

Masterarbeit

Philipp Julian Otto

Konstruktion und Entwicklung einer Sondermaschine zur
automatisierten Sortierung von Spielkarten

Philipp Julian Otto

Konstruktion und Entwicklung einer Sondermaschine zur automatisierten Sortierung von Spielkarten

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang *Master of Science Automatisierung*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuende Prüferin: Prof. Dr. Anna Usbeck
Zweitgutachter: Prof. Dr. Florian Wenck

Eingereicht am: 26. Februar 2025

Philipp Julian Otto

Thema der Arbeit

Konstruktion und Entwicklung einer Sondermaschine zur automatisierten Sortierung von Spielkarten

Stichworte

Robotik, Handhabung, Automatisierung, Sondermaschinenbau, Konstruktion, SPS-Programmierung, Prozessoptimierung, Pneumatik, Vakuumtechnik, Entwicklung, Spielkarten, Papierhandhabung

Kurzzusammenfassung

In der Automatisierungstechnik stellt die Handhabung von Papier oder Flachgut im Allgemeinen eine besondere Herausforderung dar. Die Handhabungsvorrichtungen müssen spezifisch an die Prozessanforderungen angepasst sein und das zu handhabende Flachgut darf nur begrenzt in seinen geometrischen Eigenschaften variieren. Bei dem vorliegenden Flachgut handelt es sich um bespielte Spielkarten. Diese variieren nicht nur in ihren geometrischen Eigenschaften, darüber hinaus beeinflussen Fette und Öle den Reibungskoeffizienten des Flachguts, was die Handhabung mit einer Vielzahl der bekannten Methoden erschwert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Sondermaschine entwickelt und konstruiert, die zur Sortierung von Spielkarten verwendet werden kann. Dies beinhaltet eine genaue Analyse der vorliegenden Anforderungen aus dem geforderten Prozess, die Literatur- und Patentrecherche über den Stand der Technik und die in Frage kommenden Funktions- und Wirkprinzipien, die Auswahl eines geeigneten Funktionsprinzips nach den Methoden der Konstruktion, die Auswahl passender Komponenten, den Bau der Sondermaschine, die Entwicklung eines Steuerungskonzepts und die Programmierung der Hardware. Die Entwicklung der Sondermaschine hat gezeigt, dass für die Lösung der Automatisierungsaufgabe eine Vielzahl an Tests notwendig sind, um die Sondermaschine zu optimieren und die Prozessparameter empirisch ermitteln zu können. Die umfangreichen Funktionstests haben gezeigt, dass die entwickelte Sondermaschine in der Lage ist die Automatisierungsaufgabe zu erfüllen und dabei alle im Voraus definierten Leistungsanforderungen zu berücksichtigen.

Philipp Julian Otto

Title of Thesis

Design and development of a special machine for the automated sorting of playing cards

Keywords

robotics, handling, automation, special machine construction, design, PLC-programming, process optimisation, pneumatics, vacuum technology, development, playing cards, paper handling, gripping system

Abstract

In automation technology, the handling of paper or flat goods in general poses a particular challenge. The handling devices must be specifically adapted to the process requirements and the flat goods to be handled may only vary in their geometric properties to a limited extent. The flat goods in question are playing cards. Not only do these vary in their geometric properties, fats and oils also influence the coefficient of friction of the flat goods which makes the application of a large number of methods/principles more difficult when it comes to handling. As part of the present work, a special machine was developed and constructed that can be used for sorting playing cards. This includes a precise analysis of the existing requirements from the desired process, literature and patent research on the state of the art and the functional and operating principles in question, the selection of a suitable functional principle according to the methods of design, the selection of suitable components, the construction of the special machine, the development of a control concept and the programming of the hardware. The development of the special machine has shown that a large number of tests are necessary to solve the automation task in order to optimise the special machine and to be able to determine the process parameters empirically. The extensive functional tests have shown that the developed special machine is able to fulfil the automation task and meet all the performance requirements defined in advance.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Forschungsfragen	2
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Physikalische Aspekte der Vereinzelung von Flachgut	5
2.1.1 Adhäsionskräfte	6
2.1.2 Reibung	6
2.1.3 Vakuum	9
2.2 Physikalische Aspekte des Transports von Flachgut	12
2.3 Auswahl geeigneter Motoren	13
2.4 Konstruktionssystematik	14
3 Stand der Technik	17
3.1 Vereinzelungsprinzipien	17
3.2 Transportprinzipien	20
3.3 Vergleichbare Entwicklungen	24
4 Anforderungsanalyse	28
4.1 Prozessbeschreibung	28
4.2 Anforderungsliste	30
4.3 Anforderungsbeschreibung	31

5	Konzeption	33
5.1	Mögliche Lösungswege	33
5.1.1	Konzept A	35
5.1.2	Konzept B	35
5.1.3	Konzept C	36
5.2	Auswahl eines Konzepts	37
5.3	Sensorik	39
6	Entwicklung	42
6.1	Vereinzeln	43
6.2	Transportieren	49
6.3	Speichern	51
6.4	Kinematik	52
6.5	User-Interface/Bedienung	54
6.6	Steuerung	56
7	Tests und Auswertung	61
7.1	Durchführung und Auswertung	61
8	Fazit und Ausblick	74
9	Zusammenfassung	77
10	Anhang	79
10.1	Anhang A	79
10.2	Anhang B	80
10.3	Anhang C	81
10.4	Anhang D	82
10.5	Anhang E	83
10.6	Anhang F	84
	Literaturverzeichnis	85
	Selbstständigkeitserklärung	90

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vereinzelungsprinzipien durch Reibung mit a) exzentrischer Reibrolle von oben und b) exzentrischer Reibrolle von unten [3]	8
2.2	Vereinzelung mittels Flachsauger	11
2.3	Funktionsprinzip eines Vakuumejektors mit Venturidüse [15]	12
2.4	Dekomposition komplexer Probleme [4]	15
2.5	Abstrahierende Vorgehensweise in der Produktentwicklung [4]	16
3.1	Vereinzelung mittels Reibanleger [3]	18
3.2	Vereinzelung mittels Kartenschieber [3]	18
3.3	Vereinzelung mittels- a) Klemm-Saug-Greifer b) Zangen-Saug-Anleger [3] .	19
3.4	Transport mittels Reibrollen [27]	20
3.5	Transport mittels Vakuumförderband [28]	21
3.6	Transport mittels Rutsche [29]	22
3.7	Transport mittels 'shingling' [30]	23
3.8	'Bridesorter' von 'Jannersten Förlag AB' [31]	24
3.9	'PhyzBatch-9000' von 'TCGMachines' [32]	25
3.10	'Roca' von 'TCGplayer' [33]	26
3.11	'Magic Sorter' von 'Fabbrica Binaria s.a.s' [34]	27
4.1	Prozessablauf dargestellt als Elementarfunktionen, nach [35]	29
5.1	Morphologischer Kasten der Wirkprinzipien, Konzept A(rot), Konzept B(grün), Konzept C(gelb)	34
5.2	Morphologischer Kasten der Sensorkonzepte	40
6.1	Funktionsstruktur der zu entwickelnden Sondermaschine	42
6.2	Versuchsaufbau zur Ermittlung des Flachsaugerdurchmessers	44
6.3	Testaufbau zum Vereinzeln von Spielkarten durch Biegen	45
6.4	Ermittlung der für die Biegung benötigten Gewichtskraft	46

6.5	Entwickelter Vakuumgreifer	47
6.6	Greifer im Verbund	49
6.7	Gesamtansicht des konstruierten Förderbandes	50
6.8	Konstruktion des Förderbandes in Schnittansicht	50
6.9	Konstruktion des Kartenmagazins	52
6.10	Gesamtansicht der Sondermaschine	53
6.11	User-Interface (Tastergehäuse)	55
6.12	Klassendiagramm der Programmstruktur	57
6.13	Zustandsübergangsdiagramm der Ablaufsteuerung	58
7.1	Funktionstest des entwickelten Greifers	63
7.2	Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband-Teilstück	65
7.3	Funktionstest des Förderbandes	66
7.4	Schematische Darstellung des a) bisherigen- und b) verbesserten Vakuum- systems	68
7.5	Ermittlung der Leistungsparameter für Verlässlichkeit und Durchsatz . . .	71
10.1	QR-Code zur weiterführenden Dokumentation	79
10.2	Anforderungen an die Sondermaschine	80
10.3	Konstruktionszeichnung 'Anschlagblock'	81
10.4	Konstruktionszeichnung 'Greiferhalter'	82
10.5	Konstruktionszeichnung 'fallender Rahmen'	83
10.6	Konstruktionszeichnung 'Lagerhalter'	84

Tabellenverzeichnis

4.1	Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen	30
5.1	Nutzwertanalyse der Konzepte A,B und C	37
5.2	Aus Tabelle (5.1) errechnete Nutzwerte	37
5.3	Bewertung der Sensorkonzepte	41
7.1	Ergebnisse der Testreihe	72
7.2	Ermittelte Leistungsparameter	72

Abkürzungsverzeichnis

SPS speicherprogrammierbare Steuerung

FSM Finite State Machine

IO Input/Output

NC Numerical Control

TOF Time Of Flight

HMI Human Machine Interface

Glossar

Symbol	Beschreibung	Einheit
F_{HR}	Haftreibungskraft	N
μ_{HR}	Haftreibungskoeffizient	—
F_N	Normalkraft	N
F_{GR}	Gleitreibungskraft	N
μ_{GR}	Gleitreibungskoeffizient	—
F_{RR}	Rollreibungskraft	N
μ_{RR}	Rollreibungskoeffizient	—
p	Druck	N/m^2
p_N	Normaldruck	N/m^2
t_p	Evakuierungszeit	s
V_V	Volumen der Evakuierungsvorrichtung	mm^3
S_{eff}	Saugleistung der Evakuierungsvorrichtung	l/min
F_T	Trägheitskraft	N
m	bewegte Masse	kg
F_W	Luftwiderstandskraft	N
c_W	Luftwiderstandsbeiwert	—
A_W	Wirkfläche des Strömungswiderstandes	mm^2
F_A	dynamischer Auftrieb	N
c_A	dynamischer Auftriebsbeiwert	—
A_A	Wirkfläche des dynamischen Auftriebs	m^2
a	Beschleunigung der Masse	m/s^2
λ	Massenträgheitsverhältnis	—
J_L	Trägheitsmoment der Last	$kg \cdot m^2$
J_M	Rotormassenträgheit	$kg \cdot m^2$
s	zurückgelegte Strecke pro Antriebswellenumdrehung	mm

1 Einführung

Verschiedene Einflussfaktoren wie der demografische Wandel, der wirtschaftliche Druck zur Effizienzsteigerung und neue technische Möglichkeiten sorgen für eine zunehmende Nachfrage nach Automatisierungslösungen. Dies gilt auch in Bereichen abseits der klassischen Schlüsselindustrien wie bspw. der Automobilindustrie. Diese Nachfrage betrifft auch die Entwicklung von Sondermaschinen für Spezialanwendungen, die bisher nur einen geringen Automatisierungsgrad aufwiesen. Bei einem lokalen Veranstalter von Indoor-Live-Rollenspielen wird täglich eine große Anzahl von Spielkarten sortiert und an die Spielenden ausgegeben [1]. Bei der Tätigkeit des Sortierens handelt es sich um eine anstrengende und monotone Tätigkeit, welche die Kapazitäten der Mitarbeiter bindet und somit deren verfügbare Zeit für andere Serviceleistungen reduziert. Daher soll eine geeignete Automatisierungslösung gefunden werden, die sich in die bestehenden Prozesse eingliedert. Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Sondermaschine, die für die Sortierung von Spielkarten eingesetzt werden kann.

1.1 Problemstellung

Die Handhabung von Spielkarten oder Flachgut im Allgemeinen stellt in der Automatisierungstechnik eine besondere Herausforderung dar. Etablierte Greifsysteme, die Form- oder Kraftschlüsse [2] verwenden, um Werkstücke zu handhaben, können aufgrund der Geometrie von Flachgut nur bedingt verwendet werden. Aus diesem Grund werden meist Reibrollen verwendet, die durch Reibung ihre Drehbewegung in eine translatorische Vorschubbewegung übertragen [3]. Die zu sortierenden Spielkarten befinden sich in einem stark unterschiedlich bespielten Zustand und weisen deshalb variierende Oberflächeneigenschaften auf. Für eine sichere Vereinzelung muss die Maschine mit dieser Variation des zu handhabenden Flachguts umgehen können. Je deutlicher sich diese voneinander unterscheiden, desto schwieriger ist die Handhabung des Flachguts. Bei dem geforderten Prozess werden die Spielkarten in 'sortenreinen' Stapeln zur Verfügung gestellt und sollen

derart sortiert werden, dass sich ein Spielkartenstapel mit einer homogenen Verteilung der einzelnen Spielkartentypen ergibt. Die sich hierbei ergebende Reihenfolge der Karten spielt für den Anwendungsfall keine Rolle, sie sollte sich jedoch im Verlauf des Prozesses durch Fehler bei der Vereinzelung der Karten nicht verändern.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung, Konstruktion und Programmierung einer Sondermaschine, mit der die händisch durchgeführte Sortierung von Spielkarten automatisiert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein zuverlässiges System konzipiert werden, welches die Spielkarten nach einem im Voraus definierten Muster sortiert. Die Entwicklung umfasst die mechanische Konstruktion, die Auswahl geeigneter Aktoren und Sensoren sowie die Implementierung einer Steuerungssoftware. Im Vordergrund stehen Aspekte wie die Prozessgeschwindigkeit und die Minimierung von Fehlern bei der Handhabung der Spielkarten. Abschließend soll ein funktionsfähiger Prototyp präsentiert und umfassend evaluiert werden.

1.3 Forschungsfragen

Forschungshypothese: Durch die Anwendung von geeigneten technischen Prinzipien und etablierten Konstruktionsmethoden lässt sich eine Sondermaschine entwickeln, die zuverlässig für die Sortierung von unterschiedlich beschaffenen Spielkarten eingesetzt werden kann. Hieraus lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

1. welche bereits existierenden Entwicklungen können verwendet werden, um geeignete Wirkprinzipien daraus abzuleiten?
2. welche technischen Wirkprinzipien sind für die Vereinzelung von unterschiedlich beschaffenen Spielkarten geeignet?
3. welche Konstruktionsmethoden können angewendet werden, um ein zuverlässiges und innovatives Produkt zu entwickeln?
4. wie können die gefundenen Teillösungen in einen funktionalen Zusammenhang gebracht werden?

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Struktur dieser Arbeit orientiert sich an den Schritten der Produktentwicklung, die für den Bau der Sondermaschine notwendig sind [4]. Zu Beginn dieser Arbeit werden zunächst die für das Verständnis notwendigen theoretischen Grundlagen erläutert. Dies bezieht sich auf die Grundfunktionen der Sondermaschine, die für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe notwendig sind. Im Anschluss daran wird der aktuelle Stand der Technik vorgestellt. Hierbei wird auf in Frage kommende Wirkprinzipien eingegangen sowie bereits existierende Produkte mit ähnlichen Funktionen vorgestellt. Zu Beginn der eigentlichen Entwicklung wird zunächst die zu automatisierende Tätigkeit und der gewünschte Prozessablauf ermittelt und mit den in der Automatisierung zur Verfügung stehenden Mitteln beschrieben. Die Anforderungen an die zu entwickelnde Sondermaschine werden im Anschluss daran aufgestellt. Diese werden abgeleitet aus einem Kundengespräch, einer Analyse der Arbeitsumgebung, dem Stand der Technik und sich daraus ergebenden Leistungsparametern vergleichbarer Sondermaschinen und den allgemein gültigen Anforderungen an Sondermaschinen. Auf Basis der Anforderungen und der zur Verfügung stehenden Wirkprinzipien vergleichbarer Sondermaschinen werden mehrere Konzepte entwickelt, die unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten der Sondermaschine widerspiegeln. Diese Konzepte werden hinsichtlich ihrer Machbarkeit, Eignung und der Erfüllung der Anforderungen evaluiert. Im Anschluss daran wird das geeignetste Konzept ausgewählt und zunächst in die wichtigsten Unterfunktionen unterteilt. Die grundlegendste Funktion wird zunächst als Prototyp konstruiert und das gewählte Wirkprinzip auf seine Funktionalität und Eignung für die Erfüllung der Anforderungen untersucht. Sollte sich das gewählte Konzept als nicht geeignet herausstellen, wird das gewählte Konzept überarbeitet oder ein anderes ausgewählt. Nach der Evaluierung der Grundfunktion werden die restlichen Funktionen der Sondermaschine separat voneinander konstruiert und getestet. Im Anschluss wird die gesamte Sondermaschine als Verbund der einzelnen Funktionen konstruiert und gefertigt. Die hierfür entwickelten Elemente wie das Greifsystem, User-Interface, Transport- und Lagersystem und die Auswahl der benötigten Linearachsen mit den dazugehörigen Motoren werden im Anschluss daran näher beschrieben. Im darauf folgenden Abschnitt wird das entwickelte Steuerungskonzept näher beschrieben. Das Steuerungskonzept wird mit Hilfe von einem Klassen- und einem Zustandsübergangsdiagramm beschrieben. Hierbei wird sowohl auf die implementierte Logik eingegangen als auch auf die Erfüllung der Anforderungen. Das letzte Kapitel der Entwicklungsbeschreibung befasst sich mit der Entwicklung eines Sensorkonzeptes. Hierfür werden erneut mehrere Konzepte entwickelt und anschließend in ihrer Eignung und Erfüllung der An-

forderungen evaluiert. Die Wahl des am besten geeigneten Konzepts wird anhand einer Nutzwertanalyse und einer kritischen Betrachtung der Konzepte in Bezug auf die Anforderungen durchgeführt. Im Anschluss an die Beschreibung des Entwicklungsprozesses folgt die Beschreibung aller durchgeführten Tests und deren Auswertungen. Üblicherweise werden Testdurchführung und Testauswertung getrennt voneinander betrachtet. Auf Grund der großen Anzahl an durchgeführten Tests werden in dieser Ausarbeitung die Tests einzeln betrachtet, mit direkt anschließender Auswertung und Schlussfolgerungen, die auf Basis des jeweiligen Tests aufgestellt werden können. Im abschließenden Fazit werden die für den Bau der Sondermaschine notwendigen Schritte zusammengefasst. Es wird evaluiert, ob es im Rahmen dieser Arbeit gelungen ist, eine Sondermaschine zu konstruieren und zu entwickeln, die dazu in der Lage ist, Spielkarten in unterschiedlichem Abnutzungszustand zu sortieren und dabei den formulierten Anforderungen zu genügen.

2 Theoretische Grundlagen

Die zu entwickelnde Maschine muss für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe mindestens zwei grundlegende Funktionen erfüllen. Die Sondermaschine muss in der Lage sein, die Spielkarten zu vereinzeln und die vereinzelteten Spielkarten zu transportieren und zu speichern. Zur Vereinzelung müssen jedoch zunächst die zwischen den Karten wirkenden Adhäsions- und Anhangskräfte überwunden werden. Dieses Kapitel erläutert die physikalischen Grundlagen, um ein besseres Verständnis der Entwicklung zu gewährleisten.

2.1 Physikalische Aspekte der Vereinzelung von Flachgut

Die Vereinzelung von Spielkarten stellt keine Tätigkeit dar, die hohe Bewusstseinsanforderungen an den Menschen stellt. Auf der motorischen Ebene handelt es sich jedoch um eine komplexe Tätigkeit. In den meisten Fällen wird der gesamte Kartenstapel dabei in der Hand gehalten und mit dem Daumen wird die oberste Karte seitlich vom Stapel abgeschoben. Gleichzeitig werden die unterliegenden Spielkarten des Stapels mit den anderen Fingern der Hand zurückgehalten, um so das Ablegen von nur einer Karte garantieren zu können. Die motorische Herausforderung bei der Handhabung liegt in den wirkenden Anhangskräften zwischen den Karten, die im folgenden Kapitel näher beleuchtet werden. Für die maschinelle Vereinzelung von Spielkarten muss ebenfalls eine Kraft auf die Spielkarte einwirken, die sie von den übrigen Spielkarten fortbewegt, während anhaftende Spielkarten zurückgehalten werden. Es finden sich hierfür im Allgemeinen zwei Wirkprinzipien. Die Vereinzelung mit Hilfe von Reibrollen über Friktion und die Verwendung von Vakuumgreifern. Im Folgenden werden die relevanten physikalischen Wirkmechanismen näher beschrieben.

2.1.1 Adhäsionskräfte

Befinden sich zwei Körper mit einer glatten Oberfläche in direktem Kontakt zueinander, so entstehen Adhäsionskräfte oder auch Anhangskräfte, die dem Trennen der beiden Körper entgegenwirken [5]. Diese Adhäsionskräfte ergeben sich aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Die Karten haften aufgrund von elektrostatischer Aufladung, Adhäsion durch Van-der-Waals-Kräfte, Unebenheiten oder Feuchtigkeit auf der Oberfläche und Luftdruckunterschieden von Ober- zu Unterseite der Karte [6]. Eine Van-der-Waals-Adhäsion kann zwischen Werkstoffen aller Art auftreten und ist daher die häufigste Ursache für Adhäsionskräfte [5]. Sie gehen zurück auf schwache, nicht-kovalente Wechselwirkungen zwischen Molekülen oder Atomen und können bei glatten Oberflächen mit geringem Kontaktabstand Adhäsionskräfte zwischen zwei unterschiedlichen Körpern hervorrufen. Da die Bindung stark von der Mikrostruktur der Oberfläche beeinflusst wird, ist eine Berechnung der Adhäsionskräfte für technische Kontakte kaum möglich [5]. Zur Bestimmung der Van-der-Waals-Kräfte wird meist ein experimenteller Ansatz verwendet, für den sehr präzise Messmethoden angewendet werden [7]. Eine exakte Bestimmung der Adhäsionskräfte ist für die durchzuführende Entwicklung nicht notwendig und wird daher quantitativ nicht genauer betrachtet. Diese Kräfte haben einen mehrfachen Einfluss auf die Vereinzelung, indem sie sowohl dem Abzug des Körpers entgegenwirken als auch weitere Körper an dem zu vereinzelnden Körper haften lassen. Man spricht in diesem Fall von einem Mehrfachabzug.

2.1.2 Reibung

Die Vereinzelung von Flachgut mittels Reibung ist eine gängige Strategie [3]. Es wird zwischen Haft-, Gleit- und Rollreibung unterschieden [8]. Solange das Flachgut nicht transportiert wird, tritt Haftreibung auf. Diese wird mit Gleichung 2.1 [8] beschrieben und ist abhängig von der Normalkraft F_N und der Haftreibungszahl μ_{HR} .

$$F_{HR} = \mu_{HR} \cdot F_N \quad (2.1)$$

Das Gleiten beschreibt eine Bewegung eines Körpers entlang der Oberfläche eines anderen Körpers. Hierbei wechseln die Kontaktpunkte kontinuierlich. Werden zwei Körper

gegeneinander gedrückt und gleiten gleichzeitig aneinander, so entsteht ebenfalls Gleitreibung [9]. Diese wird mit Gleichung 2.2 [8] beschrieben und ist ebenfalls abhängig von der Normalkraft F_N und in diesem Fall jedoch von der Gleitreibungszahl μ_{GR} .

$$F_{GR} = \mu_{GR} \cdot F_N \quad (2.2)$$

Rotiert einer der beiden Körper entlang der Oberfläche, wobei keine bis lediglich minimale Relativbewegung am Kontaktpunkt auftritt, so spricht man von Rollreibung [10]. Diese wird mit Gleichung 2.3 [8] beschrieben. Sie ist erneut abhängig von der Normalkraft F_N und der Rollreibungszahl μ_{RR} .

$$F_{RR} = \mu_{RR} \cdot F_N \quad (2.3)$$

Die Reibungszahlen μ_{HR} , μ_{GR} und μ_{RR} sind dimensionslose Koeffizienten, die den Widerstand gegen die verschiedenen Bewegungsarten zwischen zwei Körpern beschreiben [11]. Die Reibungszahlen sind von einer Vielzahl von Eigenschaften abhängig. Materialpaarung, Oberflächenbeschaffenheit, Geschwindigkeit, Kontaktfläche und Feuchtigkeit oder Schmierstoffe können die Reibungszahlen beeinflussen [12]. Die Haftreibungszahl beschreibt meist den größten Betrag, da für die Bewegung aus dem Stillstand zunächst die Mikrokontaktbindung zwischen den beiden Körpern überwunden werden muss. Die Gleitreibung hat meist einen geringeren Betrag als die Haftreibung, da bei einer gleitenden Bewegung lediglich Abriss und Scherkräfte wirken, die zu einer dauerhaften Materialverformung führen. Die Rollreibungszahl hat im Vergleich zu den anderen beiden Bewegungsarten den geringsten Betrag, da beim Rollen keine dauerhafte Oberflächenverformung auftritt.

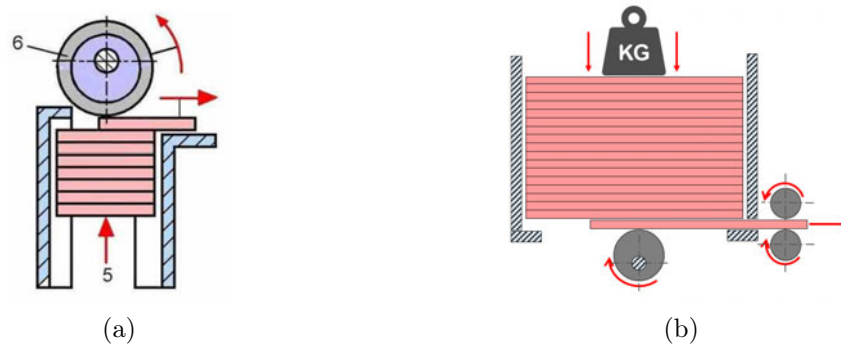


Abbildung 2.1: Vereinzelungsprinzipien durch Reibung mit a) exzentrischer Reibrolle von oben und b) exzentrischer Reibrolle von unten [3]

Eine gängige Form der Vereinzelung ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Bei dieser wird eine Reibkraft verwendet, um die für die Vereinzelung notwendige Vorschubbewegung zu erzeugen. Für diese Anwendungen existieren eine Vielzahl von mechanischen Anordnungen, die verwendet werden können. Diese unterscheiden sich vor allem in ihrer baulichen Komplexität, in der Verlässlichkeit der Vereinzelung und der Anzahl der benötigten Komponenten. Die Vereinzelung nach diesem Prinzip ist der händischen Vereinzelung nicht unähnlich. Eine exzentrisch gelagerte Reibrolle erzeugt mit Hilfe eines im Voraus justierten Anpressdrucks eine Reibkraft auf die Unterseite der Spielkarte. Aus dieser Reibkraft resultiert eine Vorschubbewegung, die die Karte in Drehrichtung des Reibrades bewegt, solange dieses in Kontakt mit der Karte ist. Sobald die zu vereinzelnde Karte einen bestimmten Vorschub erhalten hat, kommt diese in Eingriff mit zwei gegenläufigen Reibrollen, die das Vereinzeln von mehreren Spielkarten gleichzeitig verhindern sollen und eine weiterführende Vorschubbewegung der Spielkarte hervorrufen. Der für die Vorschubbewegung benötigte Anpressdruck der Rolle an die Karte wird im vorliegenden Fall durch das Eigengewicht des Stapels selbst erzeugt. Dieser Anpressdruck variiert mit der Anzahl der gestapelten Werkstücke. Entweder muss der Prozess trotz variierendem Anpressdruck dazu in der Lage sein, das Flachgut zu vereinzeln, oder es wird ein zusätzliches Gewicht von oben auf den Stapel gelegt. Ist die Gewichtskraft dieses zusätzlichen Gewichts um ein Vielfaches höher als die des gestapelten Flachguts, so ist der Anpressdruck auch bei abnehmender Stapelhöhe annähernd konstant. Alternativ dazu kann das Reibrad auch von oben herab an das Flachgut gepresst werden (Abbildung 2.1a). Hierbei wird der Stapel meist federnd gelagert und so ein konstanter Anpressdruck erzeugt. Die Anwendung beider Verfahren ist bei Anwendungen mit einer großen Anzahl von Werkstücken im Stapel schwierig, da das Eigengewicht des Stapels bereits sehr groß werden kann, oder

die Auslegung eines gefederten Magazins wird erschwert, da die Feder über einen großen Weg eine gleichbleibende Federkonstante aufweisen muss [13].

