der zweiteiligen Gießform“. Diese Verantwortlichkeit kann entweder durch ein bestehendes Modul übernommen werden, oder es muss ein neues Prozessmodul entwickelt werden. Stellvertretend für alle noch nicht relevanten Prozesse steht die letzte Zeile in der PSM.

3.5 Anforderungen

Mit der Produktionsstrukturmatrix als Basis werden nun die Anforderungen den einzelnen Modulen zugeordnet. Zu beachten ist, dass in diesem Schritt die Prozessmodule noch nicht im Detail gestaltet werden. Vielmehr ist das Ergebnis dieses Schrittes ein Beschreibungsmodell, das als Grundlage für die genaue Gestaltung dient. Mit der eigentlichen Gestaltung der einzelnen Module beschäftigen sich die nachfolgenden Abschnitte.

Verkettung

Die Verkettung ist das Bindeglied aller weiteren Prozessmodule. Sie nimmt somit eine Sonderstellung unter den Modulen ein. In Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit werden hohe Anforderungen an die Verkettung gestellt. Aufgrund dessen sollte das Prozessmodul selbst eine modulare Struktur besitzen. Die nachfolgende Aufzählung beginnt daher auch mit der Forderung eines Baukastensystems

- **Baukastensystem**
  Durch den Wechsel von Produkten und der gleichzeitigen Forderung einer kürzeren Taktzeit entsteht unter anderem eine längere Pufferstrecke. Außerdem soll die Möglichkeit einer späteren Prozessmodulerweiterung (Laserbeschriftungsmodul, Prüfmodul, ergänzendes Gießmodul, ...) nicht eingeschränkt werden. Die Verkettung muss mit der Größe der Produkte und den Anforderungen wachsen. Mit einem Baukastensystem besteht später die Möglichkeit das Layout der Gießanlage in viele Richtungen zu skalieren.
- **Werkstückträger**
  Um der Forderung unterschiedlicher Produktgruppen nachzukommen fällt die Entscheidung zugunsten von Werkstückträgern. Vordefinierte Werkstückaufnahmen sind notwendig um eine schnelle Umstellung auf neue Produkte sicherzustellen. Bei einem Umrüsten

der Anlage werden lediglich die mit Gießformen ausgestatteten Werkstückträger bestückt.

- **Temperaturbeständigkeit**
  Die Verkettung besteht neben den Werkstückträgern auch aus einem Fördersystem. Mit der Randbedingung, dass die Gießform inklusive Werkstück stets eine Temperatur von $120°\mathrm{C}$ aufweisen soll, wird das Fördersystem vor eine große Herausforderung gestellt. Dieses sollte zumindest für Temperaturen bis $150°\mathrm{C}$ verwendet werden können.

- **Werkstückträger ausschleusen**
  Da an den verschiedenen Prozessmodulen Fehler auftreten können, die zu einem Ausschuss führen, soll die gewählte Verkettung die Möglichkeit bieten, Werkstückträger mit fehlerhaften Werkstücken auszuschleusen. Verunreinigte Gussformen bzw. schlechte Werkstücke können so gewartet oder ersetzt werden. Das Ausschleusen der Werkstückträger bringt bei einer Umstellung auf Produktgruppe D ebenfalls Vorteile mit sich. Ohne großen Aufwand lässt sich ein Handarbeitsplatz mit der Möglichkeit einer manuellen Bestückung einrichten.

- **Staufähigkeit**
  Um die Pufferstrecke so kurz wie möglich zu halten, sollten die Werkstückträger dicht aneinander zum Stehen kommen. Diese Eigenschaft einer Verkettung wird als Staufähigkeit bezeichnet. Ein weiterer Aspekt, der für die Staufähigkeit spricht, ist der geplante Handarbeitsplatz. Gerade bei hybriden Fertigungssystemen ist es wichtig, den Bediener nicht in Stresssituationen zu bringen. In solchen Fällen empfiehlt es sich, die Handarbeitsplätze vom Rhythmus der automatischen Prozessmodul, durch einen Puffer ebenfalls zu entkoppeln.

Hybride Fertigungssysteme kombinieren automatische Stationen mit Handarbeitsplätzen

- **Hohe Präzision**
  Da direkt am Fördersystem der Gießvorgang, die Entformung und die Bestückung stattfinden sollte, muss der Werkstückträger auf $\pm 0.1\,\mathrm{mm}$ positioniert werden können. Diese Genauigkeit muss nicht zwangsläufig das Fördersystem mit sich bringen. Durch Positioniereinrichtungen und Indexelemente kann der Werkstückträger un-

abhängig von der Positioniergenauigkeit des Fördersystems in Position gebracht werden.

Zuführungsmodul/Entnahmemodul

Das Entnahmemodul umfasst dieselben Anforderungen als das Zuführungsmodul. Generell können diese Module baugleich ausgeführt werden. Die Prozessmodule für die Zuführung und die Entnahme sind dadurch ausgezeichnet, dass sie bei einer Umstellung auf verschiedene Produktgruppen gewandelt werden müssen. Es ergeben sich folgende Anforderungen an diese Module:

- **Kompatibilität mit vorhandenen Paletten**
  Bereits bei der Vorbehandlung werden die Exzenterrollen auf einer Palette (siehe Abbildung 3.13) abgelegt und in einem Wagen gesammelt. Die Zuführung/Entnahme soll für diese Paletten ausgelegt werden. Bei einer Umstellung auf eine der Produktgruppen A, B oder C werden die Paletten einfach auf das jeweilige Produkt angepasst. Die Außenmaße von 600×400 mm bleiben allerdings unverändert.

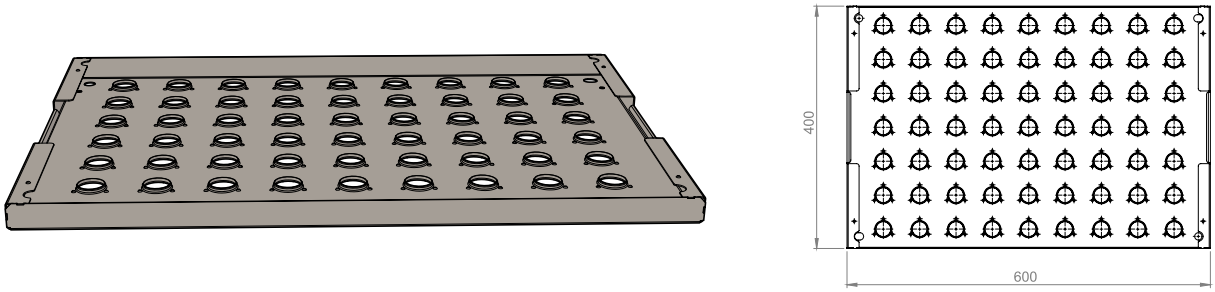


Abbildung 3.13: Abmessungen der Transportpalette

- **automatisierte Zu- und Abführung**
  Die Zuführung und Entnahme der Exzenterrolle soll weitgehend automatisch erfolgen. Dieses automatische Handling soll im Bedarfsfall auch für ähnliche Produkte bereit gestellt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Produktgeometrien ist dies ohne Wandlung nicht

möglich. Die Geometrie der Paletten und die Greiferpunkte des Roboterhandlings müssen dem neuen Produkt entsprechend angepasst werden.

- **manuelle Bestückung**
  Bei unhandlichen Produkten (Produktgruppe D) ist eine automatische Zuführung nicht wirtschaftlich lösbar. Es muss bei einem Produktwechsel der bestehende Automatisierungsgrad zurückgenommen und ein Handarbeitsplatz geschaffen werden. Ein Platz für die manuelle Bestückung von unhandlichen Teilen muss an einer beliebigen Stelle der Anlage eingerichtet werden können.
- **Einhalten der Prozesstemperatur**
  Neben den oben erwähnten Anforderungen muss bei der gesamten Zuführung die geforderte Prozesstemperatur eingehalten werden. Alle zugeführten Paletten müssen beheizt werden.

Tunnelofen

Der Tunnelofen ist einerseits vor dem Gießen zum Vorheizen der Formen, andererseits nach dem Gießen beim Aushärten der PUR-Beschichtung notwendig. Er wird somit an zwei Stellen der Anlage benötigt.

- **Flexibilität**
  Die Tunnelöfen sollen so flexibel gestaltet werden, um für die bereits definierten Produktgruppen ohne weitere Umbauten verwendbar zu sein. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang die Heizleistung und der Querschnitt der Tunnelöffnung.
- **Modularität**
  Im Fall einer niedrigeren Taktzeit muss die Länge des Ofens der Länge der Verkettung angepasst werden. Der Tunnelofen soll nach dem Beispiel der Verkettung ebenfalls in der Länge wandlungsfähig sein. Der Wandlungsbefähiger ist auch beim Tunnelofen die Modularität.

Gießmodul

- **verfahrbarer Mischkopf**
  Im Fall der Exzenterrolle kommt es bei einem punktuellen Ansetzen des Mischkopfes über der Gießform zu einem Überlaufen derselbigen. Möchte man komplexe Produkte beschichten und zu einem gewissen Grad flexibel bleiben, so muss der Mischkopf einen Pfad verfolgen können. Somit ergeben sich mindestens zwei Gründe, um den Mischkopf verfahrbar zu gestalten.
- **Wandlungsfähig für unterschiedliche Gießmaschinen**
  Unterschiedliche Produkte verlangen unterschiedliche PUR-Formulierungen. Bis zu einem gewissen Grad lassen sich eine Vielzahl von Zusammensetzungen mit ein und der selben Gießmaschine mischen. Verlangt ein Produkt allerdings den Tausch einer Gießmaschine, so soll dieser Wechsel kein Problem darstellen.

Trennmittelmodul

- **abgeschottete Atmosphäre**
  Das Trennmittel hilft bei der Entformung des fertiggestellten Bauteils aus der Gießform. Gelangt es allerdings an nicht vorgesehene Stellen, kann es der Grund für Haftungsfehler und unbrauchbare Werkstücke sein. Um diesem Risiko entgegenzuwirken muss das Aufbringen des Trennmittels in einer abgeschotteten Umgebung stattfinden.
- **flächendeckende Beschichtung**
  Das Auftragen des Trennmittels ist sehr sensibel. Bei zu geringem Auftragung zeigt das Trennmittel nahezu keine Wirkung. Das Werkstück verklebt sich in der Gießform. Wird allerdings zu viel Trennmittel aufgetragen, kommt es zu Tropfen und Schlierenbildung. Eine unschöne Oberfläche und Haftungsfehler sind das Resultat. Der Trennmittelauftrag muss demnach für jedes Produkt eigens angepasst werden.

Kapitel 4

Konzeptentwicklung

4.1 Verkettung

Eine arbeitsteilige Produktion führt zu einer Aufteilung der Aufgaben auf mehrere Prozessmodule. Verkettungssysteme ermöglichen den automatischen Transport der Werkstücke zwischen diesen Modulen.
In diesem Abschnitt soll aufbauend auf den Grundlagen der Verkettung ein geeignetes System gefunden werden. Bei der Suche wird speziell Rücksicht auf die zuvor definierten Anforderungen genommen:

- Dimensionierung
- Temperaturbeständigkeit
- Werkstückträger
- Hohe Präzision
- Werkstückträger ausschleusbar
- Baukastensystem
- Staufähigkeit

Die Verkettung baut in den meisten Fällen auf einem Transfersystem und Werkstückträger auf. Je nachdem wie die Werkstückträger mit dem Trans-

fersystem verbunden sind, unterscheidet man zwischen loser, elastischer und starrer Verkettung, (siehe Abbildung 4.1).

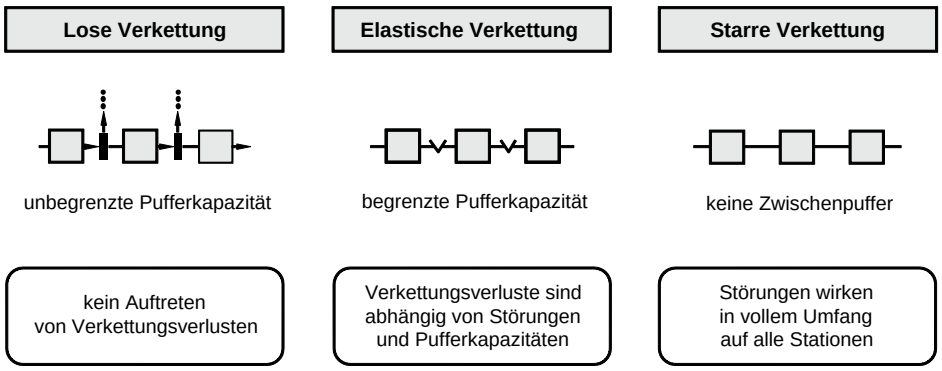


Abbildung 4.1: Überblick über die verschiedenen Arten der Verkettung (nach [21])

starre Verkettung

Bei der starren Verkettung sind die Werkstückträger in festen Abständen mit dem Transfersystem verbunden. Die Weitergabe der Werkstückträger erfolgt bei solchen Systemen daher synchron getaktet. Beim Ausfall einer Station steht die ganze Anlage still. Eine starre Verkettung ermöglicht eine hohe Taktgeschwindigkeit, allerdings auf Kosten der Flexibilität bezüglich des Materialflusses. Typische Vertreter für die starre Verkettung sind Rundtakt und Längstakt-Verkettungssysteme. Diese Art der Verkettung wird für geringe Bauteilgewichte und Größen verwendet.

lose bzw. elastische Verkettung

Eine hohe Materialfluss-Flexibiltät sowie das Ein- und Ausschleusen von Werkstückträger bringt die lose bzw. elastische Verkettung mit sich. Bei diesen Varianten der Verkettung besteht keine feste mechanische Koppelung der Werkstückträger mit dem Transfersystem. Die Werkstücke werden unabhängig von der Taktzeit (asynchron) zwischen den Stationen transportiert. Der Transport der Werkstückträger erfolgt meist über Reibschluss auf Förderbändern, -gurten, -riemen oder Metall- bzw. Kunststoffketten. In den Prozessmodulen müssen die Werkstückträger in vielen Fällen gestoppt, ausgehoben und indexiert werden. Zusätzlich können die Werkstückträger gestaut und gepuffert werden [22].
Ist der Puffer ausreichend groß, um die Stationen vollständig voneinander zu entkoppeln, so spricht man von einer losen Verkettung. Eine kurze Störungen würde bei dieser Variante keine weiteren Auswirkungen auf

die gesamte Linie haben. In der Praxis stellt sich die elastische Verkettung als sehr brauchbar dar. Im Vergleich zur starren Verkettung wirken sich hier kleine Störungen durch kurze Pufferstrecken nur verzögert auf die gesamte Anlage aus. Außerdem werden die hohen Kosten einer losen Verkettung durch große Puffer minimiert. Als Beispiel für eine Verkettung mit diesen Eigenschaften ist das Längstransfersystem zu nennen [21].

Längstransfersystem

Eine weitere Stärke des Längstransfersystem liegt in der freien Anlagenplanung. Unterschiedliche Anordnungen wie zum Beispiel Linie, Karree bzw. U-Form lassen sich in einfacher Weise mit standardisierten Basismodulen aufbauen. Neben diesen Vorteilen punktet das Längstransfersystem mit nachträglicher Erweiterbarkeit bzw. Reduzierung des Anlagenumfangs. So ist es im Vergleich zu Rundtaktmaschinen auf einfache Weise möglich manuelle Arbeitsplätze einzugliedern. Für das Ausschleusen fehlerbehafteter Teile bietet nahezu jeder Systemanbieter ein Weichenmodul in seinem Programm an. Bei der Forderung einer Puffererweiterung oder der Einbindung eines neuen Prozessmoduls lassen sich Längstransfersysteme in der Regel ebenfalls einfach verlängern.

4.1.1 Transfersystem

Der Transport der Werkstückträger von Prozessmodul zu Prozessmodul erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Transfersystems. Meist wird über Reibschluss eine Verbindung zu den Werkstückträgern hergestellt. Als treibendes Element stehen unterschiedlichste Förderer zur Verfügung. Einen Überblick über die am Markt erhältlichen Systeme gibt Abbildung 4.2.

Bei der Suche nach dem „idealen Förderer“ wurden einige dieser Varianten näher betrachtet. Die Vor- und Nachteile sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Diese Tabelle ist im Laufe der Recherche entstanden und beruht auf den Angaben unterschiedlicher Anbieter der jeweiligen Transfersysteme.

In Tabelle 4.1 sind die eingangs erwähnten Anforderungen gegenübergestellt und mit (+) bzw. (-) bewertet. Positiv ist zu vermerken,

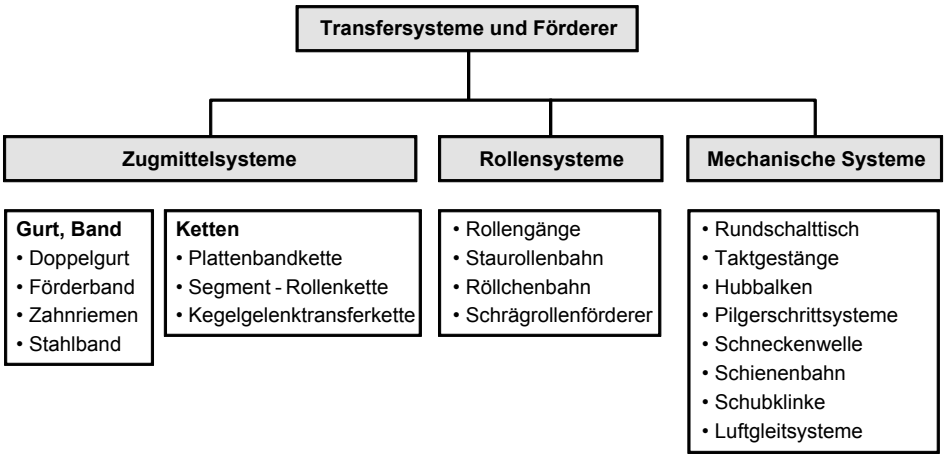


Abbildung 4.2: Überblick unterschiedlicher Transfersysteme (nach [21])

	Baukastensystem	kompakte Bauweise	kurvenfähig	WT ausschleusen	Temperaturbeständig	
Doppelgurt, Zahnriemen	+	+	−	+	−	Sehr gute Zugängigkeit des WT (auch von unten)
Kardangelenkkette	+	−	+	−	+	für schwere Werkstücke geeignet
Scharnier und Plattenbandkette	+	+	+	+	−	Gleitleiste/Kettenglieder nicht temperaturbeständig
Staurollenbahn	+	−	−	+	−	Gleitleiste nicht temperaturbeständig
Rollengänge	+	−	−	+	+	für schwere Werkstücke geeignet

Tabelle 4.1: Überblick der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Fördersysteme

dass es bei nahezu allen Transfersystemen zumindest einen Hersteller gibt, der ein Baukastensystem anbietet. Ein besonderes Augenmerk wird auch auf die Kurvengängigkeit der Förderers gelegt. Besitzt der Förderer diese Eigenschaft, entfallen aufwendige Dreh-Hebemodule, welche das Werkstück von einer Linearstrecke auf die nächste heben. Je nach Ausmaß des Längstransfersystems kann durch den Einsatz kurvengängiger Förderer der Aufwand hinsichtlich Planung, Montage und Programmierung erheblich gesenkt werden.

Problem der Temperaturbeständigkeit

Die Gegenüberstellung macht ebenfalls ersichtlich, dass eine Vielzahl der Transfersysteme an der Temperaturbeständigkeit scheitern. Meist sind es

Gleitleisten oder die Förderkette/Fördergurt selbst, die den Temperaturen über 120°C nicht standhalten. Der Transport über Kardangelenkketten oder Rollenbahnen wäre im Hinblick auf die Temperaturbeständigkeit möglich. Jedoch sind diese für schwere Werkstücke ausgelegt und für den vorliegenden Anwendungszweck mehrfach überdimensioniert. Diese Überdimensionierung steht im direkten Widerspruch mit der kompakten Bauweise.

Eine Möglichkeit, die Temperatur vom Fördersystem fern zu halten, wäre eine Umgestaltung der Werkstückträger. Zum Beispiel besteht die Möglichkeit, durch einen Steg das Werkstück vom Fördersystem abzuheben. Der Tunnelofen könnte so um die Gießform herum aufgebaut werden. Der Steg müsste aus einem wärmeisolierenden Material gestaltet werden um einen Wärmetransport zu verhindern (siehe Abbildung 4.3).

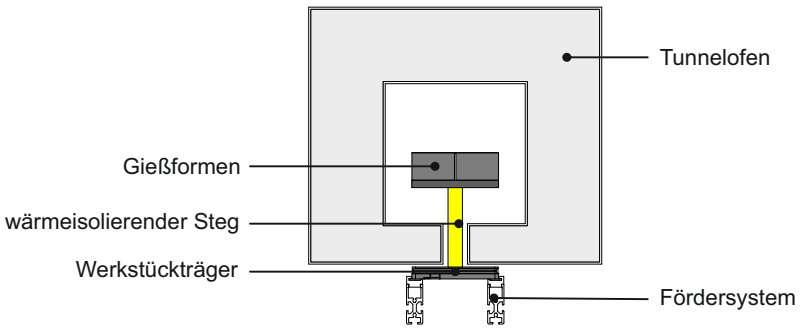


Abbildung 4.3: schematische Darstellung der Steg-Konstruktion zur Verhinderung von Wärmeeinflüssen

4.1.2 Mono Rail Transfer (MRT)

Das Konzept der Trennung von Fördersystem und Wärmezone, allerdings in einer sehr ausgereiften Ausführung, verfolgt auch das Transfersystem der *Fa. Soldati* [23]. Hier übernimmt eine Plattenbandkette die Förderung. Diese Kette ist in zwei Raumachsen kurvengängig. Ein einziger Antrieb am gesamten Transfersystem ist ausreichend, um alle notwendigen Richtungswechsel zu realisieren. Der Name *Mono Rail Transfer* weist bereits daraufhin, dass eine Schiene Hauptbestandteil dieses Systems ist. Diese Laufschiene ist parallel über der umlaufenden Plattenbandkette montiert

Antrieb durch Plattenbandkette

und ist für die Führung der Werkstückträger zuständig [24].
Das gesamte System ist komplett modular aufgebaut. Mit einer überschaubaren Auswahl von Modulen kann eine komplexe Anlage aufgebaut werden. Unter den Modulen befinden sich unter anderem Liniensstrecken, Kurvenstrecken und Weichen.

Kern dieses Systems sind jedoch spezielle Werkstückträger (siehe Abbildung 4.4). Über zwei diagonal befestigte Laufrollen werden diese auf der Laufschiene geführt. Am Werkstückträger befestigte Reibkörper stützen sich an der Plattenkette ab und ermöglichen einen Vortrieb von bis zu $200\,\mathrm{mm/s}$. Der Reibschluss zwischen Werkstückträger und Plattenkette wird aufgehoben, sobald es zu einem Stau mehrerer Werkstückträger kommt. Außerdem kann dieser Reibschluss auch durch eigene Stopper-Elemente aufgehoben werden. Als Resultat werden die Reibflächen geschont und der Antriebsmotor benötigt nur ein Minimum an Leistung.

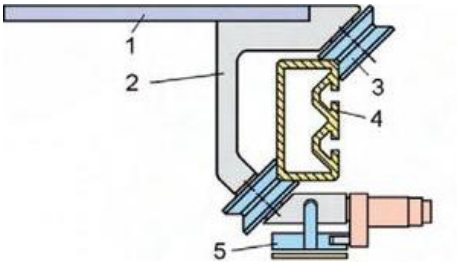


Abbildung 4.4: funktioneller Aufbau des Werkstückträgers; Werkstückplatte (1), Grundkörper (2), Laufrollen (3), Laufschiene (4), Reibkörper (5) (nach [23])

4.1.3 Werkstückträger (WT)

Werkstückträger sind die Lastesel einer Anlage. Sie sind die Schnittstelle zwischen variablen Werkstückformen und einem geometrisch unveränderlichen Transfersystem [21]. Die Bestandteile eines Werkstückträgers lassen sich in wenige Komponenten aufteilen (vgl. Abbildung 4.5). Als Lauf- und Führungselement ist hier der Wagen der *Fa. Soldati* dargestellt. Die weiteren Komponenten werden im Anschluss noch weiter beschrieben.