Bei dieser Form der Vereinzelung treten alle bisher erläuterten Formen der Reibung auf. Zu Beginn der Vereinzelung muss zunächst die Haftreibung zwischen Spielkarte und Reibrad, aber auch zwischen Spielkarte und Spielkartenstapel überwunden werden. Diese Haftreibung entsteht durch die bereits in Kapitel 2.1.1 erläuterten Adhäsionskräfte. In einem optimal justierten System entsteht Rollreibung zwischen Spielkarte und Reibrad und Gleitreibung zwischen Spielkarte und Spielkartenstapel. Damit die Spielkarte vom Stapel gelöst und transportiert werden kann, muss der Betrag der Rollreibung größer sein als die Haftreibung. Durch die Erhöhung der Normalkraft F_N der Reibrolle, also der Anpresskraft auf die Oberfläche der Spielkarte, kann die Rollreibungskraft nach Gleichung 2.3 erhöht werden. In einem nicht optimal justierten System entsteht zwischen Reibrad und Spielkarte ebenfalls eine Gleitreibung. Der auf der Spielkarte abrollende Umfang des Reibrades wird nicht vollständig in eine translatorische Vorschubbewegung der Spielkarte umgewandelt. Es entsteht eine Form von Schlupf in dem System. Diese Gleitreibung führt zu einer dauerhaften Oberflächenverformung der Spielkarten. Das System erfordert eine präzise Justage, bei der die Normalkraft F_N derart angepasst werden muss, dass keine Abnutzung der Spielkarten auftritt, aber eine Vereinzelung dennoch sicher gewährleistet werden kann.

2.1.3 Vakuum

Wird eine bestimmte Menge an Gas in einen Behälter gebracht, so verteilt sich diese Menge an Gas homogen im Behälter. Das Volumen V des Gases ist also abhängig vom Volumen des Behälters [14]. Das Gas im Behälter übt eine Kraft auf die Behälterwandung aus. Je größer die Wandung, desto größer die Kraft. Der Druck p beschreibt das Verhältnis von Kraft, die senkrecht auf die Behälterwandung ausgeübt wird, zur Oberfläche der Wandung und wird mit der Gleichung 2.4 [14] beschrieben.

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Unter Vakuum versteht man ein verdünntes Gas, dessen Druck oder Dichte in einem Behälter kleiner ist als der kleinste auf der Erdoberfläche vorkommende atmosphärische Druck ($300hPa$) [15]. Als Normdruck wurde der durchschnittliche Atmosphärendruck auf Meereshöhe definiert. Dies entspricht in etwa dem Druck der umgebenden Luft.

$$p_n = 101.325 \text{ Pa} \quad (2.5)$$

Bei vielen Anwendungen in der Vakuumtechnik (z.B. Hebevorrichtungen) wird der Druckunterschied vom erzeugten Vakuum gegenüber dem Umgebungsdruck verwendet, um eine Haltekraft zu erzeugen. Dieser Druckunterschied wird als relatives Vakuum bezeichnet und wird nach Gleichung 2.6 [14] berechnet.

$$\text{relatives Vakuum} = \frac{p_n - p_i}{p_n} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Die mit dem relativen Vakuum erzeugte Haltekraft wird nach Gleichung 6.3 [14] berechnet. Der Anwendungsfall für die Gleichung ist ein Vakuumgreifer mit kreisrundem Querschnitt, wie etwa ein Flachsauger, der üblicherweise für Hebevorrichtungen verwendet wird [16].

$$F_G = p_n - p_i \frac{(d_i^2 \pi)}{4} \quad (2.7)$$

Formel 6.3 zeigt, dass die erzeugte Haltekraft proportional ist zum Querschnitt der verwendeten Evakuierungsvorrichtung. Die Wahl eines geeigneten Querschnitts ist also elementar für die erfolgreiche Anwendung dieses Wirkprinzips und wird meist nach der Berechnung eines geeigneten Querschnitts empirisch verbessert.

Neben der benötigten Haltekraft spielt in der Automatisierungstechnik die Abspumpzeit eine wichtige Rolle. Sie beschreibt, in welcher Zeit ein Vakuumniveau bei gegebener Saugleistung des Vakuumerzeugers erreicht werden kann. Die Abspumpzeit ist entscheidend für die Zykluszeit der Handhabung, die von der Sondermaschine erreicht werden kann. Die Berechnung der Abspumpzeit wird mit Gleichung 2.8 [14] beschrieben. Diese setzt voraus, dass es sich bei der Evakuierungsvorrichtung um ein leakagefreies System handelt. Aufgrund von unvermeidlicher Rauigkeit und Verschmutzung der Oberflächen ist ein absolut leakagefreies System technisch jedoch nicht zu realisieren und die Berechnung ist lediglich als Annäherung zu betrachten.

$$t_p = \frac{V}{S_{eff}} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (2.8)$$

Die Vereinzelung mit Hilfe von Vakuumsaugern kann mit einer Vielzahl von mechanischen Anordnungen erfolgen, wobei in diesem Fall nicht das zugrunde liegende Wirkprinzip variiert, sondern die eingesetzten Komponenten. Bei der gängigsten Form der Vereinzelung mittels Vakuumbreifern werden aus einem Elastomer bestehende Vakuumsauger verwendet, die formschlüssig auf das Werkstück aufgesetzt werden. Mit einem geeigneten Vakuumerzeuger wird die Luft innerhalb des Vakuumsaugers entfernt und es entsteht eine Haltekraft, mit der das Werkstück meist nach oben hinweg vom Werkstücklager vereinzel werden kann. Diese Haltekraft ist proportional zum Querschnitt des Vakuumsaugers, der Güte der Formschlüssigkeit und dem erreichten Vakuumniveau und muss dem Prozess gegenüber angepasst sein.

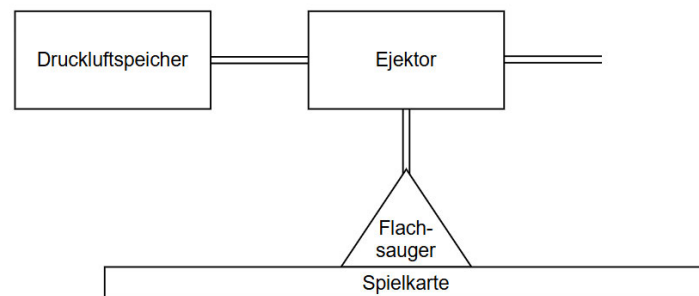


Abbildung 2.2: Vereinzelung mittels Flachsauger

Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Aufbau einer Evakuierungsvorrichtung zum Vereinzeln von Flachgut. Verwendet wird hier ein Flachsauger, ein Druckluftspeicher und ein Vakuumejektor. Ein Vakuumejektor (Abbildung 2.3) verwendet Druckluft, um das Vakuum zu erzeugen. Die Druckluft wird in den Ejektor gespeist und zunächst von einer Venturidüse verdichtet und beschleunigt. Unmittelbar hinter der Venturidüse kann sich die verdichtete Luft wieder ausdehnen. Die beschleunigte Druckluft 'zieht' die Luft aus der Evakuierungsvorrichtung mit sich und erzeugt ein Unterdruck. Dieser Unterdruck ist das für den Prozess nutzbare Vakuum. In einer Mischkammer wird die gespeiste Druckluft mit der Luft aus der Evakuierungsvorrichtung vermischt und über einen Schalldämpfer abgegeben [15].

Handelt es sich bei den Werkstücken um Papiererzeugnisse oder generell Werkstücke mit einem geringen Gewicht im Verhältnis zur Oberfläche der Auflagefläche und die Werkstücke werden orthogonal nach oben hinweg vereinzel, so benötigt der Prozess ebenfalls weitere bauliche Maßnahmen, um das Vereinzeln von nur einem Werkstück gewährleisten

zu können. Im vorliegenden Fall entstehen zwischen den einzelnen Karten eines Kartensapels Adhäsionskräfte, die beim Vereinzeln dafür sorgen, dass weitere Karten an dem zu handhabenden Werkstück haften.

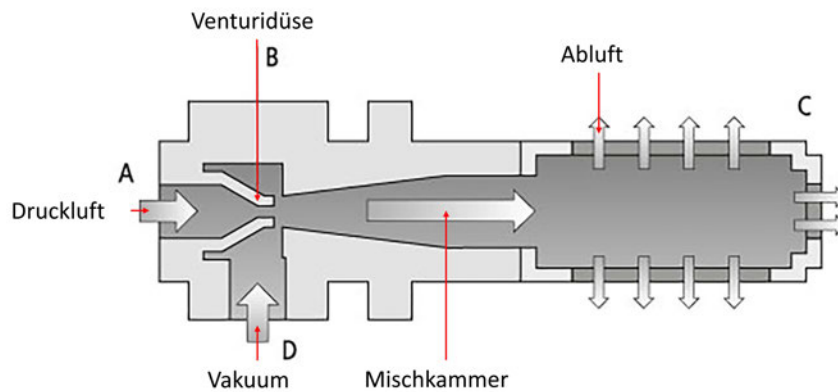


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip eines Vakuumejektors mit Venturidüse [15]

2.2 Physikalische Aspekte des Transports von Flachgut

Die physikalischen Aspekte beim Transport von Flachgut sind abhängig vom verwendeten Wirkprinzip. Diese werden im Kapitel 3.2 näher erläutert. Werden für den Transport Reibräder verwendet, spielen die gleichen zugrunde gelegten physikalischen Aspekte eine Rolle, die auch bereits bei der Vereinzelnung in Kapitel 2.1 betrachtet wurden. Haft- und Gleitreibung spielen auch hier eine zentrale Rolle, wobei sich der Transport von Flachgut vorwiegend in der zu überwindenden Distanz, der erreichten Geschwindigkeit und der benötigten Beschleunigung unterscheidet. Wird das Flachgut jedoch aufliegend auf einem Förderband transportiert, so ist das Verhältnis von Haftreibung und Trägheitskraft beim Beschleunigen des Körpers zu betrachten. Erfährt ein Körper auf einem Transportband eine zu hohe Beschleunigung, so kommt es zum Schlupf zwischen Körper und Oberfläche des Transportbandes. Für den erfolgreichen Transport muss also die Haftkraft (Formel 2.1) zwischen Körper und Oberfläche größer sein als die Kraft, die der Körper beim Beschleunigen erfährt. Gleichung 2.9 beschreibt dieses Verhältnis.

$$F_{HR} > F_T = \mu_{HR} \cdot F_N > m \cdot a \quad (2.9)$$

Beim Beschleunigen erfährt der Körper ebenfalls eine Kraft F_L , die den Luftwiderstand des bewegten Körpers beschreibt. Diese Kraft richtet sich nach Gleichung 2.10 [17]. Der Luftwiderstand ist abhängig von der Fläche A_W , die orthogonal zur Bewegungsrichtung des Körpers ist. Da Flachgut jedoch meist auf seiner größten Fläche liegend transportiert wird, kann der Luftwiderstand vernachlässigt werden.

$$F_W = c_W \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot A_W \cdot v^2 \quad (2.10)$$

Aufgrund von Verformungen und der Oberflächenrauheit des Flachguts entsteht meist ein Spalt zwischen der Auflagefläche und dem Förderband. Die beim Transport auf den Körper einwirkenden Luftströmungen sorgen für einen Luftdruckunterschied zwischen Ober- und Unterseite des Flachguts. Wenn der Körper mit zu hoher Geschwindigkeit transportiert wird, reicht dieser Luftdruckunterschied aus, um das Flachgut ähnlich wie eine Tragfläche vom Förderband ‘abheben’ zu lassen.

$$F_A = c_A \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot A_A \cdot v^2 \quad (2.11)$$

Der dynamische Auftrieb, der hierbei erzeugt wird, lässt sich mit Gleichung 2.11 [18] berechnen. Die Referenzfläche A_A bezieht sich hier auf die Auftriebsfläche (Unterseite der Spielkarte) und nicht wie in Gleichung 2.10 auf die Querschnittsfläche in Strömungsrichtung. Da die Referenzfläche im vorliegenden Fall jedoch nur der verformte Teil der Spielkartenoberfläche ist, lässt sich der dynamische Auftrieb nicht exakt ermitteln. Gängige konstruktive Maßnahmen, diesen Effekt zu verhindern, sind entweder Niederhalter, zusätzliche Reibrollen oberhalb der zu transportierenden Werkstücke oder Vakuumförderbänder, in deren Innerem ein Vakuum erzeugt wird, welches die Werkstücke beim Transport am Förderband fixiert [19].

2.3 Auswahl geeigneter Motoren

Für die exakte Auslegung eines Motors ist die genaue Kenntnis der Prozessparameter erforderlich. Viele dieser Parameter, wie etwa die Beschleunigung oder die Geschwindigkeit,

können jedoch erst nach dem Bau der Sondermaschine ermittelt werden. Im Sondermaschinenbau wird darum üblicherweise zunächst eine überschlägige Berechnung der Eignung nach [20] durchgeführt. Für die überschlägige Berechnung wird Gleichung 2.13 [20] verwendet. Dieser Ansatz verwendet für die Auslegung eines Motors die Betrachtung des Verhältnisses zwischen der Trägheit der bewegten Masse und der Rotormassenträgheit.

$$\lambda = \frac{J_L}{J_M} \quad (2.12)$$

Dieses Verhältnis wird als λ bezeichnet und muss den jeweiligen Prozessanforderungen entsprechen. Das Trägheitsmoment beschreibt die Trägheit eines starren Körpers gegenüber einer Änderung seiner Winkelgeschwindigkeit bei der Drehung um eine gegebene Achse [21]. Die Rotormassenträgheit des betrachteten Motors findet sich meist in seinem Datenblatt. Bei der vorliegenden Kinematik wird die Masse translatorisch bewegt mit Hilfe eines Antriebsriemens oder einer Spindel. Für die Auslegung über das Massenträgheitsverhältnis muss zunächst ein Ersatzträgheitsmoment der bewegten Masse berechnet werden. Dies geschieht nach Formel 2.13 [20].

$$J_L = m \cdot \left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 \quad (2.13)$$

Die Variable s beschreibt die Strecke, die die bewegte Masse bei einer Umdrehung der Antriebswelle zurücklegt. Gleichung 2.13 bezieht sich auf den Antrieb der Achse ohne die Verwendung eines Getriebes. Für die Auslegung des Motors für den Antrieb einer Linearkinematik mit Spindelantrieb [22] wird nach [20] ein Wert von $3 < \lambda < 10$ und für eine Linearkinematik mit Riemenantrieb ein Wert von *mit* $3 < \lambda < 15$ empfohlen.

2.4 Konstruktionssystematik

Unter Produktentwicklung versteht man die Erarbeitung neuer Lösungen oder im Fall des Sondermaschinenbaus auch häufig die Anwendung bereits existierender Lösungen in neuem Kontext oder zur Lösung ähnlicher Probleme. Die Produktentwicklung ist ein Prozess bestehend aus einer logischen und einer kreativen Komponente und ist somit mehr als nur die Lösung eines Problems [23]. Die Grundlagen der methodischen Entwicklung aller Arten von technischen Produkten und Systemen werden in [24] definiert. Die opportunistische Arbeitstechnik beruht auf Erfahrungen und Intuition und ist gut geeignet, um

schnelle und effektive Lösungen zu finden. Dieses Vorgehen bedingt jedoch eine geringere Komplexität der Problemstellung. Der Ansatz basiert auf Erfahrung und es ist darüber hinaus nur bedingt möglich, innovative Lösungen zu einem Problem zu entwickeln. Für die Lösung von komplexeren Problemstellungen bietet sich der Einsatz von etablierten Konstruktionsmethoden an [4]. Diese sind förderlich für den Produktentwicklungsprozess, da sie sowohl das kreative als auch das logische Denken unterstützen. Man unterscheidet zwischen intuitivem (opportunistisch) und diskursivem Denken (Anwendung der Vorgehensstrategien). Diese Konstruktionsmethodik ist mehr als Heuristik anstelle von starren Regeln zu verstehen und sollte stets an den Kontext angepasst werden, um so ein Höchstmaß an Nutzen zu ermöglichen und nicht den Entwicklungsprozess zu hemmen. Die wichtigste, in dieser Arbeit angewendete Vorgehensstrategie ist die Dekomposition komplexer Probleme. Das Verfahren wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Hierbei wird ein Problem zunächst in kleinere Teilprobleme zerlegt und analysiert. Für diese Teilprobleme werden isolierte Teillösungen entwickelt und anschließend unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten in die Gesamtlösung integriert. Diese Unterteilung des Gesamtproblems hat unter anderem den Vorteil, dass weniger komplexe Teilprobleme zunächst mit dem intuitiven Ansatz gelöst werden können.

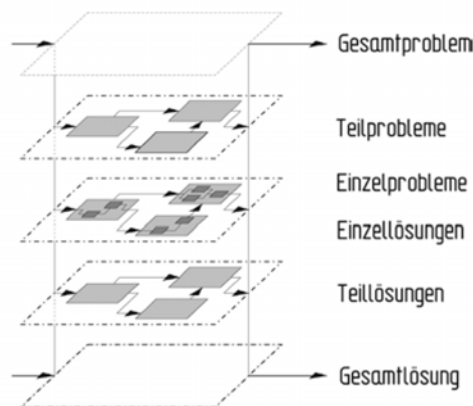


Abbildung 2.4: Dekomposition komplexer Probleme [4]

Eine weitere Vorgehensstrategie, die in dieser Arbeit Anwendung gefunden hat, ist die Divergenz und Konvergenz. Hierbei werden ausgehend von der Problemstellung zunächst eine Vielzahl von Zwischenlösungen erarbeitet. Hierbei werden mehrere Iterationen durchlaufen und so schrittweise alternative Lösungen erarbeitet und so das Problem- und Lösungsverständnis erweitert. Das Schaffen von alternativen Lösungen wird auch als Erwei-

terung des Suchraumes bezeichnet (Divergenz). Im Anschluss an die Schaffung des Suchraumes folgt die Konkretisierung von Lösungsvorschlägen (Konvergenz). Diese erfolgt auf Basis einer hinreichenden Analyse der Lösungsvorschläge. Bei der Dimensionierung des Suchraumes ist eine ausgewogene Gestaltung zu beachten. Zu viele Alternativen binden zu viele Ressourcen und erschweren die Konvergenz. Ein zu kleiner Suchraum spiegelt meist die Vorfixierung auf bestimmte Lösungsstrategien wider und ist für die innovative Lösungssuche nicht divergent genug.

Kreatives Arbeiten wird oftmals durch eine Vorfestlegung auf existierende Lösungen erschwert. Aus diesem Grund bietet es sich an, das Problem zunächst zu abstrahieren. Abbildung 2.5 zeigt den Verlauf der Produktentwicklung in Bezug auf den empfohlenen Grad der Abstraktion. Eine Vorfixierung auf eine Lösungsstrategie wird vermieden, indem das Produkt nach der eigentlichen Idee vollständig abstrahiert wird, um es dann im Verlauf der Entwicklung stetig zu konkretisieren.

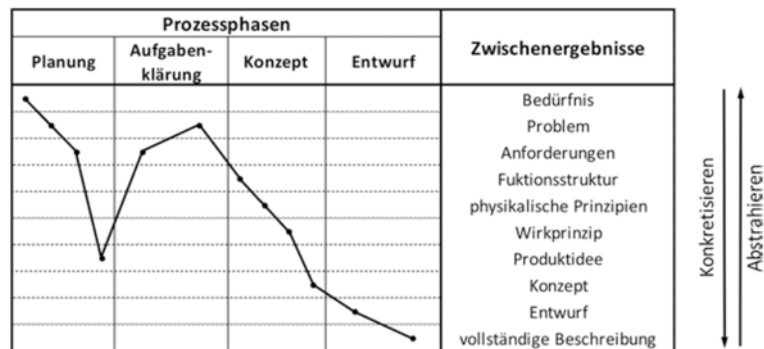


Abbildung 2.5: Abstrahierende Vorgehensweise in der Produktentwicklung [4]

3 Stand der Technik

Im Sondermaschinenbau, oder bei der Entwicklung von Maschinen generell, ist es von entscheidender Bedeutung, zunächst den Stand der Technik zu ermitteln, der im Rahmen dieses Kapitels näher beleuchtet wird. Diese Produkt- und Patentrecherche ermöglicht es, bereits vorhandene Lösungen und Technologien zu ermitteln, die für den vorliegenden Anwendungsfall direkt verwendet oder als Grundlage für Weiterentwicklungen dienen können. Dieses Vorgehen ermöglicht, dass die zu entwickelnde Sondermaschine den aktuellen Industriestandards entsprechen kann und minimiert die Kosten der Entwicklung durch die Vermeidung von unnötiger Entwicklungszeit. Eine gängige Vorgehensweise hierbei ist die Betrachtung bereits existierender Produkte, die einem ähnlichen Zweck dienen oder die gleichen elementaren Grundfunktionen bieten wie jene, die eine zu entwickelnde Sondermaschine voraussichtlich erfüllen muss. Ähnliche Maschinen oder Wirkprinzipien finden sich in der automatisierten Handhabung von Briefen, in Druckern oder industriellen Automatisierungslösungen für den Druck oder sogar direkt in der Spielkartenindustrie [25, 26].

3.1 Vereinzelungsprinzipien

Es existiert eine Vielzahl von mechanischen Wirkprinzipien, die das Vereinzeln von Flachgut ermöglichen. Im Folgenden werden die technischen Möglichkeiten betrachtet und die in Frage kommenden Wirkprinzipien evaluiert.

Reibanleger

Abbildung 3.1 zeigt den mechanischen Aufbau eines Reibanlegers. Dieses Prinzip wird vorwiegend im Druckereiwesen angewendet und kann für flache Objekte wie etwa Briefumschläge oder Kartons verwendet werden. Das Prinzip basiert auf dem physikalischen Prinzip der Haftreibung (Kapitel 2.1). Die für die Vereinzelung notwendige Friktion entsteht hier jedoch über einen Flachriemen, auf den das unterste Objekt des Magazins gedrückt wird. Das Magazin ist schräg angeordnet, um das Befüllen des Magazins zu erleichtern. Vorteil dieser Anordnung ist der hohe Durchsatz von bis zu 800 Stück pro Minute [3].

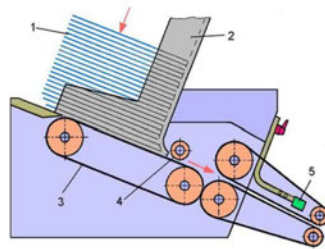


Abbildung 3.1: Vereinzelung mittels Reibanleger [3]

Kartenschieber

Abbildung 3.2 zeigt eine weit verbreitete Methode, flache Objekte zu vereinzeln. Hierbei wird ein Schieber pneumatisch unter das Magazin gedrückt. Dieser schiebt dann das unterste Objekt des Stapels heraus, bis dieses von zwei Auszugswalzen weitergeführt wird. Darüber hinaus sind zwei Bürstenwalzen zu sehen. Diese erzeugen einen definierten Abwärtsdruck des Stapels und können diesen durch eine Umkehr der Drehrichtung zum Zeitpunkt der Rückführung des Schiebers reduzieren.

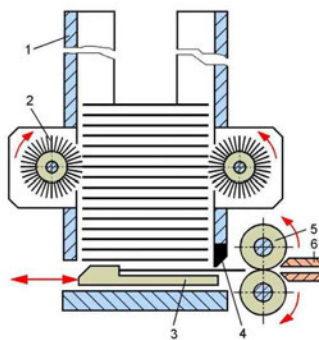


Abbildung 3.2: Vereinzelung mittels Kartenschieber [3]

Zangen-Saug-Anleger

Die in Abbildung 3.3 dargestellten Vereinzelungsprinzipien arbeiten beide nach einem ähnlichen Prinzip. Hier geschieht die Vereinzelung zweiphasig, das heißt, es werden zwei Handhabungsschritte für die Vereinzelung eines Werkstücks benötigt. Im ersten Schritt wird ein Vakuumsauger verwendet, um das Werkstück außer-mittig zu greifen. Der Vakuumsauger wird gekippt und biegt somit das Werkstück entlang der Kippachse. Eventuelle Mehrfachabzüge bleiben dabei im Magazin zurück. Der zweite Schritt der Vereinzelung geschieht entweder mit einem kurvengesteuerten Greifer (Abbildung 3.3b) oder mit einem Klemmbackengreifer (Abbildung 3.3a). Die gegriffene Karte wird an den Ablageort transportiert und der Vakuumsauger kippt in seine Ausgangsstellung zurück.

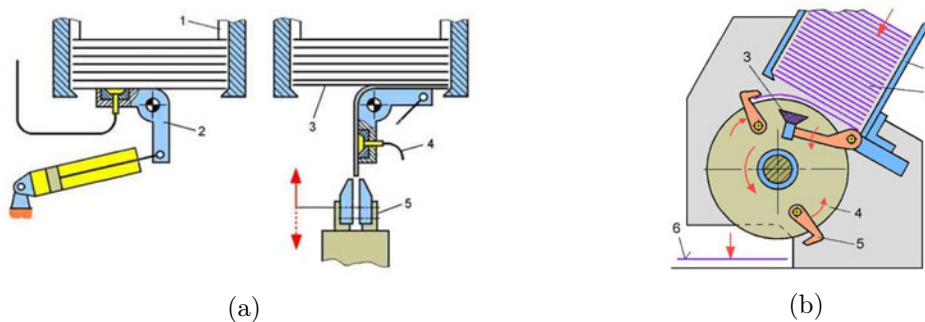


Abbildung 3.3: Vereinzelung mittels- a) Klemm-Saug-Greifer b) Zangen-Saug-Anleger [3]

3.2 Transportprinzipien

Reibrollen

Bei dem in Abbildung 3.4 dargestellten Transportprinzip handelt es sich um die Baugruppe für den Spielkartentransport einer im Folgenden vorgestellten Maschine. Bei diesem Prinzip werden mehrere parallel zueinander ausgerichtete Reibrollen verwendet, die über ein System aus Riemen angetrieben werden. Der Abstand der Reibrollen zueinander muss kleiner sein als die Breite der zu transportierenden Spielkarte. Die Achsen der Reibrollen sind justierbar, sodass sich aus dem Zusammenspiel von Anpressdruck und Reibkoeffizient der Rollen eine Vorschubbewegung in Drehrichtung der Rollen ergibt. Ein ähnliches Wirkprinzip findet sich auch zum Papiertransport in Druckern. Das Prinzip verhindert die bereits aufgezählten Probleme beim Transport von Flachgut durch eine ober- und unterseitige Führung der Spielkarten.



Abbildung 3.4: Transport mittels Reibrollen [27]

Vakuum-Förderband

Das in Abbildung 3.5 dargestellte Vakuumförderband wird vor allem in der Druck- und Papierindustrie verwendet. Im Inneren des Förderbandes befindet sich ein Vakuumsystem, welches durch einen mit Löchern versehenen Flachriemen Luft ansaugen kann. Liegt ein Werkstück auf dem Förderband, so wird dieses durch das erzeugte Vakuum an den Flachriemen 'herangezogen' und es entsteht ein Anpressdruck an das Förderband. Dieses Prinzip verhindert die bereits beschriebenen Probleme beim Transport von Flachgut mit hoher Dynamik. Das Prinzip wird vorwiegend in Anlagen mit hohem Durchsatz verwendet, wo Papier zum Transport eine hohe Beschleunigung und Geschwindigkeit erfährt.



Abbildung 3.5: Transport mittels Vakuumförderband [28]

Rutschen, Trichter und Rollenbahnen

Rutschen und Trichter finden vorwiegend im Bereich Materialtransport Anwendung. Dennoch werden sie auch im Sondermaschinenbau verwendet, da sie eine Methode für den Werkstücktransport bieten, die keinerlei Aktorik benötigt. Hierbei wird das Werkstück einzig durch seine eigene Gewichtskraft angetrieben und rutscht über ein schräg angeordnetes Flächenelement mit geringem Reibkoeffizienten. Über einen Pneumatikzylinder können Rutschen häufig in ihrer Orientierung verändert werden, was das Zuteilen in unterschiedliche Lager ermöglicht. Bei der Auslegung von Rutschen und Trichtern ist darauf zu achten, dass der Steigungswinkel an den Prozess und das zu transportierende Werkstück angepasst sein muss. Besonders Werkstücke mit einem geringen Eigengewicht benötigen steilere Rutschen und Trichter, da die Hangabtriebskraft proportional von dem Eigengewicht des Werkstücks abhängig ist.