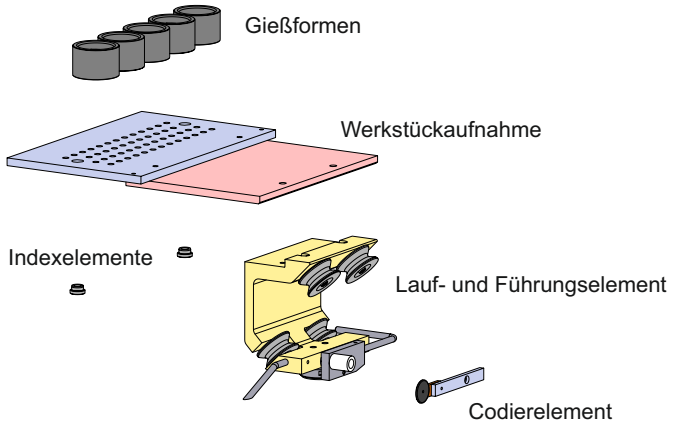


Abbildung 4.5: Abbildung der verschiedenen Bestandteile eines Werkstückträgers

Arbeitsplatte und Werkstückaufnahme

Der eigentliche Vorteil dieses Systems liegt in der Möglichkeit die Werkstückaufnahme auskragend zu montieren. Durch die auskragende Montage lassen sich eine Reihe von neuen Anwendungsgebieten finden (siehe Abbildung 4.6).

auskragende Werkstückträger

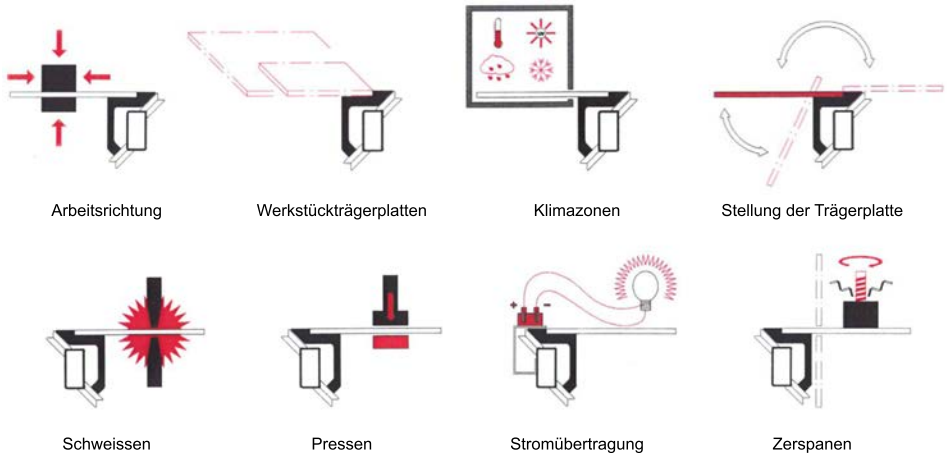


Abbildung 4.6: Auszug der Vorteile des MRT (nach [23])

Nennenswert ist in diesem speziellen Fall die einfache Integration einer Klimazone. Beispielsweise kann diese Eigenschaft für das thermische

Aushärten oder Kühlen von Objekten genutzt werden. Im vorliegenden Fall kann damit ohne weiteres eine Umgebung mit einer Temperatur von 120°C für das Aushärten des PUR-Kunststoffes geschaffen werden.
Neben diesem Vorteil lässt diese Bauweise auch Operationen an vier Seiten des Werkstücks zu. Momentan gibt es noch keine Anwendung, jedoch kann es bei später entwickelten Prozessmodulen z.B. in der Montage sehr hilfreich sein. Einen weiteren Nutzen hat das auskragende Design für das Gießmodul im Hinblick auf Verunreinigungen. Eine Verschmutzung des Fördersystems durch das Polyurethan kann nun weitgehend ausgeschlossen werden.

Belastungskurve

Für die Auslegung der Arbeitsplatte und der Werkstückaufnahme wird von der *Fa. Soldati* eine Belastungskurve bereitgestellt. Aus dieser Kurve, dargestellt in Diagramm 4.1, lässt sich die maximale Belastung der Arbeitsplatte in Abhängigkeit der Schwerpunktausladung bestimmen.

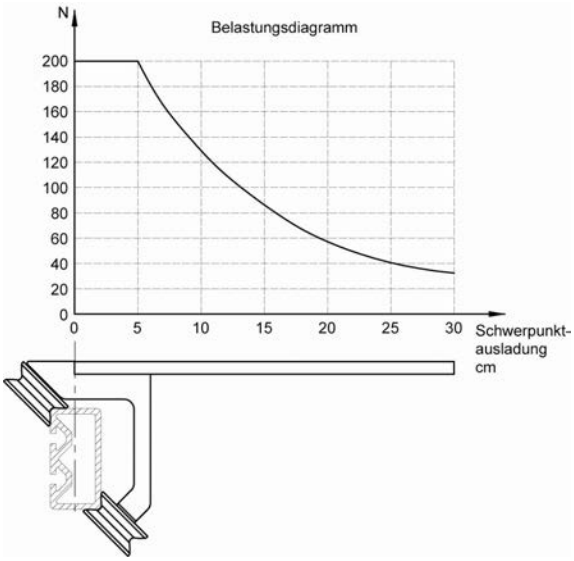


Diagramm 4.1: maximale Belastung des MRT in Abhängigkeit der Schwerpunktausladung (nach [23])

Ausgehend vom Gewicht der Gießform und des Produktes lässt sich nun bestimmen, wieviele Gießformen bei einem bestimmten Schwerpunktsabstand montiert werden können. Zu beachten ist bei dieser Auslegung auch das Gewicht der Grundplatte. Die Grundplatte ist zweiteilig ausgeführt: Eine glasfaserverstärkte Wärmeschutzplatte soll das Fördersystem so gut

wie möglich vor der Erwärmung durch Wärmeleitung schützen. Diese Wärmeschutzplatte wird mit einer Aluminiumplatte verschraubt, welche die Gießformen trägt. Die Abmessungen der Platten ergibt sich gemeinsam mit der in Abschnitt 4.3.3 behandelten Auslegung des Tunnelofens. Ein Lochraster am Aluminiumteil hat den Hintergrund, die Platte auch mit anderen Gießformen bestücken zu können.

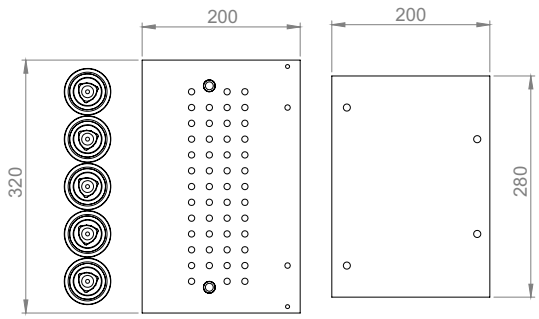


Abbildung 4.7: Werkstückträger

Mit der in Abbildung 4.7 ersichtlichen Konfiguration (Werkstückaufnahme inkl. 5 Gießformen) erhält man einen Schwerpunktabstand von $239,16\,\mathrm{mm}$ bei einem Gesamtgewicht von etwa $4875\,\mathrm{g}$. Laut Diagramm 4.1 stellt das bereits eine Überschreitung der Belastungskurve dar. Allerdings findet man in der Produktbroschüre ebenfalls ein zulässiges Belastungsmoment des Werkstückträgers von $20\,\mathrm{Nm}$. Dieser Wert wird bei unserer Anwendung nicht erreicht.
Nach Rücksprache mit *Fa. Soldati* ist die angestrebte Belastung kein Problem für das Transfersystem.

Schwerpunktabstand und Masse wurde mit den Bordmitteln von *Solidworks* bestimmt

$M = 48,75\,\mathrm{N} \cdot 0,24\,\mathrm{m}$
$M = 11,65\,\mathrm{Nm}$

Positionierung

Asynchron laufende Werkstückträger müssen in den einzelnen Stationen angehalten und positioniert werden. Das Anhalten wird über Stopper-Module erreicht. Zum Positionieren sind am Werkstückträger zwei Zentrierbuchsen angebracht. An diesen Zentrierbuchsen orientiert sich die Positioniereinheit der jeweiligen Station. Die Positioniergenauigkeit beträgt nach der Indexierung $\pm 0,05\,\mathrm{mm}$. An Stationen wo keine Positionsgenauigkeit gefordert wird, kann das Anbringen einer Positioniereinheit entfal-

len. Zum Beispiel bei einem Handarbeitsplatz würde die Genauigkeit von $\pm 1\,\mathrm{mm}$ des Stopperzylinders ausreichen.

Codierung

Zur Identifikation der einzelnen Werkstückträger lassen sich Codierelemente anbringen. Hierfür gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Neben *Nur-Lese-Datenträgern* (Strichcode, QR-Code) besteht auch die Möglichkeit von *Schreib-Lese-Datenträgern* (RFID-Tag/Transponder).

RFID steht für Radiofrequenz-Identifikation

In der vorliegenden Anlage wird die RFID-Technologie verwendet. Mit dieser Technologie ist es möglich, innerhalb einer bestimmten Reichweite berührungslos Daten zu übertragen. Die Kopplung zwischen einem Schreib/Lese-Gerät und dem Transponder geschieht durch elektromagnetische Wellen. Diese lassen sich in vier Frequenzbereiche unterteilen: LF (niedrige Frequenz), HF (mittlere Frequenz), UHF (hohe Frequenz) und Mikrowelle (sehr hohe Frequenz). Damit werden nicht nur Daten übertragen, sondern auch der Transponder mit Energie versorgt [25].

	LF (niedrige Frequenz)	HF (mittlere Frequenz)	UHF (hohe Frequenz)	Mikrowelle (sehr hohe Frequenz)
Frequenzbereich	125 kHz	13,56 MHz	868 MHz	2,45 GHz
Reichweite	1 m	3 m	10 m	>10 m
Übertragungsgeschwindigkeit	4 kBit/s	26 kBit/s	40 kBit/s	320 kBit/s

Tabelle 4.2: Unterschiedliche Übertragungsfrequenz bei der RFID

Die RFID-Technologie beschränkt sich nicht nur auf die Identifikation der Werkstückträger. Vielmehr besteht die Möglichkeit Informationen auf einem Datenträger abzuspeichern und so an einer anderen Stelle auszulesen. Der Werkstückträger wird somit zum elektronischen Laufzettel zwischen den einzelnen Prozessmodulen [26]. Jeder Werkstückträger trägt auf diese Weise neben den Werkstücken auch alle relevanten Daten mit sich. Der steuerungstechnische Aufwand kann dadurch deutlich verringert werden.

IO... in Ordnung
NIO... nicht in Ordnung

An jedem Prozessmodul werden alle notwendigen Informationen für die Ausführung des Prozesses abgerufen. Nach Beendigung der Arbeit können die Ergebnisse gespeichert werden. Bei einfachen Prozessen ist

das lediglich eine IO/NIO-Aussage. Bei komplexeren Aufgaben können dazugehörige Messwerte (z.B. Temperatur) ergänzt werden.

Der Speicherbereich eines RFID-Tags ist in zwei Teile geteilt. Im ROM steht eine eindeutige ID, die sich nicht überschreiben lässt. Der RAM hingegen kann beliebig beschrieben werden. Die Größe des RAMs liegt in der Praxis zwischen 1-Bit und mehreren Megabytes [25]. Der verwendete RFID-Tag umfasst ein Speichervolumen von 128 Byte. Die Einteilung dieses Speicherbereiches wird im Abschnitt 4.2.3 der Programmierung behandelt.

ROM... Read Only Memory
RAM... Random Access Memory

4.1.4 Auslegung

Layout

Nun soll die notwendige Länge des MRT-Systems bestimmt werden. Diese Auslegung verlangt einige Annahmen. Zwar ist zu diesem Zeitpunkt die Anzahl der Prozessmodule bekannt, jedoch lässt sich noch nichts über deren Dimensionen sagen. Bereits hier wird deutlich, dass die Auslegung des Transfersystems ein iterativer Prozess ist. Aufgrund der modularen Bauweise sollten nachträgliche Änderungen am MRT jedoch zu keinen nennenswerten Problemen führen.

iterativer Prozess

	Rüstzeit	Bearbeitungsz.	Liegezeit produktionsbedingt
Bestückungsmodul	4 s/WT	3 s/Rolle	-
Gießmodul	4 s/WT	4 s/Rolle	600 s/WT
Entnahmemodul	4 s/WT	3 s/Rolle	-
Trennmittelmodul	4 s/WT	15 s/WT	-

Tabelle 4.3: Rüst-, Bearbeitungs- und Liegezeit der einzelnen Prozessmodule

Für jedes Prozessmodul werden $1,5\,\mathrm{m}$ am Transfersystem reserviert. Das entspricht genau einem Linearmodul des MRTs der *Fa. Soldati*. Für die Auslegung der Pufferstrecken zwischen den Modulen gestaltet es sich als hilfreich die Taktzeiten der einzelnen Prozessmodule zu ermitteln. Zu diesem Zeitpunkt können auch dafür nur Annahmen getroffen werden. Ta-

belle 4.3 gibt einen Überblick der Rüst-, Bearbeitungs- und Wartezeiten der vorhandenen Prozessmodule.

Unter die Rüstzeit fällt die Freigabe und das Positionieren eines neuen Wagens. Dieser Vorgang sollte nach 4 Sekunden abgeschlossen sein. Im Idealfall steht nach jeder Bearbeitung bereits der nächste Wagen bereit. Für die Bestückung und die Entformung wurde für das Handling eine Zeit von 3 Sekunden pro Werkstück eingeräumt. Interessant werden die Betrachtungen im Falle des Gießmoduls. Diese Station gibt alle 24 Sekunden eine Werkstückträgern frei. Aufgrund einer produktionsbedingten Wartezeit (Aushärtung) von 10 Minuten müssen die produzierten Werkstückträger gepuffert werden bis sie für das nächste Prozessmodul freigeben werden. Die Größe des Puffers ist so gestaltet, dass alle Werkstücke, die innerhalb der Aushärtezeit produziert werden, untergebracht werden können. Der Puffer muss demnach Platz für 25 Werkstückträger fassen. Bei einer Werkstückträgerlänge von 320 mm entspricht das 8000 mm bzw. der Länge von 6 Linearmodulen des MRTs.

Wartezeit aufgrund PUR-Aushärtung

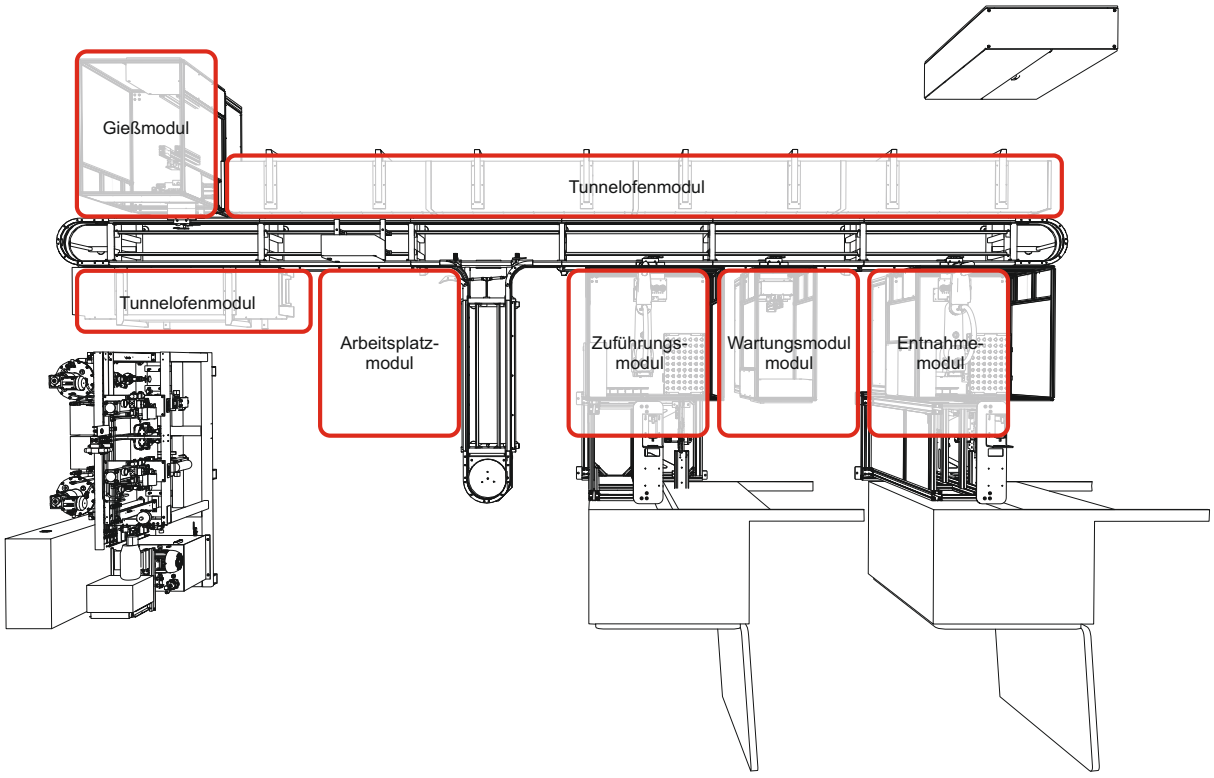


Abbildung 4.8: Layout der Anlage

Karreeanordnung

Im vorläufige Anlagenbild in Abbildung 4.8, lässt sich erkennen, dass die einzelnen Module in Karreeanordnung angeordnet sind. Dieses Anordnungsprinzip zeichnet sich durch eine Rücklaufstrecke aus die ebenfalls zur Einbindung weiterer Prozessmodule verwendet wird. Dadurch ist die Karreeanordnung die kostengünstigste aller Varianten. Außerdem wird der Aufbau der Anlage wesentlich kompakter. Als Nachteil gilt die zweiseitige Teileanlieferung- und Bereitstellung bzw. eine eingeschränkte Übersicht für den Maschinenbediener. Bei der Aufteilung der Prozessmodule wurde dennoch darauf geachtet, dass sich die Bestückung auf eine Seite der Anlage konzentriert. Bis auf das Gießmodul befinden sich alle Prozessmodule mit Bestückung auf der selben Seite. Der Tunnelofen zur Pufferung der gegossenen Teile erstreckt sich fast über die gesamte Länge der Anlage. Der kurze Tunnelofen vor dem Gießmodul dient der Kompensation von Temperaturverlusten, die in gewissen Bereichen der Anlage nicht zu vermeiden sind.
Die Größe der Prozessmodule (Zuführungsmodul, Gießmodul, Abführungsmodul, Wartungsmodul und Arbeitsplatzmodul) ergibt sich durch die Konstruktion der einzelnen Module. Um bereits an dieser Stelle ein gültiges Anlagenlayout abbilden zu können werden diese Dimensionen als gegeben angenommen. Man erhält somit das in Abbildung 4.9 ersichtliche Anlagenlayout.

Hardwarekomponenten

Aus dem Schema von Abbildung 4.9 wird ersichtlich, wo Stopper-Zylinder, induktive bzw. RFID-Sensoren am Anlagenlayout zu verteilen sind. Natürlich muss für jedes Prozessmodul eine Station am MRT zur Verfügung stehen. Eine solche Station besteht in jedem Fall aus einen Stopp-Zylinder und einen Anwesenheitssensor. Je nachdem ob auf der Stopposition Informationen benötigt bzw. generiert werden, müssen RFID-Sensoren verteilt werden. Allgemein lässt sich sagen, dass jedes Prozessmodul einen RFID-Sensor benötigt. Eine 180°-Kurve darf nur durch zwei Werkstückträger zur selben Zeit befahren werden. Somit ist vor jeder Kurve ebenfalls eine Station notwendig. Ein Spezialelement im Anlagenschema stellt die Weiche dar. Diese besteht aus zwei Stoppern, vier Anwesenheitssensoren und einem RFID-Sensor. Diese Komponenten sind notwendig, um einen geregelten Ablauf zu gewährleisten.

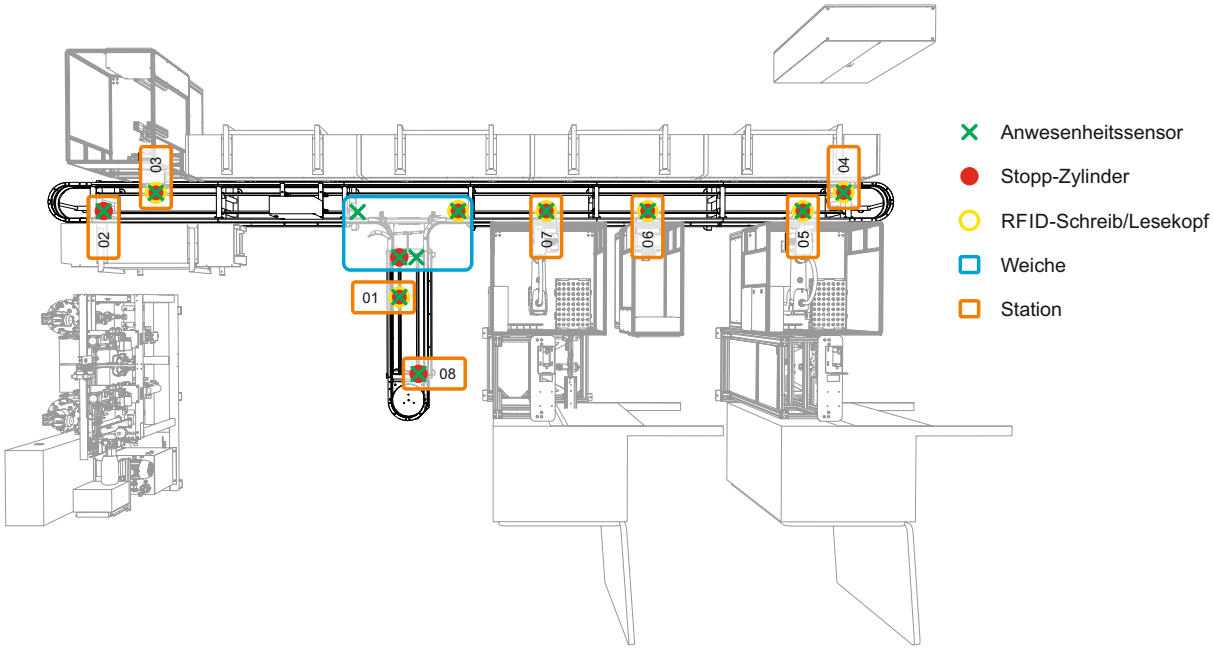


Abbildung 4.9: Komponenten des MRTs

Anzahl an Werkstückträger

Die Anzahl der Werkstückträger wird durch eine Simulation ermittelt. Grundlage für die Simulation sind die Zeiten der einzelnen Prozesse und die Wegstrecken zwischen den Prozessstationen. Zur Modellierung der Anlage steht die Softwarelösung *PlantSimulation* der *Fa. Siemens* zur Verfügung. Aus dem Resultat dieser Studie lassen sich Aussagen über die Produktionsrate und die Taktzeit machen. Außerdem kann im Zuge der Simulation die optimale Anzahl an Werkstückträger bestimmt werden.