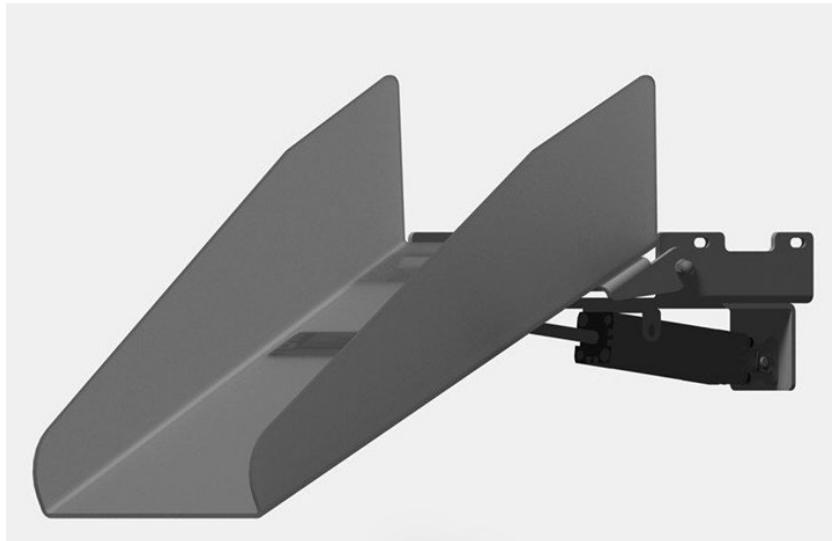


Abbildung 3.6: Transport mittels Rutsche [29]

Konische Reibrollen

Eine Lösung sowohl für den Transport als auch für die Vereinzelung von Flachgut stellt das in Abbildung 3.7 dargestellte Patent dar. Hier wird ähnlich wie bei einem Reibanleger ein Magazin mit stehendem Flachgut an eine Reibrolle angelegt. In diesem Fall ist die Reibrolle jedoch kein Flachriemen oder eine exzentrisch laufende Reibrolle, sondern ein konisch zulaufender Zylinder. Wenn der konische Zylinder entlang seiner Achse rotiert wird, entstehen aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser unterschiedliche Umlaufgeschwindigkeiten. Diese erzeugen bei dem in Reibkontakt gebrachten Flachgut eine Vorschubbewegung parallel zur Achsrichtung der Reibrolle. Diese Vorschubbewegung kann sowohl für die Vereinzelung als auch für den Weitertransport des Flachguts verwendet werden. Bei kurzen Distanzen tritt zunächst das sogenannte 'shingling' auf, bei dem die Werkstücke nicht vollständig vereinzel werden, sondern sich zunächst überlappen. Die Distanz der Werkstücke zueinander nimmt zu, je weiter sie mit Hilfe der konischen Reibrollen transportiert werden, da die Umlaufgeschwindigkeit der Reibrolle stetig zunimmt. In einem zweiten Handhabungsschritt wird das vereinzelte Flachgut mit einem Vakuumgreifer gegriffen und weitertransportiert. Das Prinzip wird hauptsächlich bei der Post zur Vereinzelung von Flachgut mit unterschiedlichsten geometrischen Eigenschaften (Briefe, Postkarten, etc.) verwendet.

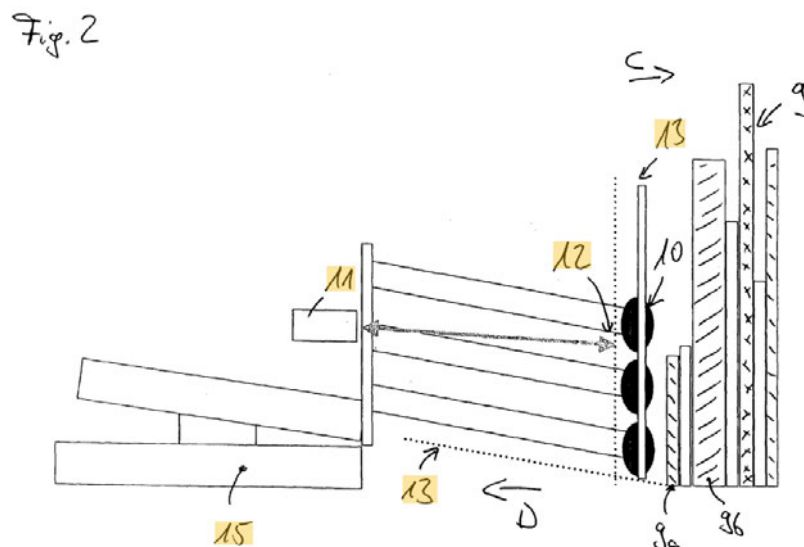


Abbildung 3.7: Transport mittels 'shingling' [30]

3.3 Vergleichbare Entwicklungen

Bridgesorter

Ein Beispiel für ein bereits existierendes Produkt ist der 'Bridgesorter' von 'Jannersten Förlag AB' (Abbildung 3.8). Bei dieser Maschine handelt es sich um eine Maschine für die automatisierte Sortierung von Bridgekarten. In einem Magazin werden alle Spielkarten in einem einzigen Stapel zugeführt. Die Maschine nutzt eine Kamera und Algorithmen der Bildverarbeitung, um den Wert der Karte zu erkennen und zuzuordnen. Mit Hilfe eines Reibrades wird die unterste Karte vereinzelt und über ein System aus mit Riemen angetriebenen Reibrädern transportiert. Die Maschine ist in der Lage, die Karte einem von vier möglichen Stapeln zuzuteilen, indem eine Klappe über dem jeweiligen Kartenstapel geöffnet wird, sodass das Hineinfallen der Spielkarte ermöglicht wird. Diese Maschine verfügt über eine einfache Bedienung und eine hohe Zykluszeit von 6-10 Karten in der Sekunde. Sie ist jedoch in ihrer Kapazität und der Fähigkeit, stark bespielte Spielkarten zu sortieren, begrenzt.



Abbildung 3.8: 'Bridgesorter' von 'Jannersten Förlag AB' [31]

PhyzBatch-9000

Der 'PhyzBatch-9000' von der Firma 'TCGMachines' ist ein weiteres Beispiel für eine automatisierte Sortierlösung für Spielkarten. Er verwendet exakt das gleiche Wirkprinzip wie der bereits erläuterte 'Bridesorter', ist jedoch aufgrund der größeren Bauweise in der Lage, 1750 Spielkarten in einem Zuführungsmagazin aufzunehmen und zu verarbeiten, was für das bedienende Personal einen geringeren Arbeitsaufwand bedeutet. Darüber hinaus verfügt er über insgesamt 14 mögliche Ablagestapel, die über einen Schlitten verfügen, der über Gewindegetriebe mit jeder abgelegten Karte gesenkt wird, um so eine konstante Fallhöhe für die Karten zu ermöglichen. Darüber hinaus verfügt die Maschine über eine intelligente Bildverarbeitung, die die erkannten Karten mit zur Verfügung stehenden Datenbanken abgleicht und diese dann nach den gewählten Metriken sortiert. So ist es z.B. möglich, Sammelkarten nach ihrem monetären Wert zu sortieren. Der Hersteller gibt für diese Maschine eine Zykluszeit von 60 Karten in der Minute an. Auch diese Maschine ist bedingt durch ihr Wirkprinzip nur begrenzt dazu in der Lage, stark bespielte Spielkarten zu sortieren. Darüber hinaus ist der Durchsatz nicht ausreichend, um die im folgenden Kapitel erläuterten Anforderungen zu erfüllen.



Abbildung 3.9: 'PhyzBatch-9000' von 'TCGMachines' [32]

Roca

Der 'Roca' Kartensortierer von der Firma 'TCGplayer' verwendet im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Maschinen ein anderes Wirkprinzip. Anstatt alle Karten in einem Magazin zuzuführen, werden sie hier zweidimensional aufgereihten Schächten zur Sortierung in die Maschine gegeben. Eine Portalkinematik fährt einen Greifer mit Kamera über die einzelnen Schächte, um die oberste Karte zu erkennen. Mit Hilfe eines Vakuumsaugers wird die oberste Karte gegriffen und nach oben hin vereinzelt. Hierbei wird sie gegen ein u-förmiges Bauelement gezogen, wodurch die Karte gebogen wird. Die Portalkinematik transportiert im Anschluss daran die Karte zu ihrem jeweiligen Ablageort. Die Maschine ist auf diese Weise in der Lage, 8 Karten in der Minute zu sortieren. Obwohl diese Maschine eine große Anzahl von Spielkarten ohne das Zutun eines Bedienenden verarbeiten kann, werden keine zusätzlichen Achsen für angetriebenen Kartenlager benötigt. Das macht diese Maschine in der Herstellung besonders kostengünstig.



Abbildung 3.10: 'Roca' von 'TCGplayer' [33]

Magic Sorter

Der 'Magic Sorter' von der Firma 'Fabbrica Binaria s.a.s' (Abbildung 3.11) ist eine ähnliche Sortiermaschine wie der 'Roca'. Auch hier werden die Karten in passiven Schächten zugeführt und eine Portalkinematik führt einen Vakuumgreifer von oben an die Kartenstapel heran, um diese mit einem u-förmigen Bauelement zu vereinzeln. In diesem Fall wird der Greifer jedoch mit einer zusätzlichen Achse auf den Kartenstapel gedrückt. Dieser Anpressdruck erzeugt zwischen Flachsauger und Spielkarte ein Vakuum, das zum Lösen der Karte mit einem Ventil wieder abgebaut werden muss. Die Sicherung gegen Mehrfachabzüge erfolgt ebenfalls über ein u-förmiges Bauelement, das in einem zusätzlichen Handhabungsschritt aktiv von oben auf die Karte gedrückt wird. Die Maschine hat eine Lagerkapazität von 1000-3000 Karten und in Abhängigkeit von den gewählten Sortierregeln eine Zykluszeit von 8 Karten in der Minute.



Abbildung 3.11: 'Magic Sorter' von 'Fabbrica Binaria s.a.s' [34]

4 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen an das zu entwickelnde System ergeben sich sowohl explizit aus den im Kundengespräch ermittelten technischen Leistungsparametern als auch implizit aus der Arbeitsumgebung der Maschine, welche in diesem Kapitel umfassend analysiert werden. Darüber hinaus werden eine Vielzahl der Anforderungen implizit aus dem gesamten Prozess abgeleitet. Dies bezieht sich sowohl auf die zu automatisierende Tätigkeit als auch auf die Eingliederung in den restlichen Betrieb.

4.1 Prozessbeschreibung

Für eine genaue Analyse der Anforderungen bzw. die Analyse der zu automatisierenden Tätigkeit ist es zunächst sinnvoll, den bisherigen Prozess zu betrachten und zu beschreiben. Der erste Schritt hierbei ist es, alle Handgriffe der Person zu betrachten, die die Tätigkeit durchführt. Die sortierende Person führt folgende Handgriffe durch:

1. Greifen eines sortenreinen Stapels
2. Vereinzeln der oberen Karte
3. Ablegen der Karten auf dem Nebentisch
4. Schritt 2-3 insgesamt 10x wiederholen
5. Zurücklegen der übrigen Karten im sortenreinen Stapel
6. Schritt 1-5 insgesamt 32x wiederholen
7. Zusammenfassen der sortierten Karten zu transportablen Stapeln (ca. 500 Karten)
8. Ablegen des zusammengefassten Stapels in der Kartenausgabe

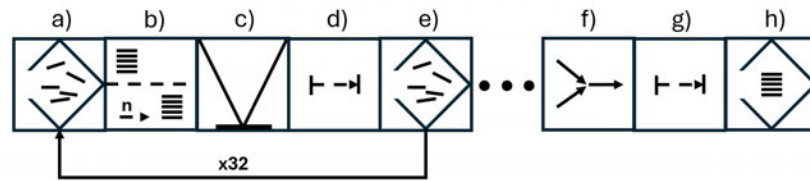


Abbildung 4.1: Prozessablauf dargestellt als Elementarfunktionen, nach [35]

Eine weitere Möglichkeit, Prozesse zu beschreiben, ist die Verwendung von Elementarfunktionen [35]. Diese beschreiben den Prozess als grundlegendes Prinzip und schaffen so eine Betrachtung außerhalb der aktorspezifischen Handhabungsmöglichkeiten. Die Beschreibung ist also zunächst lösungsneutral. Abbildung 4.1 zeigt den Prozess als Verkettung von Elementarfunktionen für die Sortierung der Spielkarten.

- a) Zu Beginn des Prozesses liegen die Karten in einem teilgeordneten Speicher (Kartenstapel) vor
- b) Im Anschluss daran wird die Karte von ihren Stapel vereinzelt und zu einer neuen Zielposition transportiert. Man spricht in diesem Fall von einer Zuteilung mit der Teilmenge eins
- c) Nach der Zuteilung folgt das Prüfen. Die zugeteilte Menge wird auf ihre Anzahl überprüft
- d) Ist die Anzahl korrekt, so wird die Karte zu ihren Zielort transportiert. Sie wird positioniert
- e) Hat die Karte ihren Zielort erreicht, so wird sie erneut in einem teilgeordneten Speicher gelagert
- f) Sind auf diese Weise alle Spielkarten in ihren zugehörigen Kartenstapeln gespeichert, so wird ein neuer Speicher durch eine Zusammenführung der einzelnen Speicher erstellt. Dieser ist in diesem Fall jedoch vollständig geordnet
- g) Der geordnete Speicher wird erneut positioniert und so zu seinem Zielort befördert
- h) Am Zielort angekommen werden die Karten bis zur weiteren Verwendung geordnet gespeichert

Aus der Analyse der zu automatisierenden Tätigkeit geht hervor, dass eine Vielzahl von Handgriffen notwendig ist, um die Spielkarten effizient sortieren zu können. Die Anzahl und Art der Handgriffe basiert auf den speziellen Fähigkeiten und Möglichkeiten des verwendeten Aktors (menschliche Hand) und kann daher bei der Umsetzung einer Automatisierungslösung stark variieren.

4.2 Anforderungsliste

Nr.	Name	Beschreibung	Wert
A1	Einbaumaße	Im Raum zur Verfügung stehender Platz	2700x800x3000mm
A2	Zykluszeit	Handhabungsdauer einer Spielkarte	0.6s
A3	Automatisierungslevel	Menge der händischen Bedienung	Level 4
A22	Kartengröße	Werkstückdimension	60x90x0.17mm
A26	Verschmutzung	Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke	staubig bis ölig
A27	Maßhaltigkeit	Abweichung von Nennmaßen	groß
A28	Mehrfachabzüge	Auftrittswahrscheinlichkeit von Mehrfachabzügen	0.1%
A29	veränderte Sortierreihenfolge	Auftrittswahrscheinlichkeit von veränderter Reihenfolge	5%
A30	Justierbarkeit	wie einfach lässt sich die Sondermaschine einstellen	mittel
A31	Verlässlichkeit	wie hoch ist die Ausfallwahrscheinlichkeit	gering

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen

Tabelle 4.1 zeigt eine Zusammenfassung der Anforderungen an die Maschine, die den größten Einfluss auf die Konstruktion haben. Eine vollständige Anforderungsliste findet sich im Anhang B.

4.3 Anforderungsbeschreibung

Den größten Einfluss auf die Konstruktion hat die Anforderung A2. Diese beschreibt die benötigte Taktzeit der Maschine und ergibt sich implizit aus der maximalen Anzahl der Spielenden und der Anzahl an Karten, die an die Spielenden pro Stunde ausgegeben werden. Aus einer Worst-Case-Betrachtung geht hervor, dass maximal 120 Spielende gleichzeitig teilnehmen können, die pro Stunde 20 Spielkarten erhalten. Hieraus ergibt sich eine Taktzeit von 0.6 s, die der Sondermaschine pro Karte zur Verfügung steht. Anforderung A3 beschreibt die benötigte Technisierungsstufe der Sondermaschine nach [35]. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus den kundenspezifischen Anforderungen eine Technisierungsstufe von 4, da sich diese am besten in die umgebenden Arbeitsprozesse der Sondermaschine einbinden lassen. Das Zuteilen und Eingeben von Karten erfolgt in dieser Technisierungsstufe automatisch, während das Bestücken der Magazine weiterhin händisch erfolgt. Dies ermöglicht eine Bedienung der Sondermaschinen, die unabhängig von deren Taktzeit ist, ohne dass weitere Peripherie für das Zubringen von Spielkarten benötigt wird. Die Anforderungen A22-24 haben ebenfalls einen großen Einfluss auf die Konstruktion der Sondermaschine, da sie die geometrischen Eigenschaften des zu handhabenden Flachguts beschreiben. Diese Anforderungen definieren die Größe aller Kartenlager, Transportbänder, Greifer und sonstigen Traversen. Der Grad der Verschmutzung der Spielkarten wird in der Anforderung A26 beschrieben. Dieser erschwert die Handhabung der Spielkarten mit einer Vielzahl der etablierten Handhabungstechnologien und beschreibt damit auch gleichzeitig den größten Anspruch an die zu entwickelnde Sondermaschine. Da die Maschine sowohl für unbespielte als auch für gebrauchte Spielkarten verwendet werden soll, bildet der Grad der Verschmutzung ein breites Spektrum ab. Die Oberflächen der unbespielten Spielkarten sind häufig mit feinem Papierstaub vom Zuschnitt der Karten versehen, während mehrfach bespielte Karten eher eine fettige/ölige Oberfläche aufweisen. Anforderung A27 beschreibt die Maßhaltigkeit der bespielten Karten. In normaler Benutzung werden die Spielkarten bei einer Vielzahl von Spielhandlungen parallel ihrer Längsseite gebogen. Diese Biegung verformt die Spielkarten häufig plastisch, was ihre effektive Höhe beeinflusst. Unterschiedlich stark gebogene Spielkarten stellen also ein großes Spektrum an Dimensionen dar, mit denen die Sondermaschine umgehen können muss. Dies erschwert vorwiegend die Handhabungsschritte, bei denen die Höhe oder Dicke des Flachguts präzise justiert werden muss. Anforderung A28 beschreibt die Häufigkeit von Mehrfachabzügen. Bei diesen haftet eine oder mehrere zusätzliche Spielkarten an der zu vereinzelnenden Spielkarte. Dies führt dazu, dass im resultierenden Stapel der Spielkarten mehrfach hintereinander der gleiche Kartentyp auftritt. Ziel der Sondermaschine

ist es, einen Stapel mit möglichst homogener Spielkartentypverteilung zu erstellen. Diese Anforderung beschreibt also direkt die Güte und Funktionalität der Automatisierungslösung. Anforderung A29 ist ebenfalls eine Auftrittswahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlertyps. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die sortierten Spielkarten zwar in ihrer Verteilung und Häufigkeit dem gewünschten Prozess entsprechen, ihre Reihenfolge weicht aber von der durch den Prozess vorgegebenen Reihenfolge ab. Das Einhalten einer bestimmten Reihenfolge wird nicht vom Kunden gefordert, dennoch beschreibt das Einhalten der definierten Reihenfolge ebenfalls die Güte und Verlässlichkeit der Automatisierungslösung. Die Anforderung 30 beschreibt die Justierbarkeit der Sondermaschine. Darunter wird nicht nur verstanden, wie einfach es ist, die notwendigen Justagetätigkeiten wie etwa das Einstellen eines korrekten Anpressdrucks vorzunehmen, sondern auch, an wie vielen Stellen dies überhaupt notwendig ist. Bedingt die konturierte Sondermaschine, dass eine Vielzahl von Funktionen zunächst genau justiert werden müssen, so gilt diese Anforderung als nicht erfüllt. Anforderung 31 ist die allgemeine Verlässlichkeit der Sondermaschine. Diese sinkt z.B. bei der Verwendung von komplexen und empfindlichen Komponenten. Der Begriff Verlässlichkeit wird hier verwendet, um Attribute wie technische Verlässlichkeit, Wiederholgenauigkeit, Langlebigkeit, Wartungsfreundlichkeit und Prozesssicherheit zusammenzufassen. Unter der technischen Verlässlichkeit wird die Fähigkeit verstanden, die spezifizierten Funktionen, bei gleichzeitiger Minimierung von Ausfällen, zu erfüllen.

5 Konzeption

In diesem Kapitel wird die grundlegende Konzeption der Sondermaschine vorgestellt. Diese Konzeption stellt die Grundlage für die darauf folgenden Entwicklungs- und Konstruktionsphasen der einzelnen Komponenten dar und basiert auf den beschriebenen Anforderungen an die zu entwickelnde Sondermaschine. Für die Konzeptfindung werden zunächst aus den bereits vorgestellten Entwicklungen infrage kommende Wirkprinzipien abgeleitet und hinsichtlich der technischen Anforderungen analysiert. Auf Basis dieser Teillösungen werden mehrere Gesamtlösungen entwickelt und das für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe geeignetste Prinzip ausgewählt.

5.1 Mögliche Lösungswege

Die Auswahl eines möglichen Lösungskonzepts erfordert zunächst die Betrachtung aller Lösungsmöglichkeiten. Hierzu bietet sich die Verwendung eines oder mehrerer morphologischer Kästen an [36]. Abbildung 5.1 zeigt alle für die Entwicklung der Sondermaschine in Frage kommenden Wirkprinzipien. Aus der Kombination aller Wirkprinzipien lässt sich eine Vielzahl von möglichen Lösungswegen ableiten, von denen jedoch nur eine begrenzte Anzahl tatsächlich für die Erfüllung der Anforderungen geeignet ist. Aus einer kritischen Betrachtung der Anforderungen heraus werden drei mögliche Konzepte entwickelt, diese im Anschluss mit Hilfe einer Nutzwertanalyse gegenübergestellt und das geeignetste Konzept ausgewählt.

ver einzeln	Reibrad von unten	Vakuumgreifer	Reibrad von oben	konische Reibrolle	Druckstift	
trennen	aktiver Gegenlauf	Rutsche	biegen	konische Reibrolle	abstreifen	Spalt
lagern (unsortiert)	einreihig vertikal	einreihig horizontal	mehrrähig vertikal	mehrrähig horizontal	Schachbrett	rund
schützen gegen Eingriff	Klappdeckel	Einschub	Schiebedeckel	Drehdeckel		
lagern (sortiert)	gebunden (Banderole)	gestapelt	Einzelmagazine			
transportieren	Förderband	Förderrollen	mit Greifer	Rutsche	Trichter	

Abbildung 5.1: Morphologischer Kasten der Wirkprinzipien,
Konzept A(rot), Konzept B(grün), Konzept C(gelb)

5.1.1 Konzept A

Konzept A beschreibt die Verwendung eines Vakuumgreifsystems als Vereinzelungsstrategie. Als Sicherungsstrategie gegen Mehrfachabzüge werden die Karten mittig entlang ihrer kürzeren Seite gebogen. Das Biegen der gegriffenen Karte reduziert die Kontaktfläche dieser mit der evtl. darunter haftenden Karte und ermöglicht es so, die beiden Karten voneinander zu trennen. Die Karten werden auf einem Förderband abgelegt und in einem Magazin geordnet gespeichert. Die Kartenlager sind mehrreihig horizontal angeordnet, wobei sich das Förderband in der Mitte befindet. Die Magazinierung erfolgt in einem Gesamtmagazin. Zur Sicherung gegen versehentliches Eingreifen in die bewegte Mechanik wird die gesamte Maschine eingehaust, während die Kartenlager zur Befüllung von den Nutzenden seitlich herausgezogen werden können.

5.1.2 Konzept B

Das zweite Konzept verwendet ein exzentrisch laufendes Reibrad, um die Karten von unten zu vereinzeln. Der hierfür notwendige Anpressdruck an den Kartenstapel wird dabei durch die Gewichtskraft des Kartenstapels erzeugt, aber auch von zusätzlichen Gewichten, die auf den Stapel gelegt werden können. Als Sicherungsstrategie der Vereinzelung wird ein Spalt verwendet, der garantiert, dass lediglich eine Karte gleichzeitig von dem Reibrad vorgeschoben werden kann. Sollte sich beim Testen des Verfahrens herausstellen, dass die Vereinzelung auf diesem Weg nicht ausreichend gesichert werden kann, so kann das Konzept darüber hinaus um ein gegenläufiges Reibrad ergänzt werden. Für den Transport der Spielkarten wird ein System aus Reibrädern verwendet, die über einen gemeinsamen Antriebsriemen angetrieben werden. Der Achsabstand der einzelnen Reibräder ist der kurzen Seite der Spielkarten angepasst. Der für den Transport notwendige Anpressdruck wird über weitere Reibräder erzeugt, die paarweise mit den angetriebenen Reibrädern angeordnet und in ihrer Höhe justierbar sind. Die Kartenlager sind einreihig horizontal angeordnet. Die Sicherung gegen versehentliches Eingreifen erfolgt ebenfalls über eine vollständige Einhausung, der Zugriff des Nutzenden erfolgt jedoch über eine Zugangsklappe mit entsprechender Türsicherung.

5.1.3 Konzept C

Konzept C verwendet das bereits in Kapitel 3 erläuterte Prinzip des Reibanlegers. Ähnlich wie in Konzept B wird die reibende Baugruppe von unten an den Kartenstapel herangeführt. In diesem Fall wird jedoch das Förderband für den Weitertransport der Spielkarten auch direkt für die Vereinzelung verwendet. Dabei muss das Förderband in einen gesteuerten Kontakt mit dem Magazin gebracht werden können. Hierfür eignen sich Pneumatikzylinder, die den Flachriemen des Förderbandes für die Dauer einer Vereinzelung von unten gegen das Magazin drücken. Als Sicherung gegen Mehrfachabzüge wird ein einstellbarer Spalt im Magazin verwendet. Die Anzahl der benötigten Förderbänder wird durch das Vereinzeln mehrerer Magazine mit einem Förderband erreicht. Beispielsweise könnten jeweils acht Magazine mit einem Förderband vereinzelt werden, was die Anzahl der benötigten Förderbänder auf vier reduzieren und dennoch eine flexible Anordnung erlauben würde. Die Magazine werden kreisrund angeordnet. Für das Lagern der vereinzelteten Spielkarten werden diese zunächst von den Vereinzelungsförderbändern in die Kreismitte transportiert. Dort befindet sich ein Trichter, in den die Karten hineinfallen. Unterhalb des Trichters befindet sich ein weiteres, entnehmbares Magazin, in das die Spielkarten über den Trichter hineingleiten. Die Ansteuerung der Förderbänder geschieht zeitversetzt, damit nicht mehrere Spielkarten gleichzeitig in den Trichter hineinfallen und so die Sortierreihenfolge verändern. Die gesamte Maschine wird mit einer vollständigen Einhausung gegen versehentliches Eingreifen geschützt, die mit einem Kippdeckel Wartungs- und Servicearbeiten ermöglicht.

5.2 Auswahl eines Konzepts

Das für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe am besten geeignete Konzept wird mit Hilfe einer Nutzwertanalyse ermittelt [37]. Bei der Durchführung einer Nutzwertanalyse werden die in der Anforderungsliste definierten Leistungsparameter der Sondermaschine mit einer Gewichtung versehen, die die Bedeutung der Anforderung für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe widerspiegeln. Im Anschluss daran werden die Konzepte einzeln hinsichtlich ihrer Fähigkeit bewertet, die jeweilige Anforderung zu erfüllen. Diese Bewertungsentscheidung ist eine subjektive Entscheidung und basiert meist auf Erfahrungswerten oder dem direkten Vergleich mit anderen vorgestellten Entwicklungen. Zur frühzeitigen Vermeidung von 'Entwickler-Bias' wird die Bewertung der Nutzwertanalyse in Kooperation mit anderen Entwicklern durchgeführt, während die Gewichtung aus den Anforderungen des Kunden und der Bedeutung für die Funktionalität abgeleitet wird. Der eigentliche Nutzwert ergibt sich aus der Addition aller gewichteten Bewertungen der Anforderungserfüllung. Das laut Nutzwertanalyse am besten geeignete Konzept ist das Konzept mit dem höchsten Nutzwert. Als Bewertungssystem wird eine Skala von eins bis zehn verwendet. Dies gilt sowohl für die Gewichtung der Anforderungen als auch für die Erfüllung der einzelnen Anforderung.

Anforderung	Gewichtung	Konzept A	Konzept B	Konzept C
A1	6	8	4	4
A2	8	5	8	10
A3	5	5	5	5
A26	10	9	4	5
A27	10	10	5	6
A28	9	7	5	5
A29	6	6	7	8
A30	7	8	6	4
A31	9	7	6	6

Tabelle 5.1: Nutzwertanalyse der Konzepte A,B und C

Name	Nutzwert
Konzept A	521
Konzept B	386
Konzept C	414

Tabelle 5.2: Aus Tabelle (5.1) errechnete Nutzwerte

Aus der Tabelle 5.1 gehen die in Tabelle 5.2 dargestellten Nutzwerte hervor. Die Analyse zeigt, dass Konzept A über den höchsten Nutzwert verfügt und somit am besten geeignet ist, die in Kapitel 4.2 erläuterten Anforderungen zu erfüllen. Da sich sowohl bei der Vergabe von Gewichtungen als auch bei der Erfüllung von Anforderungen um subjektive Bewertungskriterien handelt, empfiehlt es sich an dieser Stelle jedoch, die Kernfunktionen der Konzepte gesondert zu betrachten. Konzept B und C verwenden das Wirkprinzip 'Friktion', um die Vereinzelung der Spielkarten zu realisieren. B verwendet ein exzentrisch laufendes Reibrad, während C einen Reibanleger verwendet. Die Betrachtung vergleichbarer Entwicklungen hat gezeigt, dass diese beiden Wirkprinzipien im Zusammenspiel mit der Verwendung von Förderbändern für den Transport der Spielkarten besonders geringe Zykluszeiten erreichen können. Der größte Nachteil dieses Wirkprinzips ist die hierfür benötigte Anzahl der Komponenten. Da 32 unterschiedliche Spielkartentypen sortiert werden sollen, werden ebenfalls 32 aktive Kartenlager mit Reibrollen und allen weiteren essentiellen Komponenten benötigt. Da diese für eine erfolgreiche Vereinzelung exakt justiert werden müssen, resultiert hieraus ein kostspieliges und dennoch fehleranfälliges System. Darüber hinaus benötigt die Vereinzelung mit Hilfe von Friktion möglichst konstante Oberflächeneigenschaften, um eine zuverlässige Vereinzelung gewährleisten zu können. Der Verwendung eines passiven Bauteils für den Transport der Spielkarten ist ebenfalls kritisch zu betrachten. Konzept C verwendet einen Trichter, um die von mehreren Förderbändern fallenden Spielkarten zu einem Stapel zusammenzufassen. Damit ein Werkstück verlässlich über eine Rutsche oder einen Trichter transportiert werden kann, muss das Zusammenspiel aus Werkstückgewicht, Werkstückoberfläche, Steigung der Rutsche und dem Reibkoeffizient der Oberfläche genauestens dem Prozess angepasst werden. Variieren die Spielkarten darüber hinaus auch in ihren Oberflächeneigenschaften z.B. aufgrund von Fetten und Ölen, so könnte es sehr schwierig werden, das Wirkprinzip auf die vorliegende Automatisierungsaufgabe anzuwenden. Konzept B verwendet ein System aus angetriebenen Reibrädern für den Transport der Spielkarten. Dieses Förderprinzip benötigt einen einstellbaren Anpressdruck, damit die Spielkarten verlässlich und mit konstanter Geschwindigkeit bewegt werden können. Eine häufige Abnutzungserscheinung der Spielkarten ist jedoch eine plastische Biegung entlang der längeren Mittelachse der Spielkarten. Diese Verformung führt zu einer variierenden effektiven Dicke der Spielkarten. Die Erzeugung eines konstanten Anpressdrucks ist somit deutlich erschwert.

5.3 Sensorik

Die Erstellung eines Sensorkonzepts beinhaltet sowohl die Auswahl geeigneter Sensoren in Bezug auf das verwendete Wirkprinzip und deren Leistungsparameter als auch die jeweilige Positionierung der Sensoren. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Sensorik sehr kostspielig sein kann. Es wird also stets versucht, ein möglichst kostengünstiges Sensorkonzept zu erstellen, das dennoch ausreichend Informationen über den Prozess liefert und die Prozesssicherheit erhöht. Insgesamt müssen für die Funktion der Sondermaschine mindestens drei Teilfunktionen sensorisch überwacht werden. Die Sondermaschine verfügt über zwei Linearachsen mit Schrittmotoren, die vor dem Betrieb referenziert werden müssen. Hierzu eignen sich induktive Näherungssensoren, die entweder am Schlitten der Achse oder an der Achse selbst befestigt werden und ein elektrisch leitfähiges Bauteil (in diesem Fall Metall) erfassen können. Bei der Referenzfahrt werden die Achsen in eine definierte Richtung verfahren, bis eine steigende Flanke des Sensorsignals erfasst wird. Im Anschluss daran wird die Fahrtrichtung invertiert und erneut mit reduzierter Geschwindigkeit verfahren, bis eine fallende Flanke des Sensorsignals erfasst wird. Dem Inkrementaldrehgeber des Schrittmotors wird an dieser Position ein definierter Wert (meistens 0 mm) zugewiesen, und die Achse wird referenziert. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Sensoren derart platziert werden, dass die Flanken des Sensorsignals bei vordefinierten Referenzfahrtrichtungen stets den gleichen Verlauf aufzeigen. Der Messbereich des Sensors darf nicht in Referenzfahrtrichtung verlassen werden können. Das Referenzieren ist notwendig, da der Inkrementaldrehgeber nach dem Einschalten der Sondermaschine nicht die absolute Position der Achse erfassen kann, sondern lediglich Inkremente bei aktiven Fahrbefehlen messen kann. Die zweite Teilfunktion, die sensorisch überwacht werden muss, ist der Pneumatikzylinder zum Heben und Senken des Vakuumgreifsystems. Dieser verfügt über zwei Endlagen, die ebenfalls mit Hilfe von Reed-Kontakten überwacht werden können. Das Erreichen der Endlage ist ein wichtiges Sensorsignal, welches für den Programmablauf und die Sicherung der Linearachse benötigt wird. Die Linearachse darf nicht verfahren werden, solange sich das Greifsystem in der unteren Endlage befindet, da es zur Kollision kommen kann, die die Sondermaschine beschädigt. Das Erreichen der Endlage kann ebenfalls durch Timerbausteine in der Software simuliert werden, die das Signal nach einer definierten Zeit anlegen. Dies ist eine kostengünstige Alternative zur Verwendung von Sensoren, sie wirkt sich jedoch negativ auf die Prozesssicherheit aus. Darüber hinaus ist die Bewegungsgeschwindigkeit des Pneumatikzylinders durch Drosseln einstellbar. Das Verstellen der Drosseln verändert die Zykluszeit des Prozesses und müsste mit einer Veränderung der Timerbausteinen berücksichtigt werden.

Das Greifen der Spielkarten ist ebenfalls eine Teilfunktion, die sensorisch überwacht werden muss. Befinden sich in einem Kartenlager nicht ausreichend Spielkarten oder es kommt zu einer Störung des Vakuumsystems, so muss die Sondermaschine dieses detektieren können und in den Fehlerzustand wechseln. Für das Überwachen der Greifer gibt es unterschiedliche Konzepte, die an dieser Stelle erneut mit einem morphologischen Kasten verglichen werden.

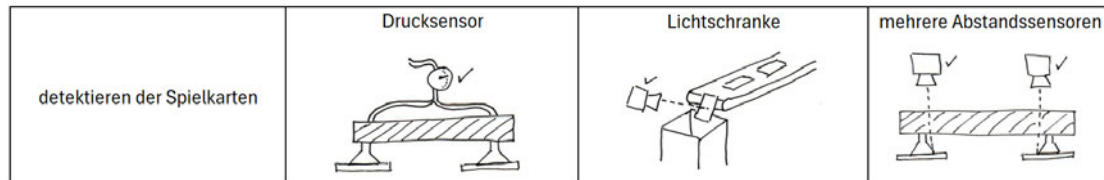


Abbildung 5.2: Morphologischer Kasten der Sensorkonzepte

Konzept A

Das Konzept C verwendet einen für Vakuum geeigneten Drucksensor. Das Konzept basiert auf dem Prinzip, dass eine Leckage im Vakuumsystem entsteht, sobald eine oder mehrere Spielkarten nicht gegriffen werden können. Dies hat zur Folge, dass das erreichte Vakuumniveau nicht dem Vakuumniveau eines leckagefreien Systems entspricht. Der Sensor verfügt über die Funktion, eine Schaltschwelle per Teach-In einzustellen. Der Sensor meldet das Erreichen des geteachten Vakuumniveaus an seinem Meldeausgang. Liegt dieser zum Zeitpunkt des Greifens nicht an, so kann davon ausgegangen werden, dass die Spielkarten nicht korrekt gegriffen worden sind.

Konzept B

Konzept B verwendet eine Lichtschranke, die sich oberhalb des Magazins befindet und von den herunterfallenden Spielkarten unterbrochen wird. Nach dem Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband wird gezählt, wie häufig die Lichtschranke unterbrochen wird. Entspricht die Anzahl der Unterbrechungen nicht der erwarteten, so konnte eine oder mehrere Spielkarten nicht gegriffen werden.

Konzept C

Konzept A beschreibt die Verwendung von insgesamt acht Laser-Time Of Flight (TOF)-Sensoren, die oberhalb des Greifers montiert werden. Diese messen den Abstand zur gegriffenen Karte und geben diesen Wert an die Steuerung weiter. Sollte der gemessene

Wert weit über dem erwarteten Wert oder sogar außerhalb des Messbereichs liegen, so wurde keine Spielkarte gegriffen.

Auswahl eines Sensorkonzepts

Alle drei Konzepte beschreiben mögliche Messprinzipien für die vorliegende Teilfunktion. Für die Auswahl eines für die Messaufgabe geeigneten Konzepts werden diese hinsichtlich der in Tabelle 5.3 aufgelisteten Kriterien bewertet.

Kriterien	Drucksensor	Lichtschranke	Abstandssensoren
Stückzahl	+	+	–
Montierbarkeit	+	+	–
Verlässlichkeit	+	–	+
konstruktiver Aufwand	+	–	–
Informationsdichte	–	+	+

Tabelle 5.3: Bewertung der Sensorkonzepte

Das Konzept C stellt eine verlässliche Messmethode dar, die darüber hinaus Informationen liefert, welche Spielkarte nicht korrekt gegriffen werden konnte. Nachteil dieser Methode ist die hohe Anzahl an benötigten Sensoren und der konstruktive Aufwand, diese an den Greifern zu montieren. Im Gegensatz dazu benötigt das Konzept B nur einen einzigen Sensor, der mit geringem Aufwand oberhalb des Magazins montiert werden könnte. Das Konzept liefert keine Informationen darüber, welche Karte nicht gegriffen werden konnte, sondern lediglich, dass der Greifvorgang nicht korrekt durchgeführt wurde. Darüber hinaus wird das fehlerhafte Greifen erst detektiert, wenn alle Spielkarten in das Magazin gefördert wurden. Das Konzept weist darüber hinaus die Problematik auf, dass für das Zählen der einzelnen Karten ein Spalt zwischen diesen auf dem Förderband existieren muss. Da das Greifsystem die Spielkarten jedoch sehr nah aneinander auf das Förderband fallen lässt, reduziert sich die Verlässlichkeit dieser Messmethode. Das Konzept A verfügt ebenfalls über einen geringen Bauteilaufwand, detektiert das fehlerhafte Greifen unmittelbar, ist einfach zu montieren und bei Verwendung eines modernen Drucksensors leicht in die Steuerung zu integrieren. Einzig die Informationsdichte fällt bei diesem Konzept geringer aus, da lediglich das fehlerhafte Greifen des Gesamtsystems festgestellt werden kann. Aus den genannten Gründen wird das Konzept A für das Prüfen der Vereinzelung verwendet.

6 Entwicklung

Die Entwicklung der Sondermaschine erfolgt in mehreren Iterationen und wird zunächst in testbare Unterfunktionen unterteilt, um Fehler in der Konstruktion oder im Konzept bereits frühzeitig erkennen und beheben zu können. Abbildung 6.1 zeigt die Funktionsstruktur der Sondermaschine. Diese leitet sich aus der Beschreibung des bisher händisch durchgeführten Prozesses ab und stellt auf der ersten Stufe die wichtigsten Teilfunktionen der Sondermaschine dar.

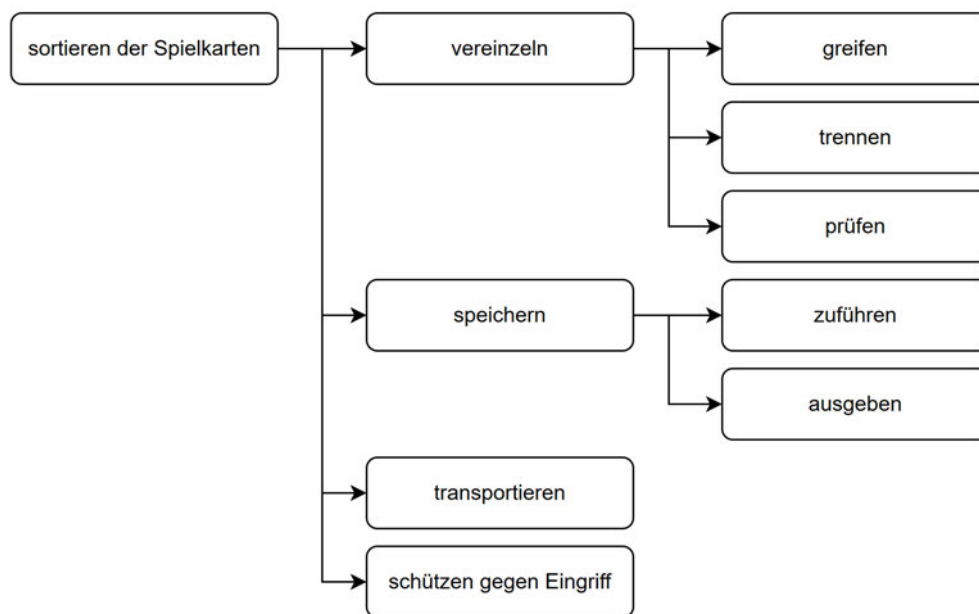


Abbildung 6.1: Funktionsstruktur der zu entwickelnden Sondermaschine

Die wichtigste Kernfunktion der Sondermaschine ist das Vereinzeln und Greifen der Spielkarten. Aus diesem Grund startet der Entwicklungsprozess auch mit der Entwicklung des Greifers. Für diesen wird zunächst ein Konzept entwickelt, welches die ausgewählten Wirkprinzipien verwendet. Der entwickelte Prototyp des Greifers wird im Anschluss daran getestet, bevor weitere Komponenten der Sondermaschine konstruiert werden. Zur

Optimierung der Testbarkeit erfolgt daraufhin die Konstruktion des Transportsystems. Dieses wird ebenfalls vor dem Bau des Gesamtsystems in seiner Eignung und Funktionalität evaluiert. Das Transportsystem wird zunächst als Teilsystem getestet, bevor es in einen Funktionsverbund mit dem Greifsystem gesetzt wird. Die Konstruktion des Kartenspeichers erfolgt zuletzt, da das Teilsystem keinen direkten Funktionsverbund mit dem Greifsystem besitzt und nur mit dem Transportsystem gemeinsam als Funktionsverbund getestet werden sollte. Die Funktion 'schützen gegen Eingriff' beschreibt keine für die Funktionalität der Sondermaschine notwendige Funktion und wird daher in dieser Arbeit lediglich als vorliegendes Konzept für das fertige Produkt betrachtet und nicht weiter konstruiert.

6.1 Vereinzeln

Das gewählte Wirkprinzip für das Vereinzeln und Greifen der Spielkarten ist die Verwendung eines Vakuumgreifers. Bevor der Greifer konstruktiv entworfen wird, werden zunächst Tests durchgeführt, um Spielkarten mit unterschiedlichen Flachsaugern von einem Kartenstapel abzuheben. Hierzu werden zunächst eine Vielzahl an geeigneten Flachsaugern mit unterschiedlichen Durchmessern und Materialien beschafft. Das verlässliche Greifen eines Objekts mit einem Vakuumgreifer erfordert, dass das Vakuum ausreichend Haltekraft erzeugen kann, um das Objekt zu halten und zu bewegen. Ein zu großer Durchmesser des Flachsaugers kann wiederum eine Leckage in das Vakuumssystem einbringen. Daher ist es notwendig, die ideale Größe zunächst empirisch zu ermitteln [38]. Hierfür wird der in Abbildung 6.2 dargestellte Versuchsaufbau verwendet.

Dieser Versuchsaufbau beinhaltet die Verwendung eines Vakuum-Ejektors zur Erzeugung des Vakuums, einem Manometer zum Messen des erreichten Vakuumniveaus und unterschiedlichen Flachsaugern mit variierenden Durchmessern und Materialien. Bei der Testdurchführung wird das erreichte Vakuumniveau mit dem im Datenblatt des Vakuumerzeugers theoretisch erreichbaren Vakuumniveaus verglichen. Stimmt das erreichte Vakuumniveau mit dem Datenblatt überein, so ist das System vollständig leakagefrei. Für die Ermittlung eines geeigneten Flachsaugers wird der größtmögliche Durchmesser ermittelt, der dennoch ein leakagefreies System darstellt. Der ausgewählte Flachsauger muss genügend Haltekraft hervorrufen, um mehrere Spielkarten gleichzeitig anheben zu können. Damit der Prozess ausreichend sicher ist, wird definiert, dass der Sauger mindestens 10 Karten gleichzeitig halten können muss.

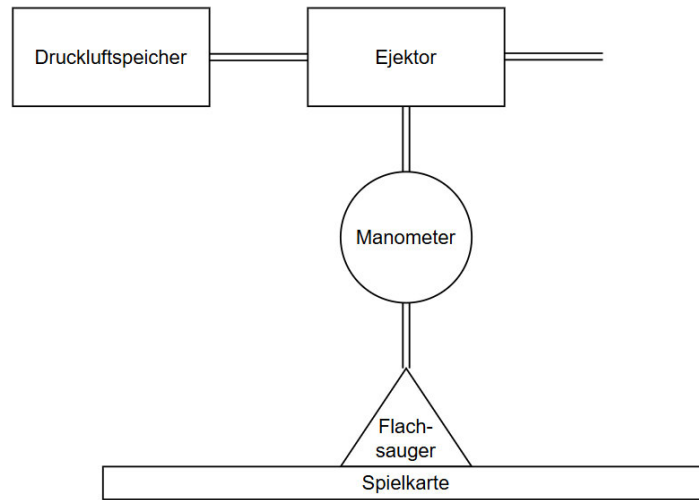


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Flachsaugerdurchmessers

Die Testdurchführung ergibt einen optimalen Durchmesser von 11 mm. Bei einem erreichten Vakuumniveau von 0,4 % ergibt sich hieraus eine theoretische Haltekraft von 0.99 N.

$$F_G = 1 \text{ Bar} - 0.4 \text{ Bar} \frac{(11\text{mm}^2\pi)}{4} = 0.99 \text{ N} \quad (6.1)$$

Bei einem Gewicht von nur 2 g pro Karte reicht diese theoretische Haltekraft aus, um ca. 51 Karten halten zu können. Diese Anzahl berücksichtigt jedoch nicht die von der Bewegung hervorgerufenen Kräfte, die zusätzlich auf die Karte einwirken und die benötigte Haltekraft weiter erhöhen.

Im Anschluss an die Wahl eines geeigneten Flachsaugers kann der Vakuumerzeuger ausgewählt werden. Hierfür wird das Auswahlverfahren nach [38] verwendet. Die Wahl fällt auf einen mehrstufigen Vakuumejektor, da es sich hierbei um eine kostengünstige Form der Vakuumerzeugung handelt, die in sehr kurzer Zeit bereits ein mittleres Vakuumniveau (50%) erreichen kann, welches für den vorliegenden Anwendungsfall bereits ausreicht. Das gewählte Konzept A beinhaltet die Verwendung des Wirkprinzips 'Biegen', um die Wahrscheinlichkeit von Mehrfachabzügen zu minimieren. Dieses Wirkprinzip wird ebenfalls zunächst in einem Versuchsaufbau getestet. Hierzu wird ein Kartenmagazin mit einem Absatz oberhalb des Kartenstapels mit einem 3D-Drucker gefertigt. Der Flachsauger wird am Flansch eines 'KR-15' Roboters der Firma Kuka befestigt.

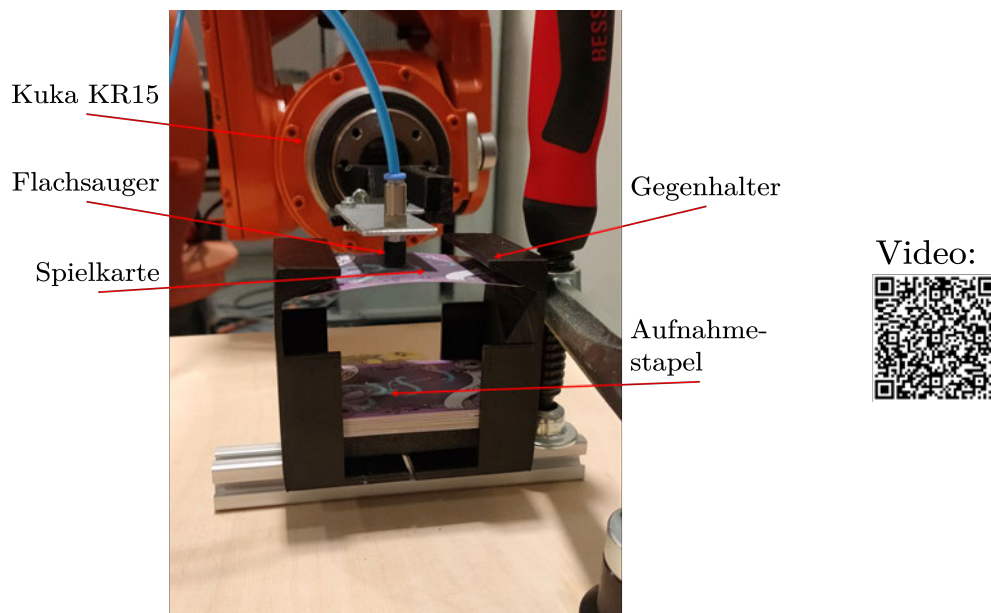


Abbildung 6.3: Testaufbau zum Vereinzeln von Spielkarten durch Biegen

Dieser Versuchsaufbau ermöglicht das wiederholte Greifen und Biegen einer Karte mit konstanter Geschwindigkeit und exakt definierten Wegpunkten der Roboterbahn. Der Flachsauger wird zunächst von oben herab auf den Kartenstapel bewegt. Der 'geteachte' Endpunkt der Roboterbahn wird hierbei so gewählt, dass der Flachsauger leicht auf den Spielkartenstapel gedrückt wird, um den Federdruck des später verwendeten Federstößels zu imitieren. Nach Erreichen des Wegpunktes wird der Vakuumejektor eingeschaltet und die oberste Spielkarte gegriffen. Die gegriffene Spielkarte wird nach oben vom Kartenstapel hinweggehoben und gegen den gedruckten Absatz gezogen. Die Spielkarte wird durchgebogen, anschließend abgesenkt und auf einem Ablagestapel neben dem Magazin abgelegt. Auf diese Weise wird empirisch ermittelt, wie stark die Spielkarte durchgebogen werden kann, ohne in den Bereich der plastischen Verformung zu gelangen und wie stark die Spielkarte durchgebogen werden muss, damit an der Unterseite haftende Spielkarten verlässlich getrennt werden. Beim Greifen einer gebogenen Spielkarte mit dem Flachsauger wirkt durch die elastische Verformung dieser ebenfalls eine Federkraft entgegengesetzt zur Haltekraft des Saugers. Da der Flachsauger aber bereits mit ausreichend Prozesssicherheit ausgewählt worden ist, kann diese Kraft vernachlässigt werden. Die erfolgreiche Durchführung dieses Tests wird als Beweis gewertet, dass die vorliegende Vereinzelaufgabe mit der gewählten Strategie realisierbar ist. Im Anschluss an den Test des Wirkprinzips wird ein Greifer entwickelt, der nun sowohl die Funktion des Grei-

fens als auch die der Biegung in einer Komponente realisiert. Die Biegung der Karten wird passiv durch die Gewichtskraft eines heruntergleitenden Elements erzeugt. Da der Greifer stets horizontal ausgerichtet sein wird, ist es möglich, ein u-förmiges Bauteil an einer Linearwelle heruntergleiten zu lassen, bis dieses auf einem Anschlagblock aufliegt und seine Ruhelage erreicht. Das Bauteil drückt von oben herab auf die Spielkarte, bis sich diese unter dem Gewicht des Bauteils durchbiegt. Das hierfür benötigte Eigengewicht wird ebenfalls empirisch ermittelt. Den größten Widerstand gegen die gewünschte Verformung bietet eine in Abbildung 6.4 dargestellte Karte. Diese weist eine plastische Verformung entlang der Längsachse der Karte auf. Hierbei handelt es sich um eine übliche Abnutzungserscheinung von Spielkarten und sollte daher in der Prozessauslegung berücksichtigt werden.

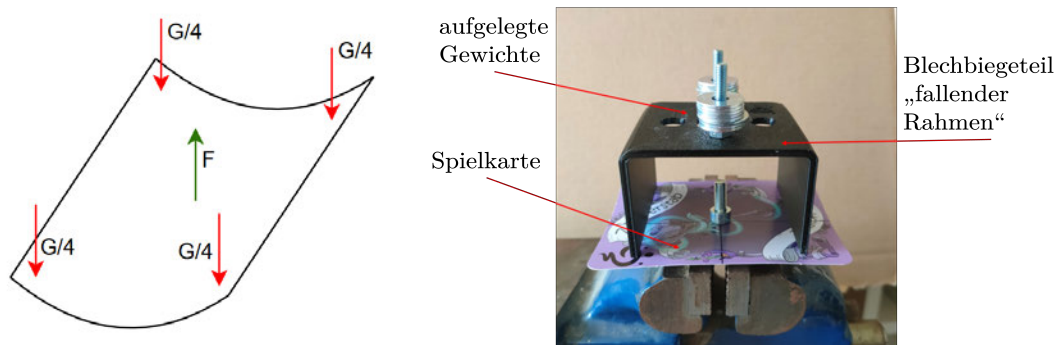


Abbildung 6.4: Ermittlung der für die Biegung benötigten Gewichtskraft

Zur empirischen Ermittlung des benötigten Gewichts wird eine derart plastisch verformte Spielkarte punktuell eingespannt und mit einer 3D-gedruckten Version des Bauteils belastet. Das Gewicht des Bauteils wird iterativ durch das Auflegen von Unterlegscheiben erhöht, bis sich die Spielkarte beim Auflegen des Bauteils verlässlich unter dessen Eigengewicht durchbiegt. Dieser Test ergibt ein Gewicht von 70 g. Daraus resultiert eine auf der gesamten Auflagefläche des Bauteils wirkende Kraft von 0,69 N. Diese Kraft entspricht dem Widerstand der Spielkarte gegen eine Verformung. Diese zum Zeitpunkt der Biegung auftretende Kraft muss additiv mit der Gewichtskraft der Spielkarte kleiner ausfallen als die Haltekraft des Flachsaugers, um das Anheben und gleichzeitige Durchbiegen der Spielkarte ermöglichen zu können.

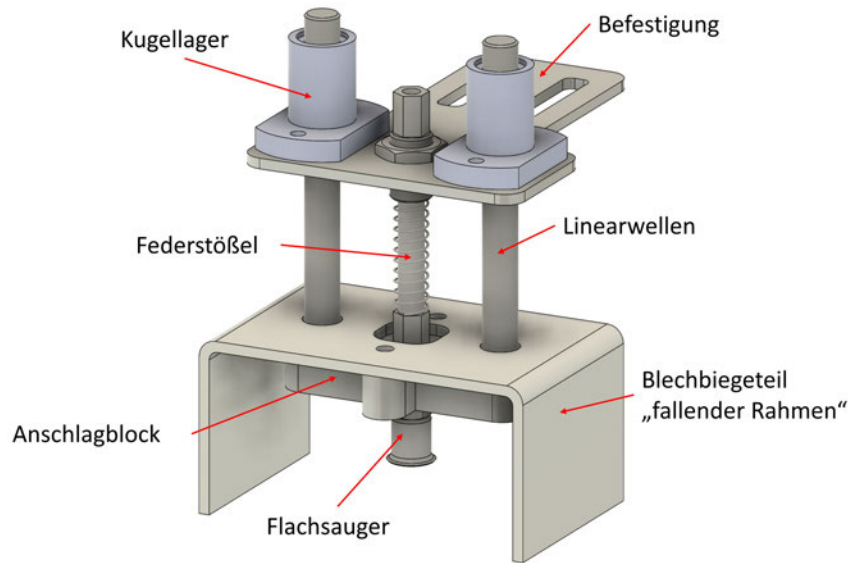


Abbildung 6.5: Entwickelter Vakuumgreifer

Abbildung 6.5 zeigt den entwickelten Greifer. Dieser verfügt über einen Flachsauger, der in direkten Kontakt mit den Spielkarten gebracht wird und für die Erzeugung der Haltekraft zuständig ist. Zwischen Flachsauger und der Steckverschraubung des Pneumatikschlauches befindet sich ein Federstößel. Bei diesem handelt es sich um zwei federnd ineinander geschobene Rohre, in deren Innenrohr das erzeugte Vakuum geführt werden kann. Da der Federstößel einen Hub von 20 mm besitzt, ermöglicht dieser das Greifen der obersten Spielkarte von Kartenstapeln mit einer unterschiedlichen Anzahl an Spielkarten, ohne dass die Kinematik die oberste Spielkarte exakt anfahren muss. In einem Anschlagblock sind zwei Linearwellen parallel zum Federstößel verschraubt. Diese erfüllen zwei Funktionen gleichzeitig. Die zusätzliche Fixierung verhindert das Verdrehen des Federstößels und bietet eine Gleitführung für das Bauteil, welches für die Biegung der Spielkarten zuständig ist. Dieses verfügt über zwei 'Wurfpassungen' und gleitet durch sein Eigengewicht an den Linearwellen nach unten, bis es vollständig auf dem Anschlagblock aufliegt. Das Bauteil ist u-förmig gebogen und in Richtung Flachsauger geöffnet. Bei dem Bauteil handelt es sich um ein 'Blechbiegeteil'. Damit es für den Prototypen ebenfalls kostengünstig produziert werden kann, wird es zunächst durch ein Laser-geschnittenes Blechteil ersetzt, in dessen Ecken vier Schrauben mit entsprechender Länge montiert werden.