Modellierung

Die Software stellt eine Reihe an verschiedenen Objekten zur Verfügung mit deren Hilfe sich ein einfaches Modell der vorliegenden Anlage modellieren lässt (siehe Abbildung 4.10). Einen Auszug der Objekte die bei der Modellierung verwendet werden, sind im Folgenden kurz angeführt.

Quelle: Dieses Objekt generiert neue bewegte Elemente (BEs) und bringt diese in Umlauf. Im Fall der Gießanlage sind das Werkstückträger bzw. die Rollen.

Senke: An dieser Stelle des Modells werden die bewegten Elemente „verschluckt". Dieses Objekt wird am Ende der Entformung verwendet. Die Anzahl aller entformten Rollen wird über einen Zähler abgerufen.

Umladestation: Für die Simulation eines Handlings, z.B. SCARA Roboter, steht das Objekt Umladestation zur Verfügung. In den Einstellungen dieses Objektes muss die Start und Zielposition angegeben werden.

Einzelstation: Dieses Objekt wird stellvertretend für die hier verwendeten Prozessmodule eingesetzt. Durch Angabe von Rüst- und Bearbeitungszeit bzw. anderen Einstellungen, wie Störungen und Verfügbarkeit, lässt sich ein sehr genaues Modell erstellen.

Platzpuffer: Um den Aushärtepuffer zu modellieren gibt es das Platzpufferobjekt. In den Einstellungen lässt sich die geforderte Wartezeit angeben. Die Belegung des Puffers kann auch hier durch einen Zähler überwacht werden.

Förderband: Zwischen den Objekten kann durch das Einfügen eines Förderbandobjektes auch die Verkettung simuliert werden. Auch hier gibt es einige Einstellungen (Geschwindigkeit, Länge) um die Realität so gut wie möglich abzubilden.

Annahmen für Simulation

Das Modell ist sehr ähnlich mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Prozessablauf, dennoch werden einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen. Die Simulation geht unter anderem von 0 % Ausschuss aus. Das heißt, es werden keine Teile ausgeschleust und die Weiche kann vernachlässigt werden. Allerdings wird bei den Prozessmodulen lediglich eine Verfügbarkeit von 90 % definiert. Für die Rüst- und Bearbeitungszeiten bzw. die Aushärtezeit dient die Tabelle 4.3 als Grundlage.

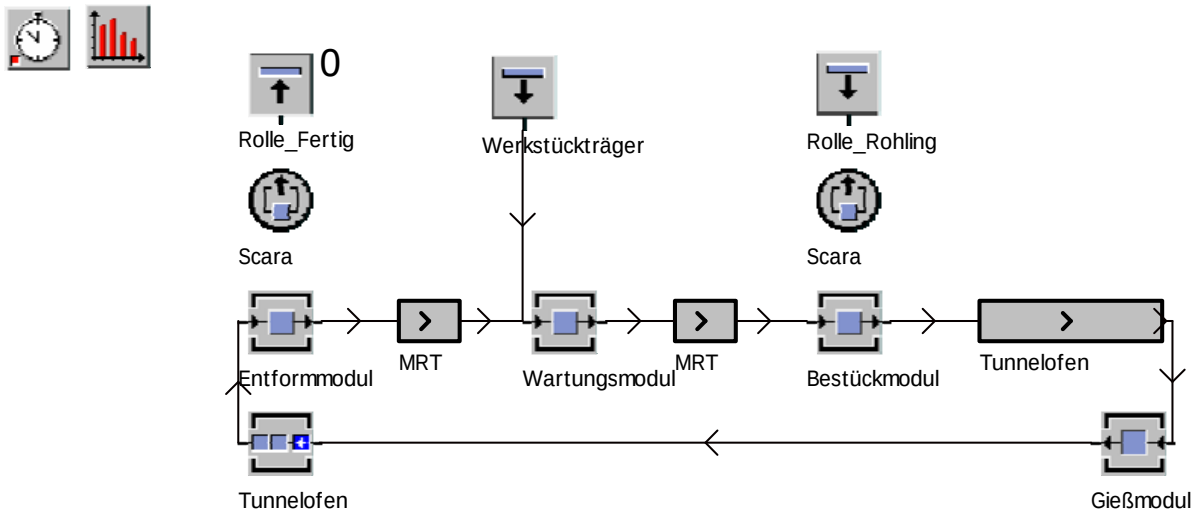


Abbildung 4.10: Modell in PlantSimulation

Simulation und Ergebnis

Die Simulation repräsentiert eine Schicht eines Arbeitstages. Dabei läuft die Anlage für sieben Stunden. Eine Stunde wird für das Vorbereiten, Einschalten, Ausschalten und sonstige Arbeiten reserviert.

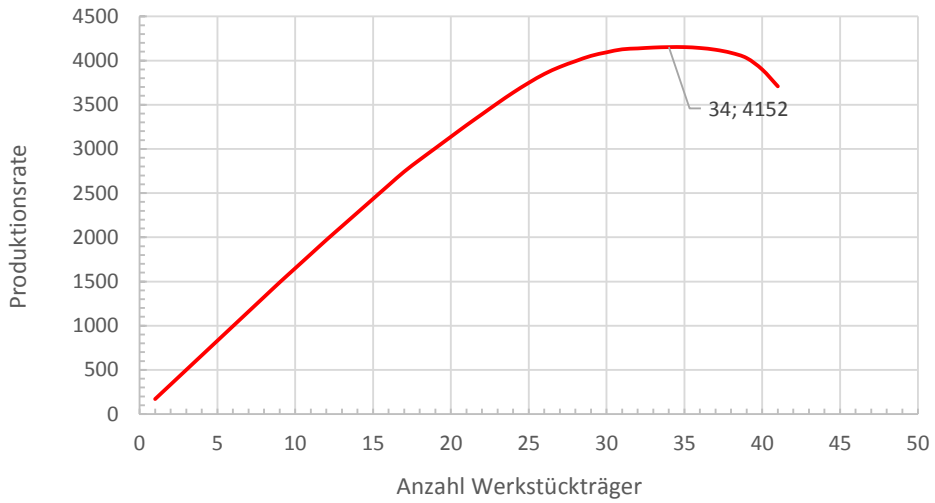


Diagramm 4.2: Zusammenhang der Produktionsrate über Werkstückträgeranzahl

Im ersten Teil der Simulation wird der Aushärtepuffer mit 24 Pufferplätzen festgelegt. Bei eins beginnend wird die Zahl der in Umlauf befind-

lichen Werkstückträger immer weiter erhöht. Aus dieser Simulationsreihe lässt sich Diagramm 4.2 erstellen.

Auffällig ist, dass die Produktionsrate bis zu einem Maximum ansteigt. Ab einer gewissen Anzahl an Werkstückträger fällt die Produktionsrate ab, bis die Anlage schlussendlich blockiert wird. Zu diesem Zeitpunkt ist das System im Stillstand. Es sind somit mehr Werkstückträger im Umlauf als Kapazität vorhanden ist. Die Anzahl an Werkstückträgern hat demnach einen erheblichen Einfluss auf die Produktionsrate einer Anlage. Eine Erhöhung der Werkstückträger über die ermittelten 34 Stück würde keinen wirtschaftlichen Nutzen mit sich bringen.

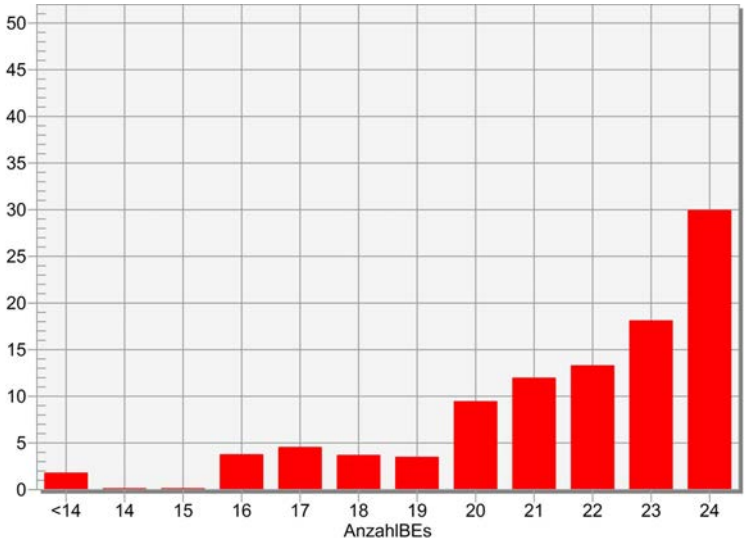


Diagramm 4.3: Pufferbelegung im Laufe einer Schicht

Ein Blick auf das Diagramm 4.3 lässt vermuten, dass eine Vergrößerung des Aushärtepuffers zu einer Steigerung des Ausstoßes führen kann. Zirka 30 % der Produktionszeit ist der Puffer voll ausgelastet. Diese Auslastung führt zu einer Blockade an der Gießstation. Zwar wurde der Puffer so ausgelegt, dass er genügend Platz bietet, um alle Werkstücke die innerhalb der Aushärtezeit produziert werden unterbringen zu können, jedoch wurde bei dieser Berechnung mit einer vollständigen Verfügbarkeit der Stationen gerechnet. Durch eine 10 %ige Ausfallwahrscheinlichkeit entleert sich der Puffer nicht stetig und es kommt zu einer Überlastung.

Auswirkung der Pufferlänge

Im zweiten Teil der Simulation wird der Einfluss des Aushärtepuffers zur Produktionsrate gegenübergestellt. Dafür wird die Größe des Puffers um 25 % verringert, um 25 % erhöht und bei einem weiteren Durchgang als unendlich groß angenommen.

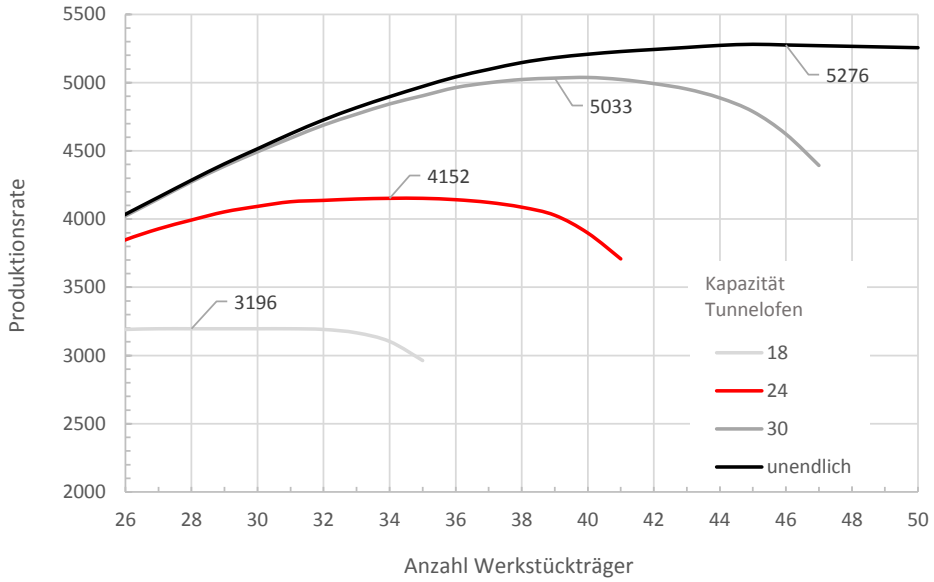


Diagramm 4.4: Auswirkungen der veränderten Puffergröße auf die Produktionsrate

Die Auswirkungen des Puffers sind sehr deutlich aus Diagramm 4.4 abzulesen. Zwar ist die Verlängerung des Puffers alleine schon ausreichend um eine höhere Produktionsrate zu erzielen. Jedoch lässt sich durch Anpassung der Werkstückträgeranzahl der Wirkungsgrad der Anlage noch weiter erhöhen. Eine Verlängerung des Aushärtepuffers ist zum momentanen Zeitpunkt noch kein Thema. Zum einen ist dies mit weiteren Kosten verbunden und vorerst lassen sich die geforderten Stückzahlen auch mit einem etwas kleineren Puffer produzieren. Für eine spätere Erweiterung ist es allerdings ein sehr interessantes Ergebnis und eine Option um weitere Reserven der Anlage zu aktivieren.

4.2 Integration von Prozessmodulen

Angelehnt an die in der Literatur vorgestellten Modularisierungskonzepte und der Entwicklung unterschiedlichster Hersteller (*teamtechnik, Montagetechnik GmbH, Feintool Automation AG*) soll die in dieser Arbeit betrachtete Anlage ebenfalls aus Prozessmodulen aufgebaut und in ein übergeordnetes System integriert werden. Aus mechanischer Sicht handelt es sich beim übergeordneten System um die Verkettung durch das MRT (Mono Rail Transfer), welches im Abschnitt 4.1 ausführlich behandelt wird. Aus steuerungstechnischer Sicht muss eine Verbindung mit der Elektrik, Pneumatik und SPS im Hauptschaltschrank hergestellt werden.

SPS. . . speicherprogrammierbare Steuerung

Für die Prozessmodule wird in diesem Abschnitt ein allgemein gültiger Standard entwickelt. Die Grundidee ist die Entwicklung eines Prozessmoduls, welches die Plattform für einen fertigungs-, montage- und/oder prüftechnischen Hauptprozess bildet.
Der wesentliche Vorteil in der Erstellung dieses Konzeptes liegt in der Reduzierung des Konstruktionsbedarfes. Außerdem kann die Herstellung bzw. die mechanische und elektrotechnische Montage der Prozessmodule dezentral, abseits der Anlage, erfolgen. Durch eine ebenfalls dezentrale Steuerung erhält man ein autarkes betriebsfertiges Prozessmodul, das mit wenig Aufwand in die vorhandene Infrastruktur integriert werden kann.
Für die Umsetzung dieser Idee benötigt es unter anderem standardisierte Stationsaufbauten, definierte Schnittstellen und ein Konzept für die steuerungstechnische Einbindung der Prozessmodule. In den folgenden Abschnitten werden die notwendigen Grundlagen dafür geschaffen.

4.2.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau eines Prozessmoduls setzt auf das Aluminiumprofilsystem der *Fa. Bosch Rexroth*. Durch ein breites Spektrum an Aluminiumprofilen und verschiedensten Verbindungselementen lassen sich mit einfachen Mitteln Gestelle verschiedenster Dimensionen aufbauen.

Aluminium-Profiltechnik

Abbildung 4.11 zeigt das resultierende Prozessmodul. Bei der Konstruktion wurde auf folgende Punkte Rücksicht genommen.

- Kompatibilität mit dem Transfersystem der *Fa.Soldati (MRT)*
- skalierbare Grundfläche
- einfacher Transport via Hubwagen
- sichere Einhausung bei sicherheitskritischen Prozessen
- ergonomische Arbeitshöhe des Schaltschrankes
- Kabelmanagmentsystem
- einfache Konstruktion und Fertigung

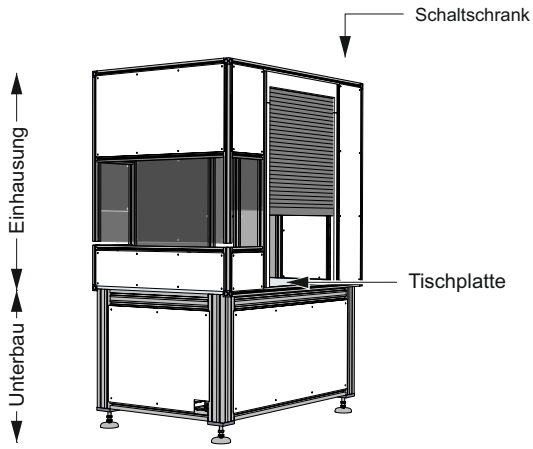


Abbildung 4.11: Standardaufbau eines Prozessmoduls

Endresultat dieser Anforderungen ist ein Aufbau, der sich aus vier Teilen zusammensetzt: Unterbau, Tischplatte, Einhausung und Schaltschrank. Der Unterbau ist das Verbindungsglied zwischen Boden und dem Prozess. Wird aufgrund hoher dynamischer Kräfte (z.B. Roboter) ein steifer, schwerer Unterbau verlangt, können die Profile ersetzt und das Gewicht und die Steifigkeit an diese Anforderung angepasst werden.

CAD... computer-aided-design

Die Tischplatte ist die Plattform für fertigungs-, montage- oder prüftechnische Hauptprozesse. Sie lässt sich je nach Prozessumfang abändern. Dafür wird ein parametrisiertes CAD-Modell erstellt. Bei der

Änderung der Länge bzw. Breite der Tischfläche, werden alle anderen Abmessungen dynamisch angepasst. Man erhält sofort die Profile in der richtigen Länge. Dadurch wird der Entwicklungsaufwand bei der Erstellung eines neuen Prozessmoduls wesentlich erleichtert.

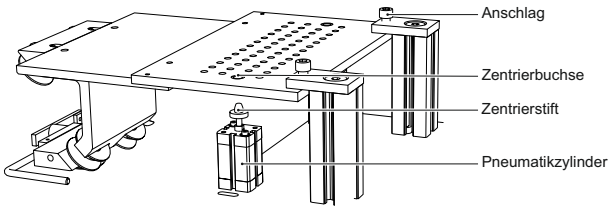


Abbildung 4.12: 3D-CAD einer Positioniereinheit

Auf der Tischplatte ist bereits eine Positioniereinheit vormontiert (Abbildung 4.12). Diese Positioniereinheit ist die mechanische Schnittstelle zur Verkettung. Zwei kleine Pneumatikzylinder mit Zentrierstiften bringen den Werkstückträger in die richtige Position. Um die Lage der Werkstückträgerplatte noch fein zu justieren, kann der Anschlag mit zwei Feingewindeschrauben eingestellt werden.
Wird das Prozessmodul innerhalb eines eingezäunten Bereiches verwendet, ist eine Einhausung nicht notwendig. Aus diesem Grund ist die Einhausung so konstruiert, um auch nachträglich am Tisch aufgesetzt werden zu können. Für die auskragenden Werkstückträger des MRTs der *Fa. Soldati* ist eine Ausnehmung vorgesehen.
Für die Wartung bzw. Bestückung der Prozessmodule lassen sich in der Einhausung Rollläden montieren. Rollläden haben im Vergleich zu Türen den großen Vorteil, dass die Zugänglichkeit (im Gegensatz zu Türflügeln) nicht so sehr beeinträchtigt wird. Außerdem benötigen Rollläden weniger Platz bei der Öffnung. Dadurch wird es möglich, die Prozessmodule enger aneinanderzureihen. Sichtscheiben rund um das Basismodul ermöglichen eine visuelle Überwachung des Prozesses.
Der Schaltschrank kann je nach Anwendung unterhalb im Unterbau oder auf Augenhöhe in der Einhausung des Prozessmoduls montiert werden. Aufgrund der daraus resultierten ergonomischen Arbeitshöhe ist die Montage in der Einhausung vorzuziehen. Das Kabelmanagement bzw. die Kabelkanäle können ohne weiteres an das Layout angepasst werden.

4.2.2 Schnittstellen

In Bodennähe wurde im Abdeckblech des Unterbaues eine Ausnehmung vorgesehen und dient zur Installation einer modularen Steckverbindung der *Fa. Harting*. Dadurch ist es möglich, alle relevanten Versorgungen durch eine einzige Stecker-/Buchsenverbindung sicher zu stellen. Abbildung 4.13 zeigt die Belegung des konfektionierten Steckers.

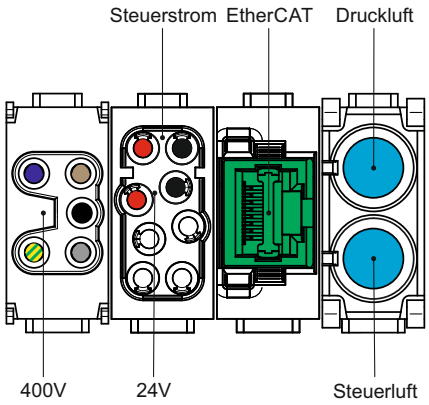


Abbildung 4.13: Konfiguration des modularen Hartingstecker

Neben den notwendigen Stromversorgungen kann auch die Druckluft- und die Busverbindung (*EtherCAT*) in einem Stecker vereint werden.

Steuerspannung Bei der Steuerspannung handelt es sich um einen 24 V-Anschluss und versorgt den *EtherCAT*-Koppler, welcher an jedem der Prozessmodule vorhanden ist. Die Steuerspannung ist stets präsent und wird im Not-Aus Fall nicht weggeschalten.

EtherCAT EtherCAT ist ein von der *Fa.Beckhoff* entwickelter Feldbus und kommt bei dieser Anlage zum Einsatz. Die Verbindung erfolgt über einen RJ45-Anschluss. Mit *EtherCAT* sind auch Stern-Topologien möglich, was eine unabhängige Einbindung der einzelnen Prozessmodule in die zentrale Steuerung noch einfacher gestaltet.

Druckluft und Steuerluft Die Druckluft und Steuerluft-Versorgung sind für den Betrieb pneumatischer Antriebe notwendig. Die Steuerluft ist neben der Spannungsversorgung für das Schalten der Ventile

zuständig. Gemeinsam mit der Druckluft kann die Steuerluft für jede einzelne Station separat drucklos gemacht werden. So kann ein sicherer Zustand hergestellt werden und es ist möglich in ein Prozessmodul einzugreifen, ohne die anderen zu beeinflussen.

24 V und 400 V Die 24 V-Versorgungsspannung ist unter anderem für die Versorgung der Ventile zuständig. Die 400 V-Versorgungsspannung wird für andere Verbraucher wie zum Beispiel Motoren, Heizung oder Roboter benötigt. Die Versorgungsspannungen können ebenfalls für jedes Prozessmodul separat geschaltet werden. Im Not-Aus Fall wird diese Versorgung sicher heruntergefahren und die Anlage ist vor unerwarteten Bewegungen abgesichert.

Durch diese Standardisierung wird neben der Verringerung der Planungsaufwände, auch die Integration der so aufgebauten Module enorm erleichtert. Das Prozessmodul kann mit einfachen Mitteln mit der vorhandenen Infrastruktur verbunden werden. Mittels Hubwagen werden die Module positioniert und anschließend mit den Stationen des MRTs gekoppelt. Durch eine genormte Steckverbindung für die Daten- und Energieübertragung wird die Verbindung zum Hauptschaltschrank hergestellt. Der Zeitbedarf für das Umrüsten eines Prozessmoduls wird somit stark minimiert.

4.2.3 Programmierung

Für die Einbindung eines Prozessmoduls ist es wichtig, mechanische und energetische Schnittstellen zu schaffen. Für die steuerungstechnische Einbindung eines Moduls in eine übergeordnete Steuerung ist ein SPS-Programm zuständig. Die Software ist so gestaltet, dass sie ebenfalls alle Änderungen der Anlage ohne großen zusätzlichen Programmieraufwand abbilden kann. Im Ausnahmefall kann auch die Software selbst adaptiert werden. Demnach ist es erforderlich, ein Konzept zu entwickeln, dass möglichst alle Eventualitäten im Hinblick auf die verschiedenen Lebensphasen des Produktionssystems berücksichtigt. Im Sinne der

Wandlängsfähigkeit wird eine spätere Erweiterung nicht schon im Vorfeld ausgeschlossen.
Die Prozessmodule sollen innerhalb der Anlage austauschbar und in beliebiger Reihenfolge kombinierbar bzw. ergänzbar sein. Ziel der Programmierung ist es, am Ende die Anlage durch einfaches Konfigurieren bzw. Umkonfigurieren in Betrieb nehmen zu können.
Für jedes Prozessmodul ist SPS-seitig ein zugehöriges Programm hinterlegt, welches den Prozess steuert. Beim Anschließen eines Prozessmoduls wird dieses Programm aktiviert und kann einer Station zugewiesen werden.
Beim Konzept der Programmierung darf auch nicht die Möglichkeit eines Produktwechsels vernachlässigt werden. Durch Hinterlegung einer Produkt-ID am Werkstückträger müssen die für den Produktionsablauf notwendigen Prozessmodule angefahren und das zugeordnete Programm ausgeführt werden. Die Abfolge der Prozessmodule für das jeweilige Produkt wird in einer Rezeptdatenbank hinterlegt.

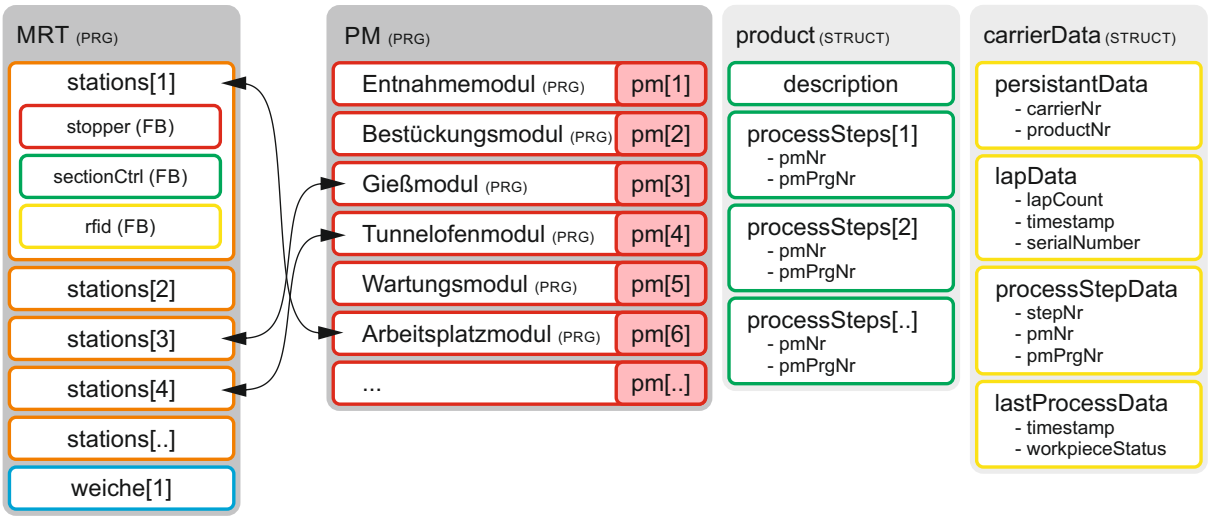


Abbildung 4.14: schematischer Aufbau der Programmierung

Abbildung 4.14 zeigt eine schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der Programmierung. Programmiert wurde nach der europäischen Norm EN 61131 in ST (structured text). Als Editor dient *Beckhoff TWINCAT*.

PRG... Programm
FB... Funktionsblock

Das Konzept der Programmierung unterteilt sich in zwei Hauptprogramme. Im `MRT(PRG)` werden alle hardwaremäßig vorhandenen Stationen und die Weiche instanziiert und gesteuert. Eine Station selbst ist ein Funktionbaustein und besteht ebenfalls aus solchen(`stopper(FB)`, `sectionMonitor(FB)` und `rfid(FB)`)
Das zweite Programm `Prozessmodule(PRG)` ist ein Katalog aller einzelnen Prozessmodulprogramme. Vor der Inbetriebnahme muss durch Verknüpfen der Stationsinstanzen mit dem Prozessmodulprogramm ein Abbild der realen Anlage geschaffen werden.

als Struktur kann ein selbst definierter Datentyp verstanden werden

Neben den Programmen werden noch zwei wesentliche Strukturen definiert. Die `product(STRUCT)` beinhaltet eine Beschreibung und eine eindeutige Produktnummer. Zusätzlich wird in dieser Struktur der zugehörige Prozessablauf hinterlegt. Durch die Angabe der notwendigen Prozessmodule und der Prozessmodulprogramme ist die Reihenfolge der Bearbeitungschritte eindeutig definiert. Auf diese Weise wird für jedes Produkt ein eigenes „Rezept“ erstellt.

Einteilung des RFID-Tags

Die zweite Struktur `carrierData(STRUCT)` entspricht dem Abbild der am RFID-Tag gespeicherten Daten. Unterteilt werden die Daten am RFID-Tag in `persistantData`, `lapData`, `processStepData` und `lastProcessData`.
Im `persistantData` befinden sich Daten, die im Laufe der Produktion nicht geändert werden. Zum Beispiel wird die `productNr` nur bei einem Produktwechsel, oder Wechsel einer Werkstückträgerplatte beschrieben.
Im `lapData` werden Informationen über die momentane Runde gespeichert. Hier wird die Seriennummer bzw. Chargennummer des Werkstücks hinterlegt. Ein Rundenzähler gibt Überblick wie oft eine Werkstückaufnahme schon verwendet wurde. Besonders im Hinblick auf die Gießanlage ist das notwendig, da die Gießformen nach mehreren Durchläufen gereinigt werden müssen.
Für einen reibungslosen Ablauf sorgt der Speicherbereich `processStepData`. Nach der Beendigung eines Prozesses werden hier die Informationen für das nächste Prozessmodul hinterlegt. Die Informationen für das nächste Prozessmodul sind in der oben beschriebenen `product(STRUCT)` zu finden.
In der letzten Unterstruktur `lastProcessData(STRUCT)` werden

Ergebnisse des vorhergegangen Prozessmoduls hinterlegt. Speziell sind das Aussagen über den Status der am Werkstückträger befindlichen Werkstücke. Das heißt, ob die Werkstücke in Ordnung oder nicht in Ordnung sind. Außerdem wird ein Zeitstempel hinterlegt, der Auskunft gibt zu welcher Zeit der letzte Prozessschritt vollendet wurde. Diese Information ist notwendig, um die geforderte Aushärtezeit im Tunnelofen kontrollieren und sicherstellen zu können.

die GRAFCET-Diagramme sollen nur zur Verbildlichung dienen und sind keinenfalls als vollständiger Ablauf anzusehen

Das Zusammenspiel der Programme, Funktionsblöcke und der Strukturelemente soll im Anschluss mit Hilfe der Ablaufsprache *GRAFCET* grafisch dargestellt werden. Spezielles Augenmerk wird hier auf die Programmierung des `station(FB)` gelegt. Auf die Programmierung der Prozessmodule wird nicht näher eingegangen. Allerdings soll vorher noch ein Standard für die Form und Art der Austauschdaten definiert werden. Im Regelfall lassen sich die Prozessmodule durch einfache Schrittketten beschreiben, die durch einen `execute`-Befehl angestoßen werden und mit einem `done`-Signal enden. Mit diesen zwei Variablen ist auch bereits die minimal notwendige Kommunikation mit dem MRT gesichert. Alle für die Kommunikation verantwortlichen Variablen werden in der Struktur `pm(STRUCT)` zusammengefasst. Neben den bereits beschriebenen Variablen `execute` und `done` werden über diese Struktur die RFID-Daten ausgetauscht. Die RFID-Daten tragen den Variablennamen `carrierDataIn` und `carrierDataOut`. Über `error` bzw. `errorID` werden die Fehler an das Prozessmodul weitergegeben.
Zum besseren Verständnis beginnt die Erklärung in der untersten Ebene, genauer gesagt mit den Grundfunktionen der einzelnen Hardwarekomponenten.

stopper (FB)

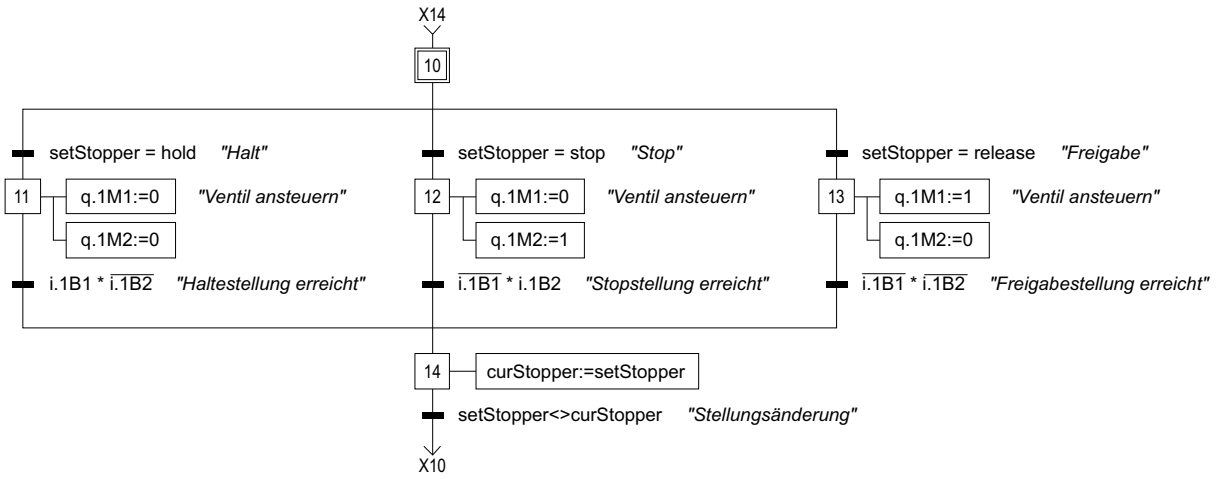


Abbildung 4.15: *GRAFCET* des Stopper-Funktionsblock

Der Stopper kann die Zustände *Freigabe, Halt* und *Stop* annehmen. Bei der *Freigabe* werden alle Werkstückträger ungehindert durchgelassen. Hingegen wird beim *Halt* der nächste Wagen aufgehalten. Der Reibschluss zwischen Werkstückträger und Fördersystem wird jedoch nur im *Stop*-Zustand aufgehoben. Je nachdem wie der Stopper eingesetzt wird muss der Zylinder zwischen diesen Zuständen wechseln. Für die Programmierung des 3-Wege-Zylinders ergibt sich ein Ablaufplan nach Abbildung 4.15. Die Abfrage `setStopper <> curStopper` sorgt dafür, dass nur bei einem Zustandswechsel die Schrittkette durchlaufen wird.

Kommt es zu einem Zustandswechsel werden die Ventile dementsprechend geschaltet. Erst wenn der Zylinder die gewünschte Lage erreicht hat, wird eine neue Zustandsänderung zugelassen. Verweilt das Programm zu lange in einem Schritt, kann angenommen werden, dass der Zylinder klemmt oder ein anderes Problem vorliegt. Es wird ein `Error` ausgelöst.

Das Error-Handling ist nicht in der Ablaufkette mitabgebildet

sectionMonitor(FB)

Der Funktionsblock `sectionMonitor(FB)` dient zur Überwachung eines durch zwei Sensoren abgesteckten Bereiches. Als Sensoren dienen hier in erster Linie, der Anwesenheitssensor einer Station (Beginn des Bereiches) und ein weiterer Sensor, der sich in Laufrichtung der Förderstrecke weiter hinten platziert (Ende des Bereiches) ist. Dieser Sensor kann entweder der Anwesenheitssensor der nachfolgenden Station sein oder ein separat angebrachter, unabhängiger Sensor.

`CTUD(FB)` und `RTRIG(FB)` sind Standardfunktionsblöcke von *TwinCAT*

Der Funktionsblock ist sehr einfach aufgebaut, da er aus vordefinierten Funktionsbausteinen zusammengesetzt ist. Ein Auf- und Abwärtszähler `CTUD(FB)` ist für das Zählen der Werkstückträger innerhalb des Bereiches zuständig. Hier ist zu beachten, dass der Zähler beim ersten Start initialisiert werden muss. Die Zählvariable muss den tatsächlichen Wert an Werkstückträger im Bereich annehmen. Ein weiterer Baustein, Detektor einer steigenden Flanke `RTRIG(FB)`, wird verwendet um das Ankommen eines Wagens zu registrieren.

rfid(FB)

Bei `rfid(FB)`(Abbildung 4.16) handelt es sich um einen Funktionsbaustein, der zwei unterschiedliche Kommandos zulässt. Soll der RFID-Tag beschrieben werden, wird `cmd=Write` gesetzt. Unter Angabe der `address` und des `byteCount` wird nur ein bestimmter Bereich des 128-Byte großen RFID-Tags beschrieben. Die zu schreibenden Daten werden über ein 128-Byte großes Array `tagData` an den Funktionsblock übergeben. Ähnlich ist es beim Lesen des RFID-Tags. Hier wird `cmd=Read` gesetzt. Die gelesenen Daten werden ebenfalls in das `tagData`-Array gelegt. Dadurch steht ein stets aktuelles Abbild des vorliegenden RFID-Tags zur Verfügung. Die Schrittkette wird nur nach einem `execute` und bei anwesenden RFID-Tag abgearbeitet. Weiters wird über das Signal `tagPresent` überprüft ob ein RFID-Tag in Reichweite ist. Nach Abschluss eines erfolgreichen Schreib- bzw. Lesevorganges gibt die RFID-

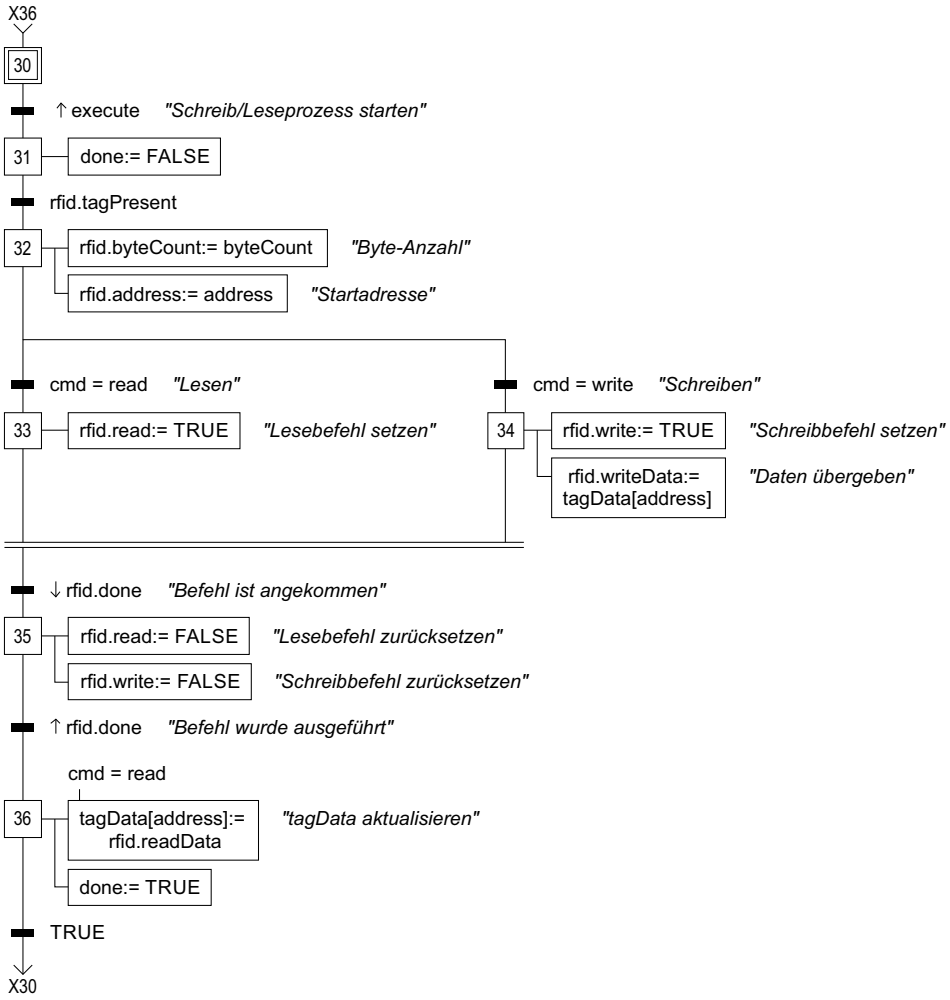


Abbildung 4.16: *GRAFCET* des Rfid-Funktionsblock

Hardware ein `done` zurück und ein neuer Durchlauf kann beginnen. Beim Verlassen des RFID-Tags wird das `tagData`-Array geleert.

station(FB)

Nun gilt es einen Funktionsbaustein zu programmieren, der die Grundfunktionen der oben beschriebenen Komponenten einer Station logisch verknüpft. Am Ende soll die Anlage durch Hinzufügen und Konfigurieren eines standardisierten Funktionsblockes `station(FB)` in Betrieb genom-

men werden können.
Dafür ist es erforderlich, alle möglichen Systemzustände und Funktionen einer Station zu ermitteln. In nachfolgender Liste werden die vorläufig notwendigen Modi festgehalten.

Station mit Prozessmodul In den meisten Fällen ist jede Station mit einem Prozessmodul verknüpft. Die Kommunikation und ein geregelter Ablauf zwischen Station und Prozessmodul steht bei diesem Modus im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Station als Stopper Speziell vor Kurven ist es notwendig die Wagen so aufzuhalten, dass es zu keiner Kollision zwischen zwei Werkstückträgern kommt. Die ordnungsgemäße Freigabe vor einer Kurve soll ebenfalls durch eine Station gesteuert werden.

Station nicht aktiv Wenn kein Prozessmodul angekoppelt ist und die Station auch keine weitere Aufgabe hat, muss die Station deaktiviert werden.

Station im Startzyklus Vor allem beim Startzyklus ist es möglich, dass die Stationen in speziellen Modi arbeiten müssen. Ein mögliches Szenario wäre eine gewisse Anzahl an Werkstückträger durchzulassen oder diese für eine bestimmte Zeit zu stoppen.

Die verschiedenen Zustände führen zu einem Station-Ablauf laut Abbildung 4.17. Dieses Diagramm stellt den allgemeinsten Ablauf einer Station dar. Unterteilt wird der gesamte Ablauf in sieben Schritte (M1 - M7). Je nachdem, wie die Station konfiguriert ist, werden Schritte übersprungen bzw. ausgeführt. Hinter den einzelnen Schritten stehen weitere Ablaufpläne mit geringerem Umfang. Diese Abläufe müssen durchlaufen werden, bevor im Hauptstrang fortgesetzt werden kann. Einige davon werden im Folgenden aufgezählt und näher beschrieben.
In der Ablaufkette oben beginnend lässt sich bereits im ersten Schritt M1 durch Angabe der Variable `stationMod` ein Arbeitsmodus der Station festlegen. In der inneren Struktur des Schrittes M1 (siehe Abbildung 4.17) finden sich die zuvor definierten Zustände wieder. Zum einen

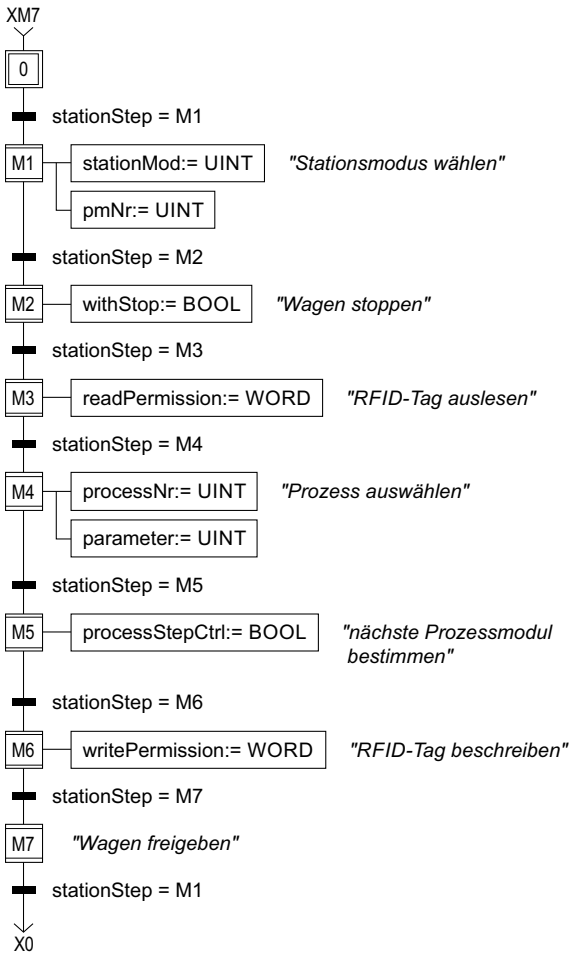


Abbildung 4.17: *GRAFCET* des Station-Funktionsblock

kann die Station deaktiviert oder gezwungen werden, alle ankommenden Werkstückträger aufzuhalten. Unter Angabe einer Prozessmodulnummer `pmNr` ist es auch möglich die Werkstückträger zu halten, wenn diese an dieser Station bearbeitet werden müssen.

am RFID-Tag wird das nächste anzufahrende Prozessmodul gespeichert

Bei `stationMod=2` wird der RFID-Chip ausgelesen. Stimmt die Prozessnummer des RFID-Chips überein, wird der Wagen angehalten, andernfalls springt das Programm zu Schritt M7, der Freigabe. Die Bedingungen für das Halten lassen sich beliebig erweitern. Soll zum Beispiel der Werkstückträger aufgrund der Produktnummer, Wagennummer oder anderen Bedingungen stoppen, erweitert man die Auswahlmöglichkeit mit `stationMod=3` und programmiert den entsprechenden Ablauf.

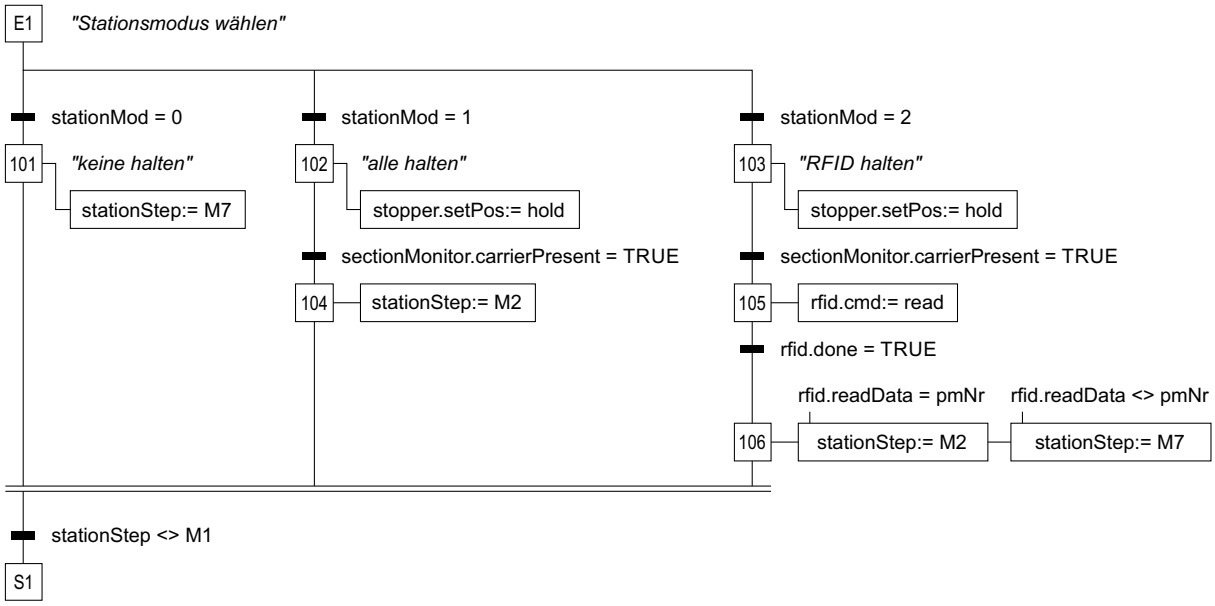


Abbildung 4.18: *GRAFCET* des M1-Makros

Ist der Werkstückträger erstmals angehalten, kann im Schritt M2 durch Setzen der Variable `withStop=TRUE` der Werkstückträger gestoppt und der Reibschluss aufgehoben werden.
Abhängig davon, ob die Station mit einen RFID-Schreib-Lesekopf ausgerüstet ist, kann der Schritt M3 aktiviert werden. Dieser Schritt macht es möglich, die unterschiedlichen Bereiche des RFID-Tags auszulesen. Die Eingangsvariable `readPermission` bestimmt, welche Informationen gelesen werden sollen. Die Variable wird dabei nach Tabelle 4.4 binär definiert.