Wird der Greifer von oben herab auf die Spielkarte geführt, setzt das u-förmige Bauteil zunächst auf der Karte auf. Die Kinematik bewegt den Greifer weiter herab, bis der

Flachsauger ebenfalls auf der Karte aufsitzt. Währenddessen wird das u-förmige Bauteil entlang der Linearwellen nach oben geschoben, um gleichzeitig mit dem Flachsauger auf der obersten Spielkarte aufliegen zu können. Durch den 20 mm langen Hub der Federstößel und der Länge der Linearwellen kann der gesamte Greifer noch weitere 20 mm abgesenkt werden. Dieser Weg wird verwendet, um unterschiedlich hohe Kartenstapel oder eine unsauber justierte Kinematik auszugleichen. Wird nun die Luft innerhalb des Vakuumsystems entfernt, so entsteht die zuvor bemessene Haltekraft. Der Greifer kann nun wieder orthogonal vom Kartenstapel abgehoben werden. Zunächst wird der federnd gelagerte Weg des Federstößels überwunden. Ist dieser vollständig gestreckt, so entfernt sich der Flachsauger vom Kartenstapel. Da das u-förmige Bauteil noch nicht auf dem Anschlagblock des Federstößels aufliegt, bleibt dieses zunächst auf dem Kartenstapel liegen. Die oberste Spielkarte des Stapels wird durch die Gewichtskraft des u-förmigen Bauteils und die Haltekraft des Flachsaugers gebogen. Abhängig von den Adhäsionskräften der unterliegenden Karten haften diese noch bis zu 500 ms an der gegriffenen Spielkarte, bevor sie auf den Kartenstapel herunterfallen.

Aus der Anforderung A2 geht eine Zykluszeit von nur 0.6 s hervor. Diese Zeit bezieht sich auf die benötigte Zeit für das Handhaben von nur einer Karte. Wird die Maschine so konstruiert, dass sie in der Lage ist, mehrere Spielkarten gleichzeitig handhaben zu können, so steigt die zur Verfügung stehende Zeit ebenfalls um 0.6 s pro Karte. Bei acht gleichzeitig gegriffenen Karten stehen also bereits 4.8 s für die Handhabung zur Verfügung. Der entwickelte Greifer ist auf das Handhaben von nur einer Spielkarte ausgelegt. Das Handhaben von acht Spielkarten gleichzeitig wird mit einem Greifsystem, bestehend aus acht einzelnen Greifern, einem Aluminiumprofil und einem System aus Pneumatikschläuchen realisiert. Ein Teilstück des Greifsystems wird in Abbildung 6.6 dargestellt. Zu sehen sind drei Greifer, die sich zur Aufnahme der Spielkarten im gesenkten Zustand des Systems befinden. Es ist zu erkennen, dass das Greifsystem dank der verwendeten Federstößel dazu in der Lage ist, die oberste Spielkarte von Kartenstapeln mit unterschiedlicher Höhe vereinzeln zu können.

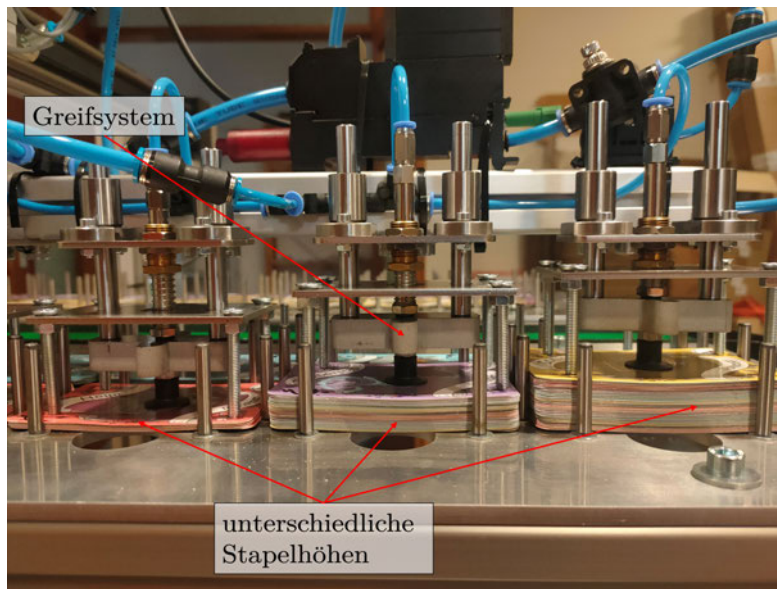


Abbildung 6.6: Greifer im Verbund

6.2 Transportieren

Das Greifen von mehreren Spielkarten gleichzeitig führt zu einem linearen Versatz und muss durch weitere, bauliche Maßnahmen ausgeglichen werden, wenn alle sortierten Spielkarten in einem einzigen Kartenlager gespeichert werden sollen. Das gewählte Konzept sieht hierfür ein aktiv angetriebenes Förderband und ein Schachtmagazin als Kartenlager vor, in das die Spielkarten hineinfallen sollen. Das Konzept wird zunächst in testbare Unterfunktionen heruntergebrochen. Hierfür wird ein Teilstück des Förderbandes erneut mit Hilfe eines 3D-Druckers gefertigt. Mit diesem Teilstück des Förderbandes werden die geometrischen Eigenschaften wie etwa die Breite oder der gewählte Radius der Antriebsräder überprüft. Das Fallenlassen der Spielkarten aus unterschiedlichen Höhen auf das gedruckte Teilstück ermöglicht es, die Eignung der Breite des Förderbandes zu evaluieren. Mit Hilfe eines federnden Stiftes, der ebenfalls am Roboterflansch befestigt wird, werden die Karten vom Teilstück geschoben und das Fallverhalten der Karten beobachtet. Trotz der bereits beschriebenen Probleme, die bei dem Transport von Spielkarten bei hohen Dynamikanforderungen auftreten können, wird zunächst ein 'einfaches' Förderband konstruiert, welches über keinerlei weitere konstruktive Maßnahmen verfügt, die die ermöglichte Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Transportgutes weiter erhöhen.

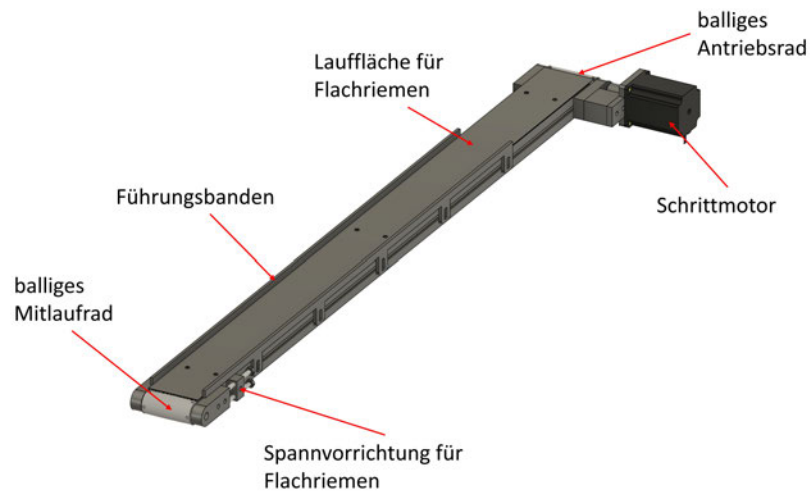


Abbildung 6.7: Gesamtansicht des konstruierten Förderbandes

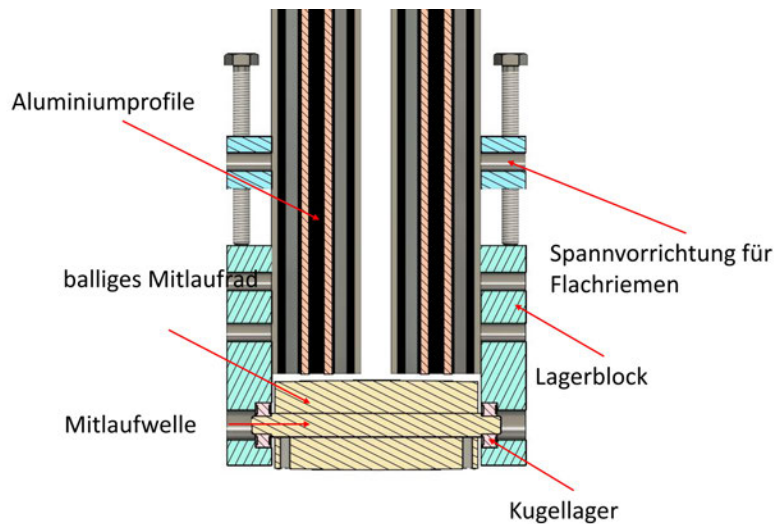


Abbildung 6.8: Konstruktion des Förderbandes in Schnittansicht

Abbildung 6.7 und 6.8 zeigen das konstruierte Förderband. Dieses richtet sich nach den bereits vorgestellten Transportsystemen und stellt eine kostengünstige Bauform für Förderbänder dar. Für das Förderband wird ein ringförmiger Flachriemen, bestehend aus einem Gewebeband mit PVC-Ummantelung, verwendet, der den für den Transport benötigten Reibkoeffizienten aufweist. Dieser Flachriemen wird über ein balliges Antriebsrad angetrieben. Die für den Antrieb benötigte Riemen- und Führungsspannung wird mit Hilfe von vier Anschlagblöcken und einer Spannvorrichtung eingestellt [39]. In den An-

schlagblöcken sind Passungsbohrung für die Kugellager. Aufgrund der geringen benötigten Genauigkeit und der geringen übertragenen Kräfte sind beide Lager 'schwimmend' gelagert, um die Fertigung der Anschlagblöcke möglichst kostengünstig zu gestalten [39]. Die Anschlagblöcke werden seitlich gegen zwei Aluprofile geschraubt. Durch das Lösen der Befestigungsschrauben und das Spannen der Spannvorrichtung ist es möglich, die Riemenspannung und die Führung des Flachriemens einzustellen.

6.3 Speichern

Abbildung 6.9 zeigt das konstruierte Kartenmagazin für die Zwischenlagerung der sortierten Spielkarten. Dieses besteht aus zwei lasergeschnittenen Blechen, die durch hohle Aluprofile miteinander verbunden sind. Das obere Blech besitzt eine Öffnung, durch die die Spielkarten von oben herab in das Magazin fallen können. Die hierfür benötigte Fallhöhe wird mit dem bereits beschriebenen Versuchsaufbau ermittelt. Da die Fallhöhe beim Stapeln jedoch stets abhängig ist von der Anzahl der bereits gestapelten Spielkarten, ist eine zusätzliche Achse notwendig, die das obere Ende des Kartenstapels im Laufe des Prozesses auf einer konstanten Höhe halten kann. Eine kostengünstige Möglichkeit hierfür ist die Verwendung einer Gewindespindel, die mit einem Schrittmotor angetrieben wird. Die verwendete Gewindespindel verfügt über ein Trapezgewinde und ist damit selbsthemmend, was die Anforderungen an den benötigten Schrittmotor weiter reduziert. Neben der Gewindespindel wird eine weitere Linearwelle benötigt, mit der die Führung eines Schlittens ermöglicht wird. Durch die Rotation der Welle ist es möglich, den Schlitten axial entlang der Linearwelle zu verschieben. Werden weitere Spielkarten von oben in das Magazin gefördert, so kann die Fallhöhe vom Förderband durch das Senken des Schlittens konstant gehalten werden. Damit die Karten beim Transport auf dem Förderband und beim Hineinfallen in das Kartenmagazin nicht seitlich herunterfallen können, werden Banden verwendet. Diese werden seitlich gegen das Förderband geschraubt. Für das Führen der Karten in das Magazin werden Banden mit einer komplexen Geometrie benötigt. Da das Förderband breiter ist als der Schacht des Magazins, verfügen die Banden ebenfalls über eine Verjüngung zum Schacht hin, die die fallenden Spielkarten zentriert. Diese Banden verfügen darüber hinaus über Langlöcher, die eine weitere Justage ermöglichen.

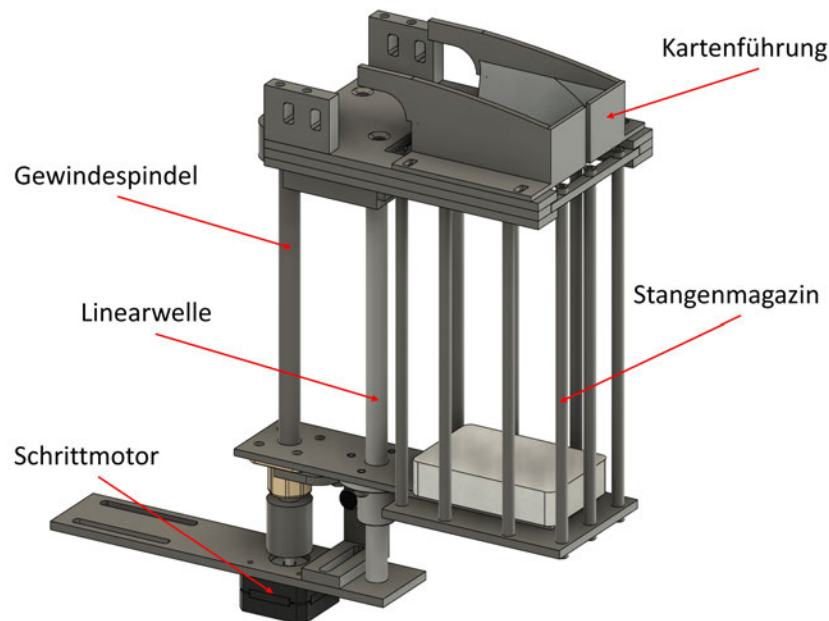


Abbildung 6.9: Konstruktion des Kartenmagazins

6.4 Kinematik

Abbildung 6.10 zeigt die konstruierte Sondermaschine in der Gesamtansicht. Analog zu gängigen Maschinen für 'pick and place'-Aufgaben verfügt die konstruierte Sondermaschine über zwei Linearachsen, die die für Bewegung notwendigen Freiheitsgrade abdecken. Das für das Greifen benötigte Heben und Senken des Greifsystems wird mit einem Pneumatikzylinder realisiert. Aufgrund der Greiferkonstruktion ist es nicht notwendig, dass die exakte Höhe der obersten Spielkarte von den Stapeln angefahren werden muss. Die Hebe- und Senkbewegung erfolgt also stets von Endlage zu Endlage und ermöglicht somit die Verwendung eines Pneumatikzylinders. Dieser ist deutlich kostengünstiger, lässt sich leichter in das System implementieren und ist störunempfindlicher als eine mit einem Schrittmotor angetriebene Linearachse. Die Verwendung eines Pneumatikzylinders hat darüber hinaus auch den Vorteil, dass dieser ebenfalls federt. Dies ist notwendig, damit das Greifsystem keinen Schaden nimmt, sollte einer der Federstößel blockieren oder sich zu viele Karten in einem Kartenlager befinden, sodass der Hub des Federstößels überwunden und die Feder vollständig gestaucht wird.

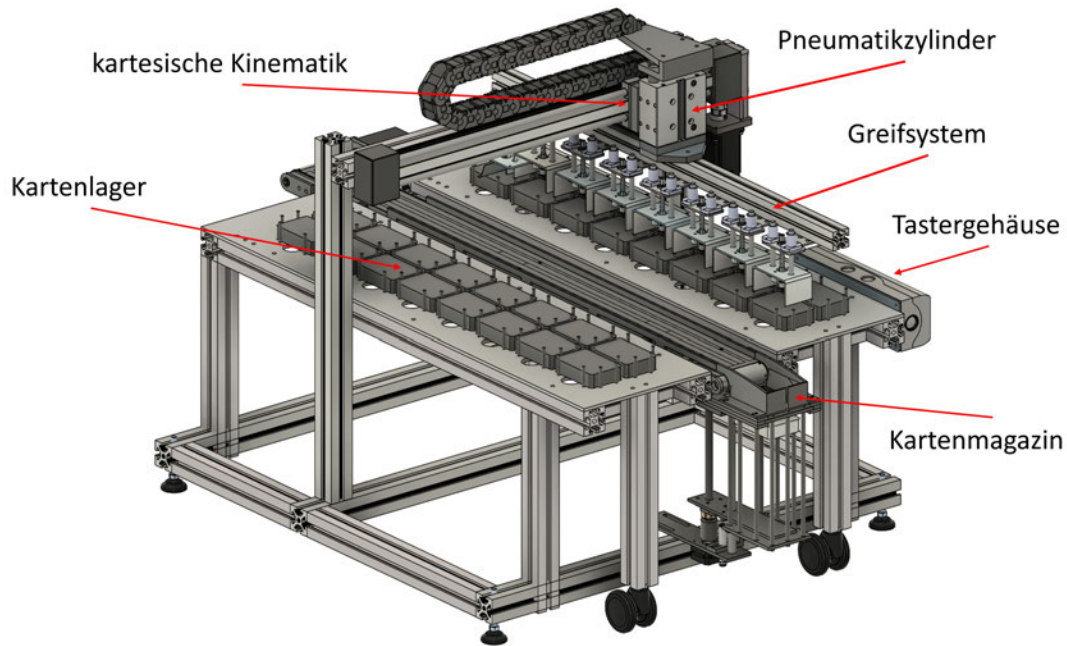


Abbildung 6.10: Gesamtansicht der Sondermaschine

Eine Linearachse in X-Richtung bewegt das gesamte Greifsystem zu den Kartenlagern oder dem Förderband. Die Linearachse benötigt insgesamt einen Hub von 500 mm und muss eine Masse von ca. 3.5 kg bewegen können. Die Anforderungen an Wiederhol- und Positioniergenauigkeit sind für die Automatisierungsaufgabe nicht hoch, weswegen sich die Verwendung einer Linearachse mit Riemenantrieb anbietet. Diese ermöglicht sehr hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten, jedoch auf Kosten der Präzision. Die Auslegung des antreibenden Schrittmotors geschieht unter Zuhilfenahme eines Online-Konfigurators des Linearachsenherstellers [40] und die Verifikation dieser Auslegung erfolgt nach Gleichung 2.12. Aus dem Datenblatt (Anhang A) geht ein Rotormassenträgheitsmoment von $J_R = 0.48 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ hervor. Die gewählte Linearachse verfügt laut Datenblatt (Anhang A) über ein Übersetzungsverhältnis von 66 mm^{-1} . Die Berechnung der Ersatzmassenträgheit nach Gleichung 2.13 ergibt für das bewegte Greifsystem einen Wert $0.038 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

$$J_L = 3.5 \text{ kg} \left(\frac{6.6}{2\pi} \right)^2 = 0.038 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6.2)$$

$$\lambda = \frac{0.038 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{0.48 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2} = 8.04 \quad (6.3)$$

Somit ergibt sich ein Massenträgheitsverhältnis von $\lambda = 8.04$. Der für den Antrieb einer Achse mit Riemenantrieb angestrebte Wert von $\lambda < 15$ wird mit dem ausgewählten Schrittmotor erreicht. Die Auslegung der Motoren für den Antrieb des Förderbandes und des Kartenmagazins wird nach dem gleichen Verfahren durchgeführt, wobei diese weniger kritisch sind. Der Motor des Förderbandes muss lediglich in der Lage sein, die Masse von acht Spielkarten (16 g), das Trägheitsmoment der Antriebsräder und die aufgebrachte Riemenspannung zu überwinden.

6.5 User-Interface/Bedienung

Die Bedienung der Maschine wird über ein User-Interface oder auch Human Machine Interface (HMI) realisiert. Dieses ermöglicht das Starten und Stoppen der Sondermaschine sowie das Anwählen einiger Prozessparameter. Häufig werden hierfür Touchdisplays verwendet, die es ermöglichen, komplexe Informationen darzustellen und ein einfaches Bedienkonzept zu implementieren, für das häufig keine zusätzliche Einweisung des Personals notwendig ist. Zur Reduzierung der Kosten wird hierfür bei den in Kapitel 3 vorgestellten Maschinen teilweise direkt das Smartphone des Bedienenden mit einer entsprechenden App verwendet. Für die Bedienung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sondermaschine ist es nicht notwendig, komplexe Informationen wie z.B. Werkstücknummern anzuzeigen oder anwählen zu können. Aus diesem Grund wird auf eine grafische Anzeige des User-Interface verzichtet und ein Tastergehäuse im Industriestandard verwendet. In Abbildung 6.5 sind von links nach rechts die folgenden Funktionen für die Bedienung zu sehen:

- Not-Aus
- Anzeigen des Fehlerzustandes
- Quittieren des Fehlerzustandes
- Anwahl des Betriebsmodus
- Stoppen/Pausieren
- Starten

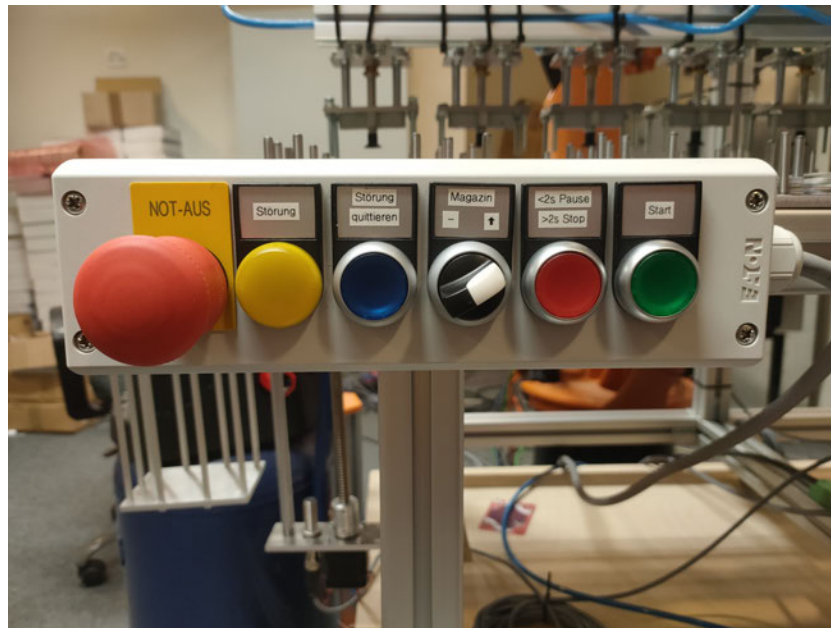


Abbildung 6.11: User-Interface (Tastergehäuse)

Bei dem entwickelten User-Interface handelt es sich um ein Tastergehäuse von der Firma 'Eaton' mit entsprechender Bestückung [41]. Der Not-Aus-Taster beendet bei Aktivierung sofort sämtliche Aktorbewegungen und setzt die Sondermaschine in einen sicheren Zustand. Dieser ist gemäß [42] kabelbruchsicher gestaltet und verfügt über redundante Signalleitungen, die beide für den Betrieb anliegen müssen. Die Signalleuchte 'Störung' signalisiert den Fehlerzustand der Sondermaschine. Dieser tritt ein, wenn der Not-Aus betätigt wird oder der Vakuumsensor eine Störung des Prozesses detektiert. Der Taster 'Störung quittieren' wird verwendet, um die Sondermaschine aus dem Fehlerzustand wieder in einen betriebsbereiten Zustand setzen zu können. Befindet sich die Sondermaschine im Fehlerzustand, so blinkt der Taster in einem Intervall von einer Sekunde, um die Bedienenden auf die Notwendigkeit des Quittierens aufmerksam zu machen. Wird der Taster im Fehlerzustand der Sondermaschine betätigt, so wird dieser aufgehoben, die Linearachse fährt den Greifer in eine Grundstellung und die Maschine wechselt in einen betriebsbereiten Zustand. Der Wahlschalter 'Magazin - ↑' wird verwendet, um die Gewindespindel des Magazins zu steuern. Nach dem erfolgreichen Beenden des Prozesses befindet sich das Magazin in seiner untersten Position und muss für den erneuten Start der Sondermaschine nach oben gefahren werden. Dies geschieht im Modus '↑'. Wurde der Prozess jedoch z.B. von einem Fehler unterbrochen, so ist es notwendig, das Magazin vor dem Start nicht in seine obere Position zu fahren und den Prozess mit dem aktuellen

Füllstand des Magazins fortzusetzen. Dies wird erreicht mit dem Modus '-'. Der Taster 'Stop/Pause' wird verwendet, um die Sondermaschine abhängig von der Dauer des Tastendrucks entweder in den Pause-Zustand zu versetzen oder den aktiven Prozess zu stoppen. Der Tastendruck beendet nicht sofort jegliche Aktorbewegung, sondern führt zunächst den derzeitigen Bewegungsbefehl zu Ende und pausiert danach. Der Taster leuchtet rot, um zu signalisieren, dass sich die Sondermaschine derzeit im gestoppten Zustand befindet. Der Taster 'Start' wird verwendet, um den Prozess zu starten. Der Taster leuchtet grün, um den gestarteten Prozess zu signalisieren. Befindet sich die Sondermaschine im Zustand 'Pause', so leuchten sowohl die rote als auch die grüne Signalleuchte des Tasters. Der Prozess kann nur gestartet werden, wenn sich die Sondermaschine im gestoppten oder im pausierten Zustand befindet.

6.6 Steuerung

Die Steuerung wird auf einer speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) von der Firma Beckhoff programmiert [43]. An diese lassen sich die benötigten Input/Output (IO)-Module zur Steuerung von Aktoren und Sensoren sowie Schrittmotorklemmen anschließen. Zur Projektierung und Konfiguration der SPS wird die vom Hersteller bereitgestellte Entwicklungsumgebung 'TwinCat' verwendet [44]. Die bereits definierten Anforderungen an die Sondermaschine richten sich ebenfalls an die Steuerung. Vorwiegend soll die Steuerung den Anforderungen an industriellen Programmcode entsprechen [45]. Hier wird insbesondere auf das Prinzip des 'separation of concern' geachtet. Die Anwendung dieses Prinzips garantiert eine erhöhte Lesbarkeit des Programmcodes, aber auch eine verringerte Fehlerwahrscheinlichkeit und die Möglichkeit zur Wiederverwendung von Codeblöcken.

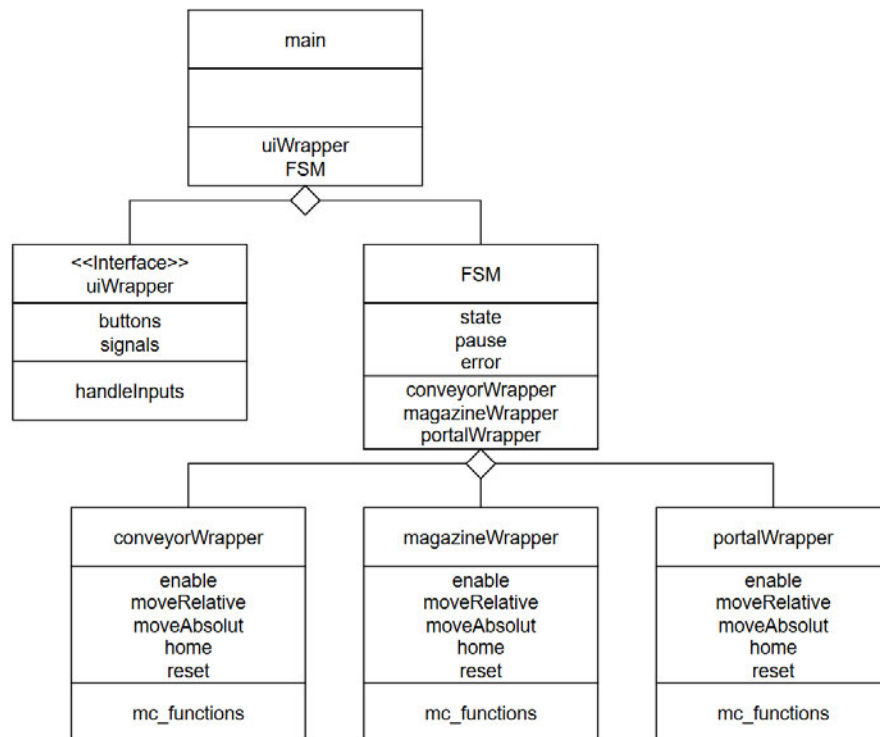


Abbildung 6.12: Klassendiagramm der Programmstruktur

Abbildung 6.12 zeigt den auf der Steuerung implementierten Code als Klassendiagramm. Die dargestellten Klassen in diesem Diagramm werden als Synonym für die auf der SPS implementierten Funktionsbausteine verwendet. Der Funktionsbaustein 'main' implementiert lediglich die weiteren benötigten Funktionsbausteine und legt durch deren Aufruf die Bearbeitungsreihenfolge im Zyklus der SPS fest. Der Funktionsbaustein 'Ui-Wrapper' ist für die korrekte Verarbeitung der Nutzereingaben und das Schalten der Signalleuchten zuständig. Da zur Nutzereingabe Taster verwendet werden, werden in diesem Baustein die benötigten Signale mit Hilfe von Triggerbausteinen verarbeitet. Der Funktionsbaustein 'FSM' beinhaltet die eigentliche Steuerlogik der Maschine und implementiert darüber hinaus die für die Ansteuerung der Motoren notwendigen Bausteine. Diese Funktionsbausteine heißen 'conveyor-', 'magazin-' und 'portalWrapper' und sind nahezu identisch. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Parametrisierung in Bezug auf Achsgeschwindigkeiten und Distanzen für relative Fahrbefehle und in den aufgerufenen Numerical Control (NC)-Achsen [46]. Die Ablaufsteuerung des Sortierprozesses wird in Form einer Finite State Machine (FSM) implementiert. Die implementierte Statemachine wird in Abbildung 6.13 dargestellt.

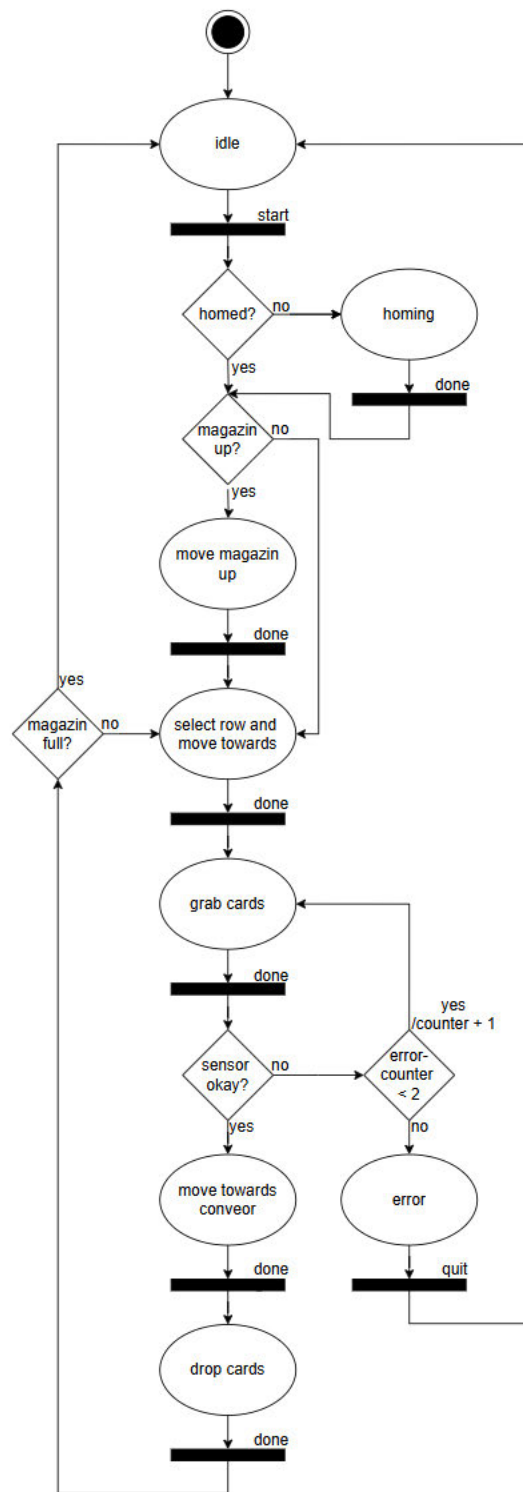


Abbildung 6.13: Zustandsübergangsdiagramm der Ablaufsteuerung

Aus Abbildung 6.13 geht hervor, dass die Ablauflogik der Sondermaschine als Schrittfolge zu betrachten ist, die sich mit Ausnahme der Zielposition zum Greifen der Spielkarten über den gesamten Prozess nicht verändert. Als Transitionsbedingung für das Erreichen des nächsten Zustandes wird entweder das 'Done'-Signal der jeweils zuständigen NC-Achsen verwendet oder die positive Flanke der Endlagensensoren des Pneumatikzylinders. Nach dem Einschalten befindet sich die Sondermaschine zunächst im Zustand 'Idle'. In diesem Zustand befindet sich die Sondermaschine, wenn sie fehlerfrei und betriebsbereit ist. Der Zustand 'Idle' lässt sich nur über die Nutzereingabe 'Start' auf dem im nächsten Kapitel erläuterten User-Interface starten. Nach dem Starten wird überprüft, ob die Linearachsen referenziert sind. Sind sie nicht referenziert, wird zunächst eine Referenzfahrt durchgeführt. Hierbei werden die Achsen mit reduzierter Geschwindigkeit in eine im Voraus definierte Richtung verfahren, bis an ihren Endlagensensoren eine positive Flanke detektiert wird. Nach dem Erreichen dieses Punktes wird die Fahrtrichtung invertiert und die Achse mit weiter reduzierter Geschwindigkeit verfahren, bis am Sensor eine fallende Flanke detektiert wird. Dieser Punkt wird als Referenzpunkt bezeichnet. Die Achse wird gestoppt und der Inkrementaldrehgeber des Schrittmotors wird auf einen ebenfalls im Voraus definierten Wert gesetzt. Im Anschluss an die Referenzfahrt wird die Position des Wahlschalters überprüft. Nach einem vollständig beendeten Prozess muss der Schlitten des Magazins in seine oberste Endlage gefahren werden, um das Hineinfallen der Spielkarten in ein leeres Magazin zu ermöglichen. Wird der Prozess jedoch vor seiner Beendigung durch einen Nutzenden unterbrochen, so kann der Prozess fortgeführt werden, indem das Magazin nicht entleert wird und der Schlitten in seiner Position bleibt. Der eigentliche Prozess sieht folgende Schritte vor, die zyklisch durchgeführt werden, bis das Magazin vollständig gefüllt ist:

Anfahren der Kartenlager > Senken des Greifsystems > Greifen der Spielkarten > Heben des Greifsystems > Anfahren des Förderbandes > Lösen der Spielkarten.

Nach dem Greifen der Spielkarten wird ein Drucksensor ausgewertet, der das Greifsystem auf das korrekte Vakuumniveau überprüft. Diese Messung schlägt fehl, wenn eine oder mehrere Spielkarten nicht korrekt gegriffen werden. Dies führt zu einem Abbruch des Kartentransports und das gleiche Kartenlager wird erneut angefahren und gegriffen. Schlägt die Messung innerhalb eines Prozesses mehr als zweimal fehl, so geht die Sondermaschine in einen Fehlerzustand. Dieser Zustand kann nur durch die Betätigung des Tasters 'quittieren' des Bedienenden wieder verlassen werden. Die Sondermaschine kehrt danach in den Zustand 'Idle' zurück und der Prozess kann neu gestartet werden.

Die FSM verfügt über weitere Zustände, die nicht in Abbildung 6.13 dargestellt werden, da diese nur über die Eingabe eines Bedienenden erreicht werden können und nicht im

regulären Prozess der Sondermaschine vorkommen. Der Zustand 'Pause' kann durch das Drücken des Tasters 'Pause' erreicht werden. Dieser Zustand kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt im Prozessablauf erreicht werden. Der aktuelle Handhabungsschritt wird jedoch zunächst vollständig beendet, bevor in den Zustand 'Pause' gewechselt wird. Durch erneutes Drücken des Tasters kann der Zustand wieder verlassen werden und der Prozess wird in seinem vorherigen Zustand fortgeführt. Bevor der Zustand 'Stop' erreicht wird, führt die Sondermaschine zunächst eine Schrittfolge aus, durch die sie in einen definierten Grundzustand versetzt wird. Die Schrittfolge besteht aus folgenden Handhabungsschritten: Ausschalten des Vakuumejektors > Heben des Greifsystems > Anfahren des Förderbandes. Diese Schritte ermöglichen das händische Eingreifen in die Sondermaschine, sollte ein aufgetretener Fehler dies erfordern.

7 Tests und Auswertung

Das Testen der in Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sondermaschine beschränkt sich nicht nur auf einen Funktionstest am Ende der Entwicklungs- und Montagephase. Vielmehr wurde die Sondermaschine bereits während ihrer Entwicklung in testbare Unterfunktionen aufgeteilt, für die parallel zum Entwicklungsprozess bereits Tests durchgeführt und erforderliche Änderungen vorgenommen wurden. Die Maschine wird in folgende Funktionen unterteilt: Greifen, Vereinzeln, Ablegen, Transport und Magazinieren der Spielkarten.

7.1 Durchführung und Auswertung

Im Verlauf der Entwicklung wurden insgesamt dreizehn unterschiedliche Tests durchgeführt. Diese Tests werden im Folgenden näher beschrieben. Die Durchführung und Auswertung der Tests 1,2 und 4 wurde bereits in Kapitel 6 erläutert. Da ein Großteil der durchgeführten Tests bereits während der Entwicklung durchgeführt worden ist, ist ihre kritische Auswertung ebenfalls entscheidend für die folgende Entwicklung der Sondermaschine, sollten Mängel oder sogar ungeeignete Wirkprinzipien aufgezeigt werden. In diesem Abschnitt folgt zunächst eine Beschreibung der weiterführenden Testverfahren mit anschließender Auswertung und eine Beschreibung der Einflussnahme der Testergebnisse.

1. Ermittlung eines geeigneten Flachsaugers
2. Vereinzelung der Spielkarten durch Biegen
3. Funktionstest des entwickelten Greifers
4. Verhalten der Spielkarten beim Verlassen eines Förderband-Teilstück
5. Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband-Teilstück

6. Funktionstest des Förderbandes
7. Funktionstest des Magazins in oberster Position
8. Funktionstest des Greifsystems im Verbund
9. Ermittlung geeigneter Dynamikparameter für alle Achsen
10. Funktionstest der Ablaufsteuerung
11. Funktionstest des Magazins mit Absenken des Kartenstapels
12. Funktionstest der gesamten Sondermaschine im Verbund aller Komponenten
13. Ermittlung der Leistungsparameter im Bezug auf Verlässlichkeit und Durchsatz

Funktionstest des entwickelten Greifers

Dieser Test dient der Evaluierung des entwickelten Greifers und ist gleichzeitig damit auch der Machbarkeitsnachweis in Bezug auf die Erfüllung der Anforderungen mit dem gewählten Konzept. Hierfür wird der gesamte Greifer am Flansch des bereits verwendeten KR-15 befestigt. Es wird ein Roboterprogramm geschrieben, welches den Greifer zunächst von oben herab auf einen in einem Kartenlager befindlichen Stapel führt. Der Roboter setzt den Greifer auf die oberste Spielkarte auf und schaltet mit einem Ventil den Vakuumejektor ein. Die oberste Karte wird gegriffen und nach oben vereinzelt. Die vereinzelte Spielkarte wird neben dem Kartenstapel abgelegt, indem der Vakuumejektor wieder ausgeschaltet wird. Insgesamt wird dieser Vorgang 40 Mal wiederholt. Im Anschluss daran wird die Anzahl der vereinzelt Karten gezählt und mit der Anzahl der Wiederholungen verglichen. Stimmt diese Zahl überein, so haben im Verlauf des Prozesses keine Mehrfachabzüge stattgefunden. Im Verlauf des Prozesses variiert der Roboter die für das Abheben der Karten angefahrne Position nicht, sondern die sich durch das Abnehmen der Stapelhöhe ergebene Differenz soll durch den Hub des Federstößels ausgeglichen werden. Insgesamt wird dieser Test 10 Mal wiederholt, um eine ausreichende Verlässlichkeit des entwickelten Greifers garantieren zu können. Im Anschluss daran wird der Prozess in seiner Geschwindigkeit erhöht und erneut durchgeführt. Auf diese Weise kann evaluiert werden, ob das gewählte Konzept die für die Erfüllung von Anforderung A2 benötigte Geschwindigkeit erreichen kann. Die Durchführung dieses Tests zeigt, dass das gewählte Wirkprinzip, also das Greifen der Spielkarte mit Hilfe eines Vakuumgreifers, sehr gut geeignet ist für die vorliegende Handhabungsaufgabe.

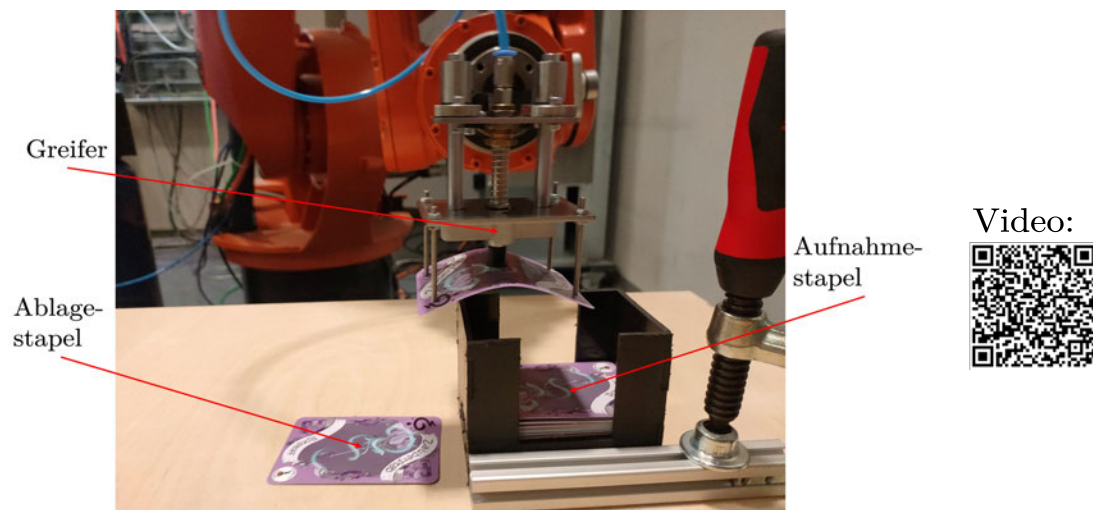


Abbildung 7.1: Funktionstest des entwickelten Greifers

Der ermittelte Vakuumgreifer erzeugt in Kombination mit dem Vakuumejektor eine ausreichende Haltekraft, die es ermöglicht, die Spielkarten mit ausreichender Sicherheit anzuheben. Dank des verwendeten Federstößels können ebenfalls Spielkarten von Stapeln mit unterschiedlicher Höhe verlässlich angehoben werden. Die Sicherung gegen Mehrfachabzüge geschieht bei stärker gebrauchten Spielkarten verlässlich, da die beschriebenen Adhäsionskräfte zwischen den Spielkarten mit dem Grad der Benutzung abnehmen. Dies ist zurückzuführen auf die durch Biegung verringerte Kontaktfläche der Spielkarten und auf Verunreinigungen wie etwa Staub oder andere Fremdkörper auf den Spielkarten. Die Vereinzelung von unbespielten Spielkarten fällt jedoch deutlich weniger verlässlich aus. Die hierbei entstehenden Adhäsionskräfte sorgen dafür, dass die Mehrfachabzüge zunächst einen Moment an der vereinzelter Spielkarte haften, bevor diese dann in das Kartenlager zurückfallen. Der Test hat gezeigt, dass die Spielkarten fast bis zur Grenze der elastischen Verformung gebogen werden müssen, damit auch unbespielte Spielkarten verlässlich vereinzelt werden können. Darüber hinaus zeigt der Test ebenfalls, dass im Fall eines Mehrfachabzugs, bei dem bis zu 10 Spielkarten gleichzeitig mit dem Greifer angehoben werden, ebenfalls eine deutlich größere Gewichtskraft des u-förmigen Bauteils benötigt wird, damit diese überhaupt durchgebogen werden. Aus diesem Grund wird das hierfür verwendete Stahlblech neu konstruiert. Es wird dicker ausgeführt, um so die Gewichtskraft des Bauteils zu erhöhen und für den Prozess eine ausreichende Sicherheit gegen Mehrfachabzüge zu erreichen.

Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband-Teilstück

Für diesen Test wird ebenfalls das bereits erläuterte Roboterprogramm verwendet. Dieses Mal werden die Karten jedoch nicht neben dem Kartenlager ungeordnet auf einer Tischfläche abgelegt, sondern auf dem 3D-gedruckten Teilstück des Förderbandes. Mit diesem Test wird überprüft, ob es notwendig ist, den Greifer zum Ablegen der Spielkarten auf das Förderband aufzusetzen oder ob ein Ablegen oberhalb des Förderbandes möglich ist. Sollte sich dies bestätigen, wird darüber hinaus auch die maximale Fallhöhe ermittelt, bei der die Spielkarten noch verlässlich auf dem Förderband landen. Darüber hinaus wird überprüft, ob die 'blow-off-Funktion' des Vakuumejektors einen negativen Einfluss auf das Ablegen der Spielkarten hat. Hierbei wird ein kleiner Teil der gespeisten Druckluft gespeichert und nach dem Ausschalten des Ejektors dazu verwendet, das aufgebaute Vakuum schneller zu entfernen.

Das Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband-Teilstück mit dem an einem Roboter befestigten Greifer hat gezeigt, dass die gewählte Breite des Förderbandes für den Anwendungsfall ausreichend ist. Aufgrund der 'Blow-Off-Funktion' des Vakuumejektors erhalten die Spielkarten beim Lösen einen Impuls aus Druckluft. Dieser führt dazu, dass die Spielkarten, basierend auf der Distanz zwischen Greifer und Förderband, nicht exakt unterhalb des Greifers landen. Darüber hinaus tritt beim Fallen der Spielkarten eine Art 'Luftkisseneffekt' auf, der die Position der abgelegten Spielkarte weiter verändert. Diese beiden Beobachtungen bedingen die Verwendung von Banden, die seitlich an das Förderband geschraubt werden. Diese Banden begrenzen die Ablageposition der Spielkarten. Die abgelegten Spielkarten können also lediglich in Fahrtrichtung des Förderbandes versetzt landen. Der Test hat gezeigt, dass dieser Versatz dazu führen kann, dass sich die gleichzeitig abgelegten Spielkarten überlagern können. Diese Überlagerung verändert die Reihenfolge der Spielkarten beim Hineinfallen in das Magazin. Diese Veränderung der Reihenfolge stellt in Bezug auf die Anforderungen kein Problem dar, dennoch sollte die exakte Vereinzelungsreihenfolge nicht auf dem Zufall basieren. Aus diesem Grund kann das Greifsystem zum Zeitpunkt des Ablegens gesenkt werden, oder das Förderband wird in seiner Höhe justierbar montiert.

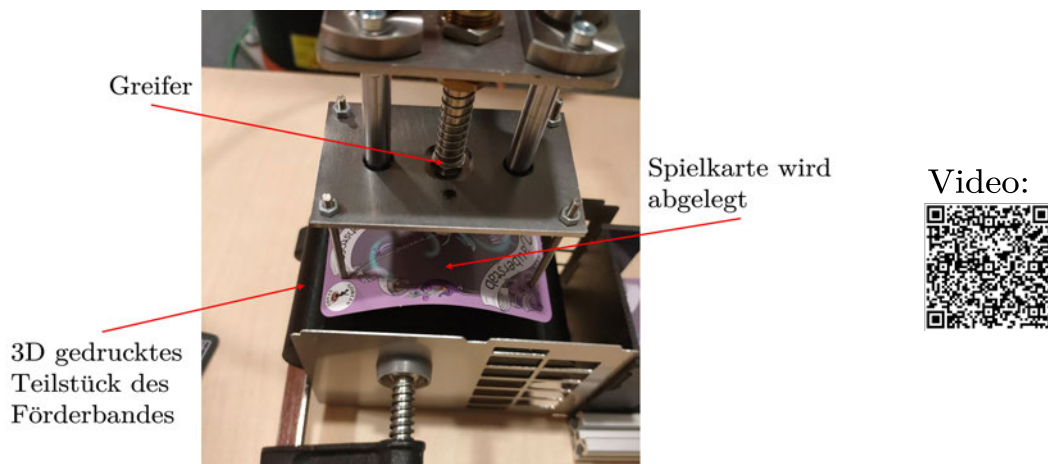


Abbildung 7.2: Ablegen der Spielkarten auf dem Förderband-Teilstück

Funktionstest des Förderbandes

Für den allgemeinen Funktionstest des Förderbandes (Abbildung 7.3) wird das Förderband mit Hölzern auf einem Tisch aufgebaut und ein Schrittmotor verwendet, um die Welle anzutreiben. Das Förderband wird durch das Antreiben der Welle zunächst kontinuierlich bewegt. Hierbei wird vor allem die aufgebrachte Riemenspannung, das Führungsspiel des Riemens, der Rundlauf der Antriebsräder, die Eignung des Schrittmotors und die Eignung des Flachriemens für den Transport der Spielkarten betrachtet. Im Anschluss daran wird das Förderband zyklisch beschleunigt und abgebremst. Mit diesem Test wird erneut die Riemenspannung überprüft und die Eignung des Förderbandes für die Erfüllung der Anforderung A2. Darüber hinaus wird überprüft, ob das gewählte Konzept geeignet ist, die Spielkarten mit der benötigten Beschleunigung und Geschwindigkeit zu transportieren. Mit dem getesteten und funktionierenden Förderband ist es möglich, das Speichern der Spielkarten im Magazin zu testen. Der Funktionstest des Förderbandes hat gezeigt, dass der gewählte Flachriemen bereits über ausreichende Oberflächeneigenschaften verfügt, um die für den Prozess benötigte Dynamik zu erfüllen. Bauliche Maßnahmen für eine weiterführende Erhöhung der Dynamik, wie etwa die Verwendung eines Vakuumförderbandes oder eines Niederhalters, werden also nicht benötigt.

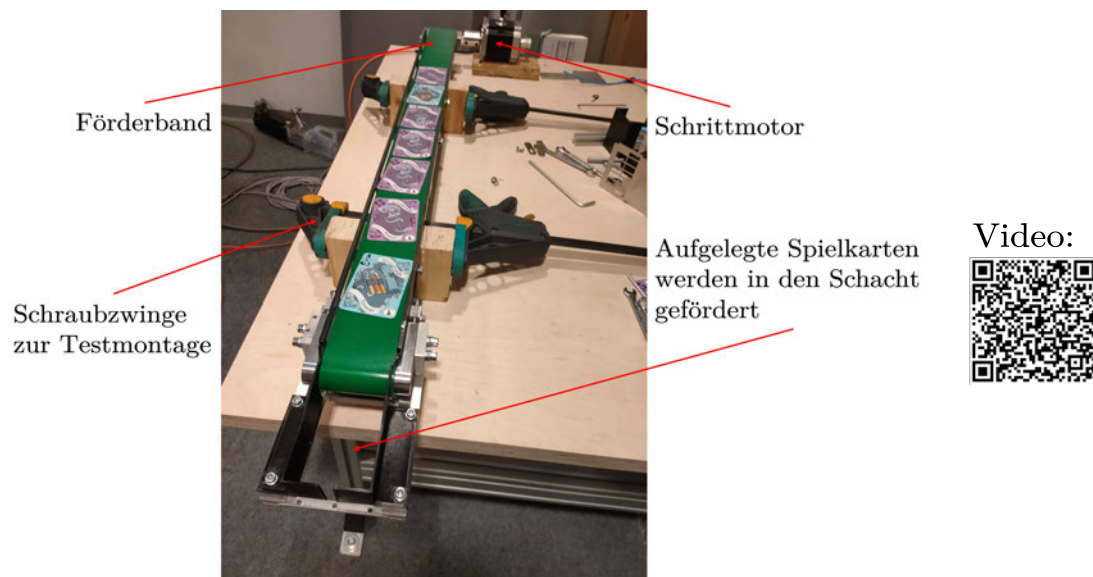


Abbildung 7.3: Funktionstest des Förderbandes

Funktionstest des Magazins in oberster Position

Hierfür wird das Magazin zunächst am Förderband montiert. Der Auflageschlitten der Spielkarten wird fest in seiner obersten Position montiert. Für den Test werden jeweils acht Spielkarten auf dem Förderband platziert. Durch das Einschalten des Förderbandes werden diese nacheinander in das Magazin gefördert. Hierbei wird das Verhalten der Spielkarten beim 'Hineinfallen' in den Magazinschacht beobachtet. Bei diesem Test werden die oberhalb vom Magazin montierten Führungsschienen justiert und die optimale Geschwindigkeit für das Förderband ermittelt, mit der die Spielkarten ausreichend schnell transportiert werden können, sie aber dennoch verlässlich in das Magazin gefördert werden. Die oberste Position des Magazins beschreibt die optimale Fallhöhe der Spielkarten vom Förderband, die bereits in einem vorherigen Test ermittelt worden ist. Auch dieser Test zeigt, dass die optimale Fallhöhe nicht kritisch ist. Die Spielkarten fallen auch bei einer geringeren Fallhöhe noch sicher in das Magazin, ohne dabei eine Kippbewegung durchzuführen.

Funktionstest des Greifsystems im Verbund

Test Nummer 8 ist der Funktionstest des gesamten Greifsystems. Bisher wurde die Funktionsweise des Greifers nur für einen Greifer einzeln getestet. Da bei der fertigen Maschine jedoch acht Greifer parallel arbeiten sollen, müssen diese auch im Verbund getestet werden. Hierfür werden alle Greifer an dem dafür vorgesehenen Aluprofil montiert und an das

Vakuumsystem angeschlossen. Das gesamte Greifsystem wird an den dafür vorgesehenen Pneumatikzylinder montiert, um eine gleichförmige Vereinzelungsbewegung gewährleisten zu können. Für den Test wird das Greifsystem zunächst mittig über einer Reihe des Kartenlagers positioniert. Durch händisches Betätigen der Ventile kann die für die Vereinzelung notwendige Ablauflogik simuliert werden. Bei der Testdurchführung werden wiederholt Spielkarten gegriffen und vereinzelt. Hierbei wird die allgemeine Funktionalität des Greifsystems und die Verlässlichkeit in Bezug auf Mehrfachabzüge überprüft, indem die Anzahl der vereinzelt Karten mit der theoretisch erwarteten Anzahl verglichen wird. Dieser Test hat gezeigt, dass für die korrekte Auslegung eines Vakuumsystems meist auch empirische Verfahren verwendet werden müssen. Zwar reicht die theoretisch errechnete Haltekraft des Greifers auch aus, um acht Greifer gleichzeitig zu betreiben, der erste Funktionstest widerlegt diese Annahme jedoch. Der Test zeigt, dass das erreichte Vakuumniveau nicht ausreicht, um alle Spielkarten anzuheben. Die Spielkarten haften kurz an dem Greifsystem, bevor eine Spielkarte dann abfällt. Dies führt zu einem Zusammenbruch des aufgebauten Vakuums und dazu, dass sämtliche Spielkarten vom Greifsystem abfallen. Eine Überprüfung des Vakuumniveaus mit einem Manometer zeigt, dass dieses deutlich geringer ausfällt als der erwartete Wert. In einem Versuch, die Haltekraft zu erhöhen, werden die verwendeten Flachsauger durch Flachsauger mit einem größeren Durchmesser ersetzt. Eine Wiederholung des Tests zeigt, dass sich die Haltekraft des Greifsystems zwar erhöht hat, sie reicht dennoch nicht aus, alle Spielkarten gleichzeitig anzuheben. Ein weiterer Ansatz, die Haltekraft zu erhöhen, ist, den Luftfluss zu den Flachsaugern zu verbessern. Abbildung 7.4 a) zeigt den schematischen Aufbau des Greifsystems, während Abbildung 7.4 b) die vorgeschlagene Änderung beschreibt.

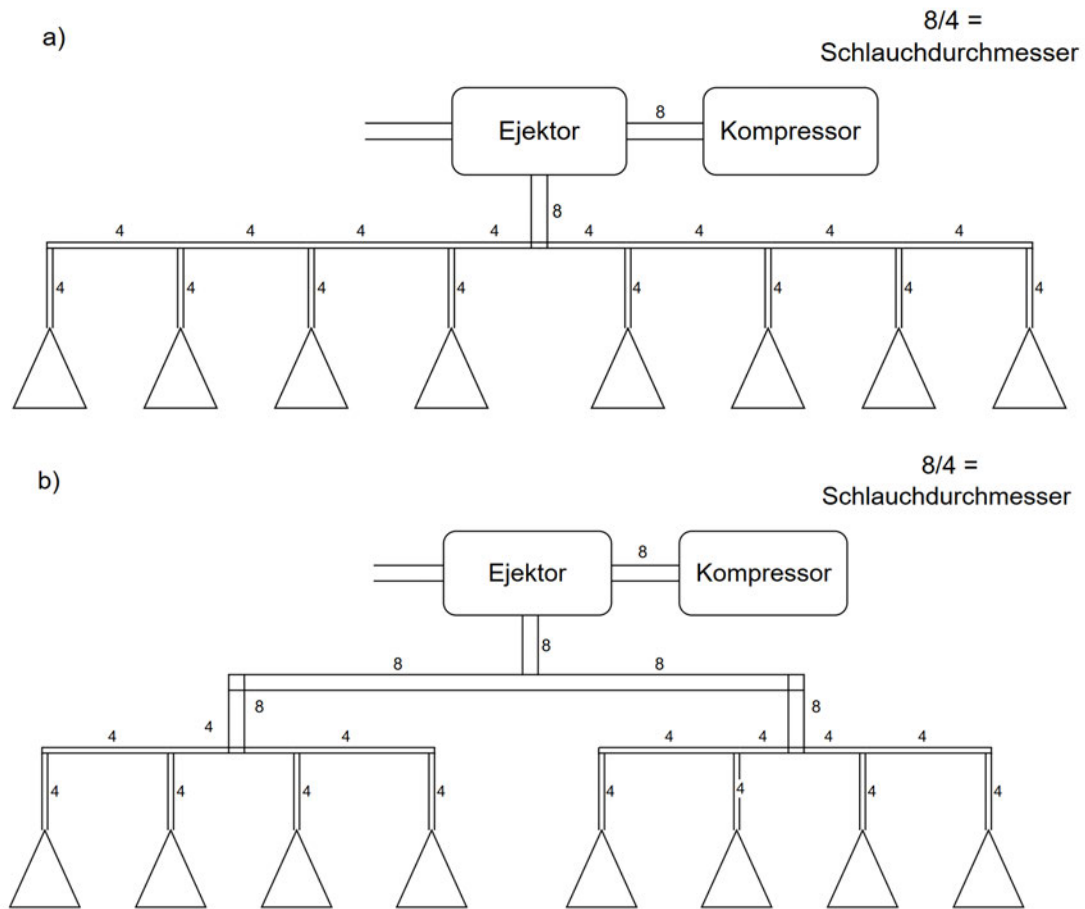


Abbildung 7.4: Schematische Darstellung des a) bisherigen- und b) verbesserten Vakuumsystems

Der Test hat gezeigt, dass die Verwendung eines Pneumatikschlauches mit größerem Querschnitt die Haltekraft der Greifer weiter erhöht. Bei dem in Abbildung 7.4 b) gezeigten Aufbau wird das Vakuum in einem Schlauchsystem mit größerem Querschnitt bis kurz vor die Flachsauger erzeugt. Dies resultiert in einem größeren Luftfluss innerhalb des Systems und erhöht die erzeugte Haltekraft. Durch die Erhöhung des Querschnitts muss der Vakuumejektor zwar auch ein deutlich größeres Luftvolumen vakuumieren, der gewählte Ejektor ist jedoch bereits dazu in der Lage, ohne dass sich ein negativer Einfluss auf die Zykluszeit des Systems ergibt.