00001	persistent data
00010	lap data
00100	processStep Data
01000	lastProcess Data
10000	all Data

Tabelle 4.4: Schema der Lese- bzw. Schreibrechte

Der Schritt M4 wird in Abbildung 4.19 mit „Prozesss wählen“ beschrieben. An dieser Stelle wird der Station eine Aufgabe zugewiesen. In den meisten Fällen besteht die Aufgabe darin, ein externes Prozessmodul zu

steuern. Für diese Anwendung muss die Einstellungsvariable `processNr` mit `1` belegt werden. Um eine Kommunikation mit dem richtigen Prozessmodul aufzubauen muss auch ein `parameter` angegeben werden. Diese Parametervariable hat je nach Definition der `processNr` unterschiedliche Bedeutungen. Bei der Einbindung eines Prozessmoduls wird an dieser Stelle die Prozessmodulnummer hinterlegt. Wird die Station zum Stoppen für eine bestimmte Zeit verwendet, kann über den selben Parameter die Zeit in Sekunden angegeben werden.

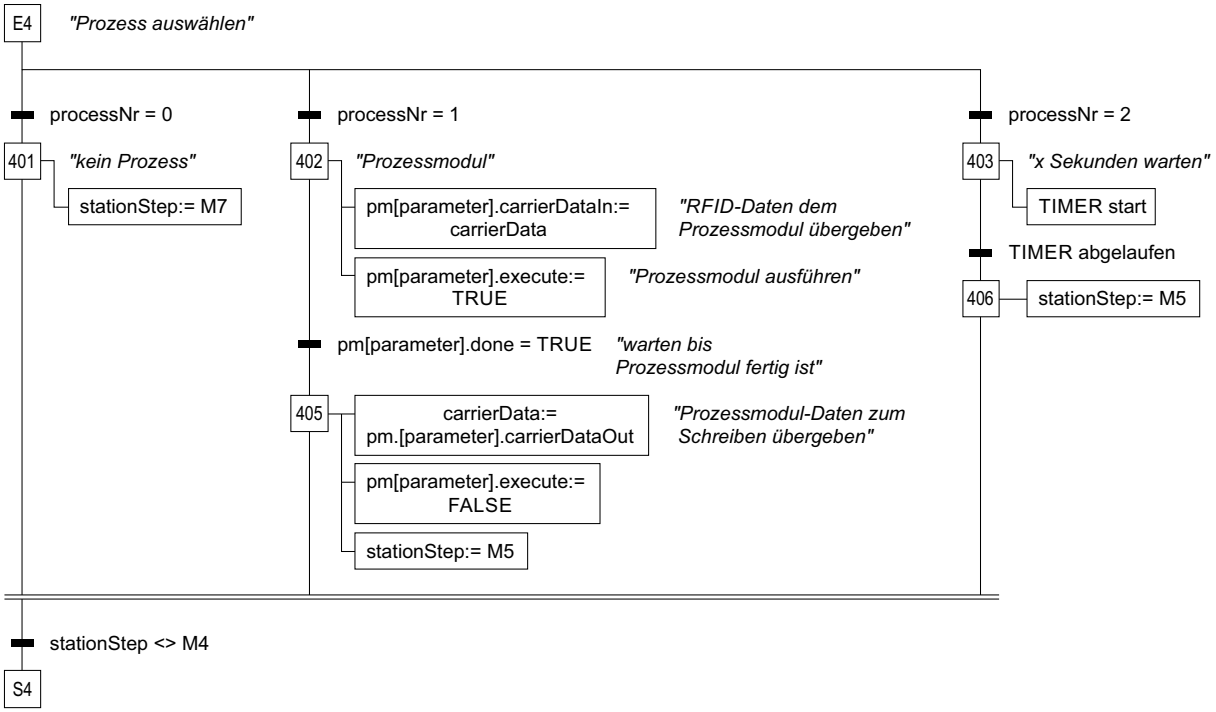


Abbildung 4.19: *GRAFCET* des M4-Makros

Die Grundfunktion einer Station kann durch weitere Prozesse mit beliebigem Ausmaß erweitert werden. Zum Beispiel kann ein Prozess einfügt werden, der für das Resetten bzw. Einlernen der RFID-Tags zuständig ist. Eine weitere Idee wäre, einen Prozess zu programmieren, der den Startzyklus steuert. Stellvertretend für diese Möglichkeiten sind in Abbildung 4.19 zwei Prozesse angeführt. Der Prozess zur Einbindung eines Prozessmoduls soll nun genauer erklärt werden.
Bevor das Prozessmodul ausgeführt wird, müssen die zuvor ausgelesenen RFID-Daten über die Prozessmodulstruktur

übergeben werden. Das passiert im ersten Schritt des Ablaufes mit `pm[parameter].carrierDataIn:=carrierData`. Anschließend wird durch die in der Struktur vorhandene Variable `pm[parameter].execute:=TRUE` das Prozessmodul zum Arbeiten angestoßen. Nach einem erfolgreichen Ablauf meldet sich das Prozessmodul mit einem `pm[parameter].done=TRUE`. Der Prozess wurde erfolgreich abgeschlossen. Die generierten Daten können für das Beschreiben des RFID-Tags bereitgestellt werden.

Der RFID-Tag wird allerdings erst nach dem Schritt M5 beschrieben. Schritt M5 ist für einen kontrollierten Arbeitsfluss innerhalb der Produktionslinie zuständig. Aufgrund der Produktnummer (`productNr`) und des aktuellen Schrittes (`stepNr`) kann mit dem Produktrezept im Hintergrund das nächste Prozessmodul (`pmNr`) und das nächste Prozessmodulprogramm (`pmPrgNr`) ermittelt werden.
Nach dem Beenden eines Prozesses ist es nicht selbstverständlich, dass dieser ohne Probleme abgelaufen ist. Auf Kommunikationsfehler, Produktionsfehler oder Fehler mit anderer Ursache muss hier reagiert werden. Wird ein Problem diagnostiziert, muss davon ausgegangen werden, dass Ausschuss produziert wurde und die nachfolgenden Prozessschritte dürfen nicht ausgeführt werden. Das nächste Prozessmodul in dem der Werkstückträger stehen bleiben soll, muss in solchen Fällen das Arbeitsplatzmodul sein. Hier kann der Maschinenbediener den vorhandenen Fehler manuell identifizieren und darauf reagieren.

Die Daten aus den Schritten M4 und M5 werden in der Struktur `carrierData(STRUCT)` gesammelt. In gleicher Weise wie beim Lesen wird unter Vergabe von `writePermission` der RFID-Tag beschrieben (Ablauf siehe Abbildung 4.20). Die Einführung der Permissions hat den Hintergrund, dass zum Beispiel der Persistent-Bereich auch tatsächlich unberührt bleibt. Außerdem hat es auch einen Einfluss auf die Performance der Anlage. So werden dadurch nur die notwendigen Bereiche gelesen bzw. geschrieben. Damit können Wartezeiten verkürzt werden.

permission engl. „Zulassung“

Im letzten Schritt M7 geht es um die Freigabe der Werkstückträger. Bei der Freigabe müssen zwei Bedingungen erfüllt werden, bevor der

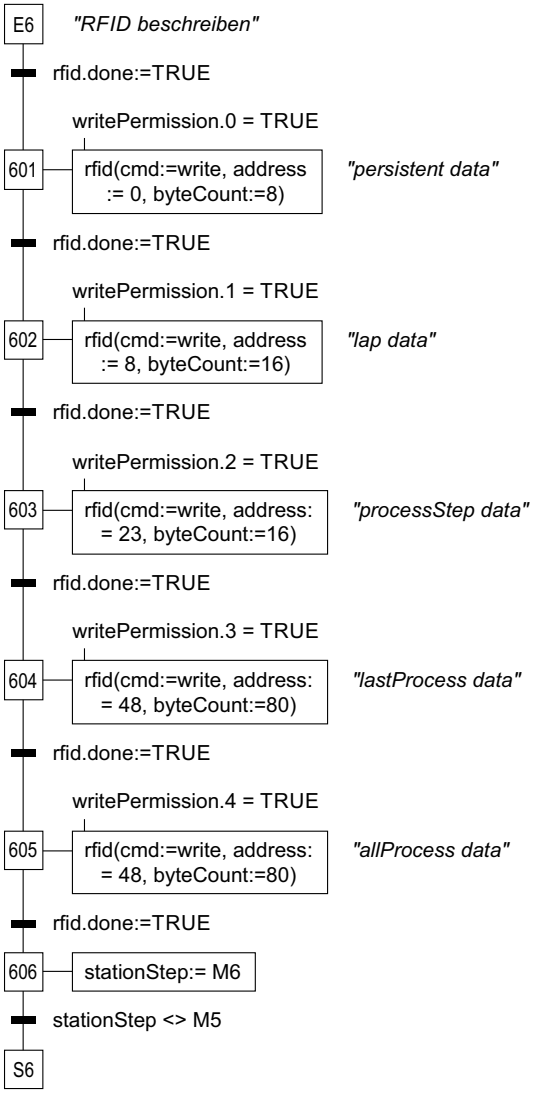


Abbildung 4.20: *GRAFCET* des M6-Makros

Werkstückträger die Station verlassen darf. Die erste Bedingung ist ein minimaler Zeitabstand, der zwischen der Freigabe zweier Werkstückträger eingehalten werden muss. Durch einen Zeitabstand von mindestens 3 Sekunden wird sichergestellt, dass es in Kurven zu keiner Kollision der Werkstückträger kommt. Um einen Stau in der Kurve zu verhindern wird die zweite Bedingung eingeführt. An dieser Stelle kommt auch der Funktionsblock `sectionMonitor(FB)` ins Spiel. Dieser Funktionsblock gibt Auskunft über die Anzahl an Werkstückträger innerhalb eines Be-

reiches. Die Station darf nur freigeben, wenn die maximale Anzahl an Werkstückträgern nicht überschritten wird.

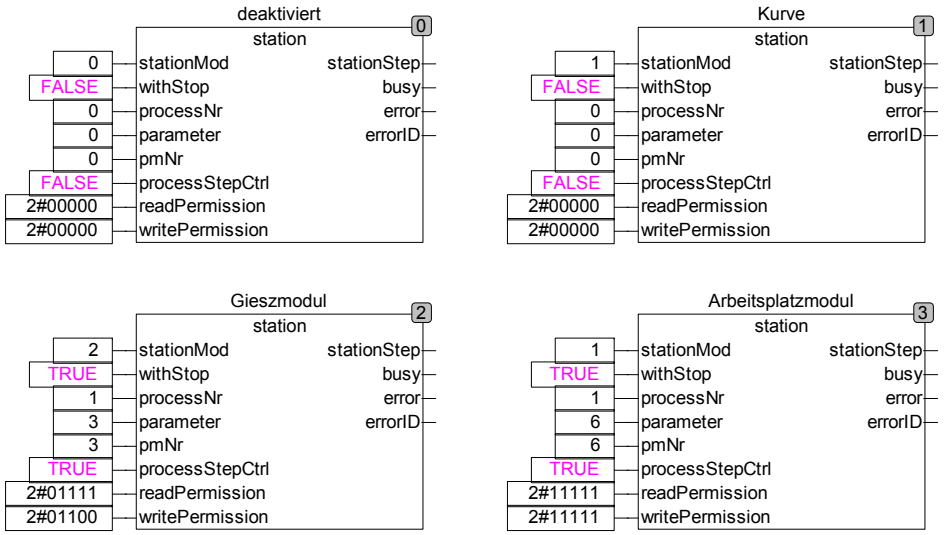


Abbildung 4.21: Instanziierung verschiedener Stations-Funktionsblöcke

Mit dem oben beschriebenen Ablauf steht nun ein Funktionsblock zur Verfügung, der für alle Stationen verwendet werden kann. Alleine durch Umkonfiguration des selbigen lassen sich eine Vielzahl von Möglichkeiten realisieren. Rücksicht nehmend auf die Anfangs erwähnten Modi zeigt Abbildung 4.21 verschiedene Konfigurationsbeispiele.
In den Funktionsblöcken werden durch diverse Ausgänge Informationen nach außen geführt. Unter anderem gibt `stationStep` Auskunft in welchem Schritt sich die Station momentan befindet. Bei einem ungewollten Stillstand einer Schrittkette wird ein Fehler inkl. Fehlercode generiert und an die Ausgänge `error` und `errorID` weitergegeben. Fehler der Funktionsblöcke `stopper(FB)`, `rfid(FB)` und `sectionMonitor(FB)` werden hier ebenfalls berücksichtigt.

4.3 Prozessmodule im Detail

Nachdem im Abschnitt 4.1.4 die Randbedingungen eines Prozessmoduls definiert wurden, können in diesem Abschnitt die einzelnen Module beschrieben werden. Die Entwicklung jedes Prozessmoduls setzt sich aus einer Vielzahl von Arbeitspaketen und neuen Problemstellungen zusammen. Im Folgenden wird auf konstruktionsbedingte, mechanische und steuerungstechnische Hürden hingewiesen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen allerdings nur die zeit-intensivsten Problemstellungen der jeweiligen Module.

4.3.1 Zuführungs- und Entnahmemodul

Die Aufgaben und Anforderungen des Zuführungs- und Entnahmemoduls hat bereits Abschnitt 3.5 beschrieben. Das resultierende Ergebnis, welches allen Ansprüchen genügt, ist in Abbildung 4.22 zu sehen. Bei den weiteren Betrachtungen wird das Zuführungsmodul herangezogen. Die Entnahme ist bis auf den umgekehrten Materialfluss äquivalent zu den weiteren Beschreibungen.

Der Ablauf der Zuführung beginnt beim Positionieren und Arretieren des Palettenwagens im Kammerofen. Nach der Anforderung einer Palette öffnet sich eine pneumatische Tür an der Rückseite des Kammerofens. Durch eine verfahrbare Teleskopgabel kann auf die einzelnen Ebenen des Palettenwagens zugegriffen werden. Die Teleskopgabel hat einen Verfahrweg von einem Meter in beide Richtungen. Nach dem Erfassen einer Palette fährt die Teleskopgabel auf Höhe der Ablagefläche und legt diese dort ab. Ein pneumatisch angetriebener Heiztisch kann nun die Palette anheben. Dies geschieht aus zweierlei Gründen: Einerseits wird bei diesen Hub die Palette durch zwei Positionierstifte zentriert, andererseits wird so ein flächendeckender Kontakt zur Heizplatte hergestellt und eine bessere Wärmeübertragung erreicht. Ist die Palette positioniert, bestückt ein SCARA-Roboter die Werkstückträger des MRTs.

SCARA ist die Abkürzung für *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

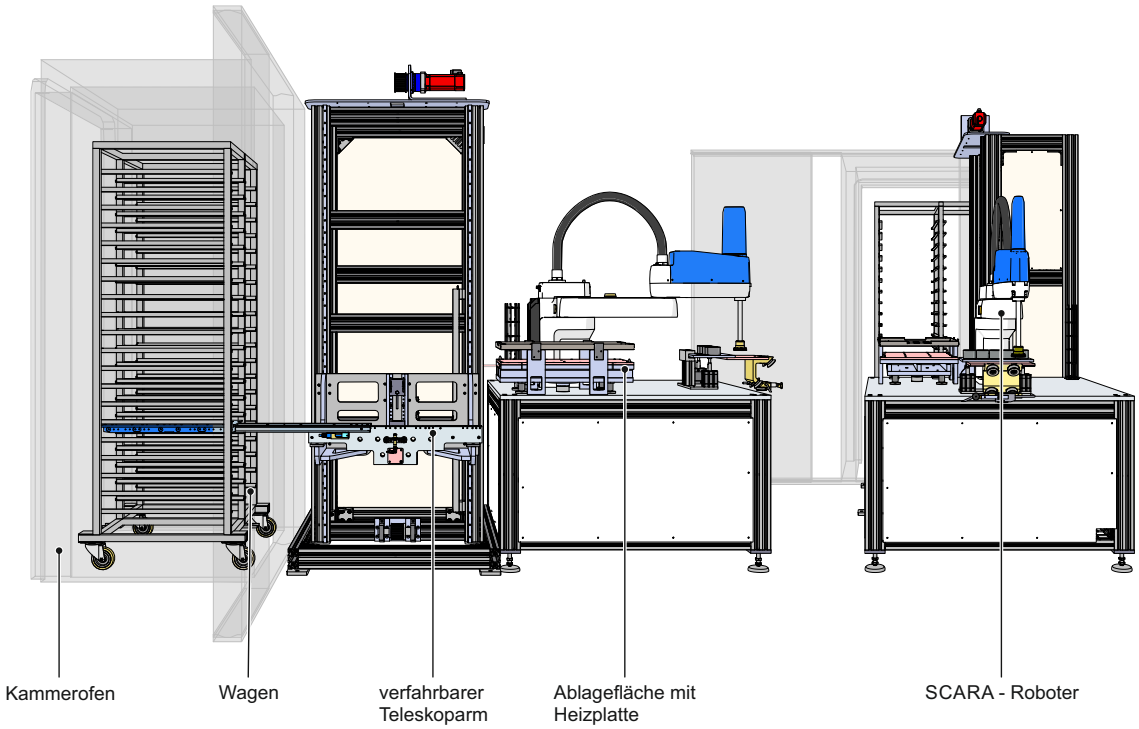


Abbildung 4.22: vereinfachte Darstellung des Zuführungs- bzw. Entnahmemoduls

Die Entscheidung diesen endgültigen Ablauf umzusetzen wurde durch verschiedene Problem- und Aufgabenstellungen bestimmt. Nachstehende Liste unterteilt die Aufgaben in einzelne Arbeitspakete.

- Leistungsbedarf des Kammerofens
- Bestimmung der Randbedingungen für den Ofenbauer
- Auslegung des Riemenantriebes (Hubeinheit)
- Toleranzen der Positioniereinrichtungen
- Roboter oder Linearhandling
- Kommunikation Kammerofen/SPS
- Schnittstelle Roboter/SPS
- Konstruktion/Montage/Programmieren des Moduls

Die Planung des Kammerofens wurde von einem externen Ofenbauer übernommen. Jedoch mussten einige Randbedingungen berücksichtigt

werden um den fertigen Ofen in die Anlage integrieren zu können. Neben den Daten zur Ermittlung des Wärmebedarfs müssen auch die Außen- und Innenmaße betrachtet werden. Maßgebend ist bei diesen Betrachtungen der maximale Ausfahrweg der Teleskopgabel. Bei einem maximalen Ausfahrweg von 1030 mm bleibt lediglich ein Platz von 260 mm zwischen Hubtisch und Palette.

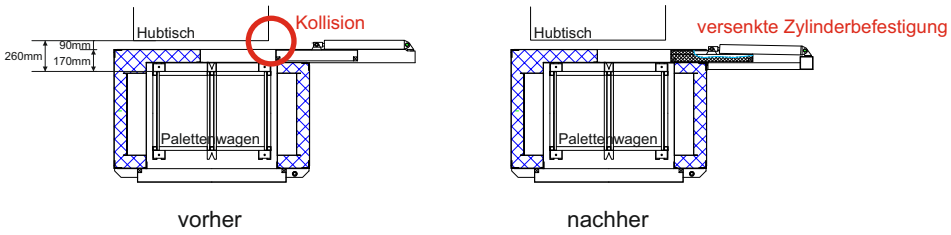


Abbildung 4.23: Situation zwischen Hubtisch und Kammerofen inkl. Lösung zur Vermeidung einer Kollision bei ausgefahrenen Zylinder

Platzproblem bei Kammerofen

In Abbildung 4.23 wird dieses Problem ersichtlich. Der Bereich von 260 mm muss ausreichen um die Arretierung des Palettenwagens, eine 100 mm starke Dämmung und die Mechanik für das pneumatische Öffnen und Schließen unterzubringen. Das Versenken der Schiebezylinder in die 100 mm starke Dämmung gestaltet sich als brauchbare Lösung, um ausreichend Platz zu schaffen und eine Kollision mit der vorhandenen Peripherie zu vermeiden.

Berrücksichtigung des Wärmeeinflusses

Bei der Konstruktion des Heiztisches muss speziell darauf geachtet werden, welche Bereiche bzw. Komponenten unter Wärmeeinfluss stehen. Die Wärmeeinflusszonen können durch den Einsatz von wärmeisolierenden Materialen begrenzt werden. Dadurch kann ein konventioneller anstelle eines hitzebeständigen Zylinders verwendet werden. Für den Robotergreifer, der sich für einen Großteil der Zeit über der Heizplatte befindet, wurde ein hitzebeständiger Greifer gewählt.

Ein großes Thema bei der Gestaltung des Bestückungs- und Entnahmemoduls war die Frage ob für die „Pick and Place“-Aufgabe, Werkstücke von der Palette auf den Werkstückträger zu legen, ein Linearachssystem bzw. SCARA-Roboter zum Einsatz kommen soll. Laut x-Technik[27] weißt ein SCARA-Roboter ab einer erforderlichen Bewegung von mehr als 300 mm

und 3-Achsrichtungen in Punkto Preis-Leistungs-Verhältnis Vorzüge auf. Außerdem werden Vorteile im Hinblick auf Geschwindigkeit und Genauigkeit dem SCARA-Roboter zugeschrieben.

Bei der Recherche nach einem Roboterhersteller, konnte die *Fa. Adept* mit ihrer *Cobra e-Vario* Serie überzeugen. Im Vergleich zu den Mitbewerbern ist dieser SCARA-Roboter um mehr als die Hälfte günstiger.

Technische Spezifikationen

Reichweite	800 mm
Tragkraft	3 kg (max)
Trägheitsmoment an Achse 4 (max)	
	360 kg•cm ^{2}
Einpresskraft	240 N
Adept Zyklus	0,78 s (2 kg)
Rotationen	
Achse 1	±105°
Achse 2	±157,5°
Achse 3	210 mm
Achse 4	±360°
Achsgeschwindigkeiten	
Achse 1	290/s
Achse 2	540°/s
Achse 3	825 mm/s
Achse 4	900°/s
Wiederholgenauigkeit	
XYZ	±0,05 mm
Theta	±0,05°

Durchgeführte Leitungen	
24 elektrische Leitungen	
2 x pneumatische Leitungen 6 mm	
3 x pneumatische Leitungen 4 mm	
1 x DeviceNet	
Digitale Ein-/Ausgänge	
AIB	12 Ein-/ 8 Ausgänge
Optionale Ventilkits	4 Ausgänge
Gewicht	43 kg
Spannungsversorgung	
Leistung	230 VAC, 10 A
Steuerung	24 VDC, 6 A
Umgebungsbedingungen	
Temperatur	5 °C bis 40 °C
Feuchtigkeit	5 % bis 90 % nicht kondensierend

Abbildung 4.24: Auszug der technischen Spezifikationen des *Adept Cobra e-Vario 800* [28]

Das Datenblatt in Abbildung 4.24 steht in keinem Widerspruch zu den gewünschten Anforderungen. Einzig die Kommunikation über eine Bus-Schnittstelle wird bei dieser Serie eingespart. Im Fall des *Cobra e-Varios* erfolgt die Kommunikation mit der SPS über digitale Ein- und Ausgänge. Mit insgesamt 12 Eingängen kann die SPS die in der Robotersteuerung hinterlegten Bewegungen starten. 8 Ausgänge stehen für die Rückmeldung zur Verfügung.
Soll die SPS den Roboter steuern und somit Kontrolle über den Verlauf

einer Bewegung haben bzw. Informationen über den momentanen Standort des Roboters bekommen, reichen die vorhandenen digitalen Ein- und Ausgänge nicht aus.