Ermittlung geeigneter Dynamikparameter für alle Achsen

Dieser Test beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung geeigneter Betriebsparameter der Antriebsachsen. Hierfür werden alle Schrittmotoren zunächst elektrisch mit den Schrittmotorklemmen der SPS verbunden. Die Nenn-Leistungsparameter der jeweiligen Motoren werden in den zugehörigen Schrittmotorklemmen hinterlegt. Bei der Testdurchführung werden die Kupplungen zwischen den Motorwellen und den Antriebswellen zunächst gelöst, um eventuelle Schäden an der Kinematik zu vermeiden. In der Entwicklungsumgebung können die Antriebe nun über 'Online-Funktionen' angesteuert werden. Ziel dieses Tests ist die Ermittlung der benötigten Beschleunigung, Geschwindigkeit und der Parametrisierung des Reglers. Hierfür bietet sich das zyklische Verfahren zweier Wegpunkte an, da die Auswirkungen der Parameterveränderungen direkt an der Achse beobachtet werden können. Aufgrund der kurzen Wege, die die Achsen im Betrieb der Maschine fahren, ist die Beschleunigung der limitierende Faktor der Zykluszeit. Die maximale Beschleunigung wird durch Beobachtung der Achsbewegung empirisch ermittelt. Das vom Motor aufgebrachte Drehmoment begrenzt, wie stark die zu bewegend Masse beschleunigt werden kann, ohne dass der Motor 'Schritte verliert', also an seiner oberen Leistungsgrenze betrieben wird. Auf Basis der maximalen Beschleunigung und der zur Verfügung stehenden Strecke kann die Geschwindigkeit ermittelt werden. Diese wird so hoch gewählt, dass zumindest ein Teilstück der Strecke mit konstanter Geschwindigkeit gefahren wird und sich ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil ergibt.

Funktionstest der Ablaufsteuerung

Für den Funktionstest der Ablaufsteuerung muss sämtliche Aktorik mechanisch, elektrisch und softwareseitig eingebunden und betriebsbereit sein. Die Ablauflogik beschreibt, in welcher Reihenfolge die Aktorik angesteuert wird und welche Positionen dabei angefahren werden müssen. Hierfür wird die Software zunächst konzeptionell betrachtet und überprüft, ob ein Zustand erreicht werden kann, aus dem die Maschine nicht wieder herauskommt (Deadlock). Im Anschluss daran kann der Prozess auf der Hardware gestartet werden und es wird überprüft, ob das Verhalten der Maschine dem erwarteten Verhalten entspricht. Schwierig zu testen sind hierbei asynchron auftretende Ereignisse wie etwa die Betätigung eines Tasters. Der Nutzende der Sondermaschine hat insgesamt vier Möglichkeiten, mit Hilfe von Tastern in den Prozess einzugreifen. Diese Eingriffsmöglichkeiten gilt es zu jedem möglichen Zeitpunkt zu testen und auf das korrekte Verhalten hin zu überprüfen. Durch Betrachtung der Ablauflogik lassen sich kritische Zeitpunkte in der Ablaufsteuerung erkennen, in denen die Sondermaschine korrekt funktionieren muss. Dies

bezieht sich vor allem auf die Funktionen 'Pause', 'Stop' und 'Not-Halt'. Darüber hinaus wird das Verfahren 'Monkey Testing' angewendet, bei dem zufällige Nutzereingaben über das User-Interface getätigt werden. Diese simulieren ein fehlerhaftes Bedienen der Sondermaschine und dürfen das System nicht in einen ungültigen Zustand bringen.

Funktionstest des Magazins mit Absenken des Kartenstapels

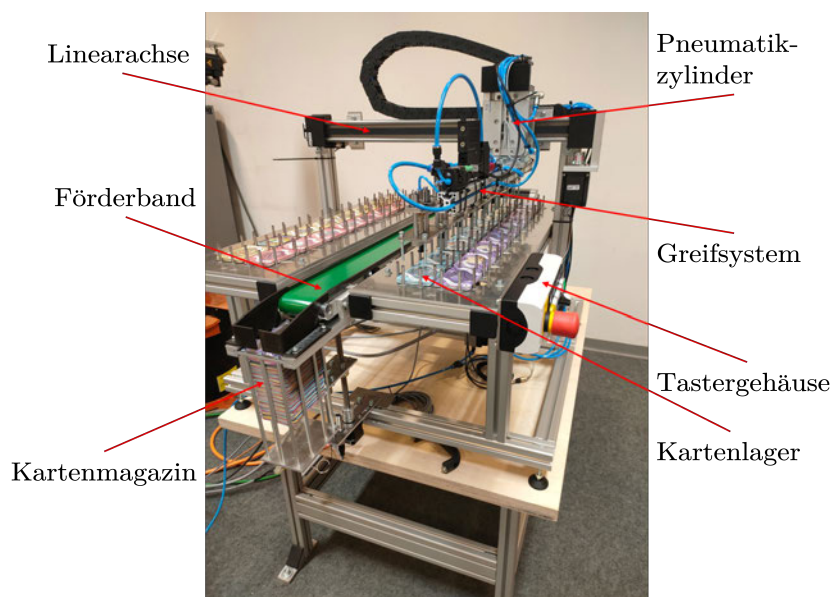
Für eine konstante Fallhöhe der Spielkarten wird der Kartenstapel nach dem Ablegen von acht Spielkarten um einen festen Betrag abgesenkt. Dieses Absenken geschieht mit einer Trapezgewindestange und einem Schrittmotor. Der Betrag, um den der Kartenstapel nach dem Ablegen gesenkt werden muss, wird zunächst empirisch ermittelt. Dies ist notwendig, da unterschiedlich stark bespielte Spielkarten in ihrer effektiven Dicke stark variieren. Bei der Testdurchführung werden kontinuierlich Spielkarten auf dem Förderband abgelegt und in das Magazin gefördert. Für die Testdurchführung steht ein Spielkartensatz aus ca. 1000 Spielkarten zur Verfügung, der zu 60% aus unbespielten und 40% aus bespielten Spielkarten besteht. Diese Aufteilung entspricht der im Betrieb erwarteten Abnutzung der Spielkarten. Der Schrittmotor senkt den Kartenstapel nach dem Ablegen um den zu ermittelnden Betrag. Entspricht dieser nicht der durchschnittlichen Dicke der bespielten Spielkarten, so ergibt sich in der Fallhöhe der Spielkarte auf den Kartenstapel eine kontinuierlich steigende Abweichung. Eine verlässliche Aussage über die Korrektheit des ermittelten Parameters tätigen zu können, ist das Fördern einer größeren Anzahl von Karten notwendig. Aus diesem Grund wird die Höhe des Kartenstapels nach dem Ablegen von 200 Karten betrachtet und eine Änderung des Parameters auf Basis der Abweichung durchgeführt. Im Anschluss daran werden so lange Spielkarten vereinzelt, bis das Magazin vollständig gefüllt ist. Währenddessen wird die Fallhöhe der Spielkarten beobachtet und somit die Korrektheit des ermittelten Parameters verifiziert.

Dieser Test zeigt, dass es trotz der stark variierenden effektiven Dicke der Spielkarten möglich ist, einen Durchschnittswert für das Absenken des Kartenstapels empirisch zu ermitteln. Stärker verformte Spielkarten führen zwar zu einer Abweichung der Fallhöhe im Magazin, diese wird jedoch im laufenden Prozess durch nachfolgende Spielkarten ausgeglichen. Je mehr Spielkarten sich im Magazin befinden, desto mehr werden die verbogenen Spielkarten 'plattgedrückt' und nähern sich ihrer tatsächlichen Dicke an. Dieser Effekt fällt durch die zunehmende Gewichtskraft der gestapelten Karten im unteren Teil des Stapels erhöht auf, während er im oberen Bereich des Stapels abnimmt. Der Test ergibt für die Spielkarten eine durchschnittliche Dicke von 0.24 mm, während eine unbe-

spielte Spielkarte lediglich eine Dicke von 0.17 mm aufweist.

Ermittlung der Leistungsparameter für Verlässlichkeit und Durchsatz

Die Ermittlung der Leistungsparameter der Sondermaschine ist der wichtigste Test und beschreibt, inwiefern die im Voraus definierten Anforderungen eingehalten werden. Hierfür wird die Sondermaschine unter normalen Bedingungen betrieben. Währenddessen wird die Sondermaschine beobachtet und es wird die Häufigkeit von Störungen im Betrieb aufgezeichnet und die Zeit gemessen, die die Sondermaschine für einen Prozessablauf benötigt. Im Anschluss daran werden alle Spielkarten im Magazin gezählt, sortiert und auf ihre Reihenfolge überprüft. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf das Vorkommen von Mehrfachabzügen oder eine Abweichung der Sortierreihenfolge. Damit ein statistisch signifikantes Ergebnis ermittelt werden kann, wird der Prozess der Sondermaschine insgesamt fünfmal durchlaufen und analysiert. Mit jedem Prozessdurchlauf werden ca. 800 Spielkarten vereinzelt und sortiert, somit basieren die Leistungsparameter auf einem Datensatz von 4000 Spielkarten.



Video:



Abbildung 7.5: Ermittlung der Leistungsparameter für Verlässlichkeit und Durchsatz

Aus der Testreihe ergeben sich die in Tabelle 7.2 dargestellten Leistungsparameter der Sondermaschine. Diese werden direkt mit den Anforderungen verglichen. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die Sondermaschine dazu in der Lage ist, die Anforderungen

Anzahl der Spielkarten	Dauer [s]	Mehrfachabzüge	veränderte Reihenfolge
800	439	1	2
800	432	1	2
800	442	3	0
800	437	0	1
800	438	2	3
4000	2188	7	8

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Testreihe

	gefordert	erreicht
Zykluszeit [s]	0.6	0.547
Mehrfachabzüge [%]	0.1	0.175
veränderte Reihenfolge [%]	1	0.2

Tabelle 7.2: Ermittelte Leistungsparameter

zu erfüllen. Während die Werte für die Zykluszeit und die Auftrittswahrscheinlichkeit für eine veränderte Sortierreihenfolge unterschritten werden, liegt die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen Mehrfachabzug knapp oberhalb der Anforderung. Die Häufigkeit von Mehrfachabzügen lässt sich durch ein Drosselventil am Vakuumsystem beeinflussen und wird auf Basis weiterführender Tests besser justiert. Die Anforderungen an Zykluszeit und die Häufigkeit von Mehrfachabzügen oder veränderter Sortierreihenfolge sind wichtige Bewertungsparameter für die Sondermaschine. Dennoch ist der störungsfreie Ablauf des Prozesses von entscheidender Bedeutung. Bei der Beobachtung des Prozesses wird aus diesem Grund vorwiegend auf kritische Situationen in der Handhabung geachtet, die dazu führen könnten, dass der Prozess nicht korrekt beendet werden kann und es zu einer Störung kommt. Aus dieser Beobachtung ergeben sich zwei kritische Situationen, die verhindert werden müssen.

Bleibt eine Spielkarte beim Hineinfallen in das Magazin an den Führungsschienen hängen, so verkeilt sich die Spielkarte im Magazinschacht und verhindert das Hineinfallen folgender Spielkarten. Es kommt zu einem Stau der nachfolgenden Spielkarten, der dazu führt, dass die Spielkarten von dem Förderband fallen. Der Prozess muss unterbrochen und der Stau händisch behoben werden. Da zum momentanen Entwicklungszeitpunkt kein Sensor für die Detektion vorgesehen ist, sollte die korrekte Funktion der Sondermaschine in regelmäßigen Abständen überwacht werden. Die Schienen am Magazin, die für das Einführen der Spielkarten zuständig sind, werden mit Langlöchern versehen, was ihnen eine ausreichende Justierbarkeit für die Vermeidung dieser Problematik ermöglicht. Die zweite kritische Situation ist eine direkte Folge von Mehrfachabzügen und dem ent-

sprechend schwieriger zu vermeiden. Kommt es zu einem Mehrfachabzug, bei dem die zusätzliche Spielkarte derart an der zu einzelnden Spielkarte haftet, dass sich diese nicht oberhalb des Kartenlagers löst, so besteht die Gefahr, dass sie zu jedem Zeitpunkt des Transports herunterfallen kann. Fällt sie schräg in ein Kartenlager zurück, kann die Spielkarte vom Greifsystem zerknickt werden oder das Greifsystem nicht mehr dazu in der Lage sein, Spielkarten aus dieser Lagerreihe zu greifen. Letzteres würde mit dem Drucksensor registriert werden, den Prozess beenden und einen Fehlerzustand auslösen. Fällt die zusätzliche Spielkarte jedoch teilweise auf das Förderband, so besteht die Gefahr, dass diese ebenfalls einen Kartenstau verursacht, der nicht von der Sondermaschine sensorisch erfasst werden kann. Diese beiden Beobachtungen sind eine weitere Motivation dazu, die Auftrittswahrscheinlichkeit von Mehrfachabzügen möglichst zu reduzieren.

8 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit hat sich mit der Frage befasst, welche technischen Prinzipien und Konstruktionsmethoden die Entwicklung einer Sondermaschine zur zuverlässigen Sortierung unterschiedlich beschaffener Spielkarten ermöglichen. Während konventionelle Sortierlösungen in industriellen Anwendungen gut etabliert sind, verlangte das vorliegende Projekt nach kreativen Ansätzen und maßgeschneiderten technischen Lösungen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Produktentwicklung hat gezeigt, dass, obwohl der vorgestellte Prozess hohe Anforderungen an eine Automatisierungslösung stellt, es dennoch möglich ist, unter Anwendung von etablierten Konstruktionsmethoden eine innovative und leistungsfähige Sondermaschine zu konstruieren. Die Evaluierung der entwickelten Maschine hat ergeben, dass die in der Konzeptfindungsphase der Entwicklung gewählten Wirkprinzipien dazu in der Lage sind, die Anforderungen zu erfüllen. Die Forschungshypothese konnte in dieser Arbeit belegt und gleichzeitig mit der erfolgreichen Entwicklung einer solchen Sondermaschine bewiesen werden. Die erste daraus abgeleitete Forschungsfrage wurde in Form einer ausführlichen Produkt- und Patentrecherche beantwortet. Diese hat die darauf basierende Entwicklung der Sondermaschine und die zweite grundlegende Forschungsfrage beeinflusst und beantwortet. Sowohl die im Vorfeld durchgeführte Analyse der entwickelten Konzepte als auch der finale Test der Sondermaschine zur Ermittlung der Leistungsparameter hat gezeigt, dass die Verwendung von Vakuumgreifern für die Vereinzelung von Spielkarten eine geeignete Wahl darstellt. Es wurde bewiesen, dass diese dazu in der Lage sind, unterschiedlich beschaffene Spielkarten zu sortieren und dabei den geforderten Prozess ausreichend zuverlässig durchführen zu können. Die dritte abgeleitete Forschungsfrage wurde insofern beantwortet, als verdeutlicht wurde, dass sowohl intuitives als auch diskursives Denken notwendig ist, um eine komplexe Problemstellung zu erfüllen. In der entwickelten Sondermaschine werden eine Vielzahl von Teilfunktionen in einem Gesamtsystem miteinander in Verbund gesetzt. Die Betrachtung des Systems nach der Dekomposition des Gesamtsystems war notwendig, um die einzelnen Teilprobleme mit jeweils geeigneten Konstruktionsmethoden entwickeln zu können. Die Abstrahierung der Problemstellung hat sich ebenfalls als nützliches Werkzeug erwiesen, um die Vorfixierung

auf bereits existierende Entwicklungen zu minimieren. Die vierte Forschungsfrage wird mit der Montage des fertigen Prototypen und den Tests, bei denen die Funktionalität mehrerer Teillösungen im Verbund untersucht wird, beantwortet. Die Verbindung der Teillösungen findet sich in den kritischen Handhabungsschritten wieder. Hierzu zählen das Vereinzeln der Spielkarten, das Ablegen auf dem Förderband und das Hineinfallen der Spielkarten in das Magazin.

Die Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeit zeigen vor allem die Relevanz von Konstruktionsmethoden, die es ermöglichen, innovative und leistungsfähige Maschinen zu konstruieren. Die Wahl von Vakuumgreifern als zugrunde gelegtes Wirkprinzip für das Vereinzeln von Spielkarten hat sich als performante Lösung in Hinblick auf die Prozesssicherheit und Reduzierung von Mehrfachabzügen herausgestellt. Während die entwickelte Sondermaschine alle beschriebenen Anforderungen erfüllt, erreicht sie dennoch nicht den gleichen Durchsatz wie einige der vorgestellten Entwicklungen. Dies ist vor allem rückzuführen auf das gewählte Wirkprinzip und sollte Bestandteil weiterführender Entwicklungen sein. Von der Analyse der Problemstellung, über die Erstellung von Anforderungen, Konstruktion der Komponenten, Erstellung eines Sensorkonzeptes, Programmierung der Steuerung bis hin zur finalen Evaluierung der Leistungsparameter wurden in dieser Arbeit viele Aspekte der Automatisierungstechnik und damit auch Tätigkeiten eines Ingenieurs in diesem Feld beleuchtet. Die Anwendung der vorgestellten Konstruktionssystematik ist themenübergreifend in allen Feldern der Konstruktion anzutreffen. Darüber hinaus liegt die praktische Relevanz dieser Arbeit in der Fertigstellung eines funktionierenden Prototypen der Sondermaschine. Die Sondermaschine ist zwar sehr speziell an den vorliegenden Prozess angepasst, die zugrunde liegenden Wirkprinzipien lassen sich jedoch auf unterschiedliche Anwendungsfälle adaptieren. Der entwickelte Greifer kann verwendet werden, um unterschiedliche Formen von Papiererzeugnissen zu handhaben. Weitere Anwendungsfälle finden sich z.B. in der Handhabung von Postkarten, Briefen, Druckerzeugnissen oder anderen Formen von Sammel- und Spielkarten.

Bei der entwickelten Sondermaschine handelt es sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit lediglich um einen Prototypen. Da die Sondermaschine aber bei dem lokalen Veranstalter von Indoor-Live-Rollenspielen zum Einsatz kommen soll, ist eine weiterführende Entwicklung und Konstruktion notwendig. Dies bezieht sich insbesondere auf die Verwendung von Sicherheitskomponenten, wie sie für die Erfüllung aller EU-weiten Anforderungen an Sicherheit, Gesundheitsschutz und Umweltschutz benötigt werden. Hierfür kann das bereits vorgestellte Konzept zur Sicherung gegen versehentliches Eingreifen in die Maschine verwendet werden. Zur Realisierung des Konzepts sollte das Rahmengestell der Sondermaschine modifiziert werden, damit eine Einhausung mit Acrylglas-elementen ermöglicht

wird. Darüber hinaus müssen weitere Komponenten wie etwa ein Einschaltventil, ein Türschalter und eine Vorrichtung zum Herausziehen der Kartenlager in das System implementiert werden.

Die entwickelte Sondermaschine ist sehr spezifisch in ihren Eigenschaften und Funktionen an den geforderten Prozess angepasst. Dennoch ist es möglich, die Sondermaschine derart zu modifizieren, dass sie Anwendung in einer Vielzahl von Prozessen finden könnte. Im Vergleich zu den vorgestellten Entwicklungen verfügt die in dieser Arbeit erbrachte Entwicklung über keine Form der Sensorik, um die Art der gegriffenen Spielkarte zu erkennen. Das Sortieren im 'klassischen' Sinn beinhaltet das Analysieren, Greifen, Handhaben und Lagern basierend auf einem gewählten Sortieralgorithmus. Hierfür werden häufig Kameras verwendet, die die obersten Spielkarten der Stapel fotografieren und auswerten. Diese Auswertung kann entweder mit Algorithmen der klassischen Bildverarbeitung wie z.B. Mustererkennung oder mit maschinellem Lernen stattfinden [47, 48]. Für den aktuell geforderten Prozess ist die Kenntnis über den Typ der gegriffenen Spielkarte nicht relevant. Erweitert man die Sondermaschine jedoch um ein System der Bildverarbeitung und ermöglicht man durch zusätzliche Ventile die spezifische Ansteuerung von einzelnen Greifern, so wäre die Sondermaschine auch dazu in der Lage, das Sortieren im 'klassischen' Sinn durchzuführen. Dies würde das Anwendungsgebiet der Sondermaschine erweitern und weiterführende Entwicklungen ermöglichen. Diese sollten dazu beitragen, die Sondermaschine modularer zu gestalten. So könnte z.B. das Förderband die Spielkarten zunächst in einer Vorrichtung zum Banderolieren [49] der Spielkartenpakete fördern, bevor sie endgültig gelagert werden. Eine modulare Bauweise mit weiteren Handhabungsschritten könnte das Anwendungsgebiet der Sondermaschine ebenfalls erweitern.

Die Arbeit hat gezeigt, dass die entwickelte Sondermaschine für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe empfohlen werden kann. Sie erfüllt alle formulierten Anforderungen und ist dazu in der Lage, den geforderten Prozess zu realisieren. Für eine weiterführende Konstruktion der Maschine wird empfohlen, dass diese zunächst derart modifiziert wird, dass sie den EU-weiten Anforderungen an Sicherheit genügt. Zusätzliche Entwicklungen sollten der Erweiterung des Anwendungsbereiches und der Erhöhung der Leistungsparameter wie etwa Durchsatz oder Lagerkapazität dienen.

9 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war die Konzeptionierung und Entwicklung einer Sondermaschine, die in der Lage ist, gebrauchte Spielkarten mit stark variierenden Abnutzungserscheinungen zu sortieren. Hierzu wurde zunächst der eigentliche Prozess des Sortierens analysiert und daraus entsprechende Anforderungen abgeleitet. Diese Anforderungen beziehen sich insbesondere auf die Oberflächeneigenschaften der Spielkarten und die Abnutzungserscheinungen. Weitere Anforderungen wurden aus einem Gespräch mit dem Kunden entwickelt und implizit aus den Umgebungsbedingungen der Sondermaschine sowie den umgebenden Abläufen des Prozesses abgeleitet. Es wurde eine umfangreiche Patent- und Produktrecherche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Recherche repräsentieren nicht nur den derzeitigen Stand der Technik, aus ihnen ließen sich auch eine Vielzahl von Wirkprinzipien ableiten, die für die Erfüllung der Automatisierungsaufgabe in Frage kommen. Die Produktrecherche hat gezeigt, dass bereits eine Vielzahl an Entwicklungen für die automatisierte Sortierung von Spielkarten existieren die jedoch nicht geeignet sind, die gestellte Automatisierungsaufgabe zu erfüllen. Auf Basis der ermittelten Wirkprinzipien wurde ein morphologischer Kasten erstellt, der die Kernfunktionen der Sondermaschine zusammen mit all ihren Realisierungsmöglichkeiten aufzeigt. Dieser morphologische Kasten ermöglichte die Erstellung von insgesamt drei Konzepten der Sondermaschine. Diese variierten sowohl in ihren zugrunde liegenden Wirkprinzipien als auch in ihrer baulichen Anordnung und Komplexität. Im Anschluss daran wurden die erstellten Konzepte hinsichtlich der Anforderungen analysiert. Hierbei hat sich gezeigt, dass das Vereinzeln mit einem Vakuumgreifer das vielversprechendste Wirkprinzip aufgrund der stark unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der Spielkarten ist. Das gewählte Konzept verwendet einen Vakuumgreifer, der die gegriffenen Spielkarten entlang ihrer Mittelachse biegt, um die Mehrfachabzüge zu vermeiden. Das Greifsystem besteht aus insgesamt acht Greifern, die die Spielkarten vereinzeln und auf einem Förderband ablegen. Dieses transportiert die Spielkarten in ein Schachtmagazin, in das die vereinzelterten Spielkarten fallen und so zu einem sortierten Stapel zusammengefasst werden. Die Konstruktion der Sondermaschine wurde in testbaren Unterfunktionen durchgeführt. Zunächst wurde getestet, ob

sich die Spielkarten mit einem Vakuumgreifer anheben lassen. Nachdem das Wirkprinzip getestet worden war, konnte der gesamte Greifer konstruiert werden. Der konstruierte Greifer verfügt über einen Federstößel, an dessen Ende ein Flachsauger befestigt worden ist. Dies dient dem Ausgleich unterschiedlicher Stapelhöhen der Spielkarten. Das Biegen der Spielkarten entlang ihrer Mittelachse übernimmt ein mit Schraubenstiften versehenes Blechbauteil, welches beim Aufsetzen des Greifers zunächst gleitend an einer Linearwelle nach oben geschoben wird. Nach dem Ansaugen der Spielkarte wird das gesamte Greifsystem mit einem Pneumatikzylinder von den Kartenlagern angehoben, wodurch das Blechbauteil an der Linearwelle nach unten gleitet und durch seine Gewichtskraft die Spielkarte durchbiegt. Im Anschluss daran wurde ein justierbares Förderband konstruiert und in seiner Eignung überprüft, die Spielkarten mit der geforderten Dynamik zu transportieren. Als letztes wurde das am Ende des Förderbandes befindende Schachtmagazin konstruiert. Damit die Spielkarten unabhängig von der Stapelhöhe in einer gleichbleibenden Fallbewegung in das Magazin gleiten können, besitzt dieses einen höhenverstellbaren Schlitten, der mit einer Gewindespindel und einem Schrittmotor gehoben oder gesenkt werden kann. Zu Beginn des Prozesses befindet sich der Schlitten in seiner oberen Endlage und wird mit jeder transportierten Spielkarte um einen festen Betrag gesenkt. Dieser Betrag musste aufgrund der unterschiedlichen bespielten Spielkarten empirisch ermittelt und eingestellt werden. Nach der mechanischen Konstruktion der Sondermaschine wurden mehrere Sensorkonzepte entwickelt, die die Prozesssicherheit erhöhen und die korrekte Funktion überwachen können. Diese Konzepte wurden miteinander verglichen und das geeignetste Konzept ausgewählt. Im Anschluss an die Konstruktion wurde die gesamte Sondermaschine gefertigt und montiert, sodass ein funktionierender Prototyp entstanden ist. Es wurde ein Steuerungskonzept entwickelt, welches den Anforderungen an die industrielle Softwareentwicklung genügt. Nachdem die Sondermaschine vollständig montiert, justiert, verkabelt und programmiert worden ist, wurde ein Testkonzept entwickelt, welches die Funktionalität und die Leistungsfähigkeit der Sondermaschine evaluiert. Der wichtigste dieser Tests war die Bestimmung der endgültigen Leistungsparameter der Sondermaschine nach Durchführung aller Verbesserungen und Optimierungen des Sortierprozesses. Dieser Test hat gezeigt, dass die entwickelte Sondermaschine dazu in der Lage ist, die bisher händisch durchgeführte Tätigkeit des Sortierens von Spielkarten zu automatisieren. Hierbei werden alle im Voraus definierten Anforderungen eingehalten. Die Sondermaschine ist dazu in der Lage, mit einer Vielzahl von Abnutzungsstufen der Spielkarten umzugehen. Abweichungen und Fehler des Sortierungsprozesses geschehen im Rahmen der Anforderungen.