Kommunikation mittels binären Code

Bei der vorliegenden Palette mit 63 Positionen, muss der Roboter zumindest 63 unterschiedliche Signale erhalten. Mit 12 Eingängen ist das nur möglich, wenn mittels binärem Code kommuniziert wird. Diese Idee weiterverfolgt führte zu einem umfangreichen Kommunikationsprotokoll, dass es ermöglicht, jede einzelne Bewegung von der SPS zu steuern. In der Robotersteuerung werden lediglich die Abhol- und Stützpunkte *„eingeteacht"* . Der SCARA-Roboter kann so auf einfache Weise für spätere Aufgaben gerüstet werden. Nach der Einbindung des Protokolls sind gegenüber eines Bus-gesteuerten Roboters keine erwähnenswerten Nachteile, bzw. Nachteile welche den Aufpreis rechtfertigen, erkennbar.

Kommunikationsprotokoll

Wie bereits beschrieben stehen für die Kommunikation am Roboter 12 Eingänge bzw. 8 Ausgänge zur Verfügung. Diese Ein- und Ausgänge können über die SPS angesprochen und ausgelesen werden. Die genaue Einteilung und Bedeutung der Signale wird im folgenden beschrieben.

8-Bit oder 1-Byte werden für die Kommandonummer `cmdNr` reserviert. Dadurch können insgesamt 256 unterschiedliche Befehle an den Roboter gesendet werden. Ein *„Handshake"*-Verfahren soll Übertragungsfehler aufgrund der unterschiedlichen Programmzykluszeiten des Roboters bzw. der SPS verhindern. Dafür werden die Variablen `cmdReady`, `cmdRcvd` und die SPS-interne Variable `cmdNxt` eingeführt. Als weitere Sicherheitsmaßnahme gegen Fehlübertragungen, aufgrund von Kabelbruch oder anderer Ursachen, wird nach dem eigentlichen Kommando eine Prüfsumme gesendet. Als Grundlage für die Prüfsumme dient die binäre Darstellung der Kommandonummer. Diese wird invertiert ($0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$) und im Anschluss als Kommando an den SPS-Ausgang gelegt.

Prüfsumme gegen Fehlübertragung

Der Ablauf der Übertragung eines Kommandos und der Zusammenhang der einzelnen Variablen wird im Signalzustandsdiagramm in Diagramm 4.5 gezeigt. Zu beachten ist, dass die horizontalen Unterteilungen im Dia-

gramm keine zeitlichen oder zyklischen Einheiten sind. Vielmehr handelt es sich um eine zeitunabhängige Darstellung, bei der jeder Schritt einem Systemzustand entspricht.

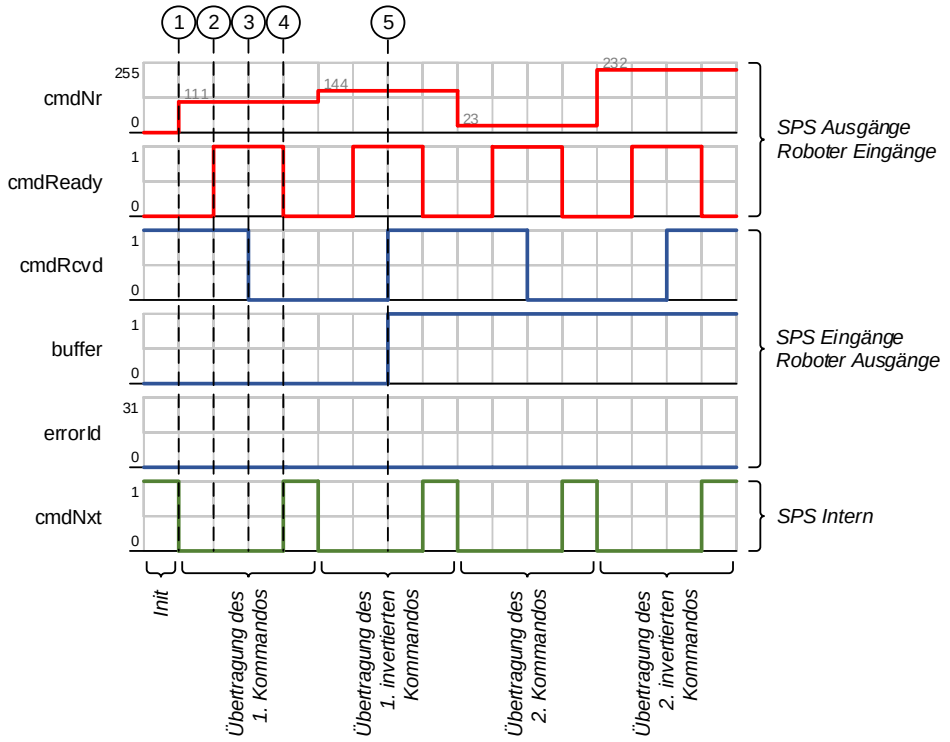


Diagramm 4.5: Signalzustandsdiagramm der notwendigen SPS-Eingänge bzw. Ausgänge zur Kommunikation mit den SCARA-Roboter

Nach dem Einschalten der Kommunikationspartner werden in der Initialisierungsphase erstmals die Variablen laut Diagramm 4.5 initialisiert. Unter anderem wird die SPS-interne boolesche Variable `cmdNxt` auf `TRUE` gesetzt. Dieser Zustand ist Grundvoraussetzung für jede neue Übertragung und wird im Dauerbetrieb immer nach einer steigenden bzw. fallenden Flanke des Signals `cmdRcvd` generiert. Im Schritt ① beginnt die Übertragung. Die Variable `cmdNxt` wird auf `FALSE` gesetzt und auf die zuvor definierten 8 SPS-Ausgänge wird die gewünschte Kommandonummer gelegt. Im vorliegenden Beispiel soll die Nummern 111 und 23 übertragen werden. Mit dem Befehl im Schritt ② `cmdReady=TRUE` wird dem Roboter mitgeteilt, dass das Kommando ausgelesen werden kann. Die Auswertung der empfangenen Kommandonummer wird später

genauer beschrieben. An dieser Stelle genügt es zu wissen, dass sich nach einer erfolgreichen Übertragung, der Roboter in Schritt ③ mit einer Flankenänderung des Signals `cmdRcvd` meldet. Im Schritt ④ wird diese Änderung des Signals registriert und die Variable `cmdNxt` auf `TRUE` gesetzt.
Nun wird allerdings nicht die nächste Kommandonummer an den Roboter gesendet, sondern, wie zuvor beschrieben, die Prüfnummer. Die Kommandonummer wird vom Roboter nur akzeptiert, wenn die passende Prüfnummer nachgeschickt und empfangen wird. Andernfalls meldet die Logik einen Error und das System geht in einen Fehlerzustand.

Kommando (Dez)	Kommando (Bin)	Prüfsumme (Dez)	Prüfsumme (Bin)
111	01101111	144	10010000
23	00010111	232	11101000

Die Übertragung der Prüfnummer läuft äquivalent zu den zuvor beschriebenen Schritten ab. Mit Schritt ⑤ ist die Übertragung einer Kommandonummer abgeschlossen und die Nächste kann übertragen werden. Auf diese Weise kann der Roboter jede beliebige Zahlenfolge erhalten.
Momentan erhält der Roboter eine Zahlenfolge aus Zahlen vom Datentyp `BYTE` (d.h. Zahlen zwischen 0 und 255), welche keine weitere Bedeutung haben.

Ringpuffer als Speicher

Die Zahlen müssen nun gespeichert, interpretiert und ausgeführt werden. Die genauen Vorgänge werden anhand der Abbildung 4.25 erklärt. In dieser Abbildung ist ein Ringpuffer mit einem exemplarischen Speichervermögen von 16-Bytes abgebildet. Der Puffer ist im Ausgangszustand leer und wird bei der Kommunikation mit der SPS sukzessive mit Daten gefüllt. Ein in Uhrzeigerichtung laufender „Zeiger“ gibt an, welcher Speicherbereich des Ringpuffers gerade beschrieben wird und kontrolliert, ob der nächste Speicherplatz leer und somit bereit zum Beschreiben ist.
Ein weiterer Zeiger ist für das Auslesen des Ringpuffers verantwortlich. Dieser Zeiger interpretiert einerseits die Kommandonummer und löst anderseits die Roboterbewegung aus. Nach erfolgreicher Ausführung wird

der Speicherbereich geleert.
Der Lese- und Schreibprozess arbeiten vollkommen unabhängig voneinander. Das heißt, während der Roboter noch beim Ausführen einer Bewegung ist, können weiterhin neue Kommandonummern empfangen werden. Dadurch kommt es zu keinen zeitlichen Einbußen zufolge der Kommunikation.

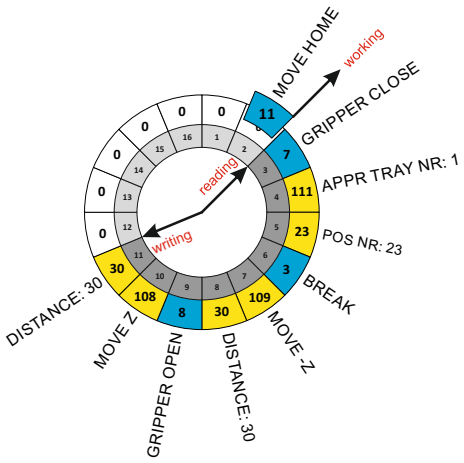


Abbildung 4.25: Funktionsweise des Ringpuffer

Befehle mit Argument

Beim Interpretieren der Kommandos geht dieses Konzept noch einen Schritt weiter. Die Werte werden nicht einzeln interpretiert, sondern es wird die Möglichkeit geschaffen, 2-teilige Kommandos, d.h Kommandos mit Argument, zu übertragen. Dadurch kann die Anzahl an möglichen Befehlen noch weiter erhöht werden und die Programmierung der Bewegungsabläufe ebenfalls flexibler gestaltet werden. Die Speicherbelegung in Abbildung 4.25 zeigt den typischen Ablauf einer „Pick and Place"-Bewegung.
Die blau markierten Zahlen sind „einfache" Befehle, für deren Ausführung kein weiteres Argument notwendig ist (z.B. `MOVE HOME`, `GRIPPER CLOSE`). Soll allerdings die 23. Position einer bestimmten Palette ansteuert werden, wird ein 2-teiliges Kommando verwendet, wobei die erste Zahl die Nummer der Palette und die zweite Zahl die Positionsnummer angibt (in der Abbildung 4.25 gelb gekennzeichnet). Auch eine Bewegung in z-Richtung kann durch den Befehl `MOVE Z (108)` und das Argument `DISTANCE (Distanz in mm)` verwirklicht werden.
Natürlich lässt sich das Konzept der mehrteiligen Kommandos noch wei-

ter ausbauen, indem zum Beispiel ein zweites oder drittes Argument pro Kommando eingeführt wird. Einen Überblick über die bislang implementierten Befehle gibt die Tabelle in Anhang B.1. Hier werden unter anderem Befehle für einen Greiferwechsel oder weitere Paletten hinterlegt. Diese Erweiterung ist notwendig, falls ein neues Produkt und Paletten mit unterschiedlicher Geometrie zum Einsatz kommen.

4.3.2 Trennmittelmodul

Das Auftragen des Trennmittels stellt eine gesonderte Herausforderung dar. Die Schwierigkeit liegt darin, nicht zu wenig Trennmittel aufzutragen, allerdings auch nicht so viel, sodass es zur Tropfenbildung kommt. Gleichzeitig muss die gesamte Oberfläche der Gießform gleichmäßig benetzt werden. Ein unbehandelter Bereich würde zu Problemen bei der Entformung des fertigen Bauteils führen. Zum Beispiel kann sich das Polyurethan mit der Gießform verbinden und der Roboter ist nicht in der Lage die notwendige Kraft für die Entformung aufzubringen.
Nicht zu vernachlässigen ist auch der Aspekt, dass Trennmittel in die Atmosphäre gelangen kann. Dieser Effekt muss so gering wie möglich gehalten werden. Eine zu starke Sättigung der Luft mit Trennmittel kann die mit Haftvermittler vorbehandelten Rohlinge angreifen und später zu Haftungsfehlern führen. Aus diesem Grund baut das Konzept in Abbildung 4.26 auf eine Sprüh-/Nebelkammer auf, welche die Gießformen umschließt und so den Trennmittelnebel weitgehend von der Umgebung abgrenzt.

Der Ablauf dieses Moduls beginnt mit der Positionierung des Werkstückträgers. Im Anschluss wird die Sprühkammer pneumatisch gesenkt und umschließt die Gießformen. Ab diesem Zeitpunkt kann die Benetzung der Gießform beginnen. Die anfänglich angedachte Methode die gesamte Kammer einzunebeln, wird durch das gezielte Aufbringen mittels fünf automatischer Spritzapparate ersetzt. Das unkontrollierte Einbringen von Trennmittelnebel führt zu einem unsauberen, lang-andauernden bzw. ineffizienten Prozess. Zwar ist die Methode

automatische Spritzapparate

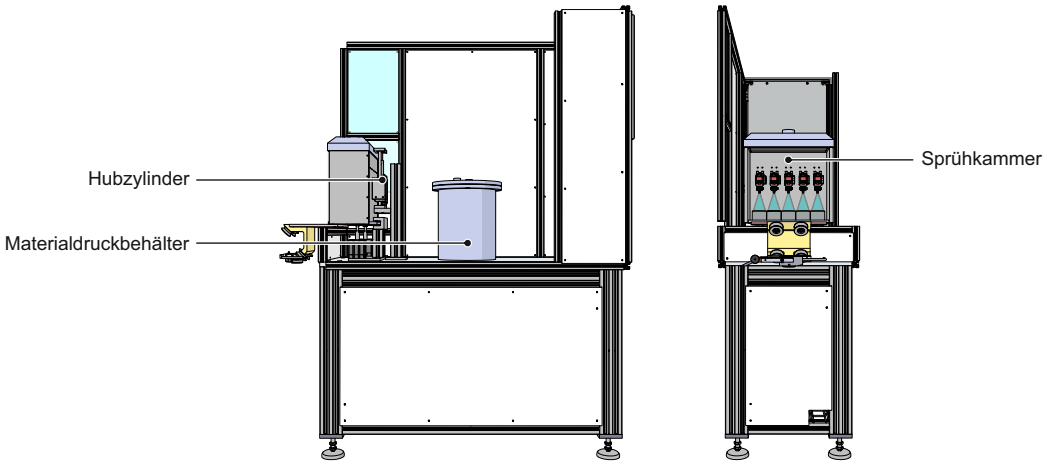


Abbildung 4.26: vereinfachte Darstellung des Trennmittelmoduls

mit einzelnen Spritzapparaten weniger flexibel, jedoch kann bei der Einführung eines neues Produktes der Innenaufbau der Sprühkammer gewandelt werden, indem die Positionen der Spritzapparate geändert wird.

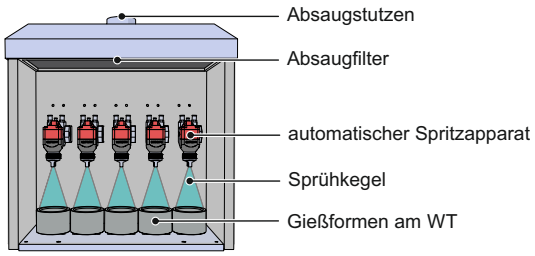


Abbildung 4.27: Anordnung der automatischen Spritzapparate über den Gießformen

Trennmittel sichtbar machen

Die automatischen Spritzapparate werden nach Abbildung 4.27 direkt über den Gießformen in einem bestimmten Abstand angebracht. Obwohl die ersten Versuche sehr brauchbare Ergebnisse brachten, gab es Bedenken betreffend der gleichmäßigen Benetzung der Gießform. Vor allem die innere Mantelfläche war Grund für Zweifel. Eine genaue Aussage lässt sich nur treffen, wenn das Trennmittel sichtbar gemacht werden könnte. Die Idee, die behandelte Gießform unter UV-Licht zu betrachten, führte erst nach dem Vermischen einer UV-aktiven Substanz mit dem Trennmittel zu einem sichtbaren Resultat. Das Ergebnis dieser Versuchsreiche ist in Abbildung 4.28 zu sehen.

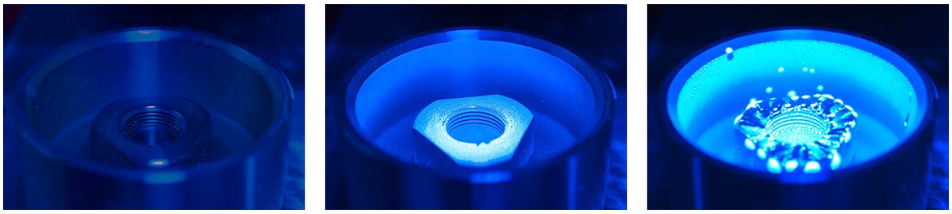


Abbildung 4.28: Ergebnis der Versuchsreihe; kein Trennmittel (links), ideale Benetzung (Mitte), zu viel Trennmittel(rechts)

In Abbildung 4.28 links wird die Gießform unter dem UV-Licht ohne vorheriger Benetzung abgelichtet. Es ist lediglich das blanke Metall zu sehen. Abbildung 4.28 Mitte ist nach einer Reihe an Versuchen entstanden. Bevor dieses Resultat erreicht werden konnte, mussten die idealen Parameter gefunden werden. Mögliche Einstellungsparameter sind der Abstand zur Gießform, der Sprühluftdruck, der Materialdruck, die Materialmenge und die Sprühdauer. Die Düse der Spritzapparatur wurde so gewählt, dass ein kreisrunder Vollkegel-Strahl entsteht. Bei den Versuchen wurde ebenfalls festgestellt, dass eine bessere Trennmittelverteilung erreicht wird, wenn nach dem Aufbringen des Materials eine gewisse Zeit mit reiner Druckluft nachgeblasen wird. In Tabelle 4.5 sind alle Parameter zusammengefasst.

die Materialmenge wird über eine Rasterregulierung bestimmt [29]

Abstand zur Form	80	mm
Sprühluftdruck	1,5	bar
Materialdruck	2	bar
Materialmenge	9	Raster
Dauer des Sprühens	1	s
Dauer des Nachblasens	2	s

Tabelle 4.5: Ermittelten Sprühparameter zum Auftragen des Trennmittels

Mit den Einstellungsparametern in Tabelle 4.5 wurde ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht. Im Vergleich zu Abbildung 4.28 links ist auf der gesamten Innenfläche eine deutliche Aufhellung zu vermerken. Als Schlussfolgerung lässt sich sagen, dass es zu einer regelmäßigen Verteilung des Trennmittels kommt. Am Ende der Versuchsreihe wurde ermittelt, ab welcher Sprühdauer es zu einer unerwünschten Tropfenbildung kommt. Das rechte Ergebnis in Abbildung 4.28 zeigt eine eindeutige Tropfenbildung an mehreren Stellen, nach einer Sprühdauer von 4 Sekunden.

Absaugen des Sprühnebels

Die Methode des Sprühens ist ohne „overspray“ nicht möglich. Es wird immer ein Sprühnebel in der Kammer entstehen. Aus diesem Grund muss die Kammer nach Beendigung des Prozesses abgesaugt werden. Für den Anschluss einer externen Absaugung ist am oberen Ende der Kammer ein Absaugstutzen vorgesehen. Der Trennmittelnebel wird über einen Mehrschichtfilter, mit guten Rückhalteeigenschaften abgesaugt. Ist der Trennmittelnebel entfernt kann, die Kammer hochgefahren und der Werkstückträger freigegeben werden.

Die Entwicklung des Trennmittelmoduls lässt sich schließlich in folgende Arbeitspakete einteilen:

- Recherche bei Düsen- und Spritzapparatehersteller
- Machbarkeitsstudie und Prototypenbau
- Auslegung und Anfragen einer Absaugung
- Konstruktion/Montage/Programmieren des Moduls

4.3.3 Tunnelofenmodul

Bei der Beschaffung des Tunnelofenmoduls stellte sich anfänglich die Frage, ob diese Aufgabe an einen externen Ofenbauer vergeben werden soll oder der Ofen intern entwickelt und montiert wird. Unrealistische Preisangebote waren der ausschlaggebende Grund den Tunnelofen intern auszulegen und zu konstruieren. Die Entwicklung des Tunnelofens setzt sich aus den Aufgaben der nachstehender Liste zusammen.

- Berechnung der Wärmeleistung
- Auslegung der Dämmung
- Recherche unterschiedlicher Heizmethoden
- Temperaturregelung (PID-Regler)
- Sicherheitsbetrachtungen
- Konstruktion/Montage/Programmieren des Moduls

Es wurde bereits festgestellt, dass das Tunnelofenmodul an zwei Stellen der Anlage zur Verwendung kommt. Einerseits wird es benötigt, um die Gießformen auf Temperatur zu bringen bzw. die Verlustwärme vor dem Gießen zu kompensieren. Andererseits wird ein acht Meter langer Tunnelofen zur Pufferung der bereits gegossenen Werkstücke benötigt. Der Tunnelofen wird in einzelne kleine Module geteilt. Die modulare Bauweise macht den Tunnelofen in der Dimension der Länge wandlungsfähig. Der Querschnitt wurde so gestaltet, um für das in Kapitel 3 definierte Produktspektrum ausreichend flexibel zu sein.