10 Anhang

10.1 Anhang A

Weiterführende Dokumentation und der für die Programmierung verwendete Quellcode finden sich in dem folgenden 'GitHub-Repository':

https://github.com/PhilippJulianOtto/Masterarbeit_2387239

Abbildung 10.1: QR-Code zur weiterführenden Dokumentation

10.2 Anhang B

Anforderung	Name	Beschreibung	Wert
A1	Einbaumaße	Im Raum zur Verfügung stehender Platz	2700x800x3000 [mm]
A2	Taktzeit	Zeit, die zur Handhabung einer Spielkarte zur Verfügung steht	0,6 [s]
A3	Level der Automatisierung	Beschreibt die für die Verwendung der Maschine benötigte händische Arbeit.	4 [Level]
A4	Kompatibilität	Das zu entwickelnde System muss sich in bestehende Systeme und Prozesse eingliedern	
A5	Sicherheitsnormen	Das zu entwickelnde System muss den aktuellen Sicherheitsnormen und Richtlinien entsprechen	
A6	Ergonomisches Design	Das zu entwickelnde System muss derart konstruiert sein, dass sich eine einfache Bedienbarkeit ergibt	
A7	Benutzeroberfläche/ Bedienbarkeit	Das zu entwickelnde System muss über eine Benutzeroberfläche verfügen die eine Bedienung der Maschine nach minimaler Einweisung ermöglicht	
A8	Wartungsfreundlichkeit	Das zu entwickelnde System muss derart konstruiert sein, dass regelmäßige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten auch von minimal geschultem Personal durchgeführt werden können	
A9	Lebensdauer und Robustheit	Das zu entwickelnde System muss derart konstruiert sein, dass sich bereits durch die verwendeten Komponenten eine hohe Lebensdauer und Robustheit ergibt	
A10	Anpassung an spezifische Produktionsumgebung	Reinräume, Schallemission	gering
A11	Umwelteinflüsse	Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit, Staub)	gering
A12	Modulare Bauweise	Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Produkte und Prozesse	mittel
A13	Erweiterbarkeit	Möglichkeit zur Nachrüstung und Erweiterung um weitere Funktionen oder Prozessänderungen	mittel
A14	Energieverbrauch	Optimierung des Energieverbrauchs	
A15	Abfall und Emissionen	Minimierung von Abfall und Emissionen	
A16	Dokumentation Wartung	Detaillierte Zeichnungen, Schaltpläne und Stückliste zur Erhöhung der Wartbarkeit	
A17	Dokumentation Bedienung	Bedienungsanleitung und Wartungshandbücher für die vom Kunden durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen	
A18	Maschinenstandort	Kellerraum (Trocken, keine direkte UV-Strahlung, durchschnittlich Staubig)	
A19	Zyklen	Anzahl der Arbeitszyklen pro tag (8h)	30
A20	Versorgungsspannung	Zum Betrieb der Maschine benötigte Spannung	230 [V]
A21	Leistungsaufnahme	Zum Betrieb der Maschine benötigte Energie	[kW/h]
A22	Kartengröße	Dimensionen des zu handhabenden Flachguts	60x90x0,17 [mm]
A23	Kartengewicht	Gewicht des zu handhabenden Flachguts	2 [g]
A24	Kartenmaterial	Material des zu handhabenden Flachguts	Papier mit Kunststoff
A25	Kartenoberfläche	Oberfläche des zu handhabenden Flachgut	Glatt
A26	Verschmutzung	geschützte Oberflächenbeschaffenheit der Karten	staubig bis ölig
A27	Maßhaltigkeit	Wie gut stimmen die Maße der Werkstücke mit den Nennmaßen überein	groß
A28	Mehrfachabzüge	Auftrittswahrscheinlichkeit von Mehrfachabzügen	< 0,1%
A29	Veränderte Sortierreihenfolge	Auftrittswahrscheinlichkeit von veränderter Reihenfolge	< 5%
A30	Justierbarkeit	wie einfach lässt sich die Sondermaschine einstellen	mittel
A31	Verlässlichkeit	wie hoch ist die Ausfallwahrscheinlichkeit	gering
A27	Zustand der Spielkarten	Abnutzungsgrad der Spielkarten	neuwertig bis stark bespielt
A33	Software - Wiederverwendbarkeit	Teile der Software lassen sich auf mehrere Komponenten anwenden	
A34	Software - Modularität	Einhaltung des Prinzips 'separation of concern'	
A35	Software - Wartungsfreundlichkeit	Ergänzungen und Änderungen lassen sich leicht hinzufügen	
A36	Software - Testbarkeit	Die Funktionalität der Software ist leicht testbar	
A37	Software - Verständlichkeit	Die Software ist verständlich geschrieben und gut kommentiert	

Abbildung 10.2: Anforderungen an die Sondermaschine

10.3 Anhang C

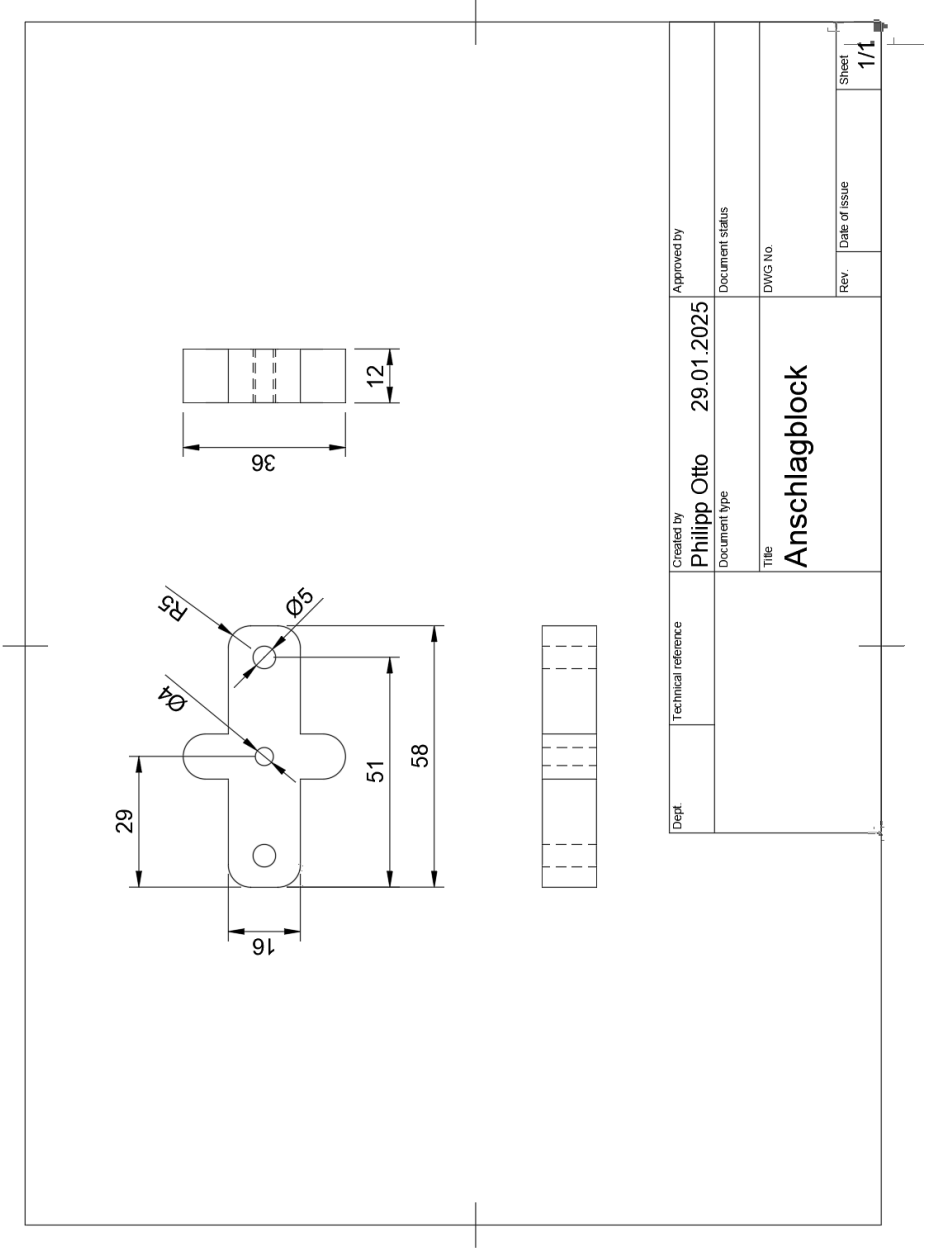


Abbildung 10.3: Konstruktionszeichnung 'Anschlagblock'

10.4 Anhang D

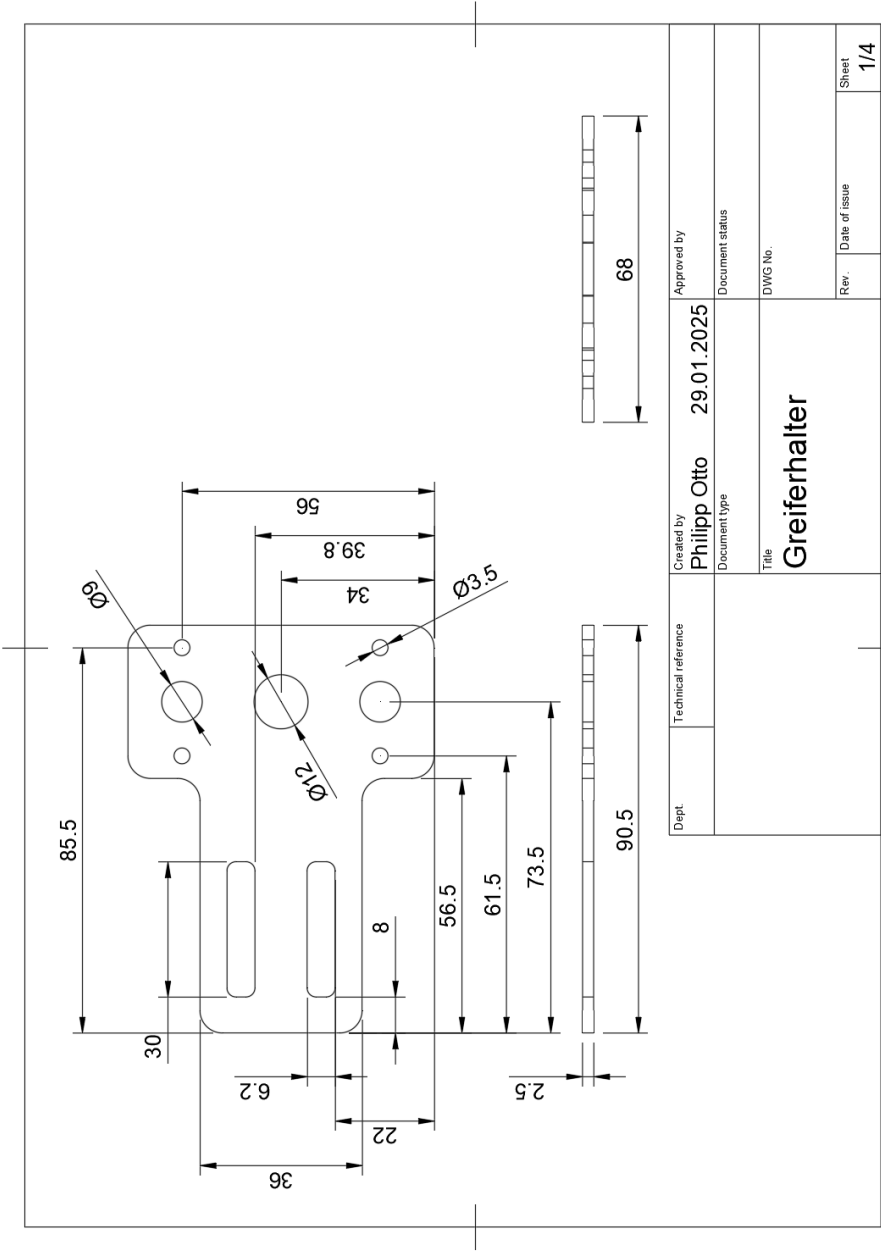


Abbildung 10.4: Konstruktionszeichnung 'Greiferhalter'

10.5 Anhang E

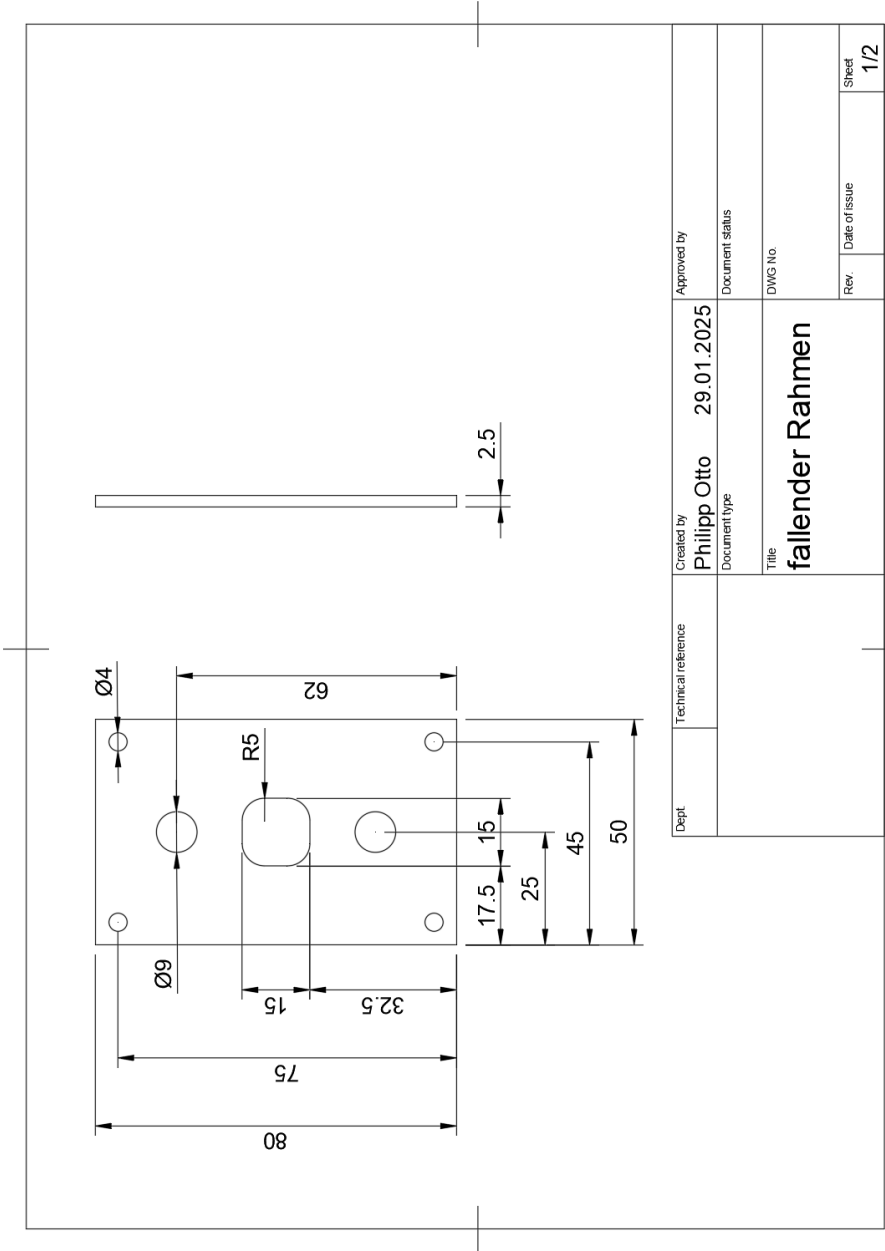


Abbildung 10.5: Konstruktionszeichnung 'fallender Rahmen'

10.6 Anhang F

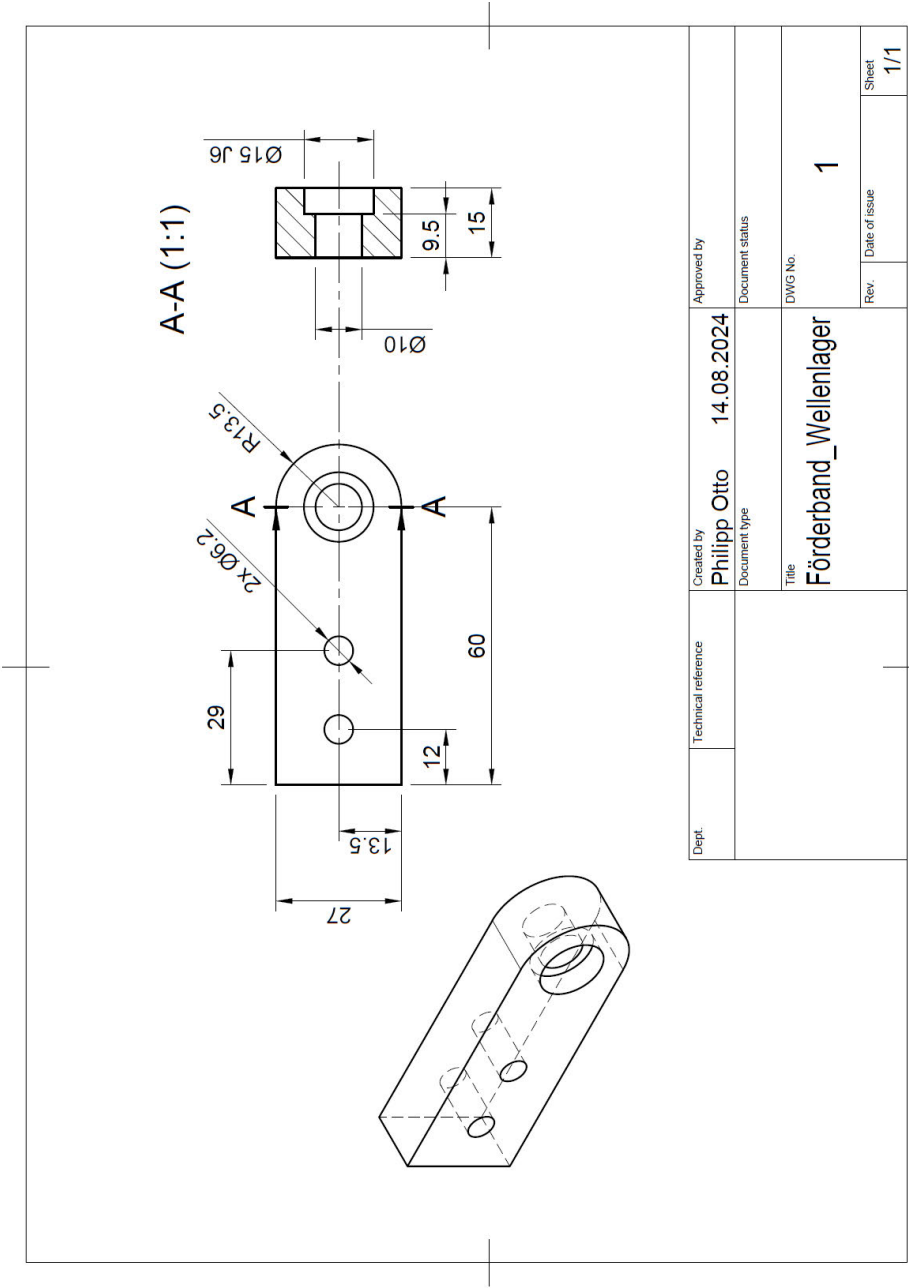


Abbildung 10.6: Konstruktionszeichnung 'Lagerhalter'

Literaturverzeichnis

- [1] Goblinstadt GmbH, “Über uns | Goblinstadt Hamburg,” Feb. 2018. [Online]. Available: <https://goblinstadt.de/ueber-uns/>
- [2] S. Hesse, “Greifen durch Klemmen,” in *Greifertechnik*, pp. 19–95, _eprint: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/9783446427419.003>. [Online]. Available: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/9783446427419.003>
- [3] —, “Flachgut – wie vereinzeln?” Mar. 2016. [Online]. Available: <https://www.industrial-production.de/handhabungstechnik/displayaction-522689.htm>
- [4] K. Gericke, B. Bender, G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, “Grundlagen methodischen Vorgehens in der Produktentwicklung,” in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, B. Bender and K. Gericke, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 27–55. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_3
- [5] H. Czichos and E. Santner, “Tribologische Beanspruchung,” in *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, H. Czichos and K.-H. Habig, Eds. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, pp. 57–120. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-29484-7_4
- [6] P. Streitenberger and D. Schneider, “Otto von Guericke und die Begründung der Lehre vom Luftdruck. Otto von Guericke and the Founding of the Science of Air Pressure,” *Vakuum in Forschung und Praxis*, vol. 14, pp. 360 – 369, Dec. 2002.
- [7] S. Kawai, A. S. Foster, T. Björkman, S. Nowakowska, J. Björk, F. F. Canova, L. H. Gade, T. A. Jung, and E. Meyer, “Van der Waals interactions and the limits of isolated atom models at interfaces,” *Nature Communications*, vol. 7, no. 1, p. 11559, May 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/ncomms11559>

- [8] A. Böge and W. Böge, “Reibung,” in *Technische Mechanik: Statik – Reibung – Dynamik – Festigkeitslehre – Fluidmechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024, pp. 97–168. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-44424-2_3
- [9] L. Deters, “Reibung, Verschleiß und Schmierung,” in *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, B. Sauer, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2025, pp. 1–73. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-67014-9_1
- [10] A. Huber, “Reibung / Haftung,” in *Technische Mechanik 1 - Stereostatik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, pp. 169–221. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-67038-5_7
- [11] P. J. Blau, “The significance and use of the friction coefficient,” *Tribology International*, vol. 34, no. 9, pp. 585–591, 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X01000500>
- [12] FWU, “Haftreibung | LEIFIphysik.” [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/grundwissen/haftreibung>
- [13] C. Spura, B. Fleischer, H. Wittel, and D. Jannasch, “Elastische Federn,” in *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, pp. 331–377. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-40914-2_10
- [14] K. Jousten, “Gasgesetze und kinetische Gastheorie,” in *Handbuch Vakuumtechnik*, K. Jousten, Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, pp. 33–61. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-13386-3_3
- [15] SCHMALZ, “Vakuum-Ejektoren.” [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de/vakuum-wissen/vakuumsystem-und-seine-bauteile/vakuum-erzeuger/vakuum-ejektoren/>
- [16] R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, P. Maruschak, and J. Xiao, “A SYSTEMATIC REVIEW ON PNEUMATIC GRIPPING DEVICES FOR INDUSTRIAL ROBOTS,” *Transport*, 2022. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251780352>
- [17] FWU, “Strömungswiderstand.” [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/stroemungswiderstand-und-crmw-wert>

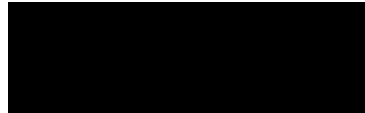
- [18] —, “Dynamischer Auftrieb.” [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/dynamischer-auftrieb-und-crma-wert>
- [19] Dorner, “Fünf einfache Schritte zur Auswahl eines Förderbands.” [Online]. Available: <https://www.dornerconveyors.com/de/ressource/fuenf-einfache-schritte-zur-auswahl-eines-foerderbands>
- [20] S. Eurodrives, “Praxis der Antriebstechnik, Gereelte und ungereelte Antriebe projektieren,” Jun. 2019. [Online]. Available: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/20274130.pdf>
- [21] A. Böge and W. Böge, “Dynamik,” in *Technische Mechanik: Statik – Reibung – Dynamik – Festigkeitslehre – Fluidmechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024, pp. 169–295. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-44424-2_4
- [22] B. M. GmbH, “Die verschiedenen Antriebsarten mechanischer Lineartechnik,” section: News. [Online]. Available: <https://www.bahr-modultechnik.de/antriebsarten-mechanischer-lineartechnik/>
- [23] K.-H. Grote, F. Engelmann, S. Herbst, and W. Beitz, “Grundlagen der Produktentwicklung,” in *HÜTTE Band 2: Grundlagen des Maschinenbaus und ergänzende Fächer für Ingenieure*, M. Hennecke and B. Skrotzki, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, pp. 575–591. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-64372-3_70
- [24] P. und Projektmanagement, “VDI 2221 Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung,” Nov. 2019.
- [25] R. J. Rynda, F. Bourbour, R. R. Swanson, and A. Grauzer, “Automatic system and methods for accurate card handling,” EP Patent EP3329974B1, Jan., 2020. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/EP3329974B1/de?q=\(spielkarten\)&oq=spielkarten](https://patents.google.com/patent/EP3329974B1/de?q=(spielkarten)&oq=spielkarten)
- [26] H. Ulrich and G. Kulik, “Belt conveyor for hanging transport of goods using vacuum means,” EP Patent EP0827919A3, Feb., 1999. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP0827919A3/en>
- [27] B. Gupta, “Collectibles for sale: How a card-sorting machine is revolutionizing trading cards,” *CBC News*, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://www.cbc.ca/news/canada/calgary/card-sorting-machine-trading-cards-collectibles-1.6867781>

- [28] M. K. GmbH, “Vakuumförderband, Vakuumförderer | mk Group.” [Online]. Available: <https://www.mk-group.com/produkte/foerdertechnik/spezialfoerderer/vakuumfoerderband.html>
- [29] F. F. AG, “Fördertechnik.” [Online]. Available: <https://www.ffag.ch/foerdertechnik/detail/rutschen.html>
- [30] M. Emanuel and W. Hahn, “Verfahren und Vorrichtung zur Vereinzelung von Briefen,” EP Patent EP1544140A2, Jun., 2005. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP1544140A2/de>
- [31] J. F. AB, “Bridgesorter, about,” Feb. 2025. [Online]. Available: <https://www.bridgesorter.com/about>
- [32] T. Machines, “PhyzBatch-9000 Product Details | TCG Machines.” [Online]. Available: <https://tcgmachines.com/shop/phyzbatch-9000>
- [33] TCGplayer, “Roca by TCGPlayer | Save Time and Money.” [Online]. Available: <https://seller.tcgplayer.com/roca>
- [34] M. Sorter, “Magic Sorter, Product details,” May 2022. [Online]. Available: <https://www.magic-sorter.com/product-details>
- [35] S. Hesse, “Handhabungsvorgänge,” in *Grundlagen der Handhabungstechnik*, pp. 98–108, _eprint: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/9783446448551.003>. [Online]. Available: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/9783446448551.003>
- [36] C. Schawel and F. Billing, “Morphologischer Kasten,” in *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*, C. Schawel and F. Billing, Eds. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018, pp. 219–221. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-658-18917-4_57
- [37] K.-H. Grote, F. Engelmann, S. Herbst, and W. Beitz, “Methodisches Konstruieren,” in *HÜTTE Band 2: Grundlagen des Maschinenbaus und ergänzende Fächer für Ingenieure*, M. Hennecke and B. Skrotzki, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, pp. 593–630. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-64372-3_71
- [38] F. V. G. . C. KG, “Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht - Festo.” [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/de/document/read/21663394/grundlagen-der-vakuumtechnik-kurzubersicht-festo>

- [39] Dorner, “Belt Tensioning Methods for Small Package Conveyor - Dorner Conveyors.” [Online]. Available: <https://www.dornerconveyors.com/de/ressource/bandspannmethoden-fuer-kleine-paketfoerderer>
- [40] igus® GmbH, “drylin® Antriebstechnik Konfigurator.” [Online]. Available: <https://drylin-drive-technology-configurator.igus.tools/requirements?l=de&c=DE>
- [41] Eaton, “_DE216537 | Eaton Moeller® series M22 Zubehör Aufbaugehäuse.” [Online]. Available: <https://www.eaton.com/de/de-de/skuPage.216537.html>
- [42] “DIN EN ISO 13850: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze,” May 2016.
- [43] B. A. AG, “Grundlagen SPS-Programmierung.” [Online]. Available: <https://www.beckhoff.com/de-ch/support/trainingsangebote/grundlagen-sps-programmierung/>
- [44] —, “Beckhoff Information System - German,” Feb. 2025. [Online]. Available: <https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/el6224/2584717451.html&id=>
- [45] —, “SPS-Programmierkonventionen.” [Online]. Available: https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tc3_plc_intro/12049233675.html&id=
- [46] —, “Beckhoff Information System - German.” [Online]. Available: <https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tcncgeneral/3447752587.html&id=6773803105536098643>
- [47] P. Martins, L. P. Reis, and L. Teófilo, “Poker Vision: Playing Cards and Chips Identification Based on Image Processing,” in *Pattern Recognition and Image Analysis*, J. Vitrià, J. M. Sanches, and M. Hernández, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 436–443.
- [48] H. Ditrih, S. Grgic, and L. Turković, “Real-Time Detection and Recognition of Cards in the Game of Set,” *2021 International Symposium ELMAR*, pp. 161–164, 2021. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:238415894>
- [49] M. Zimmerli, “Banderolieren eines packgutstapels,” EP Patent EP1922253B1, Oct., 2009. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/EP1922253B1/de?q=\(banderolieren\)&oq=banderolieren](https://patents.google.com/patent/EP1922253B1/de?q=(banderolieren)&oq=banderolieren)

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.



Ort

Datum

Unterschrift im Original