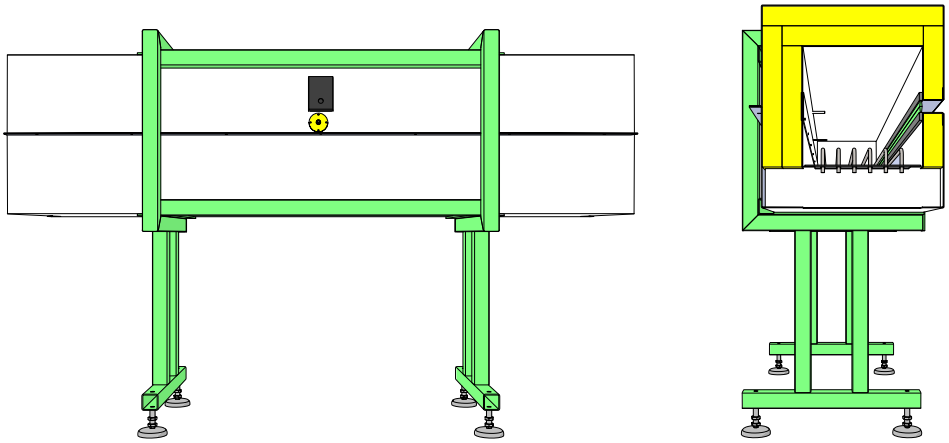


Abbildung 4.29: vereinfachte Darstellung des Tunnelofenmoduls

Bei der Konstruktion (siehe Abbildung 4.29) wurde Rücksicht auf eine ideale Wärmedämmung und die Vermeidung von Wärmebrücken genommen, um unnötige Verluste zu vermeiden. Bei dem Querschnitt in Abbildung 4.30 lässt sich allerdings eine Schwachstelle erkennen. Um die Werkstückträger durch die Wärmeeinflusszone transportieren zu können, ist es notwendig, eine seitlich laufende Öffnung in der Form eines Schlitzes vorzusehen. Obwohl die Höhe der Öffnung so gering wie möglich gestaltet wird, kommt es an dieser Stelle dennoch zu hohen Wärmeverlusten. Eine hitzebeständige Bürstenleiste soll dafür sorgen, die Wärmeverluste aufgrund der Wärmeströmung so gut wie möglich zu verhindern.

verhindern von Wärmeverlusten

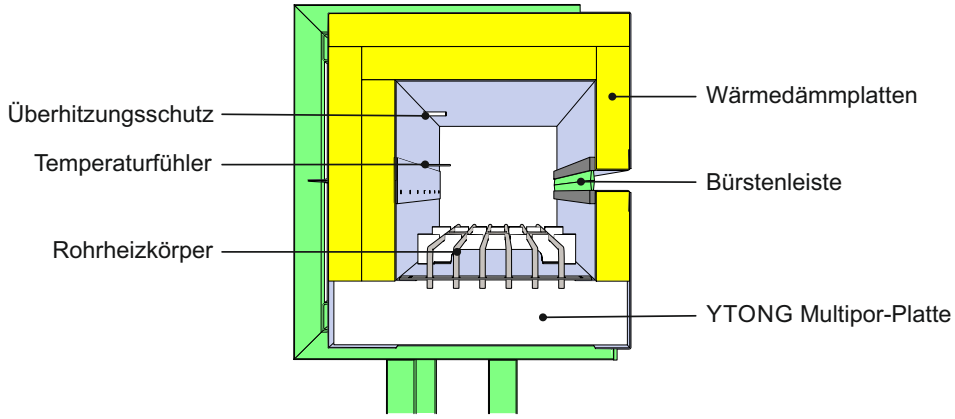


Abbildung 4.30: Querschnitt des Tunnelofenmoduls mit Blick auf die einzelnen Komponenten

Die Verluste aufgrund der Wärmeleitung werden durch eine 100 mm starke Dämmung minimal gehalten. An der Seite des Fördersystems muss allerdings ein weiterer Kompromiss eingegangen werden. An dieser Seite des Ofens konnte die Dämmung anstatt mit 100 mm nur mit 50 mm starken Wärmedämmplatten umgesetzt werden. Grund dafür ist die begrenzt auskragende Länge des Werkstückträgers. Bei der Auslegung der Werkstückträger in Abschnitt 4.1.3 wird bereits auf dieses Problem hingewiesen. Soll die Ofenöffnung dennoch den Außenmaßen des definierten Produktspektrums genügen, war der einzige Kompromiss die Dämmung an der entsprechenden Stelle zurückzunehmen.

Leistungsberechnung

Für die Berechnungen wurde der Tunnelofen als komplett geschlossener Körper betrachtet. Die seitliche Schlitzöffnung und die stirnseitigen Öffnungen werden am Ende der Berechnungen durch einen Verlustfaktor von 1,5 berücksichtigt.

Als Grundlage für die Leistungsberechnung dient der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme mit raumfesten Systemgrenzen. Bei dem betrachteten Tunnelofen handelt es sich um einen quasistationären Zustand, die zeitliche Änderung der Energie kann demnach 0 gesetzt wer-

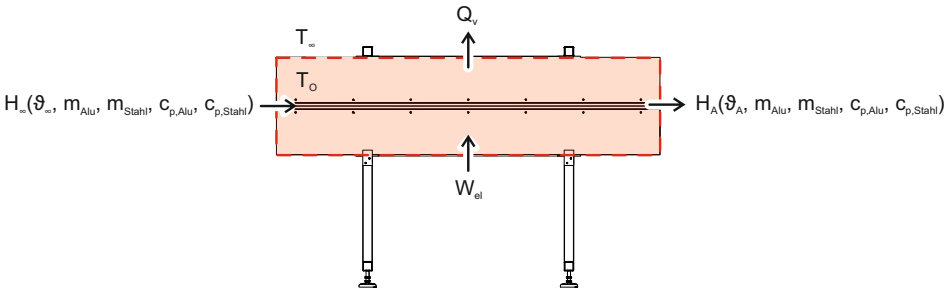


Abbildung 4.31: Darstellung des Energieaustausches an den Systemgrenzen

den [30].

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{H} = 0 \tag{4.1}$$

Die Enthalpie $\dot{H}$ lässt sich mittels Gleichung (4.2) berechnen. Materialspezifische Werte werden einerseits aus Tabellen entnommen bzw. über das CAD-System *SolidWorks* ermittelt. Die Eingangstemperatur wird mit $\vartheta_\infty = 25°\mathrm{C}$ definiert. Das heißt, für die Leistungsberechnung wird der Extremfall mit abgekühlten Gießformen und Werkstückträgerplatten herangezogen. Diese müssen auf eine Endtemperatur von $\vartheta_A = 120°\mathrm{C}$ aufgeheizt werden. Δt ist bereits in Abschnitt 4.1.4 mit 24 Sekunden definiert worden.

spezifische Wärmekapazität

$$c_{p,alu} = 896\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$$

$$c_{p,stahl} = 452\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$$

Massen

$$m_{alu} = 1645\,\mathrm{g}$$

$$m_{stahl} = 2\,581\,\mathrm{g}$$

$$\dot{H} = \dot{H}_\infty - \dot{H}_A = \dot{m} c_p \cdot (\vartheta_\infty - \vartheta_A) = \frac{m \cdot c_p}{\Delta t}(\vartheta_\infty - \vartheta_A) \tag{4.2}$$

Der Enthalpiestrom muss für beide Materialien, Stahl (Gießformen) und Aluminium (Werkstückträgerplatte), getrennt betrachtet werden.

$$\dot{H} = \left(\frac{1645\,\mathrm{g} \cdot 896\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}}{24\,\mathrm{s}} + \frac{2\,581\,\mathrm{g} \cdot 452\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}}{24\,\mathrm{s}}\right) \cdot (25\,°\mathrm{C} - 120\,°\mathrm{C}) \tag{4.3}$$

$$\dot{H} = -10,45\,\mathrm{kW} \tag{4.4}$$

Neben der Enthalpiedifferenz müssen auch die Wärmeverluste kompensiert werden. Wie oben bereits erwähnt, werden nur die Verluste aufgrund der Wärmeleitung berechnet. In die Berechnung fließen neben der Stärke s, Fläche A und Material λ der Dämmung auch die Temperaturen der Umgebung T_∞ und im Innenbereich des Ofens T_O ein.

Wärmeleitfähigkeit Mineralwolle

$$\lambda = 0,04\,\frac{W}{mK}$$

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{\lambda}{s}(T_\infty - T_O) \tag{4.5}$$

Bei der Berechnung wird des gesamte Pufferofens mit einer Länge von $8\mathrm{m}$ betrachtet. Der Querschnitt wird aufgrund der unterschiedlichen Dämmungen in zwei Teile aufgeteilt.

$$\dot{Q}_1 = 3 \cdot 300\,\mathrm{mm} \cdot 8000\,\mathrm{mm} \cdot \frac{0,04\,\frac{W}{mK}}{100\,\mathrm{mm}}(25\,^\circ\mathrm{C} - 120\,^\circ\mathrm{C}) \tag{4.6}$$

$$\dot{Q}_2 = 300\,\mathrm{mm} \cdot 8000\,\mathrm{mm} \cdot \frac{0,04\,\frac{W}{mK}}{50\,\mathrm{mm}}(25\,^\circ\mathrm{C} - 120\,^\circ\mathrm{C}) \tag{4.7}$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = -456\mathrm{W} \tag{4.8}$$

Die Ergebnisse werden in Gleichung 4.1 eingesetzt und man erhält die notwendige Energie die in das System eingebracht werden muss. Alle weiteren, nicht berücksichtigten, Wärmeverluste werden mit einem Wärmeverlustfaktor von 1,5 multipliziert.

$$\dot{W} = -\dot{H} - \dot{Q} = 10\,450\,\mathrm{W} + 456\,\mathrm{W} = 10\,906\,\mathrm{W} \tag{4.9}$$

$$\dot{\tilde{W}} = 1,5 \cdot \dot{W} = 16,36\,\mathrm{kW} \tag{4.10}$$

Da der Pufferofen in vier einzelne Module geteilt wird muss jedes Modul nur ein Viertel der Gesamtleistung aufbringen.

$$\dot{W_{modul}} = \frac{\dot{\tilde{W}}}{4} = 4,1\,\mathrm{kW} \tag{4.11}$$

Rohrheizkörper als Heizelemente

Diese Energie von $4,1\,\mathrm{kW}$ müssen jedem Tunnelofenmodul zugeführt werden. Ein in der Praxis weit verbreitetes Verfahren, um einem System Energie in Form von Wärme zuzuführen, ist die Widerstandserwärmung. In der Industrie sind es die Rohrheizkörper, welche bei einer Vielzahl von Anwendungen, z. B. zur Erwärmung von Flüssigkeiten und Gasen, eingesetzt werden [31].

In jedem Tunnelofenmodul werden je 6 Stück Rohrheizkörper eingesetzt. Jeder Rohrheizkörper mit einem Innenwiderstand von $53\,\Omega$ kann einerseits mit $1\,\mathrm{kW}$ bei $230\,\mathrm{Volt}$ bzw. $3\,\mathrm{kW}$ bei $400\,\mathrm{Volt}$ betrieben werden. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Leistungen bei unterschiedlichen Beschaltungen.

Betrachtet man den Leistungsbereich der einzelnen Schaltungen in Abbildung 4.32, ist die dritte Variante mit einer Gesamtleitung von $4,5\,\mathrm{kW}$ jene,

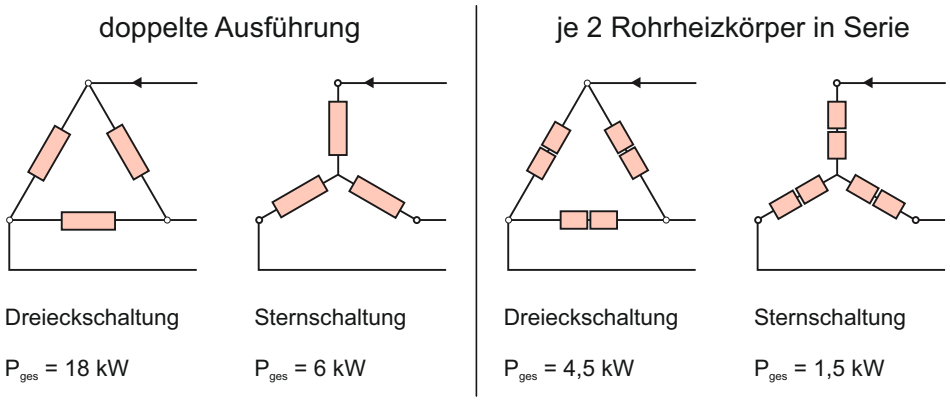


Abbildung 4.32: Leistungsunterschiede bei unterschiedlicher Beschaltung

die der Forderung von $4,1\,\mathrm{kW}$ am nächsten kommt. Hier werden bei jedem einzelnen Strang der Dreieckschaltung jeweils zwei Rohrheizkörper in Serie geschaltet. Die Leistung berechnet sich wie folgt:

$$U = R \cdot I \Rightarrow I = \frac{U}{R} \tag{4.12}$$

Werden zwei Rohrheizkörper in Serie geschaltet ergibt sich ein Gesamtwiderstand von $106\,\Omega$

$$I_{str} = \frac{400\,\mathrm{V}}{106\,\Omega} = 3,77\,\mathrm{A} \tag{4.13}$$

$$P_{str} = U_{str} \cdot I_{str} \tag{4.14}$$

$$P = 3 \cdot P_{str} = 3 \cdot U_{str} \cdot I_{str} = 4,528\,\mathrm{kW} \tag{4.15}$$

PID-Regler

Neben dem Schutz vor Überhitzung erfordert der Einsatz von Heizelementen auch eine präzise Regelung und Steuerung der Temperatur [31]. Der Überhitzungsschutz muss unabhängig von der Regelung arbeiten. Ein einfaches Thermostat übernimmt im vorliegenden Tunnelofenmodul diesen Überhitzungsschutz. Wird eine zuvor eingestellte Temperatur überschritten, wird der Stromkreis unterbrochen und der Heizvorgang gestoppt.

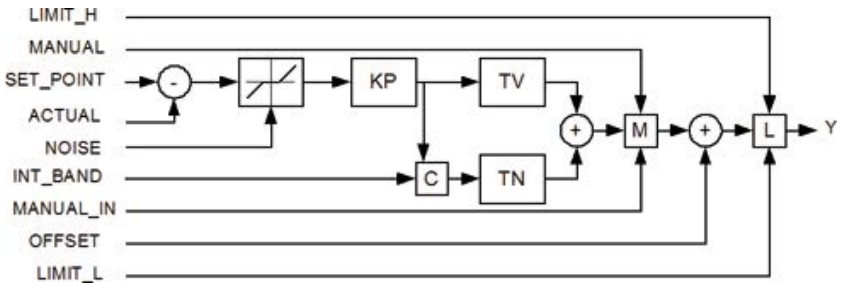


Abbildung 4.33: interne Struktur des PID-Reglers (nach [32])

Die präzise Regelung des Tunnelofenmoduls übernimmt die SPS. Erleichtert wird die Programmierung durch die Verwendung von vorgefertigten Funktionsblöcken der OpenSource-Bibliothek *OSCAT* [32]. Diese Bibliothek stellt unter anderem einen PID-Baustein mit zahlreichen Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Die Regelparameter K_p(Verstärkung), T_N(Nachstellzeit) und T_V(Vorhaltezeit) können nach der *Methode von Ziegler und Nichols* laut [33] ermittelt werden.
Der Ausgang des PID-Funktionsblocks liefert einen Wert zwischen 0 und 1. Allerdings kann die Leistung des Ofens nicht proportional gesteuert werden, sondern es gibt nur die Zustände, „ein“ und „aus“. Das Signal muss dementsprechend aufbereitet werden.

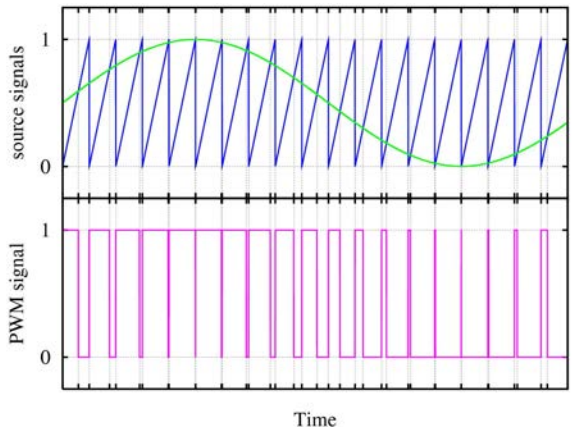


Diagramm 4.6: Beispiel eines pulsweitenmodulierten Signals (nach [34])

Pulsweiten-moduliertes Signal

Ein weiterer Funktionsbaustein löst dieses Problem, indem es den Ausgangswert in ein Pulsweitenmoduliertes (PWM) Signal umwandelt. Dabei kommt es zu einer sehr hohen Anzahl an Schaltzyklen (siehe Diagramm 4.6). Die Stromzufuhr der Rohrheizkörper wird daher mit Halbleiterrelais

gestaltet. Diese Relais zeichnen sich durch eine sehr hohe Lebensdauer bei hoher Schalthäufigkeit aus.

4.3.4 Gießmodul

Ohne die einzelnen Prozessmodule nach ihrer Wichtigkeit zu klassifizieren, nimmt das Gießmodul mit Sicherheit die wichtigste aller Stellungen im Produktionsablauf ein. Während die oben beschriebenen Module für die Vor- und Nachbereitung des Gießens zuständig sind, findet beim Gießmodul der eigentliche Produktionsprozess statt. An dieser Stelle der Anlage wird das Polyurethan verarbeitet, indem Teile beschichtet bzw. gegossen werden.
Die Gießmaschine in Abbildung 4.34 diente als Grundlage für die weitere Entwicklung des Gießmoduls. Sie ist bereits vorhanden und muss nun in die Anlage integriert werden. Als Eckpfeiler für die Gestaltung dieses Prozessmoduls sind die nachstehenden Aufgaben zu sehen.

- Gegenüberstellung des Mischkopfhandlings
- Auslegen der Antriebsachsen
- Koppeln der Antriebsmotoren
- Schnittstelle Gießmaschine/SPS
- Konstruktion/Montage/Programmieren des Moduls

Gießmaschine

Hochdruck-gießmaschine

Bei der Gießmaschine handelt es sich um eine Hochdruckgießmaschine der *Fa. Isotherm*. Der Name Hochdruckgießmaschine ist in diesem Zusammenhang etwas irreführend. Unter Hochdruck versteht man in diesen Kontext die Technologie, die zum Mischen der zwei Polyurethankomponenten (Isocyanat mit Polyol) verwendet wird und nicht den Druck des



Abbildung 4.34: Hochdruckgießmaschine Isotherm PSM90 (nach [35])

austretenden Materials. Neben dem eben erwähnten Hochdruckverfahren, gibt es auch das Niederdruckverfahren. Die Unterschiede werden im Folgenden etwas genauer erläutert.

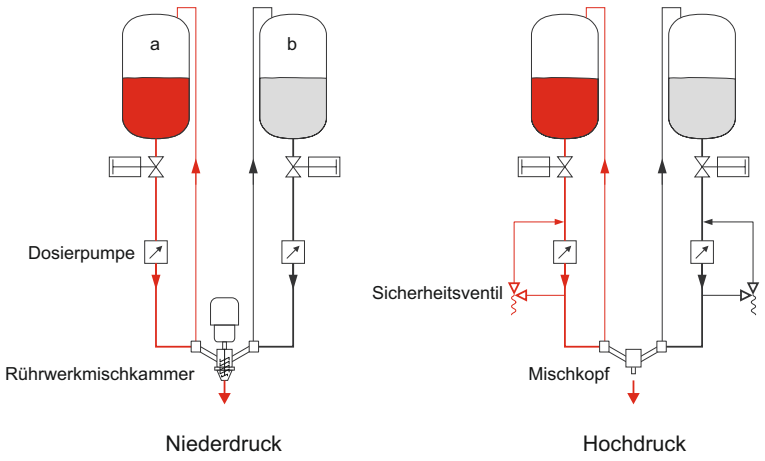


Abbildung 4.35: Vergleich des Hochdruckverfahren und des Niederdruckverfahren (nach [36] [37])

Unterschied Gießmaschinen

Abbildung 4.35 zeigt die wesentlichen Merkmale der zwei Verfahren. Beide Typen besitzen zwei Arbeitsbehälter, Filter und Dosierpumpen sowie Hin- und Rückstromleitungen. Der wesentliche Unterschied ist im unteren Bereich von Abbildung 4.35, beim Austritt des Materials, genauer gesagt beim Mischen der Komponenten, zu finden. Bei der Niederdruckmaschine werden über eine sogenannte Rührwerksmischkammer die teil-

nehmenden Komponenten vermischt. Nach dem Gießvorgang muss die Mischkammer, mittels Druckluft oder Reinigungsmittel, gespült und gereinigt werden. Das Mischverfahren der Niederdruckmaschine eignet sich besonders für die kontinuierliche Halbzeugfertigung (Blöcke, Platten). Im Gegensatz dazu bieten Hochdruckgießmaschinen alle Vorteile für die diskontinuierliche Herstellung von Formteilen. Zum einen garantieren Präzisionsdosierpumpen einen Gramm-genauen Ausstoß des Polyurethans (im Bereich von $3 - 1000\,\mathrm{g}$). Außerdem entfällt der komplexe Reinigungszyklus, wodurch kürzere Taktzeiten realisiert werden können.

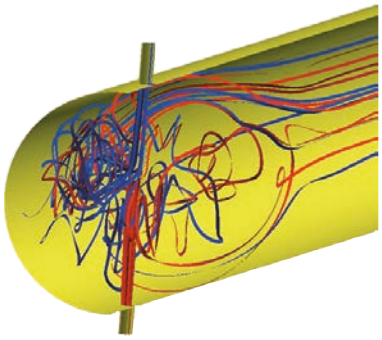


Abbildung 4.36: Mischbewegung bei der Injektionsvermischung durch Stromfäden simuliert (nach [37])

Bereits vor jedem Gießvorgang zirkulieren beim Hochdruckverfahren die zwei Komponenten, mit den für die Vermischung erforderlichen Druck ($150 - 200\,\mathrm{bar}$), im Kreislauf. Über Düsen werden die Komponenten in die Mischkammer mit einer Geschwindigkeit von 100 bis $150\,\mathrm{m/s}$ injiziert und aufgrund der kinetischen Energie vermischt (siehe Abbildung 4.36). Das im Mischkopf verbleibende Material wird am Ende mechanisch durch einen Reinigungskolben zur Gänze ausgestoßen [36][37].

Handling

Eine Forderung an das Gießmodul ist, dass sich der Mischkopf relativ zum Werkstückträger bzw. zu den Gießformen bewegen soll, um Flexibilität für ein breites Produktspektrum zu erreichen. Es ist naheliegend den Mischkopf über der Gießform zu bewegen. Diese Bewegung im Raum

wird allerdings durch ein starres und unflexibles Schlauchpaket erheblich eingeschränkt. Abbildung 4.34 zeigt unter anderem das zum Mischkopf führende Schlauchpaket. Es besteht aus vier beheizten Druckschläuchen mit je einem Durchmesser von $42\,\text{mm}$ und einem Biegeradius von mindestens $300\,\text{mm}$ [35]. Neben Linearportal und Roboterhandling werden auch noch andere Alternativen für die Relativbewegung des Mischkopfes erarbeitet. In nachstehender Tabelle 4.6 werden die unterschiedlichen Varianten gegenübergestellt.

	Starrer Mischkopf	Linearachse	3-Achs Linearportal	Knickarmroboter
Beschreibung	Der Mischkopf ist in der Gießstellung fixiert. Der Roboter nimmt die Gießform und verfährt während des Gießvorgangs unterhalb des Mischkopfes.	Der Werkstückträger übernimmt die Bewegung entlang der Förderrichtung. Der Mischkopf verfährt lediglich orthogonal dazu.	Eine Bewegung in drei Achsen wird über ein Linearportal mit angetriebenen Achsen ermöglicht.	Der Mischkopf wird am Roboter montiert und kann so gesteuert werden
Vorteile/Nachteile	+ Einfache und kurze Schlauchführung + hoher Freiheitsgrad - Höhere Komplexität der Werkstückträger durch automatisches Koppeln der Gießformen - höhere Taktzeiten	+ Einfache Schlauchführung + Verwendung des mitgelieferten Galgens möglich + Bewegung des Mischkopfes in nur eine Richtung notwendig - Verstellung der z-Achse nur manuell möglich	+ durch 3 Freiheitsgrade sehr flexibel - lange und komplexe Schlauchführung durch gegebene Biegeradius -massive Konstruktion	+ hoher Freiheitsgrad - hohe bewegte Massen - großer Handlingsroboter notwendig - unmögliche Schlauchführung bei gegeben Biegeradius

Tabelle 4.6: Zusammenstellung der betrachteten Varianten zum Erreichen einer Gießbewegung

das Gewicht von Mischkopf inkl. Schlauchpakte beträgt $80\,\text{kg}$

Nach Rücksprache mit *Fa. Isotherm* wird von der Variante mit einem Knickarmroboter abgeraten. Der Roboter müsste aufgrund der bewegten Masse dementsprechend groß ausgelegt werden. Selbst mit einem passenden Roboter wäre noch nicht die Schlauchführung gelöst. Vor allem die Empfindlichkeit des Schlauchpaketes auf Torsion und Biegung widersprechen der Bewegung eines Roboters.

Die Variante des „3-Achs Linearportals“ wird aufgrund der langen, komplexen und im selben Maße kostenintensiven Schlauchführung nicht gewählt. Diese Variante wäre nur bei größeren Verfahrwegen empfehlenswert. Im vorliegenden Fall muss allerdings lediglich die Fläche des Werkstückträgers ($320 \times 200\,\text{mm}$) abgefahren werden können. Für diese Aufgabe hat sich die zweite der gelisteten Möglichkeiten als kostengünstig und vollkommen ausreichend herauskristallisiert.

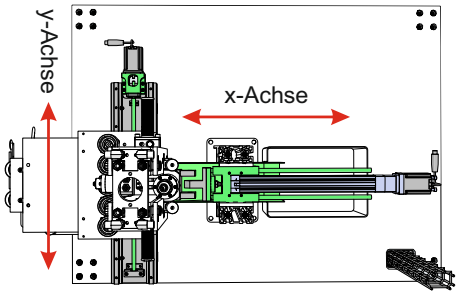


Abbildung 4.37: Achsbewegung des Mischkopfes bzw. des Werkstückträgers

Bei dem Konzept in Abbildung 4.37 wird die Bewegung einerseits durch den Werkstückträger und andererseits über den Mischkopf ausgeführt. Die ansonsten starr mit dem Prozessmodul verbundene Positioniereinheit ist in diesem Fall auf einer Linearachse montiert. Ein positionierter Werkstückträger kann so in Laufrichtung des Fördersystems (x-Richtung), angetrieben durch einen Servomotor, verfahren werden.
Die Bewegung in y-Richtung übernimmt ebenfalls eine Linearachse. Allerdings wird an dieser der Mischkopf über ein Scharniergelenk gekoppelt. Dabei kann der Mischkopf am mitgelieferten Galgen belassen werden. Dies hat den Vorteil, dass die Linearachse nicht das gesamte Gewicht des Mischkopfes tragen muss. Auch der Kippmechanismus des Galgens bietet ausreichend Spiel, um jeden Punkt der Werkstückträgerplatte zu erreichen. Möchte man die Gießmaschine zum manuellen Gießen verwenden, kann die Koppelung durch einen Bolzen gelöst werden. Auch der Wechsel auf eine andere Gießmaschine kann auf diese Weise erfolgen.
Auf eine Bewegung in z-Achse wurde verzichtet. Bei der Umstellung auf ein neues Produkt kann jedoch die Höhe des Mischkopfes manuell eingestellt werden. Erstrebenswert ist es allerdings die Gießform so zu gestalten, dass immer auf der selben Höhe gegossen werden kann.

Fehler durch Kippbewegung

Durch das Kippen des Mischkopfes entsteht ein kleiner Fehler bei der Bewegung in y-Richtung (siehe Abbildung 4.38). Dieser Fehler kann allerdings berechnet und bei der Achssteuerung berücksichtigt werden. Unter Angabe der Austrittgeschwindigkeit, dem Stellungswinkel des Mischkop-

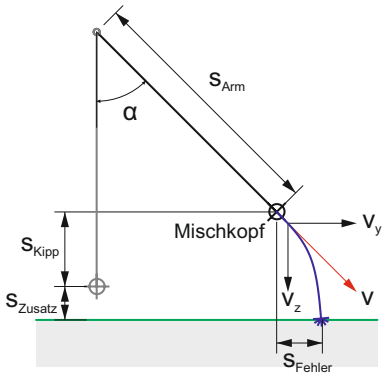


Abbildung 4.38: Darstellung des Zusammenhanges zwischen Stellungswinkel des Mischkopfes und den Auftreffpunkt des Materials

fes und dem Abstand zur Gießform kann eine Wurfparabel berechnet und der tatsächliche Auftreffpunkt des Materials ermittelt werden.

Im ersten Schritt wird die Austrittsgeschwindigkeit in seine zwei Komponenten geteilt.

$$v_y = v \cdot \sin \alpha \tag{4.16}$$

$$v_z = v \cdot \cos \alpha \tag{4.17}$$

Um die Zeit zu bestimmen die das Material benötigt bis es die Gießform erreicht hat, wird die Bewegung in z-Richtung herangezogen. Der z-Abstand errechnet sich mit:

$$s = s_{Kipp} + s_{Zusatz} = s_{Arm} - s_{Arm} \cdot \cos \alpha + s_{Zusatz} \tag{4.18}$$

die Armlänge s_{Arm} beträgt 850 mm

Gemeinsam mit der Formel für den freien Fall und der Anfangsgeschwindigkeit v_z lässt sich nach Auflösen der quadratischen Gleichung

$$s = \frac{g}{2} t^2 + v \cdot \cos \alpha \cdot t \tag{4.19}$$

die gesuchte Zeit bestimmen. In dieser Zeit erfährt das Material aufgrund des Geschwindigkeitsanteils v_y ebenfalls eine Bewegung in y-Richtung. Diese Verschiebung entspricht dem Fehler.

$$s_{Fehler} = v_y \cdot t \tag{4.20}$$

Beim vorliegenden Beispiel wird eine maximale Auslenkung von 100 mm erreicht. Daraus ergibt sich ein Kippwinkel von $\alpha \approx 7\,^\circ$. Mit einer Aus-

trittsgeschwindigkeit von $v = 1\,\mathrm{m/s}$ und $s_{Zusatz} = 10\,\mathrm{mm}$ errechnet sich ein relativer Fehler von $s_{Fehler} = 2\,\mathrm{mm}$.

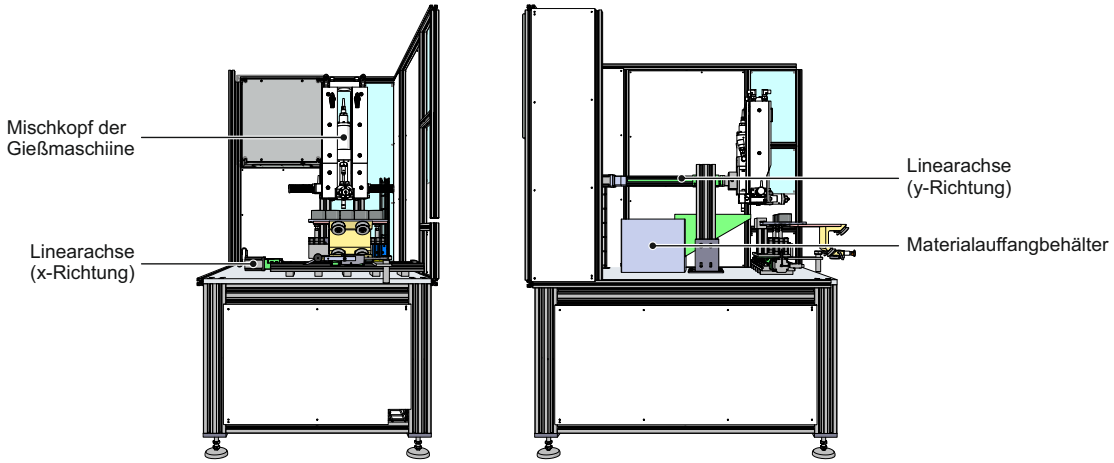


Abbildung 4.39: vereinfachte Darstellung des Gießmoduls

Die oben beschriebenen Betrachtungen zusammengefasst führen zu dem im Abbildung 4.39 gezeigten Gießmodul. Neben den beschriebenen Achsen ist dieses Modul auch mit einem Materialauffangbehälter ausgestattet. Dieser Behälter wird benötigt, um gegebenenfalls Reinigungszyklen durchzuführen. Einerseits wird bei längerem Stillstand der erste Schuss verworfen, andererseits sollte auch beim Wechseln der Rezeptur der Vorlauf nicht verwendet werden. Mit dieser vorgesehenen Reinigungsposition kann der Mischkopf oberhalb des Behälters „parken“ und alle notwendigen Zyklen durchführen, ohne in Gefahr zu treten, die Anlage zu verunreinigen.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Insgesamt gesehen war diese Diplomarbeit ein interessanter Streifzug durch die verschiedensten Gebiete des Maschinenbaus. Angefangen beim Projektmanagement wurde später bei der Konzeptionierung Wissen aus den Bereichen Fertigungstechnik, Fördertechnik und Informationstechnik benötigt.
Bei der Konstruktion der Prozessmodule wurden im konkreten mechanische und steuerungstechnische Überlegungen angestellt. Je nach Aufgabe der Module waren außerdem Grundkenntnisse aus der Thermodynamik, Regelungstechnik, Antriebstechnik, Robotik und anderen Bereichen notwendig.

Ein wesentlicher Schritt bei der Konzeptionierung war die Modularisierung und die gleichzeitige Einführung der Prozessmodule. Es wurde ein Standard für Prozessmodule definiert, der weit über die notwendigen Prozesse hinaus angewendet werden kann. Dadurch wurde die Möglichkeit geschaffen, sich stets an die momentane Marktsituation bzw. an Aufträge anpassen zu können. Zum Beispiel kann in der Endphase des Produktlebenszyklus die Anlage verkleinert werden und die Prozessmodule durch ihren standardisierten Aufbau für die Produktion eines Nachfolgeproduktes verwendet werden. Oder es werden, falls notwendig, Prozessmodule für ganz neue Aufgaben entwickelt.
Mittlerweile wurden auch für die Montage bzw. Bearbeitung der Aufga-

ben Drehen, Laserbeschriften und Lagereinpressen eigene Module umgesetzt. Unter Berücksichtigung der definierten Standards erhält man so einen Pool an Prozessmodulen, die in unterschiedlichen Infrastrukturen und in beliebiger Reihenfolge verkettet werden können.
Die für die Integration der Prozessmodule notwendige Infrastruktur war ebenfalls Gegenstand des Konzeptes. Mechanische, elektrische und steuerungstechnische Schnittstellen standen im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Mit dieser Arbeit, über die Projektierung einer wandlungsfähigen Gießanlage, wurde eine Anlage entwickelt, welche in erster Linie der automatisierten Produktion von Rollen dient. Durch das Konzept der Wandlungsfähigkeit ist es gelungen, mit geringem Aufwand in Form von Umbauten oder Erweiterungen, die Produktion für ein breites Produktspektrum zu öffnen.

Anhang A

Projektpläne

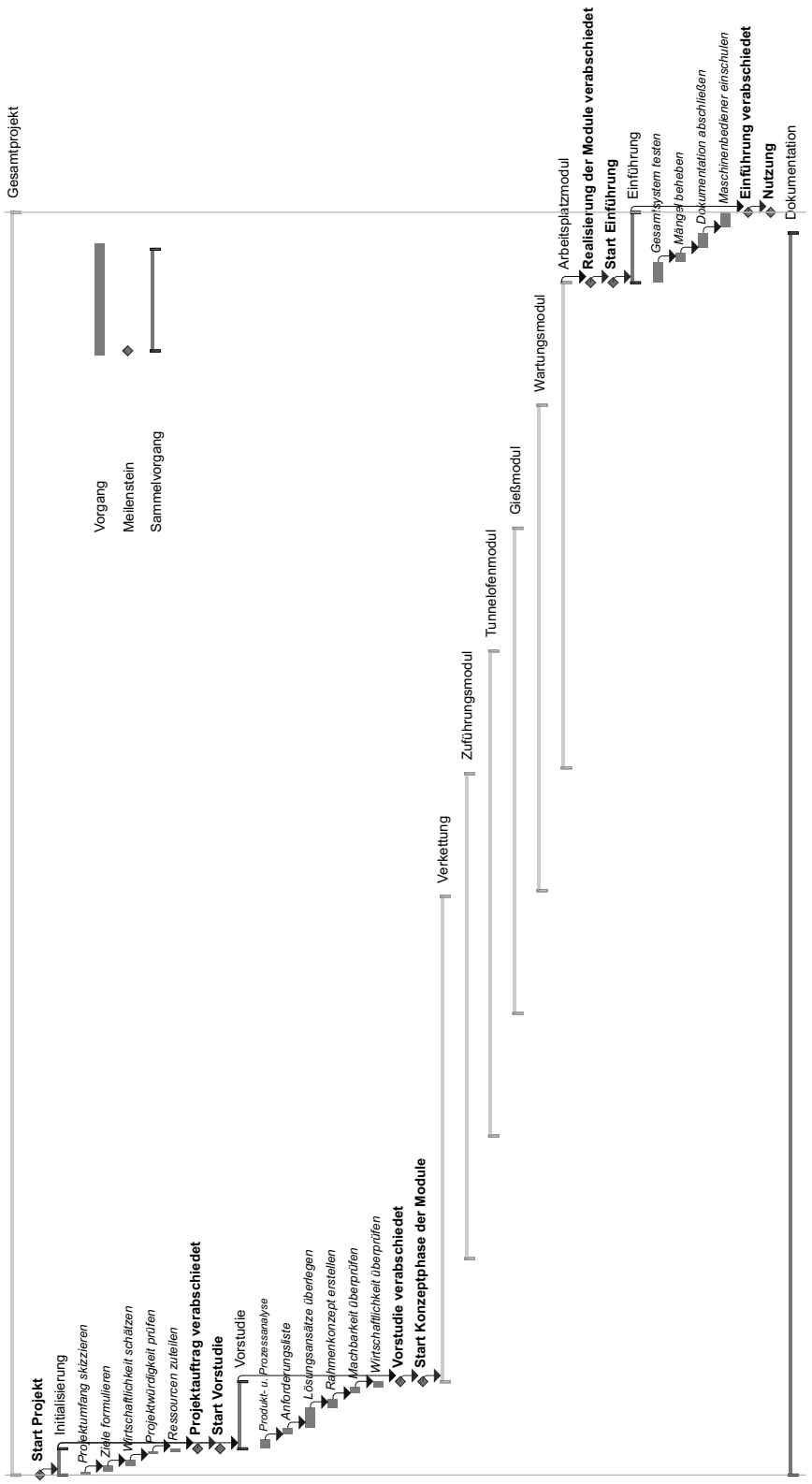


Abbildung A.1: gesamter Projektplan

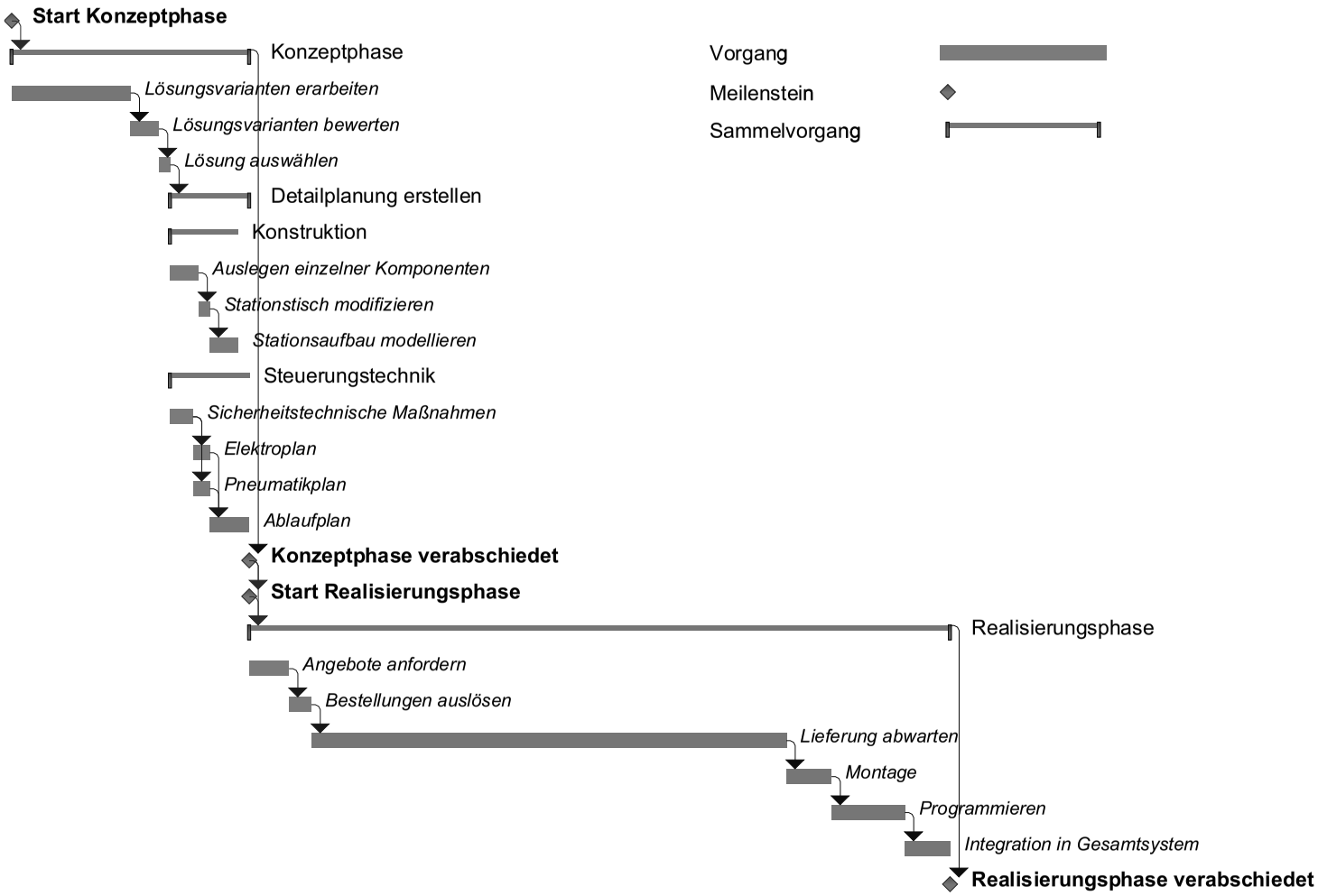


Abbildung A.2: exemplarischer Projektplan eines Moduls

Anhang B

Roboterbefehle

CmdNr	Command
1	**LEFTY**
2	**RIGHTY**
3	**BREAK**
4	**BRAKE**
5	**ENABLE CP**
6	**DISABLE CP**
7	**GRIPPER CLOSE**
8	**GRIPPER OPEN**
9	**SIGNAL 10**
10	**SIGNAL -10**
11	**MOVE HOME**
12	**MOVE pos1**
13	**MOVE pos2**
14	**MOVE pos3**
15	**MOVE pos4**
16	**MOVE pos5**
17	**MOVE pos6**
18	**MOVE pos7**
19	**MOVE pos8**
20	**MOVE pos9**

CmdNr	Command	Argument 1
101	**FINE**	*percentage (0-999%)*
102	**FINE ALWAYS**	*percentage (0-999%)*
103	**COARSE**	*percentage (0-999%)*
104	**COARSE ALWAYS**	*percentage (0-999%)*
105	**SPEED**	*percentage (0-120%)*
106	**SPEED ALWAYS**	*percentage (0-120%)*
107	**DELAY**	*Time (s)*
108	**MOVE Z**	*distance (mm)*
109	**MOVE -Z**	*distance (mm)*
110	**GRIPPER CHANGE**	*Grippernumber*
111	**APPR TRAY NR: 1**	*Positionnumber*
112	**APPR TRAY NR: 2**	*Positionnumber*
113		
114		
115		
116		
117		
118		
119		
120		

Tabelle B.1: Liste der möglichen Roboterbefehle

Literaturverzeichnis

[1] M Heinecker. *Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme*. TU München, 2006.

[2] J.-C Blumenau. *Lean planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Universität des Saarlandes, 2006.

[3] W Klimke. *Fabrikbauprojekte - Erfahrungen und Erkenntnisse aus einem Rückblick*. Herbert Utz Verlag, 2002.

[4] G Schuh, M Sesterhenn, and R König. *Lebenszyklusgestaltung kollaborativer Produktionssysteme*. ZWF, 2003.

[5] E Abele and G Reinhart. *Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder*. Carl-Hanser-Verlag, 2011.

[6] G Reinhart, S Dürrschmidt, A Hirschber, and C Selke. *Reaktionsfähigkeit für Unternehmen - Eine Antwort auf turblente Märkte*. ZWF, 1999.

[7] P Nyhuis, G Reinhart, and E Abele. *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. PZH-Verlag, 2008.

[8] P Nyhuis, T Klemke, and C Wagner. *Wandlungsfähigkeit - ein systematischer Ansatz*. Berlin: Gito-Verlag, 2010.

[9] R Cisek, C Habicht, and P Neise. *Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. ZWF, 2002.

[10] G Schuh, J Harre, S Gottschalk, and A Kampker. *Design for Changeability (DFC) - Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden*. wt Werkstattstechnik, 2004.

[11] B Scholz-Reiter and S Sowade. *Der Beitrag der Selbststeuerung zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen*. SFB 637.

[12] D Nofen, J.H. Klußman, F Löllmann, and H.-P. Wiendahl. *Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse - Wandlungsfähigkeit auf Basis modularer Fabrikstrukturen*. wt Werkstattstechnik, 2003.

[13] J Göpfert. *Modulare Produktentwicklung - Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Wiesbaden: Gabler, 2003.

[14] J Kuster, E Huber, R Lippmann, A Schmid, E Schneider, U Witschi, and R Wüst. *Handbuch Projektmanagement 3.Auflage*. Springer Vieweg, 2011.

[15] R Müller, M Esser, and J Eilers. *Rekonfigurationsorientierte Modularisierung von Montagesystemen*. wt Werkstattstechnik, 2011.

[16] T Klemke, T Mersmann, and P Nyhuis. *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. wt Werkstattstechnik, 2012.

[17] BASF Polyurethanes Benelux B.V. *Was ist Polyurethan?* http://www.polyurethanes.basf.de/, 2013.

[18] Aspelmayer GmbH. *interne Dokumente*. asma, 2013.

[19] The Electronic Lives Manufacturing. *X-Y scanner*. http://elmchan.org/, 2013.

[20] Richtlinie. *VDI 2803 - Funktionsanalyse. Grundlagen und Methoden*. VDI-Verlag, 1996.

[21] B Lotter and Wiendahl H.-P. *Montage in der industriellen Produktion*. Springer Vieweg, 2012.

[22] xpertgate. *Wissen für die Fabrikautomation*. http://www.xpertgate.de/, 2013.

[23] Soldati. *Dokumentation - MonoRailTransfer (MRT)*. http://www.soldati.ch/, 2013.

[24] handling online. *Handhabungstechnik - Transfer von X nach Y*. http://www.handling.de/, 2010.

[25] Michael ten Hompel, Hubert Büchter, and Ulrich Franzke. *Identifikationssysteme und Automatisierung*. Springer Verlag, 2008.

[26] Peter Konold and Herbert Reger. *Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2003.

[27] x-technik Zerspanungstechnik.at. *Die Zeit ist reif für SCARA-Roboter*. http://www.zerspanungstechnik.at/, 2008.

[28] Adept Technology GmbH. *Adept Technology GmbH - Website*. http://www.adept.de/, 2013.

[29] ALFRED SCHÜTZE Apparatebau GmbH. *Datenblatt - Sprühventils ASV*. http://www.schuetze-gmbh.de/, 2013.

[30] H. Steinrück and Wilhelm Schneider. *Skriptum - Wärmeübertragung*. Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, 2005.

[31] Türk+Hillinger Elektrowärme. *Berechnungsgrundlagen für elektrische Heizelemente*. Türk+Hillinger Elektrowärme, 2006.

[32] Open Source Community for Automation Technology. *OSCATBasic - Dokumentation*. http://www.oscat.de/, 2013.

[33] Die freie Enzyklopädie Wikipedia. *Faustformelverfahren Automatisierungstechnik*. http://de.wikipedia.org/, 2013.

[34] Die freie Enzyklopädie Wikipedia. *Pulsweitenmodulation*. http://de.wikipedia.org/, 2013.

[35] Isotherm AG Polyurethane Processing Equipment. *Datenblatt - PSM 90*. http://www.isotherm.ch/, 2013.

[36] Wolfgang Kaiser. *Kunstoffchemie für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, München, 2006.

[37] Udo Maier, Hans-Guido Writz, Jürgen Fietz, Andreas Frahm, and Thomas Rüb. *PUR-Technik: Polyurethan-Schäumanlagen*. Carl Hanser Verlag, München, 2013.